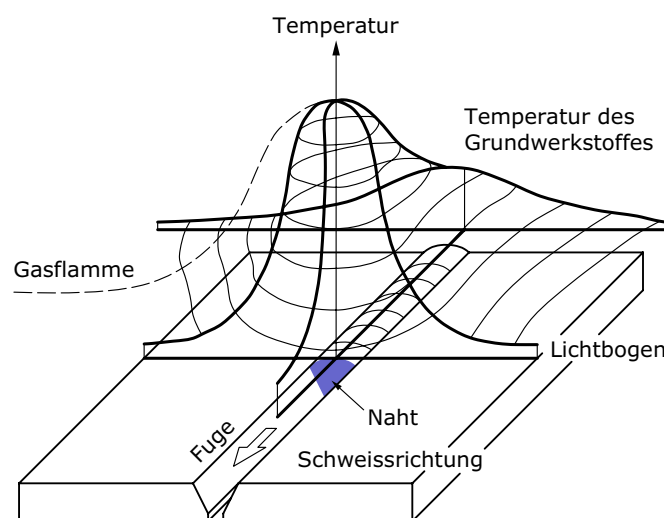


Grundlagen der Produkt-Entwicklung

Prof. Dr. Markus Meier
Sommer 2005



Inhaltsverzeichnis

Werkstoffe und Fertigungsverfahren – Basis aller Produkte	1
Überblick	3
Werkstoffe & Fertigungsverfahren	5
Wahl des Werkstoffs	5
Wahl des Fertigungsverfahrens	7
Gestaltung der Bauteile	8
Fertigungskette	10
Iteration der Auswahl	10
Zusammenfassung	11
Konstruktionswerkstoffe	1
Überblick	3
Auswahl von Werkstoffen	7
Anforderung an ein Bauteil	7
Eigenschaften der Werkstoffe	8
Bestimmen der Werkstoffeigenschaften	9
Auswahl durch Erfahrung	15
Unternehmensinterne Werkstoffnormung	16
Stand der Technik	16
Risiko der Werkstoffwahl	17
Stahl	18
Kennzeichnung der Stähle vereinfacht nach DIN EN 10027)	22
Baustähle	28
Handelsformen von Stahl	39
Eisen-Gusswerkstoffe	41
Gusseisen mit Lamellengraphit GG	42
Gusseisen mit Kugelgraphit GGG	44
Temperguss GT	46
Stahlguss	48
Nichteisenmetalle NE	50
Einteilung der NE-Metall-Legierungen	50
Bezeichnung	50
NE-Schwermetalle – Kupfer und Kupfer-Legierungen	51
NE-Schwermetalle – Bronzen	54
Leichtmetalle	58
Plastwerkstoffe	67
Thermoplaste DIN 7728	73
Duroplaste DIN 7728	74
Elastomere	74
Sonderwerkstoffe – Sinterwerkstoffe (DIN 30910)	75
Sonderwerkstoffe – Technische Keramik	79
Verbundwerkstoffe (Composites)	81
Fasermaterial	81
Polymeres Matrixsystem	84
Sonstige Werkstoffverbunde	87
Faserverstärkte Keramik	89
Weitere Werkstoffe	90
Korrosion, Korrosionsschutz	91
Chemische Korrosion	91
Elektrochemische Korrosion	92
Korrosionsschutz	94
Umweltproblematik	97
Auswahl von ökologischen Werkstoffen	97
Energieverbrauch und Umweltbelastung bei der Herstellung	97
Recycling	98
Zusammenfassung	99

Fertigungsverfahren 1 – Urformen	1
Überblick	3
Urformen aus flüssigem Zustand: Schwerkraftgiessen	5
Eigenschaften	6
Einsatzgebiet und Teilebeispiele beim Schwerkraftgiessen	10
Verfahren des Schwerkraftgiessens	11
Konstruktionsrichtlinien Schwerkraftgiessen	25
Firmen und Organisationen zum Schwerkraftgiessen	49
Urformen aus flüssigem Zustand: Druckgiessen	50
Eigenschaften	50
Einsatzgebiet und Teilebeispiele beim Druckgiessen	52
Konstruktionsrichtlinien Druckgiessen	55
Firmen, Organisationen zum Druckgiessen	57
Urformen aus flüssigem Zustand: Niederdruckgiessen	58
Urformen aus flüssigem Zustand: Schleudergiessen (Spin Casting)	59
Firmen und Organisationen zum Schleudergiessen	61
Urformen aus plastischem Zustand: Stranggiessen	62
Firmen und Organisationen zum Stranggiessen	64
Urformen aus flüssigem Zustand: Schäumen	65
Einsatzgebiet und Teilebeispiele beim Schäumen	66
Firmen und Organisationen zum Schäumen	68
Urformen aus flüssigem Zustand: Urformen von Faser-Verbund-Werkstoffen (FVW)	69
Einsatzgebiet und Teilebeispiele FVW	69
Verfahren	71
Konstruktionsrichtlinien faserverstärkte Kunststoffe	79
Firmen und Organisationen zu FVW	82
Urformen aus plastischem Zustand: Spritzgiessen	83
Einsatzgebiet und Teilebeispiele beim Spritzgiessen	85
Konstruktionsrichtlinien Spritzgiessen	88
Firmen und Organisationen zum Spritzgiessen	93
Urformen aus plastischem Zustand: Rotationsgiessen	94
Urformen aus plastischem Zustand: Strangpressen (Extrudieren) ...	96
Firmen und Organisationen zum Extrudieren	97
Urformen aus plastischem Zustand: Blasformen	98
Konstruktionsrichtlinien Blasformen	100
Firmen und Organisationen zum Blasformen	101
Zusammenfassung	102

Fertigungsverfahren 2 – Umformen	1
Überblick	3
Druckumformen – Freiformen DIN 8583 Teil 3	5
Einsatzgebiet und Teilebeispiele	6
Verfahren	8
Konstruktionsrichtlinien Freiformen	9
Gesenkformen DIN 8583 Teil 4	10
Werkstoffe zum Schmieden	13
Konstruktionsrichtlinien Gesenkformen	13
Firmen und Organisationen zum Schmieden	15
Durchdrücken DIN 8583 Teil 6	16
Einsatzgebiet und Teilebeispiele	16
Verfahren	20
Konstruktionsrichtlinien Durchdrücken	25
Firmen und Organisationen	26
Zugdruckumformen – Tiefziehen DIN 8584 Teil 3	27
Einsatzgebiet und Teilebeispiele	27
Verfahren	29
Werkzeuge	34
Übersicht verbreiteter Blechwerkstoffe	38
Konstruktionsrichtlinien Tiefziehen	44
Firmen und Organisationen zum Tiefziehen	49
Zugumformen – Weiten DIN8585 Teil 3	50
Einsatzgebiet und Teilebeispiele (IHU)	50
Verfahren	51
Zugumformen – Tiefen DIN8585 Teil 4	54
Einsatzgebiet und Teilebeispiele beim Tiefen	54
Verfahren	55
Biegen DIN 8586	58
Einsatzgebiet und Teilebeispiele des Biegens	58
Verfahren	59
Konstruktionsrichtlinien Biegeumformen	67
Firmen und Organisationen zum Biegen	77
Zusammenfassung	78

Fertigungsverfahren 3 – Trennen	1
Überblick	3
Zerteilen – Scherschneiden, DIN 8588	5
Zerteilen – Messerschneiden, DIN 8588	21
Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden – Drehen, DIN 8589 Teil 1	23
Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden – Bohren, Senken, Reiben, DIN 8589 Teil 2	34
Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden – Fräsen, DIN 8589 Teil 3	44
Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden – Hobeln, Stossen, DIN 8589 Teil 4	51
Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden – Räumen, DIN 8589 Teil 5	55
Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden – Schleifen (mit rotierendem Werkzeug), DIN 8589 Teil 11	57
Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden – Honen, DIN 8589 Teil 14	68
Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden – Läppen, DIN 8589 Teil 15	72
Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden – Strahlspanen, DIN 8200	75
Abtragen – Thermisches Abtragen, DIN 8590	83
Abtragen – Chemisches Abtragen, DIN 8590	90
Abtragen – Elektrochemisches Abtragen, DIN 8590	92
Zusammenfassung	93
Fertigungsverfahren 4 – Fügen	1
Überblick	3
Montage	5
Fügen durch Urformen – Einbetten, DIN 8593 Teil 4	13
Fügen durch Umformen – Nieten, DIN 8593 Teil 5	16
Fügen durch Schweißen, DIN 8593 Teil 6	20
Fügen durch Löten, DIN 8593 Teil 7	39
Kleben, DIN 8593 Teil 8	50
Zusammenfassung	67
Fertigungsverfahren 5 – Stoffeigenschaftsändern	1
Überblick	3
Sintern, Brennen	4
Pulvermetallurgisches Spritzgiessen (Metal Injection Moulding, MIM)	11
Bestrahlen	15
Fotochemische Verfahren	18
Zusammenfassung	22

Fertigungsverfahren 6 – Beschichten	1
Überblick	3
Beschichten aus dem flüssigen Zustand – Schmelztauchen	4
Beschichten aus körnigem/pulverförmigem Zustand – Thermisches Spritzen, DIN 32 530	8
Beschichten aus dem dampfförmigen Zustand – Vakuumbeschichten, DIN 28 400 Teil 4	10
Beschichten aus dem ionisierten Zustand – Galvanisches Beschichten	22
Zusammenfassung	28

Grundlagen des Dimensionierens	1
Überblick	3
Beispiel: Konstruktion einer Schere	4
Betriebszustand bestimmen	4
Kritische Bauteile auswählen	5
Bauteil freilegen und Belastung modellieren	5
Bestimmung der kritischen Bauteilquerschnitte und der Schnittkräfte	6
Diskussion von Optimierungsschritten	7
Bestimmung der Spannungen im kritischen Querschnitt	8
Festigkeitsberechnung durchführen	9
Diskussion	9
Eingliederung in den Entwicklungsprozess	10
Umfeld und Werkzeuge des Dimensionierens	12
Beziehung zur Mechanik	13
Ziele der Dimensionierung	14
Ablauf einer Bauteildimensionierung	15
Bestimmung der Betriebszustände	15
Selektion der kritischen Bauteile für die einzelnen Lastfälle	19
Freilegen der Bauteile und Bestimmung der äusseren Kräfte / Modellierung	19
Bestimmung der kritischen Bauteilquerschnitte und der Schnittkräfte	30
Bestimmung der Spannungen in den kritischen Querschnitten – Spannungstensor T	35
Bestimmung der Spannungen in den kritischen Querschnitten – Mohr'scher Spannungskreis	37
Festigkeits- und Versagensberechnung durchführen	45
Diskussion und Optimierung des Entwurfs	46
Zusammenfassung	48
Bauteildimensionierung bei ruhender Belastung	1
Überblick	3
Ruhende, zügige Beanspruchung	5
Versagensfälle bei ruhender, zügiger Beanspruchung	7
Werkstoffkennwerte	10
Einfluss der Temperatur	12
Weitere Einflüsse	12
Festigkeitshypothesen und Vergleichsspannung für ruhende Beanspruchung	13
Normalspannungshypothese	14
Schubspannungshypothese	16
Gestaltänderungsenergiehypothese	19
Zulässige Vergleichsspannung bei ruhender Belastung	22
Bauteilbeanspruchung oberhalb der Grenzbeanspruchung	25
Plastische Reserve	25
Beanspruchungsbedingte Reserve	26
Zusammenfassung	29

Kerbwirkung	1
Überblick	3
Kraftfluss	5
Kerben, Kerbwirkung und Formzahl	6
Bestimmung der Formzahl	10
Formzahl für Absatz und Rundnut	12
Formzahl für Absatz mit Freistich	13
Formzahl für Rundstäbe mit Querbohrung	14
Spannungsverteilung bei örtlicher Überschreitung der Fließgrenze	15
Kerb-Einfluss-Überlagerung	16
Einfluss der Kerbwirkung auf die Festigkeitsrechnung	18
Gestaltungsrichtlinien zur Minderung der Kerbwirkung	19
Zusammenfassung	23
Elementare Beanspruchungsfälle 1	1
Überblick	3
Zug-, Druck-Beanspruchung	4
Anschauungsbeispiele	6
Biege-Beanspruchung	7
Drehung des Koordinatensystems um die x-Achse	10
Verschieben des Koordinatensystems in der y-z-Ebene	12
Torsions-Beanspruchung – rotationssymmetrischer Querschnitte ..	16
Torsion nichtrotationssymmetrischer Querschnitte	20
Rechteckprofile	22
Offene, dünnwandige Profile mit konstanter Wandstärke	24
Geschlossene, allgemeine dünnwandige Profile	35
Vergleich offener und geschlossener Rohre	39
Schub-Beanspruchung	42
Rechteckquerschnitt	45
Kreisrunde Querschnitte	47
Offene dünnwandige Querschnitte	51
Weitere Aspekte der Schubspannungsverteilung – Auftrennung von Querschnitten	57
Weitere Aspekte der Schubspannungsverteilung – Einspannstelle	58
Zusammenfassung	59

Werkstoffe und Fertigungsverfahren – Basis aller Produkte

Autor: Prof. Dr. M. Meier

1. Überblick

Motivation

Betrachten Sie den Kugelschreiber in ihrer Hand genauer! Zerlegen Sie ihn in seine Einzelteile! Ein technologisches Meisterstück liegt vor ihnen, das durch die Zusammenspiel vieler Ingenieure und Fachspezialisten entstanden ist. Die einzelnen Bauteile bestehen aus einer grossen Anzahl verschiedener Materialien. Im Montageprozess wurden die Einzelteile zu einem fertigen Kugelschreiber zusammengefügt, das fertige Produkt schliesslich verpackt. Auch der Verpackung liegen Materialentscheide zu Grunde.

Während des gesamten Entwicklungsprozesses dieses Kugelschreibers wurden hunderte von Entscheidungen gefällt – Entscheidungen über den Materialeinsatz, über Fertigungs- bzw. Veredlungsschritte oder über die Montagefolge. Diese Entscheidungen werden vor dem Hintergrund eines riesigen Wissensgebiets gefällt. Dieses Wissensgebiet muss von den Entwicklungsingenieuren übersehen, ins Entwicklungsteam eingebracht und koordiniert werden.

Lernziele

Die Studierenden sollen das strukturierte Basiswissen über Werkstoffe und Fertigungsverfahren kennenlernen. Damit sollen sie während einer Produktentwicklung in der Lage sein:

- eine Materialauswahl zu treffen,
- Konstruktionen fertigungsgerecht zu gestalten,
- mit Fertigungsspezialist/-innen ein Fachgespräch zu führen und
- neue Fertigungsverfahren in das bestehende Grundwissen einzuordnen.

Ausserdem können Sie

- bestehende Produkte in Bezug auf Material und Fertigung analysieren.

Einleitung

In den Sektionen über Werkstoffe und Fertigungsverfahren ist Basiswissen für Maschineningenieur/-innen zusammengestellt. Die Auswahl des Stoffes fällt angesichts der Vielfalt und der ständig wachsenden Zahl von Materialien und Verfahren nicht leicht. Sie orientiert sich an der Praxis und umfasst eher „Basis-Werkstoffe“ und „Basis-Herstellverfahren“, auf denen die meisten der neueren Verfahren aufsetzen.

Den Ingenieuren/-innen sollen die Einsatzmöglichkeiten und Eigenschaften der vorgestellten Verfahren und Werkstoffen anhand vieler Beispiele gezeigt werden. Ein Schwergewicht liegt auch auf den konstruktiven Richtlinien und Hinweisen, welche durch die Entwickler zu berücksichtigen sind.

2. Werkstoffe & Fertigungsverfahren

Im Prozess einer Produktentwicklung müssen unzählige Entscheide für die „richtige“ Materialwahl und damit sehr eng gekoppelt „richtige“ Fertigungswahl getroffen werden. Das Wort „richtig“ muss jedoch sofort relativiert werden. Immer steht eine breite Auswahl an möglichen Varianten zur Verfügung, und jedes potentielle Material hat Vor- und Nachteile in Bezug auf die Erfüllung der geforderten bzw. gewünschten Eigenschaften der Herstellbarkeit, der Kosten, der benachbarten Bauteile oder den vorhandenen Fähigkeiten des Unternehmens. Es handelt sich somit immer um eine Optimierung in einem vieldimensionalen Entscheidungsraum.

Materialwahl und Fertigungswahl sind eng aneinander gekoppelt. So wird häufig ein Material infolge der erwarteten Eigenschaften festgelegt und dadurch die Fertigungsauswahl eingeschränkt. Umgekehrt können festgelegte Fertigungsverfahren die Materialwahl einschränken.

2.1. Wahl des Werkstoffs

Die Werkstoffwahl orientiert sich meist an den Anforderungen, die an das Bauteil gestellt werden.

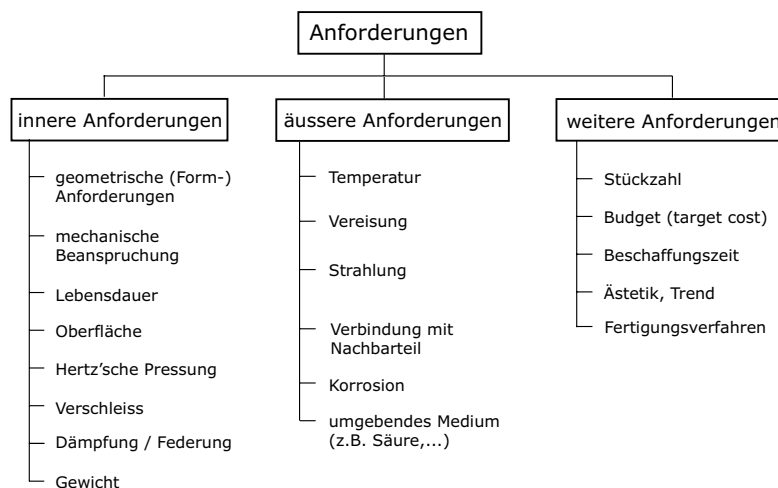


Bild (B102werZ) Anforderungen an den Werkstoff

Auf der anderen Seite existiert eine schier unendliche Anzahl von Materialien, welche zum Einsatz gelangen können.

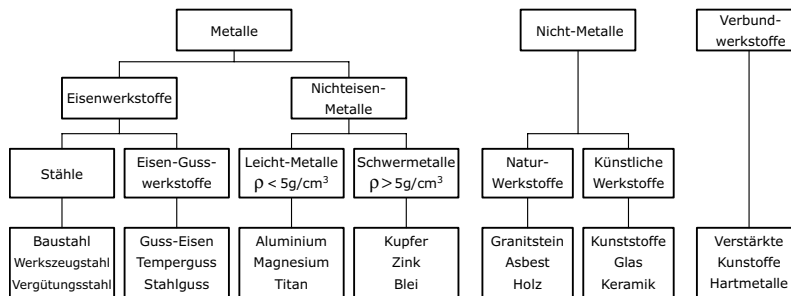


Bild (B001werZ) Klassierung der Werkstoffe

Jedes dieser Materialien, sowie dessen weitere Behandlung (Wärmebehandlung, Beschichten, ...), besitzt Eigenschaften, die die gestellten Anforderungen unterschiedlich gut erfüllen.

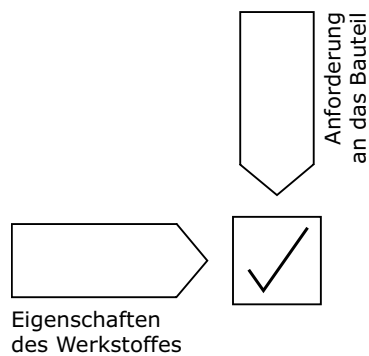


Bild (B101werZ) Eigenschaften und Anforderungen

2.2. Wahl des Fertigungsverfahrens

Auch aus der Sicht der Fertigungsverfahren öffnet sich eine unbegrenzte Palette von Möglichkeiten. Die Norm DIN8580 gruppiert diese:

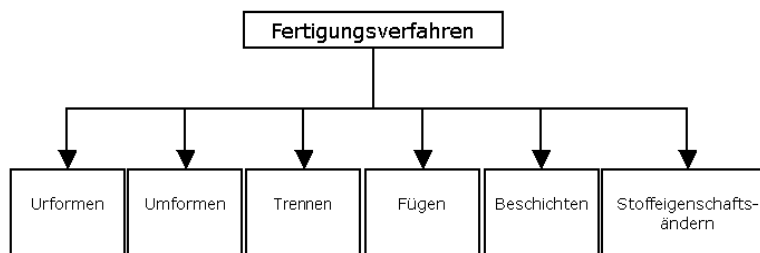


Bild (B007ferZ) Einteilung der Fertigungsverfahren

Die Auswahl erfolgt auch hier anhand von Randbedingungen, zu denen:

- der gewählte Werkstoff,
- die Stückzahl,
- der Maschinenpark/Lieferantenumfeld,
- die Marktakzeptanz,
- die Genauigkeit/Qualität,
- die Gestaltungsfreiheit/Form und
- das bestehende Know-how zählen.

Die Auswahl kann sich zusätzlich am geplanten Produktionsanlauf orientieren, da über die Zeit, von der Kleinserienfertigung zur Serienproduktion, unterschiedliche Verfahren zum Einsatz kommen können.

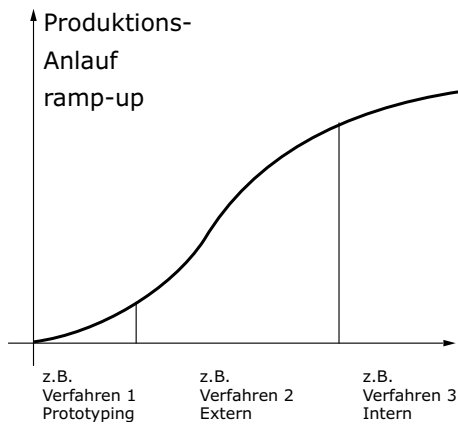


Bild (B108ferZ) Produktionsanlauf und Beispiel

2.3. Gestaltung der Bauteile

Die Gestaltung der Bauteile richtet sich stark nach der erfolgten Wahl der Werkstoffe und den Gestaltungsrichtlinien des Fertigungsverfahrens. Bild 109ferZ gibt einen Überblick über die vielen Bereiche, in denen Gestaltungsgerechtigkeit („Design for X“) anzustreben ist.

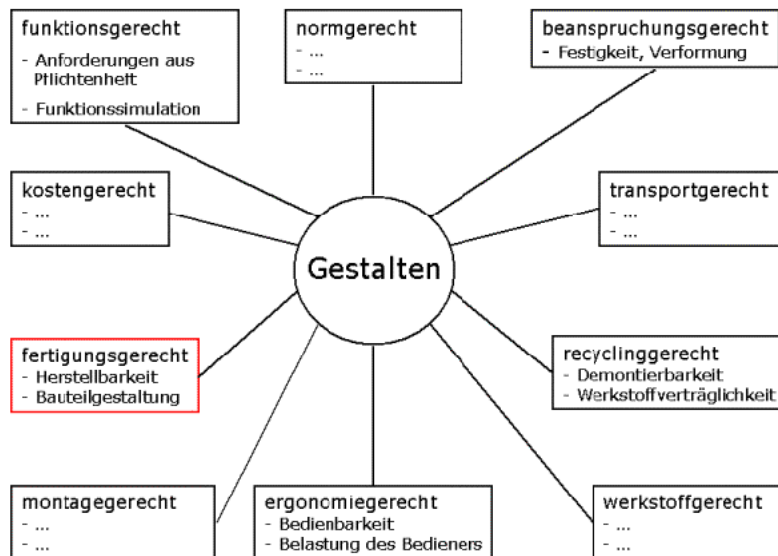


Bild (B109ferZ) Design for X

Jedes Element dieser Darstellung kann weiter detailliert werden. Beispielsweise Die „Fertigungsgerechtigkeit“ gliedert sich weiter in:

- Herstellungsgerechtigkeit,
- Putzgerechtigkeit,
- Einspanngerechtigkeit,
- Entformgerechtigkeit,
- Prüfgerechtigkeit,
- Toleranzgerechtigkeit,
- Belastungsgerechtigkeit,
- ...

Viele Fachbücher zeigen Gestaltungslösungen anhand von vereinfachten Beispielen. Bild 110ferZ zeigt eine Lösungssammlung für das Kleben:

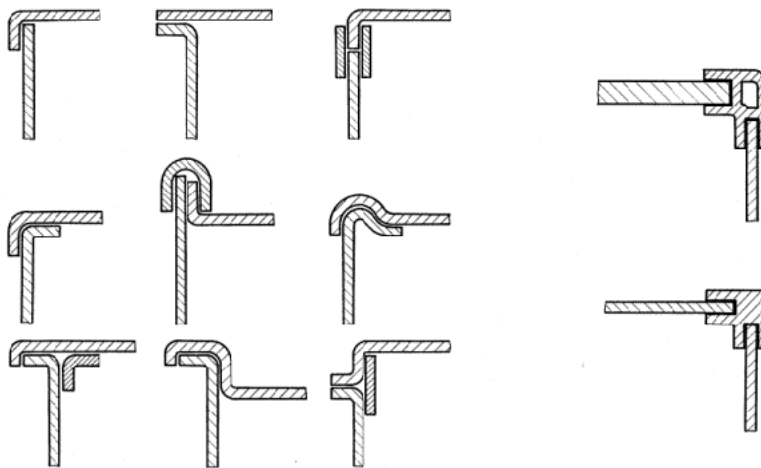


Bild (B1 110ferZ) Beispiele zur Gestaltung von Verklebungen

2.4. Fertigungskette

Nur selten wird ein Bauteil in einem Fertigungsschritt erstellt (net-shape). Vielmehr besteht der Fertigungsprozess aus einer Folge von aufeinanderfolgenden, vernetzten Fertigungsschritten, **Fertigungsketten** genannt.

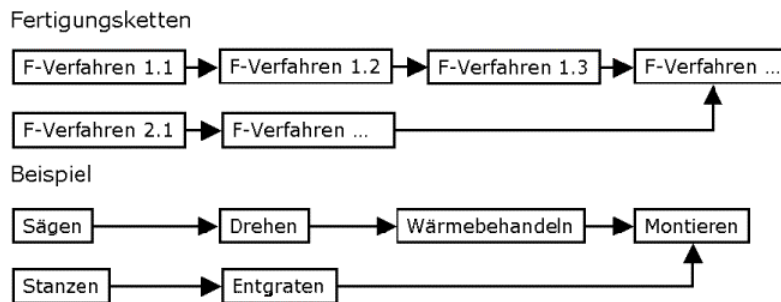


Bild (B111ferZ) Schematische Darstellung von Fertigungsketten

2.5. Iteration der Auswahl

Wie eingangs erwähnt, existieren viele mögliche Werkstoffe und Fertigungsverfahren. Diese Gesamtlösungen müssen bewertet und mit alternativen Lösungen verglichen werden. Vielfach sind hier mehrere Iterationen notwendig.

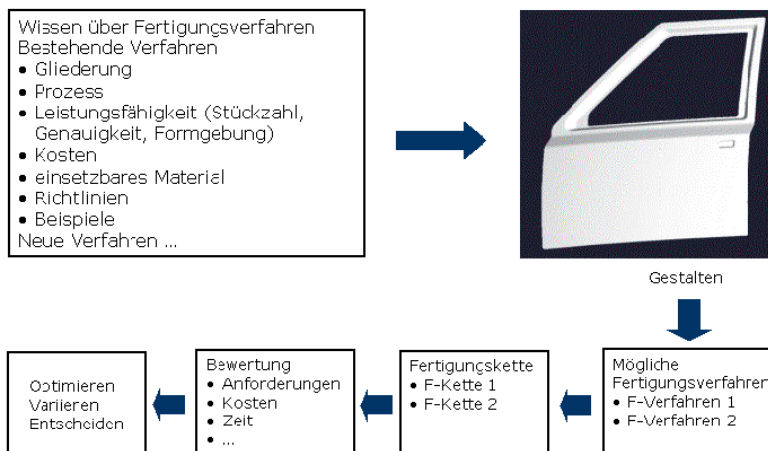


Bild (B112ferZ) Iterativer Gestaltungsprozess

3. Zusammenfassung

Um ein Produkt zu entwickeln, das die gegebenen Anforderungen optimal erfüllt, bedarf es einer geschickten Auswahl der zu verwendenden Materialien und einem gut geplanten Einsatz von passenden Fertigungsmethoden. Ingenieur/-innen haben die anspruchsvolle Aufgabe, material-, fertigungs- und gestaltungsgerechte Lösungen zu finden. Die Kenntnis von Werkstoffen und Fertigungsverfahren ist eminent wichtig und stellt einen Schlüssel zum Erfolg in der Produktinnovation dar. Dieses Wissen bildet die Basis, um bei Fragestellungen, die häufig mit einer enormen Auswahl an Lösungsmöglichkeiten aufwarten, eine Entscheidung treffen zu können.

Weitere Relevante Dokumente

- [Artikel](#): Terabyteterminal von Brian Hayes

Konstruktionswerkstoffe

Autor: Prof. Dr. Markus Meier

1. Überblick

Motivation

Die kontinuierliche Rotationsbewegung einer Antriebswelle (1) soll durch einen Exzenter (2) auf eine Schubstange (4) übertragen werden um an die Antriebswelle (6) aus Stahl eine zyklische Schwenkbewegung zu erzielen. Der Mechanismus überträgt alle 10 Sekunden wechselnde Drehmomente von 100 Nm in beiden Richtungen und dies 8 Stunden im Tag über 100 Tage im Jahr. Pro Anlage werden zwei solche Mechanismen verwendet und es werden 20 Anlagen gebaut.

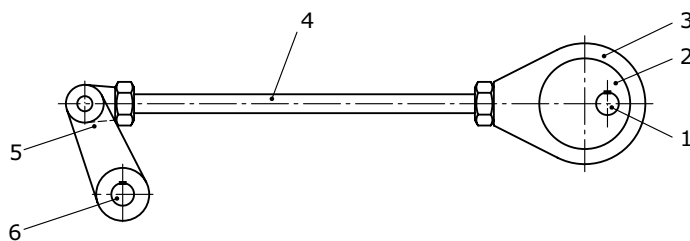


Bild (B050werZ) Antriebswelle

In der weiteren Gestaltung soll das Material des Hebels (5) bestimmt werden.

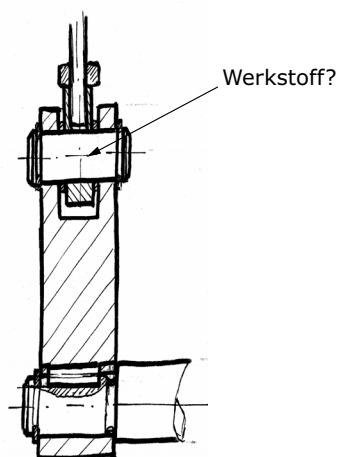


Bild (B051werZ) Hebel einer Antriebswelle

Hierzu werden die wichtigsten zu berücksichtigenden Anforderungen zusammengetragen. Dazu zählen:

- Stückzahl: Pro Jahr werden lediglich kleine Stückzahlen benötigt (rund 100).
- **Festigkeit**: Über das Antriebsmoment und die geometrischen Randbedingungen (Länge der Antriebswelle, **Passfedertyp**, ...) können die grobe Formgebung des Bauteils und somit die notwendigen Fertigkeitswerte angenähert werden.
- **Wechselfestigkeit**: Das Bauteil ist über die Lebenszeit von 20 Jahren nahezu $5 \cdot 10^6$ Zyklen wechselnd beansprucht und muss auf **Ermüdung** dimensioniert werden.
- **Härte**: Das Bauteil ist oben durch den **Bolzen** und unten durch die Passfeder auf **Pressung (Lochreibung)** beansprucht. Der **Ver-schleiss** soll minimal sein.
- Oberfläche: Für die Verbindung mit der Welle und dem Bolzen erfolgt eine Passung und somit Anforderung an die Oberfläche.
- **Temperaturbeständigkeit**: Es muss mit Temperaturschwankungen von -40°C bis $+40^{\circ}\text{C}$ gerechnet werden. Die Toleranzen der Passung, sowie die Festigkeitswerte des Materials, müssen dies gewährleisten.
- Vereisung: Es muss mit Vereisung der Verbindung gerechnet werden.
- **Korrosion**: Die Bauteile sind ständig der Feuchtigkeit ausgesetzt. Es muss sowohl zwischen Bolzen und Hebel als auch zwischen Welle und Hebel mit Korrosion gerechnet werden- und zwar mit direkter Korrosion- sowie Kontaktkorrosion.

Geht man davon aus, dass das Bauteil gespannt wird, so ergeben sich folgende Varianten der Werkstoffwahl:

- Der Hebel wird aus Baustahl gefertigt, der zusätzlich verzinkt wird – Achtung: Passungen!
- **Rostfreier Stahl** wird gewählt – Achtung: Kosten!
- eine weitere Variante besteht darin den Hebel mit Aluminium zu fertigen – Achtung: Wechselfestigkeit!

Lernziele

Die Studierenden sollen in dieser Lektion erkennen, dass die Werkstoffauswahl im Gestaltungsprozess

- eine Antwort auf die Gesamtheit der Anforderungen an das Bauteil darstellt,
- meist mehrere Varianten für die Werkstoffwahl zulässt und
- eine Bewertung notwendig ist.

Um das grundlegende Sachwissen aufzubauen, welches für eine komplette Auswahl der Werkstoffe notwendig ist:

- wird eine strukturierte Form „aller“ Werkstoffe vorgestellt,
- wird für eine Auswahl von häufig eingesetzten Werkstoffklassen die Eigenschaften und die Eignung näher beschrieben und
- sollen beispielhafte Anwendungen den Bezug zwischen den Werkstoffen und dem realen Bauteil aufzeigen.

In einem Überblick sollen die Studierenden auch ein Verständnis für Korrosionsfragen aufbauen und für ökologische Aspekte der Materialwahl sensibilisiert werden.

Einleitung

Innerhalb des Gestaltungsprozesses müssen Entwickler/-innen eine grosse Anzahl von Eigenschaften des Produktes bzw. der einzelnen Bauteile festlegen. Zu den wesentlichsten Eigenschaften gehören die in der Produktion verwendeten Werkstoffe. Das Material des Werkstoffes aus welchem ein Bauteil zu fertigen ist, muss von dem/der Entwickler/-in gewählt werden. Zum einen schränken verschiedenste Anforderungen, welche an die Bauteile gestellt werden, diese Wahl ein, zum anderen muss die Formgebung mitberücksichtigt werden. Dabei sehen sich die Entwickler/-innen oft einer Unmenge von Varianten gegenüber, woraus sie eine Auswahl treffen sollen. Diese Entscheidung ist jedoch alles andere als einfach, wenn die Anforderungen komplex sind und keine unberücksichtigt bleiben darf.

Die Folgen einer Fehlentscheidung können verherend und äusserst kostspielig sein. Erfolgbringende Entscheidungen setzen grosse Kenntnisse über die Werkstoffe, deren Eigenschaften und ein Verständnis ihrer gegenseitigen Beeinflussung voraus.

Die folgenden Kapitel werden diese grundlegenden Fachkenntnisse der Werkstoffkunde vermittelt, ohne jedoch in das Spezialistenwissen einzugehen.

Dem Entwickler steht eine fast unbeschränkte Auswahl von Werkstoffen zur Verfügung. Die folgende systematische Gliederung ergibt einen ersten Überblick:

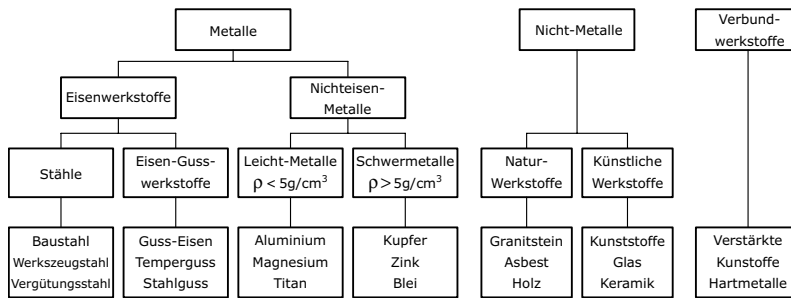


Bild (B001werZ) Verschiedene Werkstoffe im Überblick

2. Auswahl von Werkstoffen

Die Auswahl eines konkreten Werkstoffes für ein bestimmtes Bauteil erfolgt anhand der Anforderungen, welche an dieses Bauteil gestellt sind im Vergleich zu den Eigenschaften, welche ein Werkstoff besitzt. Die Werkstoffwahl lässt sich somit als das Ergebnis zweier aufeinander abgestimmter Sichten begreifen:

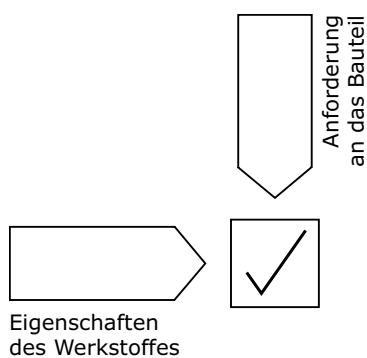


Bild (B101werZ) Auswahl von Werkstoffen

2.1. Anforderung an ein Bauteil

Die Anforderungen, welche an ein Bauteil gestellt werden, sind vielfältig. Bild 102werZ zeigt diese im Überblick:

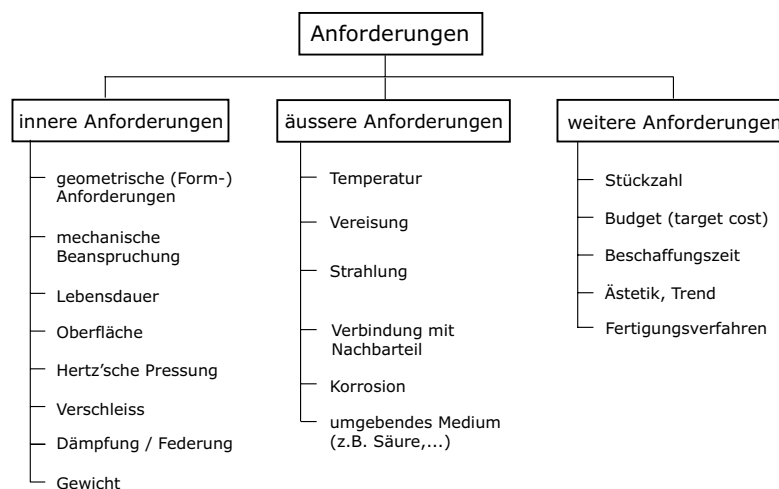


Bild (B102werZ) Anforderungen an ein Bauteil

2.2. Eigenschaften der Werkstoffe

Die Werkstoffe können auch durch ihre Eigenschaften (Merkmal und Ausprägung) beschrieben werden.

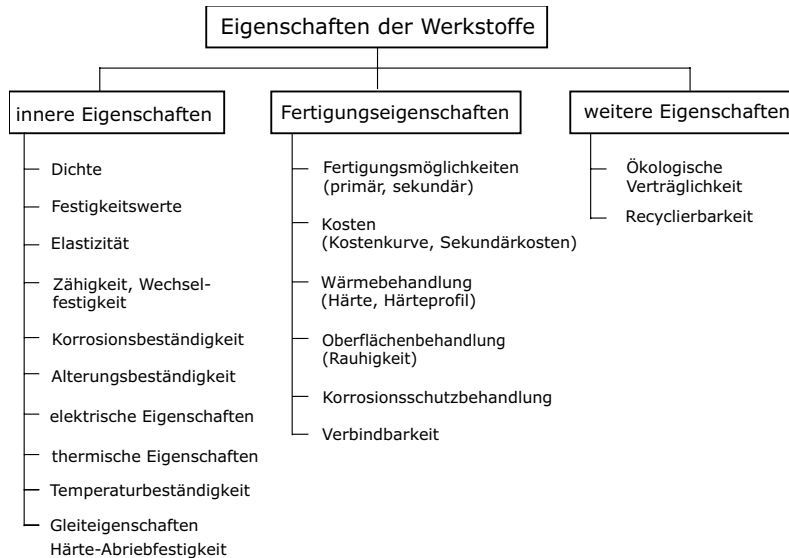


Bild (B103werZ) Eigenschaften der Werkstoffe

Die meisten Werkstoffe besitzen grosse Abhängigkeiten unter den einzelnen Eigenschaften, so hat z.B. ein Aluminium, welches als Stangenmaterial für eine Drehfertigung verwendet wird, ein anderes Eigenschaftenprofil als ein Aluminium, welches vergossen wird.

Eine Matrix, welche die Eigenschaften aller möglichen Werkstoffe direkt mit den Anforderungen koppelt und die Auswahl bzw. die Empfehlung vereinfacht, existiert bis heute nicht und die meisten Entschiede der Entwickler erfolgen intuitiv durch existierendes Wissen über Werkstoffe und deren Eignung oder durch Konstruktion entsprechender Werkstoffunterlagen und Normen.

2.3. Bestimmen der Werkstoffeigenschaften

Die Eigenschaften von Werkstoffen werden mit exakt genormten Prüfverfahren gemessen. Die genaue Normung der Prüfverfahren ist nötig um die Streuung der Messergebnisse aus verschiedenen Proben und Prüflabors so gering wie möglich zu halten.

Im Folgenden sollen einige der wichtigsten Prüfverfahren für mechanische Eigenschaften von Werkstoffen kurz vorgestellt werden.

2.3.1. Zugversuch

Mit dem **Zugversuch** wird das Werkstoffverhalten unter einachsiger Beanspruchung ermittelt. Die Ergebnisse dieses Prüfverfahrens sind Festigkeits- und Veformungskennwerte. Aus den gemessenen Werten kann ein **Spannungs-Dehnungsdiagramm** erstellt werden, aus dem das Dehn- und Bruchverhalten des Werkstoffes abzulesen ist. Wichtige dabei ermittelte Werte sind der **E-Modul**, die **Fließ-** sowie die **Bruchgrenze**.

Die bei diesem Verfahren erhaltenen Werkstoffkenngrößen sind die Grundlage für die Dimensionierung statisch beanspruchter Bauteile.

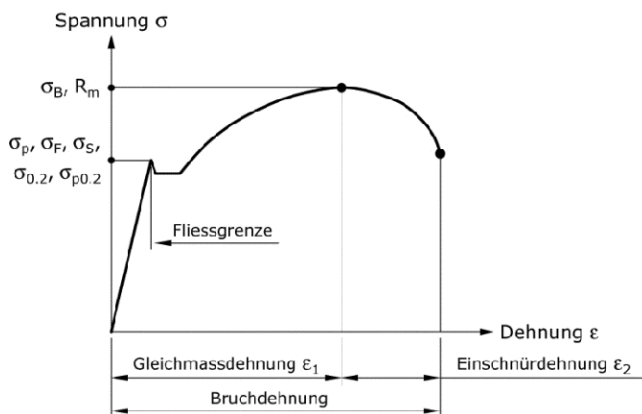


Bild (B020werZ) Spannungs-Dehnungsdiagramm

2.3.2. Dauerschwingversuch

Mit dem **Dauerschwingversuch** wird das Materialverhalten unter anhaltender **schwingender Beanspruchung** ermittelt. Als Prüfmaschinen werden **hydraulische Pulsatoren** oder mechanische **Exzentermaschinen** eingesetzt. Meist erfolgt die Werkstoffprüfung im **Zug-** oder **Druckschwellbereich** mit sinusförmig an- und abschwelliger Belastung.



Bild (B021werZ) Zugversuch Prüfstand

Wichtige Dauerfestigkeitswerte sind die Wechselfestigkeit und die **Schwellfestigkeit**.

- Die Wechselfestigkeit ist der Dauerfestigkeitswert für eine zwischen einem negativen und positiven (betragsgleichen) Wert schwingende Spannung.
- Die Schwellfestigkeit ist der Dauerfestigkeitswert für eine zwischen Null und einem Höchstwert an- und abschwellige Spannung.

Dabei werden sechs bis zehn gleichartige und polierte Proben bei unterschiedlich hoher, schwingender Belastung untersucht. Meist wird die Belastung so gewählt, dass die Wechselfestigkeit oder die Schwellfestigkeit bestimmt wird. Für jede einzelne Probe wird ermittelt, nach welcher **Lastspielzahl** sie zu Bruch geht. Proben die mehr als 10 Millionen Lastspiele ertragen, brechen erfahrungsgemäss nicht mehr – sie gelten als dauerfest.

Trägt man die Ergebnisse des Versuchs in ein Diagramm ein, das die Belastung, die zum Bruch führt, in Abhängigkeit von der erreichten Lastspielzahl angibt, erhält man die sogenannte **Wöhlerkurve**.

2.3.3. Kerbschlagversuch

Mit dem **Kerbschlagversuch** wird das Materialverhalten unter schlagender Belastung ermittelt. Dieser Prüfversuch eignet sich vorwiegend für die Feststellung der **Trennbruch**neigung eines Werkstoffes.

Beim Versuch fällt ein Pendelhammer von einer vorgegebenen Höhe und trifft in seinem tiefsten Punkt die Rückseite einer gekerbten Probe. Beim Durchschlagen der Probe wird ein Teil der Hammerenergie für die sogenannte **Schlagarbeit** verbraucht. Diese kann entweder aus der nach dem Schlag noch erzielten Steighöhe des Pendels errechnet werden, oder bei instrumentierten Pendeln direkt elektronisch gemessen und weiterverarbeitet werden. Die bei einem **Sprödbbruch** dissipierte Energie ist gering, während ein Bruch mit **plastischer Verformung** wesentlich mehr Energie aufnimmt.

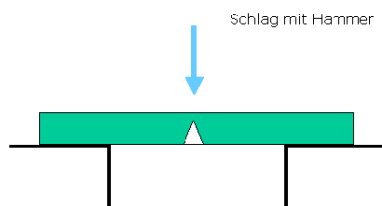


Bild (B022werZ) Anordnung der Probe beim Kerbschlagversuch

2.3.4. Härteprüfverfahren

Mit Härteprüfverfahren wird die Härte und die **Abriebfestigkeit** eines Werkstoffes ermittelt. Die Härte ist der Widerstand, den ein Werkstoff dem Eindringen eines Prüfkörpers entgegensetzt. Die Einheiten, in welchen Angaben zur Härte eines Materials gemacht werden, beziehen sich immer direkt auf das angewandte Prüfverfahren und heissen gleich wie der Name des Verfahrens.

Brinellhärte (HB): Bei der Härteprüfung nach Brinell wird eine Kugel aus Hartmetall oder gehärtetem Stahl mit einer Prüfkraft in die Probe gedrückt. Gemessen wird dabei der Durchmesser des entstandenen Kugeleindrucks. Mit der Brinellhärteprüfung können nur weiche und mittelharte Werkstoffe geprüft werden. Es werden unterschiedlich grosse Prüfkugeln entweder aus **Hartmetall** (HBW) oder **Stahl** (HBS) verwendet.

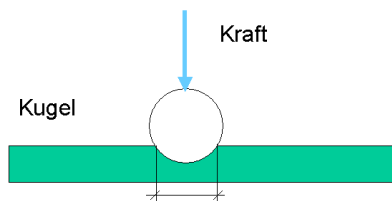


Bild (B023werZ) Prüfverfahren nach Brinell

Vickershärte (HV): Bei der Härteprüfung nach Vickers wird die Spitze einer vierseitigen Pyramide aus Diamant in die Probe eingedrückt und die Diagonalen des entstandenen Pyramideneindrucks gemessen.

Anders als beim Verfahren nach Brinell gibt es bei der Vickershärteprüfung nur einen Eindringkörper, mit dem sowohl weiche als auch harte Werkstoffe geprüft werden.

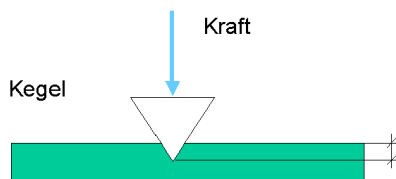


Bild (B024werZ) Prüfverfahren nach Vickers

Rockwellhärte (HR): Bei der Härteprüfung nach Rockwell wird Prüfkörper zunächst mit einer Prüfvorkraft belastet und die Messuhr auf 0 gestellt. Danach wird die eigentliche Prüfkraft aufgelegt und nach kurzer Zeit wieder weggenommen. Gemessen wird danach die Eindringtiefe, diese kann an der Messuhr direkt als Rockwellhärte abgelesen werden. Für harte Werkstoffe verwendet man als Prüfkörper einen Diamantkegel mit spitzem Winkel, für weiche Werkstoffe eine gehärtete Stahlkugel.

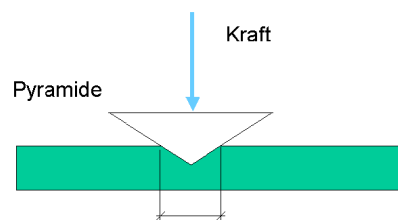


Bild (B025werZ) Prüfverfahren nach Rockwell

2.4. Auswahl durch Erfahrung

Eine andere Möglichkeit zur Werkstoffauswahl ist, sich auf bestehende Erfahrungen zu stützen und für Konstruktionsbauteile bewährte Materialien einzusetzen. Dies wird auch als **konservative Werkstoffauswahl** bezeichnet.

Beispiele von bewährten und konservativen Entscheidungsgrundlagen zeigt Tabelle 001werZ

Allg. Maschinenbauteile kleiner und mittlerer Beanspruchung; ohne spezielle Eigenschaften	S235 (St37)
Allg. Maschinenbauteile mittlerer Beanspruchung rostfrei (auch geschweisst)	X5CrNi18 10
Gleitlager mit hoher Flächenbelastung, säurebeständig	G-CuPb15Sn8
Leichtbauteile im allgemeinen Maschinenbau	AlMn
Kurvenscheiben, verschleissfest, durch Sintern hergestellt	SINT-D10

Tabelle (T001werZ) Konservative Entscheidungsgrundlagen

Erkenntnisse kann man auf eigene Erfahrung mit entwickelten Produkten abstützen oder aber auf fremde Erfahrung, die in Werkstoffdokumentationen und Normen aufgeführt sind.

In den folgenden Kapiteln der einzelnen Werkstoffgruppen wird jeweils eine kleine Auswahl von häufig verwendeten und bewährten Werkstoffen angeführt. Für weitere Werkstoffe und vertiefte Informationen können Werkstoffbücher konsultiert werden, wie z.B. Tabellenbuch Metall vom Europa Lehrmittelverlag, Dubbel oder natürlich die entsprechende DIN-Norm.

2.5. Unternehmensinterne Werkstoffnormung

Zu beachten ist auch, dass Unternehmen eine Werkstoffauswahl durch interne Normung einschränken. Jeder Werkstoff, der als **Halbzeug** (Platten, Profile, Rohre etc.) im Unternehmen an Lager gelegt wird, erzeugt Kosten (Beschaffungskosten, Lagerkosten, ...). Unternehmen sind bestrebt weniger Typen (Materialtyp, Dimension) zu lagern und in grossen Einheiten einzukaufen.

Die Konstrukteur/-innen sind aufgefordert in erster Priorität diese Werkstoffe einzusetzen. Falls bestimmte Fertigungskompetenzen und Einrichtungen im Unternehmen vorliegen, sollte entsprechend auch Material gewählt werden, das für diese Fertigung geeignet ist.

2.6. Stand der Technik

Bei der Werkstoffauswahl ist zu beachten, dass die Werkstoff-Weiterentwicklung und Forschung in schnellen Schritten weiter schreitet. Wissen über Eigenschaften von Werkstoffen oder Möglichkeiten neuer Werkstoffe kann schnell veraltet sein und muss durch Konsultation entsprechender Dokumentationen und Spezialisten dauernd erneuert werden.

2.7. Risiko der Werkstoffwahl

Die Anforderungen, die an ein Bauteil gestellt werden, sind, wie gezeigt, sehr umfangreich und ein Ausfall eines Bauteils kann enorme Auswirkungen auf Personensicherheit, kostspielige Rücklaufaktionen oder Imageschäden hervorrufen.

Beispielsweise hat Rover 1996 10'000 Geländewagen zurückgerufen. Die sda schrieb damals: „Neuss/Safenwil – [...] britischer Autohersteller Rover hat weltweit rund 10'000 Geländewagen vom Typ Range Rover in die Werkstätten zurückgerufen. [...] Bei der Überprüfung seien bei einigen Fahrzeugen Haarrisse an den Längslenken der Hinterachse festgestellt worden. [...]“

Vielfach ist die Frage nach der Schuld, ob ein konstruktiver Fehler (Formgebung, Dimensionierung), ein Fertigungsfehler (Formgebung, innere Fehlerstellen wie Lunker etc.) oder ein Materialfehler (falsche Auswahl, falsche Lieferung, Qualitätsprobleme der Eigenschaften etc.) vorliegt, müssig. Diese Dimensionen sind ausserdem meist schwer zu trennen.

Risiken können nur durch vorhandene Sachkompetenz der Entwickler/-innen oder durch Hinzuziehen von Spezialist/-innen minimiert werden. Die Risikominimierung erfolgt durch computerunterstützte Simulation oder durch umfangreiche Tests der Bauteile in realem Umfeld.



Bild (B601werZ) PKW im Dauerversuch (Quelle: Schenck AG, BRD)

3. Stahl

Die wichtigsten mechanischen Werkstoffkennwerte von Stahl sind:

- $\rho = 7.85 \text{ kg/dm}^3$
- $E = 210'000 \text{ N/mm}^2$
- $G = 83'000 \text{ N/mm}^2$

Stahl ist einer der am meisten verwendeten Werkstoffe im Maschinenbaubereich. Die Gründe liegen vor allem darin, dass Stahl preiswert hergestellt wird und in vielen Formen als Halbzeuge (Drähte, Rohre, Platten, Bleche, Profile) erhältlich ist. Stahl ist ein Eisenwerkstoff mit maximal 2% Kohlenstoff (Eisenwerkstoffe mit >2% nennt man **Guss-eisen**) und unterschiedlichsten **Legierungselementen**. Je nach Verwendung unterteilt man in:

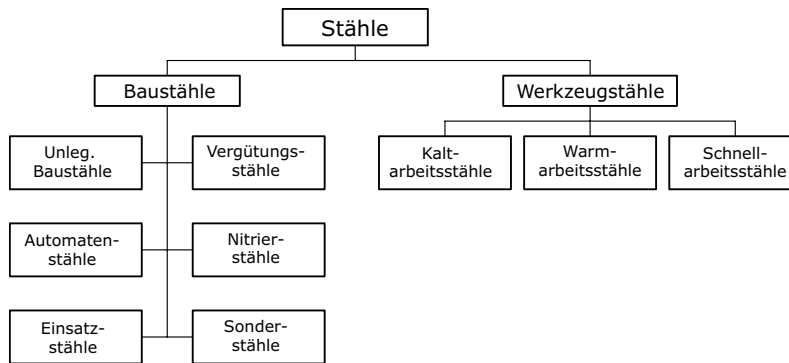


Bild (B900werZ) Klassierung der Stähle

Als Faustregel gilt:

- **Baustahl**: $C < 1\%$
- **Werkzeugstahl**: $0.4\% < C < 2.2\%$

Eine andere Unterteilung (DIN EN 10020) klassifiziert nach Güteklassen:

	Unlegierte Stähle			Legierte Stähle	
	Grundstähle	Qualitätsstähle	Edelstähle	Qualitätsstähle	Edelstähle
Merkmale	keine besonderen Gütemerkmale	erhöhte Anforderungen bezüglich Korngrösse und Verformbarkeit	besonders hohe Anforderungen an Reinheitsgrad	Legierungsbestandteile ergeben bestimmte Eigenschaften	genaue chemische Zusammensetzung ergibt bestimmte Gebrauchseigenschaften
Wärmebehandlung	nicht vorgesehen	möglich	vorgesehen	nicht vorgesehen	zum Teil vorgesehen

Tabelle (T002werZ) Unterteilung klassifiziert nach Güteklassen

Die Einteilung nach **Güteklassen** kann auch wie folgt beschrieben werden:

- **Grundstähle:** unlegierte Stähle mit eingeschränkten Legierungsbestandteilen ohne definierte Gebrauchseigenschaft,
- **Qualitätsstähle:** Stähle mit gewährleisteten Gebrauchseigenschaften und
- **Edelstähle:** genaue Zusammensetzung, gewährleistete Gebrauchseigenschaften; nach der Wärmebehandlung festgelegte Festigkeitswerte.

Die Legierungszusätze beeinflussen die Eigenschaften der Stahlsorte massgeblich. Eine Übersicht der wichtigsten Eigenschaften stellt die folgende Tabelle dar:

Eigenschaften	Legierungselemente										
	Cr	Ni	Al	W	V	C O	M o	Si	M n	S	P
Zugfestigkeit	+	+		+	+	+	+	+	+		+
Streckgrenze	+	+		+	+	+	+	+	+		+
Kerbschlagzähigkeit	-		-		+	-	+	-		-	-
Verschleissfestigkeit	+	-		+	+	+	+	-	-		
Warmumformbarkeit	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	
Kaltumformbarkeit				-		-	-	-	-	-	-
Zerspanbarkeit		-		-			-	-	-	+	+
Warmfestigkeit	+	+		+	+	+	+	+			
Korrosionsbeständigkeit	+				+					-	
Härtetemperatur	+		+	+	+	+	+	+	-		
Härtbarkeit, Vegütbarkeit	+	+		+	+	+	+	+	+		
Nitrierbarkeit	+		+	+	+		+	-	+		
Schweisbarkeit	-	-	+		+		-		-	-	-

+ Erhöhung, - Verminderung, leer kein nennenswerter Einfluss

Tabelle (T003werZ) Eigenschaften von Legierungen (Quelle: Tabellenbuch Metall)

Diese Legierungszusätze beeinflussen folgende Eigenschaften:

Zusätze		erhöht	vermindert
Kohlenstoff	C	Bruchgrenze Streckgrenze Härte, Härbarkeit Kerbempfindlichkeit Rissbildung	Schmelzpunkt Zähigkeit Schmiedbarkeit Schweisbarkeit Leitfähigkeit Zerspanbarkeit Kein Einfluss auf Korrosions- empfindlichkeit!
Mangan	Mn	Festigkeit Durchhärbarkeit Verschleissfestigkeit (falls peritisch) Hitzeempfindlichkeit Anlasssprödigkeit	Zerspanbarkeit Kaltumformbarkeit
Nickel	Ni	Festigkeit Zähigkeit Kerbschlagzähigkeit Zunderbeständigkeit Warmfestigkeit Korrosionsbeständigkeit (auch Säure) Durchhärbarkeit	Wärmedehnung
Chrom	Cr	Festigkeit Härte Verschleissfestigkeit Kerbschlagzähigkeit Durchhärbarkeit Korrosionsbeständigkeit Hitze-/Zunderbeständigkeit	Dehnung gering
Molybdän	Mo	Festigkeit Warmfestigkeit Durchvergütbarkeit Schnittleistung bei Werkzeugen	Anlasssprödigkeit Schmiedbarkeit
Wolfram	W	Festigkeit Härte Zähigkeit Warmfestigkeit Schnittleistung	Zerspanbarkeit
Silizium	Si	Festigkeit El. Widerstand Durchhärbarkeit Korrosionsbeständigkeit	Kaltverformbarkeit Schweisbarkeit Zerspanbarkeit
Schwefel	S	Zerspanbarkeit	Dauerfestigkeit Kerbschlagzähigkeit Schweisbarkeit

Tabelle (T004werZ) Legierungszusätze geordnet nach Legierungselement

Zusätze		erhöht	vermindert
Phosphor	P	Festigkeit, Warmfestigkeit Korrosionswiderstand	Dauerfestigkeit Kerbschlagzähigkeit Schweisbarkeit
Vanadium	V	Dauerfestigkeit Härte Härtbarkeit Warmfestigkeit	Überhitzungsempfindlichkeit
Kobalt	Co	Härte Schnittleistung bei Werkzeugen Anlassbeständigkeit Überhitzungsempfindlichkeit	Kornwachstum bei hoher Temperatur
Aluminium	Al	Oberflächenhärte (Eindringen von N ₂ beim Nitrieren) Zunderbeständigkeit Alterungsbeständigkeit	
Stickstoff	N ₂	Verspröden Austenitbildung	Alterungsbeständigkeit Tiefziehfähigkeit

Tabelle (T004werZ) Legierungszusätze geordnet nach Legierungselement

3.1. Kennzeichnung der Stähle (vereinfacht nach DIN EN 10027)

Die Norm unterscheidet in der Bezeichnung verschiedene Gruppen:

- Gruppe1:
 - für unlegierte Baustähle
- Gruppe2:
 - 2/1: unlegierte Stähle mit Mn < 1%
 - 2/2: unlegierte Stähle mit Mn > 1%, aber Legierungsanteil gesamthaft < 5% (früher als niedrig legierte Stähle bezeichnet)
 - 2/3: legierte Stähle mit Legierungsanteil gesamthaft > 5% (früher als hochlegierte Stähle bezeichnet)
 - 2/4: **Schnellarbeitsstähle**

3.1.1. Kennzeichnung für unlegierte Baustähle

Die Bezeichnung ist aus 5 Feldern aufgebaut, wobei die ersten 3 Felder als Hauptsymbole und die rechten 2 Felder als Zusatzsymbole bezeichnet werden. Beispiel: GS235JoW:

G	Kennzeichnung für Gussqualität (sonst leerlassen)
S	Hauptsymbol für Verwendungszweck Die wichtigsten sind S für Stahlbau und E für allg.Maschinenbau
235	Mindeststreckgrenze für Halbzeug mit Bezugsdurchmesser (grössere Erzeugnisdicke senkt Werte), z.B. 235 N/mm ² bei B < 16mm
Jo	Kennzeichnung für Kerbschlagzähigkeit und Prüftemperatur, z.B. Jo entspricht 27 Joules bei 20°C
W	Weitere spezielle Eigenschaften, z.B. W = wetterfest

Tabelle (T005werZ) Kennzeichnung für unlegierte Baustähle

Die vollständige Tabelle für das zweite Hauptsymbol ist:

- B: **Betonstahl**
- D: **Flacherzeugnisse** für Kaltumformen
- E: **Maschinenbaustahl**
- H: Flacherzeugnisse aus höherfestem Stahl zum **Kaltumformen**
- L: Stahl für Leitungsrohre
- M: **Elektroblech**
- P: Stahl für Druckbehälter
- R: Stahl für Schienen
- S: Stahl für Stahlbau
- T: Verpackungsblech und -Band
- Y: **Spannstähle**

Die **Mindeststreckgrenze** bezeichnet die maximale **Spannung**, bevor **plastisches Fließen** eintritt:

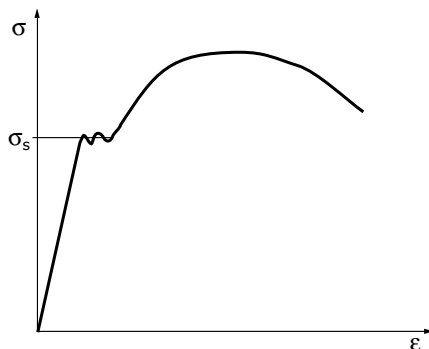


Bild (B105werZ) Übergang zum plastischen Fließen

Die vollständige Tabelle der Kerbschlagzähigkeit in Bezug auf die Prüf-
temperatur:

Kerbschlagarbeit			Prüftemperatur
27J	40J	60J	in °C
JR	KR	LR	+20
JO	KO	LO	0
J2	K2	L2	-20
J3	K3	L3	-30
J4	K4	L4	-40
J5	K5	L5	-50
J6	K6	L6	-60

Tabelle (T006werZ) Kerbschlagzähigkeit

Anstelle der Zähigkeitsangaben findet man auch Beziehungen der
Beruhigung in diesem Symbol:

G1	unberuhigt
G2	beruhigt
G3	Gütegruppe
G4	Gütegruppe

Tabelle (T007werZ) Beziehungen der Beruhigung

Für das letzte Symbol kann eine umfangreichere Klassifikation konstruiert werden:

C	mit besonderer Kaltumformbarkeit
D	für Schmelztauchüberzüge
E	für Emaillierung
F	zum Schmieden
H	Hohlprofile
L	für tiefere Temperaturen
M	Thermomechanisch gewalzt
N	Normalgeglüht oder normalisierend gewalzt
O	für Offshore
P	Spundwandstahl
Q	vergütet
S	für Schiffsbau
T	für Rohre
W	wetterfest
Cu	chemische Symbole für vorgeschriebene Elemente, z.B. Cu (falls erforderlich mit 0.1% des Gehaltes)
+C	Grobkornstahl
+F	Feinkornstahl
+H	mit besonderer Härbarkeit
+Z	Feuerverzinkt
+ZE	Elektrolytisch verzinkt
+A	weichgeglüht
+N	normalgeglüht
+QT	vergütet
+C	Grobkornstahl

Tabelle (T008werZ) Umfangreichere Klassifikation

Vielfach wird für diese Stähle noch die alte Bezeichnung verwendet.
Beispiel: St37

St	37
Festes Symbol	Mindestzugfestigkeit für kleinstes Erzeugnis in kp/mm^2

Tabelle (T009werZ) Alte Bezeichnung

Weitere häufig verwendete Baustähle mit dieser „alten“ Bezeichnung:
St50, St52, St60 etc.

3.1.2. Kennzeichnung für unlegierte Stähle mit $\text{Mn} < 1\%$

Diese Gruppe wird gekennzeichnet mit einem C an erster Stelle und folgt mit der Angabe des Kohlenstoffgehaltes in % (mal Faktor 100).
Das Zusatzsymbol gibt noch weiter Spezifikationen an, z.B. für die Verwendung:

- E: vorgeschriebener max S-Gehalt
- R: vorgeschriebener Bereich für S
- C: besondere Kaltumformbarkeit
- G: weitere Merkmale
- S: für Federn
- U: für Werkzeuge

Beispiel: C45E

C	45	E
Festes Symbol	Kohlenstoffgehalt mal Faktor:100	Spezielle Eigenschaften z.B. max. S-Gehalt

Tabelle (T010werZ) Unlegierte Stähle mit $\text{Mn} < 1\%$

3.1.3. Kennzeichnung für unlegierte Stähle mit Mn > 1% und legierte Vergütungsstähle mit Legierungsanteil < 5% (niedriglegierte Stähle)

Die Kennzeichnung dieser Gruppe basiert auf dem vorangestellten C-Gehalt in % (mal Faktor 100), den darauffolgenden Legierungsanteilen und schliesslich den Anteilsgrössen.

Bei dieser Mengenangabe muss beachtet werden, dass diese mit Faktoren multipliziert ist, welche je nach Legierungen variieren. Die erste Zahl gehört zum erstgenannten Legierungsbestandteil, die zweite zum zweiten, usw. Wenn der Wert < 1 ist, wird keine Zahl aufgeführt. Teilweise werden die Zahlen mit Bindestrich oder einem Abstand getrennt. Beispiel: 42CrMn4

42	CrMn	4
Kohlenstoffgehalt Faktor 100	Legierungsbestandteile	Gehalt der Legierungsbestandteile in der Reihenfolge der Nennung, Faktor X Faktor 4: für : Cr, Co, Mn, Si, W, Ni Faktor 10: für: Al, Cu, Mo, Pb, Ti, V Faktor 100: für: P, S, N

Tabelle (T011werZ) Unlegierte Stähle mit Mn > 1% und legierte Vergütungsstähle mit Legierungsanteil < 5% (niedriglegierte Stähle)

3.1.4. Kennzeichnung für Stähle mit Legierungsanteil > 5% (hochlegierte Stähle)

Diese Gruppe erhält an vorderster Stelle immer ein X gefolgt mit dem Kohlenstoffgehalt in % (mal Faktor 100). Dann folgen wiederum die Legierungsbestandteile in abfallender Reihenfolge, gefolgt von den Anteilswerten in derselben Folge. Für diese Stähle werden die Werte aber nicht mehr multipliziert. Beispiel: X5CrNi1810

X	5	Cr Ni	18 10
Festes Symbol	Kohlenstoffgehalt Faktor 100	Legierungsbestandteile	Gehalt der Legierungsbestandteile in der Reihenfolge der Nennung Faktor 1

Tabelle (T012werZ) Legierungsanteil > 5% (hochlegierte Stähle)

3.2. Baustähle

Bei Baustählen lassen sich folgende Arten unterscheiden:

- Unlegierte Baustähle,
- Automatenstähle,
- Einsatzstähle,
- Vergütungsstähle,
- Nitrierstähle,
- Sonderstähle,
- Federstähle,
- Rost- und säurebeständige Stähle,
- Warmfeste und hochwarmfeste (zunderbeständige) Stähle und
- Werkzeugstähle.

3.2.1. Unlegierte Baustähle

Es handelt sich hier um die im Maschinenbau am häufigsten verwendeten, gut zu bearbeitenden, unlegierten C-Stähle. Der C-Gehalt ist zwischen 0.15 und 0.5%. Je geringer der C-Gehalt ist, desto besser zerspanbar, schweisbar und einsetzbar sind sie. Ausserdem steigert ein höherer C-Gehalt die Zähigkeit und senkt die Kerbempfindlichkeit. Temperatureinsatz ist bis maximal 350°C möglich. Eine Wärmebehandlung ist nicht vorgesehen (Ausnahmebeispiel: E360 ist härtbar). Für den Einsatz im Maschinenbau ist meist nur die Mindeststreckgrenze bzw. die Zugfestigkeit sowie Schweissbarkeit massgebend. Der Reibverschleisswiderstand ist gering (Ausnahmen: E335, E360).

Auswahl von unlegierten Baustählen DIN EN 10025

Bezeichnung	Frühere Bezeichnung	C %	Streckgrenze		Zugfestigkeit	Verwendungszweck, Eigenschaften
			d < 16	d < 40		
S235	St37	0.2	235	225	340–470	gering beanspruchte Teile; gut bearbeitbar, gut schweisbar Hebel, Niete, Schweissteile, Stangen
S355	St52	0.2	355	345	490–630	Mittlere bis hohe Beanspruchung, noch gut zerspanbar, gut schweisbar, gute Zähigkeit Wellen, Schubstangen
E360	St70	0.5	360	355	670–830	Höchste Beanspruchung, naturharte Teile, schwer zerspanbar, verschleissfest Nocken, Gelenke, Walzen

Tabelle (T013werZ) unlegierte Baustähle DIN EN 10025

Es handelt sich dabei um einen preislich günstigen und gut zerspanbaren Werkstoff, welcher vorzugsweise eingesetzt wird, wenn keine besonderen Anforderungen an den Werkstoff gestellt werden (besonders S235).

Zu beachten ist jeweils, dass die Festigkeitswerte abhängig sind von der Erzeugnisdicke des Halbzeuges.

Schweisbarkeit: Baustähle sind bis zu einem Kohlenstoffgehalt von $C < 0.22\%$ gut schweisbar, darüber hinaus jedoch nur bedingt mit Vorwärmung (Martensitbildung).

3.2.2. Automatenstähle

Für Drehteile grosser Stückzahl, die meist auf Dreh-Automaten kostengünstig bearbeitet werden, wird **gezogener**, unlegierter oder niedriglegierter Stahl gewählt, der mit erhöhtem Phosphor- und Schwefelgehalt oder Pb-Zusatz für gute Zerspanbarkeit (kurzbrechende Späne) sorgt. Durch den Ziehvorgang tritt eine **Kaltverfesti-**

gung ein (grösseres σ_B und σ_S), die ein geringeres Dehnvermögen, sprich eine geringere Bruchdehnung und Kerbschlagfestigkeit mit sich bringt und bei kleineren Querschnitten besonders bemerkbar ist. Für grössere Dehnanforderungen werden diese Stähle auch blank geglüht geliefert. Sie können auch je nach dem C-Gehalt eingesetzt oder vergütet werden. Diese Stähle weisen guten Verschleisswiderstand auf, sind aber schlecht schweisssbar.

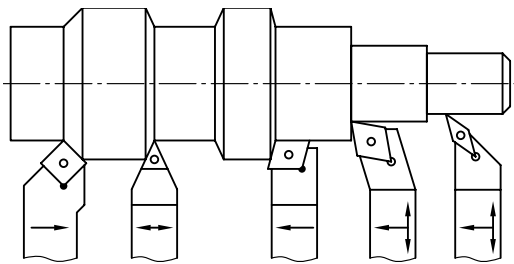


Bild (B002werZ) Anwendungsbeispiel für ein Drehteil aus Automatenstahl, das durch verschiedene Drehmeissel bearbeitet wird.

Auswahl von Automatenstählen (DIN 1651); kaltgezogen, unvergütet

Bezeichnung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Verwendungszweck, Eigenschaften
9S Mn Pb28	375	460–710	Zum Einsatzhärten nur bedingt geeignet, Kleinteile geringer Anforderungen Bolzen, Stifte, Schrauben, Wellen, Muttern
10S Pb20	355	460–710	Geeignet für Einsatzhärten, verschleissfeste Kleinteile Wellen, Bolzen, Stifte
45S Pb20	375	640–830	Zum Vergüten geeignet, Teile höherer Beanspruchung Spindeln, Wellen, Schrauben

Tabelle (T014werZ) Automatenstähle (DIN 1651); kaltgezogen, unvergütet

3.2.3. Einsatzstähle

Beim **Einsatzhärten** wird den Stählen mit ausgehend tiefem C-Gehalt (0.1–0.22%) die Oberfläche in einem ersten Verfahrensschritt bis 1 mm Tiefe aufgekohlt, um einen C-Anteil (bis 0.8%) zu erzielen, welcher im anschliessenden Verfahrensprozess härtbar ist.

Die einsatzgehärteten Teile werden dort verwendet, wo hohe Oberflächenhärte (bis 700 HV, gute Verschleissfestigkeit, gute Gleiteigenschaften) und zäher Kern (hohe **Dauerfestigkeit**, vor allem auf **Biegun**) kombiniert werden müssen.

Man unterscheidet unlegierte Einsatzstähle (z.B. C10, C15) und jene mit Legierungselementen aus Mn, Mo, Ni, Cr (legierte Einsatzstähle z.B. 16MnCr5) mit entsprechend höherer Festigkeit. Vor dem Einsetzen sind die unlegierten Einsatzstähle mit $C < 0.15\%$ gut schweisbar, die legierten Einsatzstähle werden vorgewärmt. Verwendet werden diese Teile entsprechend für **Anschlagstücke**, **Zapfen**, **Dorne**, **Bohrbuchsen**, **Kurbel-**, **Exzenter-** und **Nockenwellen**, **Zahnräder**, **Gelenke** und **Mitnehmer**.

Partielles Einsetzen ist möglich durch einerseits spanendes Bearbeiten nach dem Einsetzen von Bereichen, welche weich bleiben sollen (Zwischenbearbeitung), oder durch Abdecken dieser Bereiche mit Paste vor dem Einsetzen. Nach dem Härten erfolgt meist noch eine Schleifbehandlung (Teile verziehen sich beim Wärmevorgang) der gehärteten Stellen (Aufmass beachten).

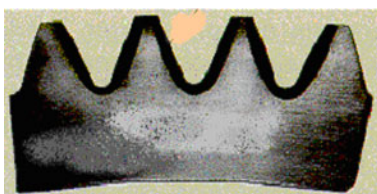


Bild (B777werZ) Schliff durch einsatzgehärtetes Zahnrad

Auswahl von Einsatzstählen DIN 17210

Bezeichnung	Streckgrenze (nach Härtung im Kern, Ø30 mm)	Zugfestigkeit	Verwendungszweck
C10	295	490–640	Teile geringer Belastung Hebel, Zapfen
16MnCr5	440	780–1080	Teile hoher Belastung Ø < 50 Kolbenbolzen, Zahnräder, Spindeln
17CrNiMo6	785	1080–1320	Teile höchster Belastung Tellerräder

Tabelle (T015werZ) Einsatzstähle DIN 17210

3.2.4. Vergütungsstähle

Unlegierte und niedriglegierte Vergütungsstähle mit C-Gehalt zwischen 0.2–0.6% werden vergütet, das heisst gehärtet und anschliessend angelassen (**Vergüten** = Härten bei rund 850°C + **Anlassen** bei hoher Temperatur von rund 600°C). Das Vergüten erhöht die Zähigkeit und somit Dauerfestigkeit und senkt die Härte (150–250 HV nach dem Anlassen), welche unmittelbar nach dem Härten vorliegt. Legierte Stähle weisen Legierungsanteile um 1% Cr, Ni, Mn und teilweise Anteile von Mo und V auf. Die Stähle können auch **randgehärtet** (Tiefe 1–2 mm), **brenn-**, **induktionsgehärtet** und manchmal auch ungehärtet eingesetzt werden. Vergütungsstähle sind bis C < 0.22% (C22) schweisbar, darüber hinaus nicht (C35 und C45 bedingt mit Vorwärmung).

Vergütungsstähle werden allgemein dort eingesetzt, wo grosse, meist wechselnde Beanspruchungen bzw. stossartige Kräfte einwirken. Sie zeichnen sich durch hohe Festigkeit (höher als Einsatzstähle) als auch durch hohe Kerbschlagzähigkeit, sowie guten Verschleisswiderstand und gute Gleiteigenschaften aus. Partielle Wärmebehandlung ist möglich.

Unterschieden werden unlegierte (z.B. C45) und legierte Vergütungsstähle (z.B. 42CrMn4). Die unlegierten Stähle werden für Anwendungen mit $\sigma_B < 900 \text{ N/mm}^2$ und kleinere Abmessungen (grössere Abmessungen erhalten im Kern nicht genügend hohe Abkühlgeschwindigkeit), die legierten Stähle für $\sigma_B > 800 \text{ N/mm}^2$ eingesetzt. Ni erhöht die Kerbschlagzähigkeit und vermindert die Überhitzungsempfindlichkeit.

Die Werkstoffe sind nach dem Vergüten bedingt spanend bearbeitbar (häufig schleifen).

Auswahl von Vergütungsstählen DIN EN 10083

Bezeichnung	Streckgrenze (Ø16–40 vergütet)	Zugfestigkeit (Ø16–40 vergütet)	Verwendungszweck
C45	390	650–800	Geringe Beanspruchung & kleine Masse Bolzen, Achsen, Welle, Getriebe- teile, Zahnstangen, Nockenwel- len, Hebel
42CrMo4	750	1000–1200	Höhere Beanspruchung & Masse Zahnräder, Lenkungsteile, Keil- und Kurbelwelle
30CrNiMo6	1050	1230–1420	Grössere Teile hoher Kerbschlag- zähigkeit

Tabelle (T016werZ) Vergütungsstähle DIN EN 10083

3.2.5. Nitrierstähle

Die Bauteile werden fertig bearbeitet (Endmass). Beim **Nitrieren** erfolgt eine Aussetzung der C-armen, niedriglegierten Cr- und Al-Stähle bei rund 500°C in stickstoffhaltiger Atmosphäre. Stickstoff dringt in die Oberfläche ein und es bilden sich harte Nitride mit den Legierungsbestandteilen. Es ergeben sich hohe Härte und **Druckeigenspannungen** an der Oberfläche und wiederum ein zäher Kern (erhöht die Dauerfestigkeit). Nitrieren ist verzugsarm im Vergleich zum Einsatzhärten. Das Einsatzgebiet der Nitrierstähle entspricht den Einsatzstählen für Teile hoher Verschleissfestigkeit und Dauerfestigkeit und reduzierter Korrosion. Der Vorteil gegenüber den Einsatzstählen liegt im verminderten Verzug. Die Materialien sind nicht schweisbar. Bei zu hoher Flächenbelastung können die harten Oberflächen abplatzen.

Auswahl von Nitrierstählen DIN 17211

Bezeichnung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Verwendungszweck
34CrAl6	540	780–900	Teile mittlerer Beanspruchung
34CrAlMo5	600	800–1000	Warmfeste (bis 500°C) Verschleissteile bis 80mm Dicke
31CrMoV9	800	1000–1200	Warmfeste Teile bis 100 mm Dicke

Tabelle (T017werZ) Nitrierstähle DIN 17211

3.2.6. Sonderstähle

Unter diese Bezeichnung fallen u.a. die Federstähle, die **warmfesten** Stähle und auch die korrosionsfesten Stähle.

3.2.7. Federstähle

Federstähle können unlegiert oder legiert sein. Sie besitzen einen relativ hohen C-Gehalt von 0.5–0.8%. Sie zeichnen sich durch hohe Dauerfestigkeit bei hoher Festigkeit aus (sehr hohe Streckgrenze). Bei Drahtfedern erzielt man dies durch gezogene und im Bleibad abgeschreckte Stahldrähte. Für Bandmaterial wird unlegierter bzw. legierter, gewalzter Stahl eingesetzt. Die Federstahldrähte werden in den Dimensionen 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 und 5.0mm handelsüblich angeboten.

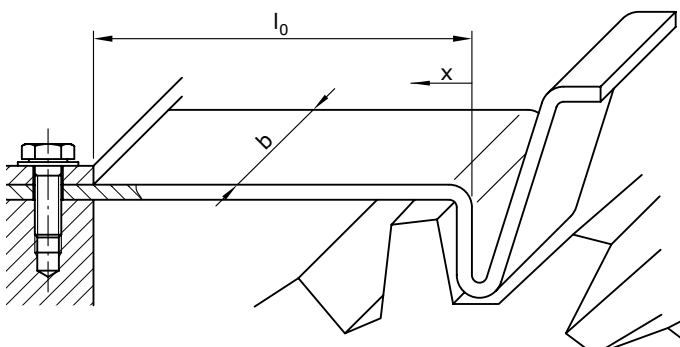


Bild (B201fedZ) Beispiel einer Blattfedergestaltung

Industrie-link: <http://www.baumann-federn.ch/>

Auswahl von Federstahldraht DIN 17223

- E-Modul = 206'000 N/mm²
- G-Modul = 81'500 N/mm²

Drahtsorte	Zugfestigkeit für Draht- durchmesser Ø 1–5*	Verwendungszweck, Belastung	
		statisch	dynamisch
A	1845–1355	gering	keine
B	2100–1555	mitte	gering
C	2400–1750	hoch	gering
D	2435–1750	hoch	mittel

Tabelle (T018werZ) Federstahldraht DIN 17223.

*höhere Werte für kleinere Durchmesser

Auswahl von gewalztem Federstahl vergütet DIN 17221

- E-Modul = 200'000 N/mm²
- G-Modul = 80'000 N/mm²

Bezeichnung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Verwendungszweck
38Si7	1030	1180–1370	Federplatte, grössere Querschnitte, Fahrzeugblattfedern
50CrV4	1175	1370–1620	Höchst beanspruchte Schrauben-, Teller- und Blattfedern

Tabelle (T019werZ) Gewalzter Federstahl vergütet DIN 17221

3.2.8. Rost- und säurebeständige Stähle

Abhängig von C-Gehalt und den Legierungsbestandteilen Cr (> 12%), Ni, Mo sind diese hochlegierten Stähle unterschiedlich resistent gegen Wasser (Rost), Wasserdampf, organische Säuren, etc.

Unterschieden werden:

- **Ferritische** Stähle, verwendet für Innenanwendungen wie z.B. Möbel (Bsp. X6Cr17)
- **Martensitische** Stähle mit höherem C-Gehalt und dadurch härter und hohe Festigkeit; verwendet im Maschinenbau z.B. für Messer (Bsp. X20Cr13)

- **Austenitische** Stähle mit zusätzlicher Ni-Beigabe. Diese Stähle sind unmagnetisch; vielfach bei Aussenanwendungen gebraucht (Bsp. X5CrNiMo17 12 2)

Abhängig vom C-Gehalt ($C < 0.15\%$) sind die Stähle gut schweisbar. Bei einigen Sorten kann in der Schweisszone **interkristalline Korrosion** auftreten.

Auswahl von rost- und säurebeständigen Stählen DIN 17440

Bezeichnung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Verwendungszweck
X12CrNi18 8	210	490–690	„V2A-Stahl“, härtbar, unmagnetisch, schwer zerspanbar
X8CrTi17	260	440–590	Nicht härtbar, für Behälterbau, schweisbar, keine interkristalline Korrosion
X6CrNiMo18 16 4	230	490–690	Kaltumformbar, gut schweisbar, schlecht zerspanbar, für Chemie- und Nahrungsmittelindustrie

Tabelle (T020werZ) Rost- und säurebeständige Stähle DIN 17440

Für höchste Beständigkeit gegen starke Säuren und Laugen verwendet man härtbare Ni-Legierungen (dies sind keine Stahlsorten), welche z.B. unter der Bezeichnung „**Monel-Metall**“ bekannt sind.

3.2.9. Warmfeste und hochwarmfeste (zunderbeständige) Stähle

Stähle, bei denen die thermische Beanspruchung eine grosse Rolle spielt, sind in jedem Fall legiert. Warmfeste Stähle erhalten Festigkeitswerte bis mindestens 550°C (unlegierte bis 400°C; niedriglegierte bis 550°C). Warmfeste, niedriglegierte Stähle sind bei C-Gehalt unter 0.2% mit Vorwärmung gut schweisbar und erhalten zwecks Erhöhung der Warmfestigkeit einige Zehntelprozent Molybdän und zur Verbesserung der **Zunderbeständigkeit** etwa bis 1.5% Chrom. Sie werden eingesetzt für Dampfkessel, Druckgefässe, Dampfleitungsrohre und andere Bauteile, die hohe Gebrauchstemperaturen haben.

Für Temperaturen ab 600°C und mehr ist eine ausreichend hohe Hitzebeständigkeit (Zunderbeständigkeit) erforderlich, da C-Stahl stark verzundert. Für diese Temperaturen kommen daher nur hochle-

gierte Stähle in Betracht. Hitzebeständige Stähle weisen auch eine Unempfindlichkeit gegen Temperaturwechsel und geringe Versprödungsneigung auf und sind für mechanisch wenig belastete Bauteile (geringe Warmfestigkeit) geeignet. Chrom ist das wichtigste, Zunderbeständigkeit begünstigende Legierungselement. Zusätzliche Gehalte an Al (CrAl-Typ) oder Si (CrSi-Typ) sind vorteilhaft. Diese ferritischen Stahlsorten sind schlecht schweisbar und schlecht kaltumformbar. Die austenitischen CrNiSi- und CrNiTi-Stähle sind bis 1200°C beständig, besser schweis- und kaltverformbar, aber auch wesentlich teurer.

Wird ausserdem bei hohen Temperaturen noch eine hohe Festigkeit verlangt, kommen neben hochlegierten Nickelstählen mit hohen Gehalten an Cr, Mo, Nb, Ta und Wolfram spezielle warmfeste Nicht-Stahl-Legierungen auf Nickel-Chrom-Basis in Frage. Bei der Gestaltung von Bauteilen aus derartigen Werkstoffen ist zu berücksichtigen, dass die Legierungen ausserordentlich schwierig zu zerspanen und zu **schmieden** sind (Ausweichvarianten sind **Präzisionsgussstücke**).

Auswahl von warmfesten Stählen

Bezeichnung	Verwendungszweck
15CrMo3	Dampfkessel, -Leitungen, Brennkammern
X8CrNiNb16 13	Gasturbinenschaufeln und -teile
CoNiCr-Legierung	dito

Tabelle (T021werZ) Warmfeste Stähle

3.2.10. Werkzeugstähle

Diese Stähle werden für den Bau von Werkzeugen eingesetzt. Sie besitzen einen C-Gehalt >0.4% und werden im weichen Zustand bearbeitet. Diese Stähle können legiert oder unlegiert sein.

Sie werden nach ihren Anwendungsbereichen eingeteilt in:

- **Kaltarbeitsstähle** (Schneid- und Umformwerkzeuge bis max. 200°C Einsatztemperatur),
- **Warmarbeitsstähle** (Druckgussformen, Schmiedegesenke, Umformwerkzeuge von 200–400°C) und
- **Schnellarbeitsstähle** (spanende Werkzeuge wie Bohrer, Drehmeissel bis 600°C).

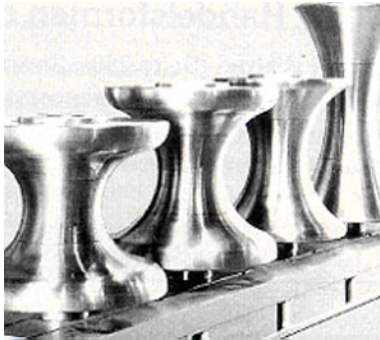


Bild (B901werZ) Anwendungsbeispiel für Kaltarbeitsstahl für Profilierrollen

Die Werkzeugstähle erhalten meist eine Wärmebehandlung durch Härten (Abschrecken in Wasser oder Öl) und Anlassen (Härte- und Anlasstemperaturen sind von Werkstoff abhängig).

Man unterscheidet die Werkzeugstähle gemäss ihrer Zusammensetzung in:

- Unlegierte Werkzeugstähle
 - C-Gehalt von 0.5–1.4%
 - in Wasser abgeschreckt
 - Härte ist bis maximal 5 mm Tiefe erzielbar, behält demnach einen weichen Kern.
 - für Kaltarbeitsstähle bis max. 200°C eingesetzt.
- Legierte Werkzeugstähle
 - C-Gehalt von 0.2–1.5%
 - in Öl abgeschreckt
 - Legierungselemente aus Cr, W, Mn, Mo und Ni ergeben eine Durchhärbarkeit
- Hochlegierte Werkzeugstähle
 - C-Gehalt bis max. 2.2%
 - Schnellarbeitsstähle werden aus diesen Materialien gefertigt

Auswahl von Werkzeugstählen DIN 17350

Bezeichnung	Härte HB	Verwendungszweck
C80W1	192	Handmeissel, Messer, Beile, Gesenke für flache Gravuren
100Cr6	223	Lehren, Dorne, Holzbearbeitungswerkzeuge, Stempel
X38CrMoV51	229	Gesenke, Druckgiessformen für Leichtmetalle, Strangpresswerkzeuge

Tabelle (T022werZ) Werkzeugstähle

Bemerkung: Für besonders hohe Schneidleistungen sind **Schneidmetalle** oder **Sinterhartmetalle** geeignet. Für die Auswahl sind Schneidhaltigkeit und Zähigkeit, Verschleisswiderstand und Warmhärte massgebend.

3.3. Handelsformen von Stahl

Stahl bezieht man als sogenanntes Halbzeug. Durch **Walzen**, Ziehen, **Strangpressen** werden unterschiedlichste genormte Formen angeboten, wie:

- Form-Profil (U-Profil, T-Profil, I-Profil),
- Stabmaterial (rechteckig und rund),
- Hohlprofile (rund und eckig),
- Bänder und Bleche, darunter auch Feinbleche (<0.5 mm) und
- Drähte (siehe Normenauszug).

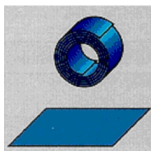


Bild (B902werZ) Blechmaterial

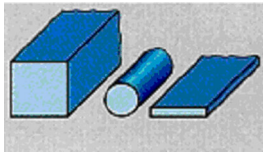


Bild (B903werZ) Stahlmaterial



Bild (B904werZ) Profilmaterial



Bild (B905werZ) Rohre, Hohlmaterial

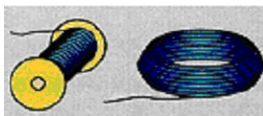


Bild (B906werZ) Draht

Welche Handelsformen von Stählen erhältlich sind, zeigen die Lieferantenkataloge.

Industrie-links zu verschiedenen Stahl-Lieferanten

- <http://www.thyssen.ch>
- <http://www.stahl.ch>
- <http://www.haeselmann.ch>
- <http://www.debrunner.ch>

4. Eisen-Gusswerkstoffe

Als Eisen-Gusswerkstoffe werden – im Gegensatz zu Stahl – jene Legierungen mit einem Kohlenstoffanteil von meist grösser als 2.1% bis max. 4.5% bezeichnet, welche für das Giess-Herstellverfahren geeignet sind.

Gusswerkstoffe sind recht kostengünstig, haben aber tiefere Festigkeitseigenschaften als Stahl. Das Gefüge als auch die Eigenschaften sind stark von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig.

Die Einteilung dieser Werkstoffe erfolgt in:

- Gusseisen mit **Lamellengraphit**, GG
- Gusseisen mit **Kugelgraphit**, GGG
- **Weisser Temperguss**, GTW
- **Schwarzer Temperguss**, GTS
- **Stahlguss**, GS

Viele der in den vorangehenden Kapitel aufgeführten Stahlsorten können auch vergossen werden. Im gegossenen Zustand werden diese Werkstoffe Stahlguss genannt ($C < 2.1\%$, identische Zusammensetzung wie die entsprechenden Stahlsorten). Zur Kennzeichnung erhält die erläuterte Stahlbezeichnung ein G vorangestellt (z.B. G20Mn6).



Bild (B056werZ) BMW X5 Scheibenbremsen

4.1. Gusseisen mit Lamellengraphit GG

Gusseisen mit Lamellengraphit zeichnet sich durch die Eigenschaften

- Dichte $\rho = 7.25 \text{ kg/dm}^3$ und
- E-Modul zwischen 40'-und $130'000 \text{ N/mm}^2$ aus.

Bei diesem Werkstoff ist der Kohlenstoff in Lamellenform ausgeschieden.

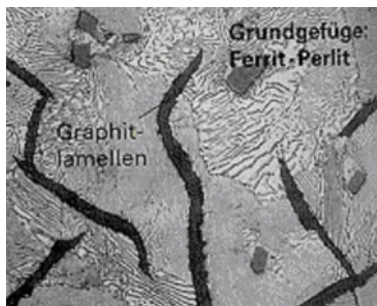


Bild (B907werZ) Gefügebild von Gusseisen mit Lamellengraphit (aus Fachkunde Metall)

Der GG ist der am meisten verwendete Eisen-Gusswerkstoff. Er zeichnet sich aus durch gute Giessbarkeit auch für komplexe Teile und gute Zerspanbarkeit. Umformen ist nicht möglich. Schweißen ist nicht oder nur mit besonderen Vorbereitungen und Wärmenachbehandlung bedingt möglich. Die ausgeschiedenen Lamellen ergeben weitere Eigenschaften wie gute Gleiteigenschaften und hohe Dämpfung von Schwingungen. Das Material ist im Vergleich zu Baustahl weniger korrosionsempfindlich. Die Lamellen wirken jedoch auch als innere Kerben und setzen damit die maximale Zugspannungen und die Wechselbelastbarkeit drastisch herab (Spröbruchverhalten). Die maximale Druckbelastung ist somit wesentlich (3–5 mal) höher. Durch die inneren Kerben sind Bauteile aus GG nicht auf Konstruktionskerben anfällig, jedoch schlagempfindlich.

Die Festigkeitswerte des GG sind stark von der Grösse der Lamellen und dem Gefüge abhängig. Beide Eigenschaften sind u.a. von der Abkühlungsgeschwindigkeit und diese vom Querschnitt der Bauteile abhängig.

Die Bezeichnung hat an erster Stelle ein GG, gefolgt von der Zugfestigkeitsangabe in kp/mm^2 , welche für einen Probekörper mit Durchmesser 30 mm gilt.

Das Gefüge ist für einen GG-10 ferritisch und wird gegen das obere Ende des GG-40 kontinuierlich **perlitisch** ausgeprägt.

Der E-Modul nimmt mit zunehmender Belastung ab. Die Einteilung erfolgt nach der Höhe der Zugfestigkeit (oder nach der Brinellhärte, was hier nicht gezeigt wird) und der Wert wird in kp/mm^2 hinter die Bezeichnung GG gestellt.

Auswahl von Gusseisen mit Lamellengraphit DIN 1691

Bezeichnung	Zugfestigkeit	E-Modul	Gefüge	Verwendung/ Bemerkungen
GG-10	100	40–70'000	Ferritisch	Gering beanspruchte Teile, Maschinenständer, Gehäuse
GG-20	200	80–100'000		Teile höherer Belastung, Gehäuse, Gleitbahnen, Kolben
GG-30	290	130'000	Perlitisch	Teile hoher Beanspruchung, dünnwandig
GG-40	390	130'000		Teile höchster Beanspruchung, dünnwandig (konstant!)

Tabelle (T024werZ) Gusseisen mit Lamellengraphit DIN 1691

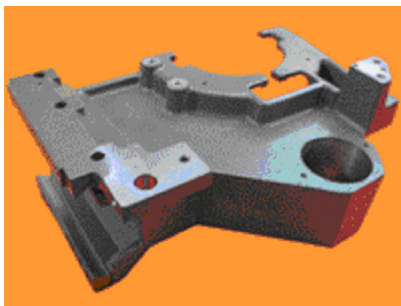
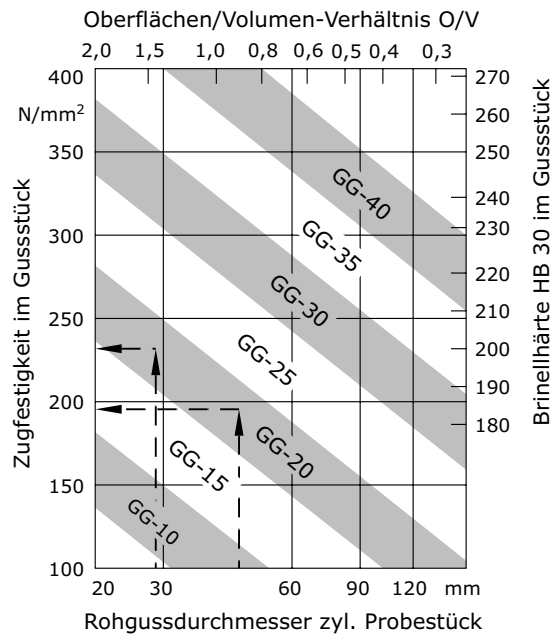


Bild (B908werZ) Anwendungsbeispiel eines GG-20

Die Festigkeiten sind, wie erwähnt, nicht nur vom Materialtyp, sondern auch von der Abkühlungsgeschwindigkeit abhängig. Zur Abschätzung der Zugfestigkeit, abhängig von der Wandstärke, verwendet man das folgende Diagramm:



Gussstücke mit einer Wanddicke:

um	um	um oder über
15 mm	30 mm	60 mm

Bild (B019werZ) Festigkeitsdiagramm für GG

4.2. Gusseisen mit Kugelgraphit GGG

Gusseisen mit Kugelgraphit zeichnet sich durch die Eigenschaften

- Dichte $\rho = 7.2 \text{ kg/dm}^3$ und
- E-Modul $E = 175'000 \text{ N/mm}^2$ aus.

Im Gegensatz zur lamellenförmigen Auslagerung wird hier der Kohlenstoff durch Zulegieren von Mg kugelförmig ausgeschieden. Damit ändern sich einige der Eigenschaften. Der E-Modul ist konstant. Die Verminderung der inneren Kerbwirkung erhöht bedeutend Festigkeitswerte (vor allem auf Zug) und Zähigkeit und hat somit eine höhere Wechselbelastbarkeit, senkt jedoch das **Dämpfungsverhalten**. Die Zerspanbarkeit von GGG ist gut, so dass auch eine Weiterverarbeitung inklusive Schweißen möglich ist. Gesamtheitlich kommt der GGG sehr nahe an die Werte von Stahlguss. Durch Vergüten (im

Gegensatz zu GG möglich) können die Festigkeitswerte nochmals gesteigert werden. Im Vergleich zu GG leicht erhöhter Korrosionswiderstand. Eingesetzt wird GGG als Alternative zu Stahlguss bei vorwiegend schwingend belasteten Teilen.

Auswahl von Gusseisen mit Kugelgraphit DIN 1693 (Sphäroguss)

Bezeichnung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Verwendung
GGG 40	250	400	Gehäuse
GGG 50	320	500	Fittings, Pleuelstangen
GGG 70	440	700	Zahnräder, Ketten, Kurbelwellen

Tabelle (T025werZ) Gusseisen mit Kugelgraphit DIN 1693 (Sphäroguss)

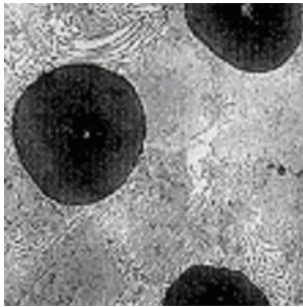


Bild (B909werZ) Gefügebild von Gusseisen mit Kugelgraphit (aus Fachkunde Metall)

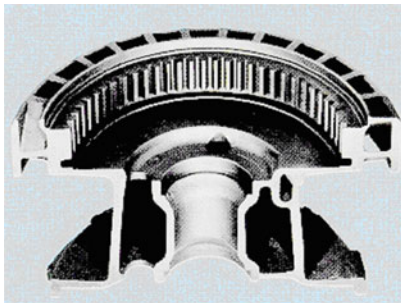


Bild (B910werZ) Anwendungsbeispiel eines GG20

4.3. Temperguss GT

Temperguss zeichnet sich durch die Eigenschaften

- Dichte $\rho = 7.4 \text{ kg/dm}^3$ und
- E-Modul $E = 170'000 \text{ N/mm}^2$ aus.

Beim Erstarren wird der Graphit vorerst nicht ausgeschieden. Nach dem Giessen werden Tempergussteile einem Glühprozess (**Tempern**) unterzogen. Weisser Temperguss entsteht in entkohlender Glühatmosphäre. Schwarzer Temperguss in neutraler Atmosphäre. Temperguss ist weniger verschleissfest als GG, jedoch gut giessbar und bearbeitbar und vergleichsweise zäher als GG.

Weisser Temperguss GTW

Die Bauteile werden in entkohlender (oxidierender) Atmosphäre bei rund 1050°C 50–80 h geblüht und dabei die Oberfläche bis zu einer Tiefe von 5 mm entkohlt. Die Randzone ist danach ferritisch und hat ein weisses Aussehen. Im Inneren wird Temperkohle ausgeschieden und das Gefüge ist perlitisch. Durch die Randentkohlung lässt sich GTW auch einsatzhärten. Schweißen ist bei einigen Sorten und eingeschränkter Wandstärke möglich. GTW wird für kleinere Teile (max. 1 kg) und konstante Wandstärken verwendet. Die Festigkeitswerte sind stark von der Wandstärke abhängig und relativ zu GG erhält man höhere Werte.

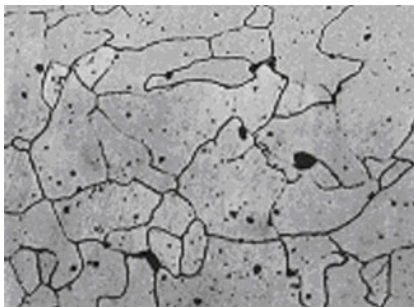


Bild (B911werZ) Gefügebild von weissem Temperguss in der Randzone

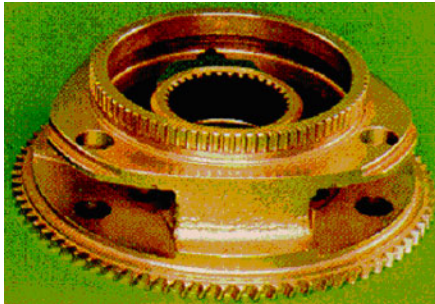


Bild (B912werZ) Anwendungsbeispiel eines Planetenträgerades für PKW aus GTS-45

Schwarzer Temperguss GTS

Die Bauteile werden rund 30h in neutraler Atmosphäre (rund 950°C) geglüht. Dabei scheidet sich der Kohlenstoff flockig und homogen über den Querschnitt aus. Daraus resultiert ein dunkles Aussehen.

Der GTS ist auch für schwerere Teile geeignet und toleriert auch weniger identische Wandstärken. GTS ist weder schweis- noch lötbare und nicht für höhere Temperaturen geeignet, jedoch vergütbar (Abschrecken und Anlassen).

Auswahl von Temperguss DIN 1692

Bezeichnung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Verwendung
GTW-40	220	400	Teile bis 1 kg, Hebel, Kettenglieder, Beschläge, Bremstrommel, Schaltgabel, Fittings, Ventilgehäuse, Schlüssel
GTS-70	530	700	Getriebegehäuse, Bremstrommeln, Kardongabeln, Planetenträger, Kupplungsteile, Achsengehäuse

Tabelle (T026werZ) Temperguss DIN 1692

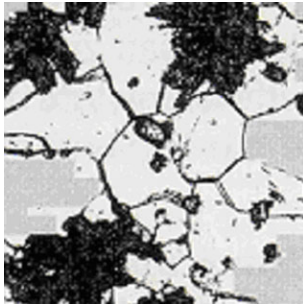


Bild (B913werZ) Gefügebild von schwarzem Temperguss (aus Fachkunde Metall)

4.4. Stahlguss

Für höchst beanspruchte Formteile, wo infolge stoss-, schlagartiger oder wechselnder Belastung ein Werkstoff mit hoher Zähigkeit und Festigkeit erforderlich ist, wird Stahlguss verwendet. Stahlguss ist jedoch schwieriger zu giessen (beachte 2–3% Schwindmass, Lunkerbildung, Gussspannungen, Warmrissigkeit, rauhe Oberfläche) und ist teurer. Die Eigenschaften entsprechen jenen der Stahlsorten, er lässt sich somit **normalglühen**, einsatzhärten, vergüten und oberflächenbehandeln und damit dem jeweiligen Verwendungszweck anpassen. Sehr vorteilhaft ist die gute Schweissbarkeit von Stahlguss mit $C < 0.15\%$ gegenüber den erwähnten Gusswerkstoffen. Die Anwendungsmöglichkeiten des unlegierten Stahlgusses erweitern sich durch Zulegieren von Cr, Ni, Mo, Si, Mn u.a.

Zu beachten ist, dass die Festigkeitswerte meist richtungsabhängig sind. Infolge des hohen Schwindmasses (2%) ist auf richtige Gestaltung der Bauteile besonders zu achten. Stahlguss wird eingesetzt, wenn die Festigkeitseigenschaften der Guss-Eisenwerkstoffe nicht ausreichen, bzw. wo die komplexe Gestalt oder das Material eine vollständige spanende Bearbeitung nicht zulässt.

Auswahl von Stahlguss

Bezeichnung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Verwendung
GS-52	260	520	Teile mittlerer bis hoher Beanspruchung: Ventilgehäuse, Radsterne, Bremsstrommel, Bolzen, Kettenräder
G-X8CrNi12	355	540–690	Verwendung bis 500°C (warmfest): hochwarmfeste Pumpengehäuse, Ventile, Heissdampfarmaturen, Pumpen
G-X6CrNiMo18 10	185	440–640	Korrosions- & säurebeständige Teile: Pumpen für Säuren, Nahrungsmittelindustrie

Tabelle (T027werZ) Stahlguss

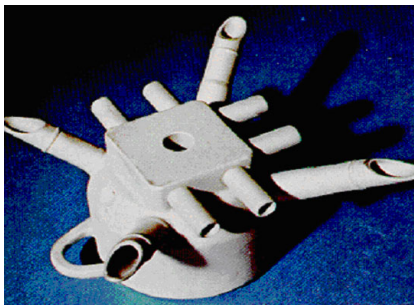


Bild (B914werZ) Anwendungsbeispiel aus G-X7CrNiNb18 9 für Ansaugstutzen einer Melkmaschine

5. Nichteisenmetalle NE

Als Nichteisenmetalle werden jene Werkstoffe klassifiziert, welche weniger als 50% Fe-Anteil besitzen. Entsprechend der Dichte unterteilt man die Nichteisenmetalle

- in Leichtmetalle und Leichtmetall-Legierungen mit $\rho \leq 5 \text{ kg/dm}^3$ und
- in Schwermetalle und -Legierungen mit $\rho > 5 \text{ kg/dm}^3$.

5.1. Einteilung der NE-Metall-Legierungen

Die Legierungen der NE-Metalle unterteilt man in Guss- und Knetlegierungen:

- **Gusslegierungen:** für die Nutzung zum Giessen
- **Knetlegierungen:** für die Nutzung als Halbzeuge wie Stangen, Profile, Bänder und weitere Umformung oder spanende Bearbeitung

5.2. Bezeichnung

Unlegierte Metalle werden durch das chemische Symbol und den Gewichtsanteil in % (Reinheit) bezeichnet. Pb 99.99 bedeutet beispielsweise Feinblei mit 99.99% Pb.

Bei Legierungen werden die chemischen Symbole der Haupt- und Nebenbestandteile aufgeführt, wobei der Hauptbestandteil immer zuerst genannt wird. Zur genaueren Kennzeichnung kann noch ein Kennbuchstaben vorangestellt werden. Dieser gibt Auskunft über Herstellung und Verwendungszweck.

Kennbuchstaben		Kennzeichen für die Zusammensetzung			
		Chemische Symbole		Kennzahlen des Gehalts in Gewichtsprozenten	
G-	Guss	Al	Aluminium	Mg3	3% Magnesium
GD-	Druckguss	Cu	Kupfer	Sn25	25% Zinn
GK-	Kokillenguss	Pb	Blei		
GZ-	Schleuderguss	Zn	Zink		
GC-	Strangguss	Sn	Zinn		
Gl-	Gleitmaterial				
Lg-	Lagermaterial				

Tabelle (T028werZ) Bezeichnung Nichteisenmetalle

Beispiel: GD-Zn Al4 Cu1 bedeutet, dass es sich hier um eine Zinklegierung handelt mit 4% Aluminium und 1% Kupfer. Ausserdem erfährt man durch den Kennbuchstaben, dass sie im **Druckgussverfahren** hergestellt wurde.

5.3. NE-Schwermetalle – Kupfer und Kupfer-Legierungen

Cu und Cu-Legierungen besitzen besonders begehrte Eigenschaften wie hohen Korrosionswiderstand gegen Feuchtigkeit, Heisswasser und verschiedene Säuren, gute Lötbarkeit, gute Gleit- und Festigkeitseigenschaften, hohe elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeitseigenschaften. Sie bieten vielseitige Fertigungsmöglichkeiten wie Giessen und Umformen (Kaltverformung) und lassen sich gut spanend bearbeiten (lange Späne). Rein-Kupfer hat folgende Eigenschaften:

- Dichte $\rho = 8.93 \text{ kg/dm}^3$
- E-Modul $E = 120'000 \text{ N/mm}^2$.

Reines Kupfer wird vor allem in der Elektrotechnik und für Wärmeübertragung im Apparatebau eingesetzt. Gusskupfer neigt wegen hoher Schwindung zu Schwindrissen. Vorsicht geboten ist beim Schweißen von Cu unter reduzierender Atmosphäre. Sauerstoff, welcher an Cu gebunden ist, verbindet sich mit Wasserstoff. Der dadurch entstehende Dampf sprengt das Gefüge (**Wasserstoffkrankheit**). Besonders zu erwähnen sind Cu-Be-Legierungen (Be = Beryllium), wel-

che Zugfestigkeiten über 1000 N/mm^2 erhalten (z.B. für Schweisseelektroden).



Bild (B057werZ) Brennglocke

5.3.1. Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)

Als **Messing** bezeichnet man Cu-Zn-Legierungen mit $\text{Zn} < 45\%$. Besondere Eigenschaften sind die goldene Farbe für dekorative als auch technische Anwendung, die Korrosionsbeständigkeit, die Giessbarkeit, die ausgezeichnete Zerspanbarkeit und die Warm- und Kaltumformbarkeit. Die Festigkeitswerte sind von weiteren Legierungsbestandteilen abhängig. Messing besitzt ausserdem gute Schweiss- und Lötbarkeit.

Der Einfluss weiterer Legierungsbestandteile

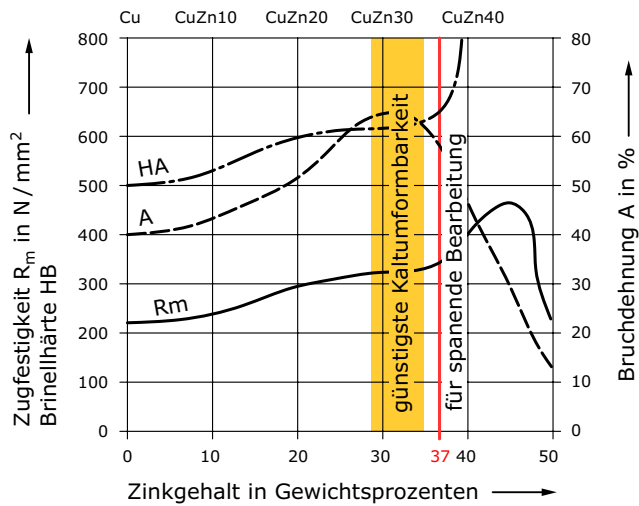
Ni	Erhöhung der Festigkeit und Härte sowie Korrosionsbeständigkeit und Warmfestigkeit
Al	identisch wie Ni, zusätzliche Erhöhung der Zunderbeständigkeit
Mn, Sn	Erhöhung der Warmfestigkeit sowie der Seewasserbeständigkeit
Si	Erhöhter Verschleisswiderstand
Pb	Bessere Zerspanbarkeit (Automatenlegierung)

Tabelle (T029werZ) Einfluss weiterer Legierungsbestandteile

Unterteilung der Messing-Sorten

- α -Messing mit $\text{Zn} < 37\%$ für die günstige Kaltumformbarkeit (hohe Bruchdehnung) und

- α - β -Messing mit $37\% < \text{Zn} < 46\%$ für die gute Bearbeitbarkeit (Pb-Zusatz für kürzere Späne).



Bild(B004werZ) Einfluss des Zinkhaltes auf die Bruchdehnung (A) und die Härte (HB) sowie Bruchfestigkeit (R_m)

Auswahl von Cu-Zn-Legierungen DIN 17660

Bezeichnung	Streckgrenze $\varnothing \leq 40$ mm	Zugfestigkeit	Verwendungszweck
CuZn30	230	350	Tiefziehteile, Federelemente
CuZn31Si	200	440	Lagerbuchsen, Führungen
CuZn40Pb2	250	430	Warmpressteile, Drehteile (Automatenmessing)

Tabelle (T030werZ) Cu-Zn-Legierungen DIN 17660



Bild (B915werZ) Anwendungsbeispiel für Messing in der Armaturentechnik (Gressel AG)

5.4. NE-Schwermetalle – Bronzen

Bronzen sind Cu-Legierungen mit $\text{Cu} > 60\%$, wobei das Hauptlegierungselement nicht Zn ist. Am bekanntesten ist die Zinn-Bronze (häufig nur Bronze genannt).

5.4.1. Zinn-Bronze

Die Eigenschaften der Sn-Bronze ($\text{Sn} < 13\%$) sind gute Festigkeitswerte und Härte bei guter **Duktilität**, sowie ausgezeichnete Gleiteigenschaften. Lagerschalen werden vielfach aus Cu-Sn-Legierungen gefertigt.

Die Festigkeiten sind im weichen Zustand mässig, durch Kaltverformung sehr hoch und für Federn geeignet. Die Fertigungsverfahren wie umformen, spanen und giessen, sowie bedingt schweissen sind möglich.

Blei löst sich in der Legierung nicht auf und bildet Auslagerungen. Diese bewirken ausgezeichnete Notlaufeigenschaften. Dadurch, dass die Festigkeiten tief sind, werden die Bronze-Schichten häufig als Verbundteil auf ein Trägermaterial aufgebracht.

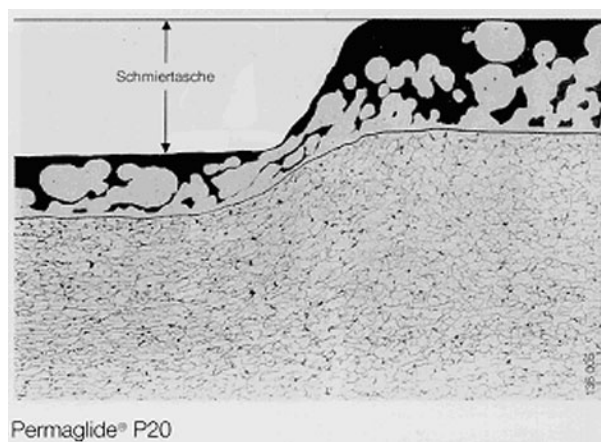


Bild (B916werZ) Zinnbronze auf Stahlrücken (mit Auslagerungen von Blei)

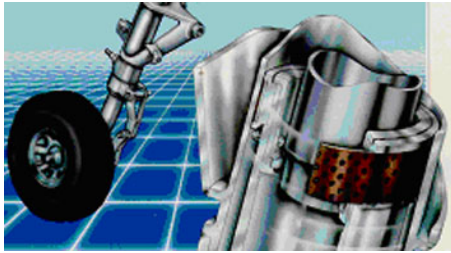


Bild (B917werZ) Cu-Sn-Lager in Radaufhängung eines Flugzeuges



Bild (B058werZ) Selbstschmierende Sinterbüchsen aus Bronze (Looser), Métafram

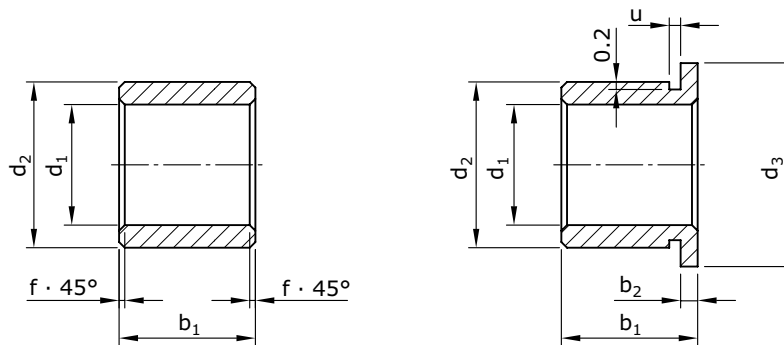


Bild (B918werZ) genormte Lagerschalen

Sn-Bronze kann als Knetlegierung mit $\text{Sn} < 8.5\%$ oder als Gusslegierung mit $\text{Sn} < 14\%$ eingesetzt werden.

5.4.2. Aluminium-Bronze

Al-Bronzen haben sehr hohe Festigkeitswerte von über 800 N/mm^2 (σ_B) und hohe Warmfestigkeit, Zunderbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Die Kaltumformbarkeit und Zerspanbarkeit ist jedoch schwierig, so dass vor allem das Giessverfahren eingesetzt wird. Diese Eigenschaften machen die Cu-Al-Legierungen besonders geeignet für mechanisch als auch chemisch beanspruchte Teile (z. B. Armaturen in der chemischen Industrie) sowie z. B. für Schiffsschrauben (G-CuAl18Mn).

Auswahl von Bronzen DIN 17662, DIN 17672

Bezeichnung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Verwendungszweck
CuSn8	340 (< 12mm)	470–550	Gleitlager, Schneckenräder
CuAl10Fe3Mn2	340 (< 50mm)	690	Korrosionsbeständig, verschleissfest, zunderbeständig Bolzen, Schrauben, Wellen, Zahnräder, Gleitsteine, Ventil-sitze

Tabelle (T031werZ) Bronzen DIN 17662, DIN 17672

5.4.3. Weitere Schwermetalle und Schwermetall-Legierungen

Für verschiedenste Anwendungszwecke existieren eine breite Palette von weiteren Werkstoffen mit speziellen Eigenschaften.

In loser Aufzählung sind dies:

- Zink und Zinklegierungen
- Blei und Bleilegierungen
- Zinn und Zinnlegierungen
- Nickel und Nickellegierung

Zink und Zinklegierungen

- $\rho = 7.1 \text{ kg/dm}^3$

Meistens eingesetzt als Korrosionsschutz auf Stahl (verzinken) oder für Druckgussteile (Zink-Druckguss). Damit lassen sich feingliedrige Teile hoher Genauigkeit und Festigkeit ($< 270 \text{ N/mm}^2$) herstellen.

Achtung: Zink ist giftig!

Blei und Bleilegierungen

- $\rho = 11.3 \text{ kg/dm}^3$
- $\sigma_B \geq 20 \text{ N/mm}^2$

Diese Werkstoffe sind gegen viele Chemikalien widerstandsfähig und als besondere Eigenschaft absorbieren sie Röntgen- und radioaktive Strahlen. Blei ist zudem auch ein guter Strom- und Wärmeleiter.

Zinn und Zinnlegierungen

- $\rho = 7.3 \text{ kg/dm}^3$

Finden in der Technik meist nur als Lote und als Überzug auf Stahlbleche (Konservendosen) Verwendung. Diese Bleche nennt man **Weissbleche**.

Nickel und Nickellegierung:

- $\rho = 8.9 \text{ kg/dm}^3$

Als reines Metall wird Nickel für **galvanische** Überzüge (vernickeln) eingesetzt.

Die wichtigsten Legierungen sind:

- Ni-Be: für Federn und Membrane infolge hoher Festigkeit und Elastizität.
- Ni-Cu-Fe: „Monel“-Metall für höchste Beständigkeit gegen Säuren- und Laugen.
- Ni-Cr-Mo: höchste Festigkeiten bei hohen Temperaturen.

5.5. Leichtmetalle

Unter den Leichtmetallen finden wir die wichtige Gruppe Aluminium und Aluminiumlegierungen, Magnesium und Magnesiumlegierungen sowie das High-Tech-Metall Titan.

5.5.1. Aluminium und Aluminiumlegierungen

Aluminium und Al-Legierungen zeichnen sich durch die Eigenschaften

- Dichte $\rho = 2.7 \text{ kg/dm}^3$ und
- E-Modul $E = 70'000 \text{ N/mm}^2$ aus.

Neben Stahl und Kunststoff ist Aluminium einer der verbreitetsten Werkstoffe. Dies verdankt er seinen ausserordentlichen Eigenschaften, wie z.B. dem geringen Gewicht, den vergleichsweise guten Festigkeiten, der Korrosionsbeständigkeit (Al überzieht sich mit einer stabilen, festen Oxidschicht), der guten Giessbarkeit, der Umformbarkeit, der spanenden Bearbeitbarkeit als auch der teilweise guten Schweissbarkeit. Aluminium benötigt als Primäraluminium grosse Energiemengen (16'000 kWh pro Tonne). Ein grosser Teil des Al wird jedoch aus Recycling-Al hergestellt und benötigt dabei viel weniger Energie. Die Nachteile sind in der geringen Warmfestigkeit und auch im kleinen E-Modul zu suchen. Der hohe Preis des Materials muss immer gesamtheitlich (Material, Fertigung und spätere Benutzungskosten) mit dem kostengünstigeren Stahl verglichen werden.

Reinaluminium

Reinaluminium wird vor allem gewalzt, gepresst oder gezogen in Form von Vollstangen, Rohren, Blechen, Bändern, Drähten und Folien geliefert. Je reiner die Qualität, desto mehr sinkt die Festigkeit.

Reinaluminium wird durch das Kurzzeichen Al gekennzeichnet, gefolgt von der Reinheit in Prozenten, z.B. Al99.5. Es können drei Qualitäten bezogen werden: weiches, halbhartes und hartes Reinaluminium.

Geglühtes Al ist plastisch weich und damit **tiefziehfähig**. Es erhält aber durch Kaltverformung eine beachtliche Festigkeit, die schon bei 100°C erheblich abfällt, bei Kälte dagegen meist etwas zunimmt. Ebenso nimmt die Zähigkeit bei tiefen Temperaturen zu. Al ist nicht magnetisch, hat eine vorzügliche elektrische Leitfähigkeit (60% von Cu), leitet ebenso Wärme (56% von Cu), reflektiert Wärme und Licht, ist schweisssbar aber schwierig lötlbar (Oxidhaut).

Korrosion

Im Gegensatz zu Stahl rostet Aluminium nicht, da es sich mit einer dünnen Oxidschicht überzieht. Al ist beständig gegen reines Wasser, verdünnte Phosphorsäure, konzentrierte Salpetersäure, Schwefeldioxid und viele Stickstoffverbindungen, aber unbeständig gegen Seewasser, anorganische Säuren, Soda, Mörtel und Beton. An Verbindungsstellen mit anderen Metallen ist Al gegen elektrolytisches **Anfressen** durch Schutzanstrich oder sonstige Isolation zu schützen (elektrolytische Korrosion). Al kann **plattiert** und farblos als auch farbig **eloxiert** (elektrisch **oxidiert**) werden.

Al-Knetlegierung

Grundsätzlich tragen Legierungsbestandteile zur Festigkeitssteigerung bei. Es gibt aber auch andere Einflüsse von Legierungszusätzen. Eisen macht Aluminium hart und spröde; Blei macht es blasig, aber besser zerspanbar; Kupfer erhöht die Härte; Magnesium die Festigkeit, Zerspanbarkeit und Korrosionsbeständigkeit; Antimon und Titan die Beständigkeit gegen Seewasser; Mangan die Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Besonders bemerkenswert ist die „**Aushärtbarkeit**“ durch Zusatz von Si, Mg oder Ni.

Die Al-Knetlegierungen können gewalzt, gezogen, gepresst, geschmiedet und geschweisst werden. Die wichtigsten sind:

- Al-Cu-Mg-Legierungen mit besonders hoher Festigkeit, guter Zerspanbarkeit, aber geringerem Korrosionswiderstand

- Al-Mg-Si-Legierungen mit hohem Korrosionswiderstand und vorzüglicher elektrischer Leitfähigkeit
- Al-Mg-Legierungen mit hoher Festigkeit und erheblicher Korrosionsbeständigkeit (auch gegen Seewasser und Alkalien)
- Al-Mg-Mn-Legierungen ebenfalls Seewasser beständig, jedoch warmfester und tiefziehfähiger bei etwas geringerer Festigkeit
- Al-Mn-Legierungen, extrem korrosionsfest, besonders in der chemischen und Nahrungsmittel-Industrie verwendet

Die Aufzählung zeigt, dass unterschiedlichste Eigenschaften aus den Legierungskombinationen entstehen.



Bild (B919werZ) Dosen aus Al-Knetlegierungen gefertigt (Tiefziehverfahren)

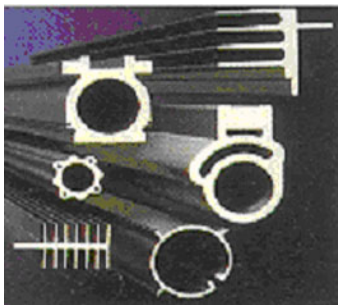


Bild (B920werZ) Kundenspezifische Profile aus Al-Knetlegierungen gefertigt (Strangpressverfahren)

Al-Gusslegierungen

Al-Gusslegierungen können in **Kokillen-** oder **Sandform** vergossen werden oder aber mittels Druckgiess- bzw. **Schleudergiessverfahren** hergestellt werden (siehe auch **Fertigungsverfahren – Druckgiessen** und **Fertigungsverfahren – Schleudergiessen**).

Die Auswahl erfolgt nach Gieseigenschaften (**Formfüllungsvermögen** und **Schwindmass**), nach Festigkeit und sonstigen Eigenschaften. Cu erhöht dabei die Festigkeitswerte, Si die Giessbarkeit (senkt die Schmelztemperatur) und die Festigkeitswerte, Mg senkt die Giessbarkeit, erhöht jedoch die Korrosionsbeständigkeit und die Warmfestigkeit. Druckgussteile erfordern wenig Nachbearbeitung, da sie sehr massgenau sind. Auch die Oberflächengüte ist sehr hoch. Schweißen ist bei Gusslegierungen nur bei einzelnen Zusammensetzungen möglich.

Aushärten von Aluminiumlegierungen

Bei Guss- oder Knetlegierungen, welche mit Cu, Zn, Mg oder Si legiert sind, kann die Festigkeit durch einen Aushärtungsprozess markant erhöht werden. Der Prozess gliedert sich in **Lösungsglühen** bei rund 500°C und anschliessendem Abschrecken in Wasser oder Öl. Beim folgenden Auslagern scheiden sich die Legierungsbestandteile aus dem übersättigten Kristall aus und die Festigkeit als auch Härten werden gesteigert.

Es wird unterschieden in **Kaltauslagern** bei Raumtemperatur (rund eine Woche) bzw. **Warmauslagern** bei rund 150°C (einige Stunden). Umformprozesse müssen unmittelbar nach dem Abschrecken im noch weichen Zustand erfolgen.

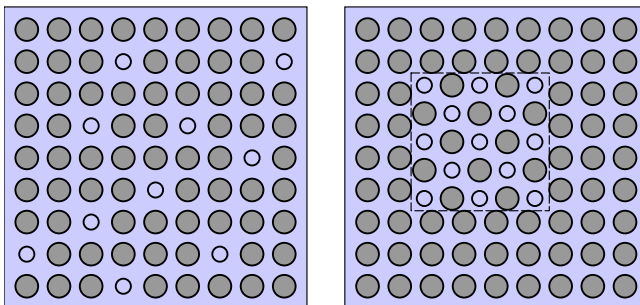


Bild (B005werZ) Gitterzustand im übersättigten Zustand direkt nach dem Abschrecken (links) und nach dem Auslagerungszustand (rechts).

Schweissen von Al und Al-Legierungen

Schweissoperationen erniedrigen die erzielte Festigkeitssteigerung durch Aushärten wieder. Al und Al-Legierungen sind unter Schutzgas schweisssbar, verlieren aber die Festigkeitswerte, welche sie durch das Kaltverfestigen bzw. durch den Aushärtungsvorgang erlangt haben. Aushärtbare Legierungen können nachträglich wieder wärmebehandelt werden (Al Zn4.5Mg1 härtet selbständig wieder aus).

Eloxieren

Durch Eloxieren werden elektrochemisch sehr beständige Oxidschichten erzielt (Eintauchen in z.B. Schwefelsäure, wobei die Teile am Pluspol einer Gleichstrom-Spannungsquelle angeschlossen sind). Die Oberfläche kann dabei eingefärbt werden (die Oxidschicht ist zuerst offenporig und die Farbpartikel können eingelagert werden). Ein anschliessendes Eintauchen in heisses Wasser schliesst die Poren zu.

Auswahl von Al und Al-Legierungen

Bezeichnung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Verwendungszweck / Eigenschaften
Al99	80 ($\varnothing < 18$)	110	sehr weiche Teile, lötbar, schweisbar, korrosionsbeständig, nicht aushärtbar
AlMg1	90 ($\varnothing < 35$)	140	witterungsbeständig, umformbar, nicht aushärtbar, Karosserieteile
AlMgSi1	200 ($\varnothing < 60$)	275	warmaushärtbar, korrosionsbeständig, schweisbar, mittlere Beanspruchung
AlCuMg2	310 ($\varnothing < 50$)	440	kaltausgehärtet, mittlere chem. Beständigkeit, hohe Festigkeit
G-AlSi12	70–100	150–200	Gut giessbar, witterungsbeständig, gut spanend bearbeitbar, schweisbar
G-AlSi10Mg	100–260	220–320	hohe Festigkeitswerte durch Warmaushärten erreichbar, Motorengehäuse, gut schweisbar und spanend bearbeitbar.

Tabelle (T032werZ) Al und Al-Legierungen

5.5.2. Magnesium und Magnesium-Legierungen (Knetlegierungen DIN 9715, Gusslegierungen DIN 1729)

Magnesium und Mg-Legierungen zeichnen sich durch die Eigenschaften

- Dichte $\rho = 1.8 \text{ kg/dm}^3$ und
- E-Modul $E = 43'000 \text{ N/mm}^2$ aus.

Reinmagnesium wird nicht als Konstruktionswerkstoff eingesetzt. Durch Zulegieren von Al und Zn erhöht man die sonst tiefe Festigkeit markant und durch Zulegieren von Mn erhöht man die Korrosionsbeständigkeit.

Die Vorteile von Mg-Legierungen sind die nochmals tiefere Dichte als Al bei gleichzeitig guter Festigkeit (jedoch geringer als Al). Durch Optimierung der Gestalt (Gestaltungsfestigkeit) lassen sich sehr steife und leichte dünnwandige Strukturen herstellen.

Mg-Legierungen sind gut zerspanbar (Achtung: Mg-Späne können entflammen), nicht löt- und nur bedingt schweisbar und nicht kaltumformbar. Der vergleichsweise niedrige E-Modul macht Bauteile unempfindlich gegen Schläge und wirkt geräuschmindernd. Die Wär-

meleitfähigkeit ist gering, 5% von Cu, und die elektrische Leitfähigkeit beträgt 40% von Cu. Im Vergleich zu Al sind Mg-Legierungen korrosionsempfindlicher, vor allem die Kontaktkorrosion muss beachtet werden.

Magnesiumlegierungen werden vielfach als Druckgusswerkstoff mit dünnen Wandstärken eingesetzt. Auch Mg überzieht sich mit einer Oxidschicht, welche resistent gegen viele Einflüsse ist. Vielfach wird jedoch die Aussenschicht noch mit **Beizen** oder Lackieren geschützt, denn die Kontaktkorrosion mit benachbarten Bauteilen unterschiedlichen Materials ist gross.

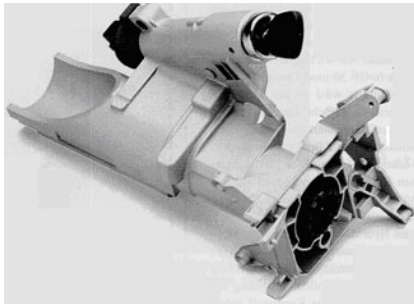


Bild (B921werZ) Türschloss von Pkw aus Mg-Gusslegierung

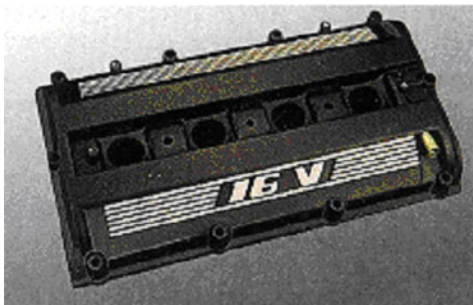


Bild (B922werZ) Gehäuseteil eines Motors

Auswahl von Mg-Legierungen DIN 1729

Bezeichnung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Verwendungszweck/ Eigenschaften
GD-MgAl9Zn1	150–170	200–250	Hohe Festigkeit, gute Gleiteigenschaften, schweisbar, häufig verwendete Druckgusslegierung

Tabelle (T033werZ) Mg-Legierungen DIN 1729

5.5.3. Titan und Titanlegierungen

Titan und Ti-Legierungen zeichnen sich durch die Eigenschaften

- Dichte $\rho = 4.53 \text{ kg/dm}^3$
- E-Modul $E = 110'000 \text{ N/mm}^2$ aus.

Titanwerkstoffe sind leicht, warmfest und haben hohe Dauerfestigkeit (bis maximal 500°C), sind tieftemperatur-tauglich und äusserst korrosionsbeständig. Ti-Legierungen sind schlechte Wärmeleiter und haben Festigkeitswerte bis 1300 N/mm^2 (Ti V13Cr11Al3). Infolge des sehr hohen Preises (ca. 25 mal so teuer wie Al) sowie der schwierigen Zerspanbarkeit (Späne brennbar) finden sie nur dort Verwendung, wo die speziellen Eigenschaften genutzt werden können, z.B. in der Luft- und Raumfahrt.

Titan ist unedel und überzieht sich mit einer äusserst resistenten Schutzschicht (auch gegen aggressive Chemikalien). Damit ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten in:

- Behälterbau und Säureherstellung in chemischer Industrie
- Schiffsbau

Titanlegierungen sind unter Schutzgas schweisbar, auch Lötten ist möglich.

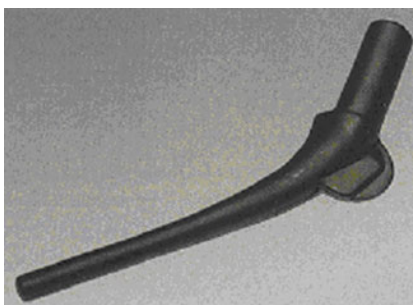


Bild (B923werZ) Hüftknochenprothese aus Ti Al6V4

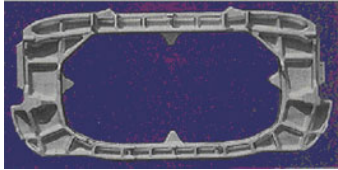


Bild (B924werZ) Flugzeugspant aus Ti Al4Mo2Sn

Auswahl von Titanlegierungen DIN 17851

Bezeichnung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Verwendungszweck / Eigenschaften
Ti Al5Sn2.5	770	810	Kompressorschaukel, Fahrgestelle, Spanten, Antenne

Tabelle (T034werZ) Titanlegierungen DIN 1785

6. Plastwerkstoffe

Einleitung, Gliederung

Eine grosse Bedeutung im Materialspektrum haben Plaste, vor allem für Serienprodukte wie Haushaltsapparate, Büromaterial, Autos usw. Sie sind in diesen Anwendungen nicht mehr wegzudenken.

Die Herstellung von Kunststoffen erfolgt basierend auf den Vorprodukten aus den Elementen C, H, O, N, Cl, S, F, den sogenannten Monomeren, wie z.B. C_2H_4 . Diese Monomere werden durch **Polymerisation**, **Polykondensation** oder **Polyaddition** zu langen, fadenförmigen Kettenmolekülen ($10^{-6} - 10^{-3}$ mm), zu sogenannten **Polymeren** verknüpft.

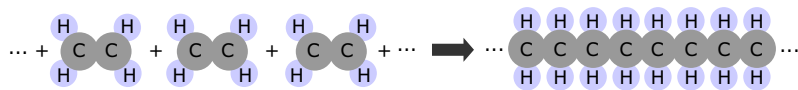


Bild (B006werZ) Polymerisation von Ethylen zu fadenartigen Makromolekülen Polyethylen.

Entsprechend dem inneren Aufbau der Kunststoffe erfolgen Unterscheidungen in die 3 Hauptgruppen:

- **Thermoplaste**
- **Duroplaste**
- **Elastomere**

Thermoplaste

Die Polymere haben keine chemischen Vernetzungsstellen, sind jedoch ineinander verschlungen. Falls die Polymere teilweise oder ganz ausgerichtet sind, nennt man diese Untergruppe kristalline bzw. **teilkristalline Thermoplaste** und bei **isotroper** Anordnung **amorphe Thermoplaste**. Thermoplaste haben eine starke Temperaturabhängigkeit. Bei erhöhter Temperatur werden sie elastisch bis teigig flüssig. Bei der Abkühlung nehmen sie die ursprüngliche Festigkeit wieder ein. Diese Plaste sind somit schweisbar und umformbar.

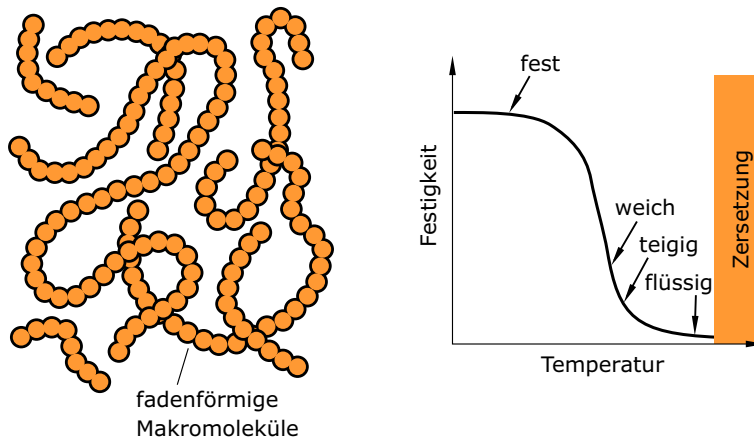


Bild (B008werZ) Vernetzung der Duroplaste und Temperaturverhalten (Fachkunde Metall)

Duroplaste

Die Polymere sind engmaschig, dreidimensional chemisch verbunden. Diese Plaste bleiben unter Wärmeeinfluss formbeständig und verändern die mechanischen Eigenschaften nur gering.

Bei Erwärmung oberhalb der Zersetzungstemperatur zerfällt der Duroplast ohne vorher zu erweichen. Ein Duroplast ist somit nicht schmelzbar und dadurch weder schweisssbar noch umformbar.

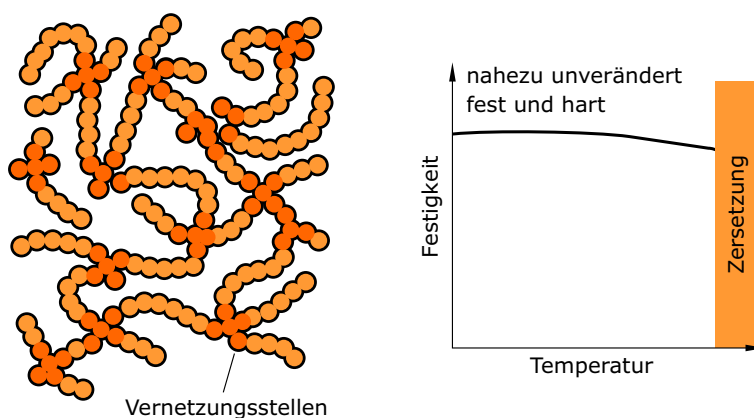


Bild (B007werZ) Vernetzung der Duroplaste und Temperaturverhalten

Elastomere

Elastomere (Gummi) sind Polymere, welche nur an wenigen Stellen vernetzt sind (meist S-Brücken) und dadurch ein **gummielastisches Verhalten** zeigen. Bei Erwärmung werden die Werkstoffe weicher und zersetzen sich, ohne den flüssigen Zustand zu erreichen. Sie sind nicht schweisbar und nicht umformbar.

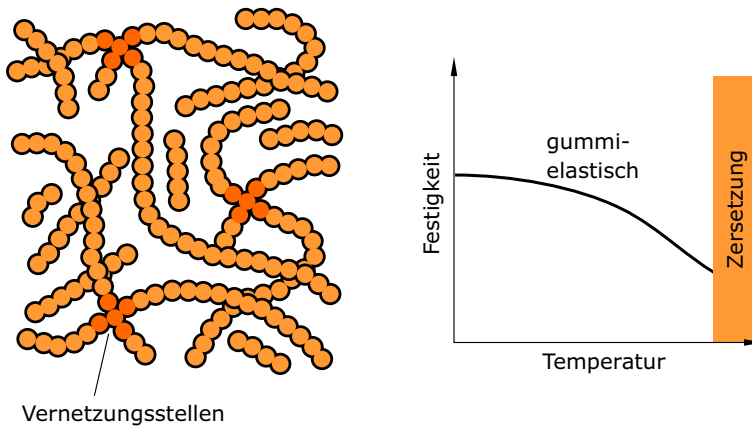


Bild (B009werZ) Vernetzung der Elastomere und Temperaturverhalten (Fachkunde Metall)

Die Auswahl der Plaste erfolgt auf der Basis der gesuchten Eigenschaften und der Herstellungsmethoden und Weiterverarbeitungsmöglichkeiten. Eine Sammlung von Eigenschaften, welche die Basis der Auswahl bilden sind zu sehen in Bild (B010werZ).

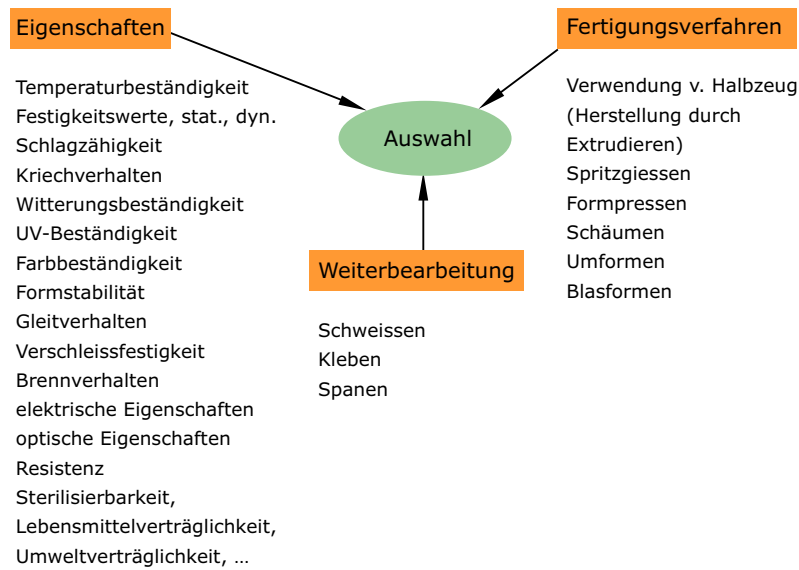


Bild (B010werZ) Checkliste für Eigenschaften der Plaste

Aus dieser Fülle der Eigenschaften geht klar hervor, dass Plaste Werkstoffe nach Mass sind und in vieler Hinsicht kundenspezifisch auf die notwendigen Eigenschaften eingestellt werden können.

Beispiele der wesentlichen Anforderungen einiger Alltagsprodukte (alles Thermoplaste) sind in den folgenden Bildern illustriert:

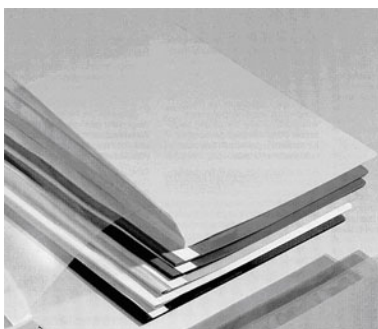


Bild (B925werZ) Beispiel Folientaschen: hoch transparent, zäh, flexibel



Bild (B926werZ) Beispiel Joghurt-Becher: steif (bei minimaler Dicke), transparent, sterilisierbar, bedruckbar, geschmacksneutral

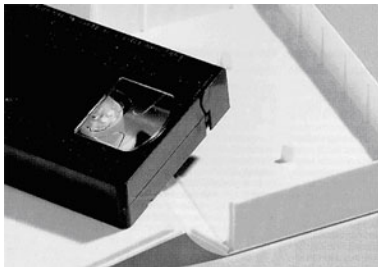


Bild (B927werZ) Beispiel Videokassette: hohe Flexibilität, Biegewechselfestigkeit, Schweissbarkeit

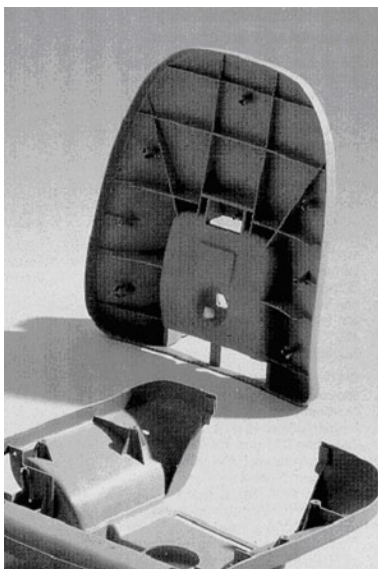


Bild (B928werZ) Beispiel Bürostuhl: steif, schlagfest, einfärbbar

Als gemeinsame typische Eigenschaften der Plaste können die folgenden aufgezählt werden:

- geringe Dichte der **füllstofffreien** Plaste von 0.9 bis 1.4 kg/dm³
- geringe Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0.1\text{--}0.35 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Stahl $\lambda = 25\text{--}39 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)
- einen etwa 7 mal grösseren Wärmeausdehnungskoeffizienten gegenüber Metallen
- gute Gleiteigenschaften (**Polyamid**)
- eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit
- bei Kurzzeit- und teilweise bei Lanzeitbeanspruchung gegen chemische und physikalische Einwirkungen (UV-Strahlen) beständig.
- Niedrige Temperaturbeständigkeit im Vergleich zu Metallen. Die obere Grenztemperatur der Einsetzbarkeit liegt bei ca. 100°C, nur bei **Silikon**en und **Polytetrafluorethylenen** (Teflon) etwa bei 200°C und bei speziellen Plasten (**PEEK**) teilweise höher. Die untere Grenztemperatur wird durch die Versprödung bestimmt und liegt bei etwa –30°C bzw. bei Polytetrafluorethylenen noch niedriger.
- **Kriechverhalten** der Kunststoffe, vor allem bei erhöhter Temperatur
- Die Festigkeiten der reinen Plaste sind bei den einzelnen Sorten sehr verschieden (weich bis hart), allgemein jedoch beträchtlich unterhalb $\sigma_z = 100 \text{ N/mm}^2$ und stark von der Temperatur abhängig. Verbesserungen der Plaste sind durch Zugabe von Füllstoffen (Metallpulver, Holzmehl usw., vor allem bei Duroplasten) und mit speziellen Einlagen (Papierbahnen, Textil- und Glasfasern, Gewebe u.a.) möglich. Siehe dazu auch das Kapitel über faserverstärkte Kunststoffe.
- Die besonders vorteilhafte Anwendung der Plaste für die Massenfertigung ergibt sich aus der ausgezeichneten spanlosen Formbarkeit durch Giessen, Pressen, Ziehen, **Blasen**, Walzen usw. Auch die spanende Bearbeitung ist sehr gut.
- Die saubere, glatte Oberfläche und die Einfärbbarkeit der Plaste begünstigen diesen Vorzug zusätzlich.
- isolierend
- schwingungsdämpfend
- Ganz besonders bei Thermoplasten muss das **Quellen** bei Kontakt mit Wasser beachtet werden.

6.1. Thermoplaste DIN 7728

Die Tabelle [Auswahl Thermoplaste und Duroplaste](#) gibt eine kleine Übersicht über die Vielzahl der Thermoplaste mit ihren Festigkeitswerten und ihrem Verwendungszweck. Zu beachten ist, dass Kunststoffe Werkstoffe nach Mass sind und somit die Herstellerunterlagen konsultiert werden müssen, um ein Optimum zu erreichen.

Kunststoffe sind hervorragend geeignet für Funktionsvereinigungen in technischen Gütern in grosser Stückzahl. Ein Beispiel aus vielen ist im folgenden Bild gegeben.

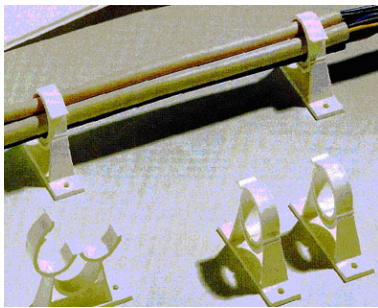


Bild (B929werZ) Kabelbritsche mit integrierten Scharnier

Thermoplaste werden in grosser Anzahl von Halbzeugen, wie Platten Rohre, Profile, etc und in verschiedensten Farben geliefert.

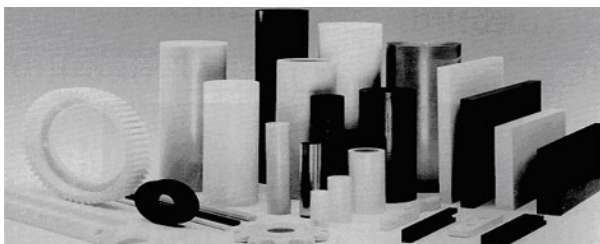


Bild (B930werZ) Auswahl von Thermoplast-Halbzeugen

Die Herstellverfahren und die Weiterbearbeitungsmöglichkeiten von Thermoplasten sind vielfältig (siehe auch Fertigungsverfahren: [Spritzgiessen](#), [Extrudieren](#), [Blasformen](#), [Formpressen](#) usw.).

6.2. Duroplaste DIN 7728

Duroplaste werden meist durch Pressen hergestellt. Dem flüssigen **Harz** wird ein **Härter** beigemischt. Die Bauteile härten irreversibel aus.

Duroplaste werden selten alleine eingesetzt, sondern vielfach gemischt mit Füllmaterial (wie z.B. Holzmehl, Zellstoff, Gesteinsmehl, Papier und Kurzfasern). Die Duroplaste und vermehrt auch die Thermoplaste bilden häufig auch die Basis für die eigentlichen faser-verstärkten Kunststoffe (siehe Sonderwerkstoffe).

Beispiele für Duroplaste sind in der Tabelle [Auswahl Thermoplaste und Duroplaste](#) gegeben.

6.3. Elastomere

Die hauptsächliche Unterteilung kann in künstlich produzierte Elastomere und in **Naturgummi** erfolgen. Die besten elastischen Eigenschaften erhält man mit Naturgummi, welcher jedoch schneller altert. Die meisten produzierten Elastomere sind heute synthetisch hergestellt. Gummisorten werden in Bezug auf ihre Härte (**Shore-Härte**) ausgewählt und unterteilen sich in Weichgummi und Hartgummi. Aus Elastomeren hergestellt sind Dichtungen und Gummifedern (Dämpfer).

Bemerkung: durch Bestrahlung (Elektronen- bzw. Gammastrahlen) von Thermoplasten können auch bei diesen Werkstoffe elastomere Eigenschaften erzielt werden (z.B. Stromkabel-Ummantelung).

7. Sonderwerkstoffe – Sinterwerkstoffe (DIN 30910)

Bei der Herstellung von Sinterwerkstoffen werden die Ausgangswerkstoffe (noch in pulveriger Form) gemischt und unter hohen Drücken zu einem Formling gepresst. Eine anschliessende Wärmebehandlung (**Sintern**) knapp über der Schmelztemperatur des Werkstoffes mit der tiefsten Umwandlungstemperatur ergibt eine teilweise **Diffusion** bzw. Verschmelzung an den Kontaktstellen. Je nach Pulversorte und Korngrösse können die unterschiedlichsten Eigenschaften erzielt werden und abhängig vom Pressdruck kann eine gesuchte **Porosität** eingestellt werden. Für höchste Genauigkeit (± 0.003 mm) wird unter nochmaligem Druck kalibriert. Auf diese Weise werden einbaufertige Teile erreicht. Sinterwerkstoffe werden beispielsweise eingesetzt für:

- Sinterbronze für poröse Gleitlager; diese werden vielfach mit Öl getränkt
- Filter aus nicht rostenden Stählen
- Schalldämpfer für Pneumatikanwendungen
- Allg. Bauteile als Alternative für das Giessen wenn Legierungsbestandteile mit stark unterschiedlichen Schmelzpunkten verwendet werden, für welche Giessen oder Schmieden technologisch nicht möglich ist
- einbaufertige Teile
- Hartmetallwerkzeuge und verschleissfeste Werkzeuge
- Wechsellplättchen



Bild (B931werZ) Sintergepresstes Zahnrad (feinporig)

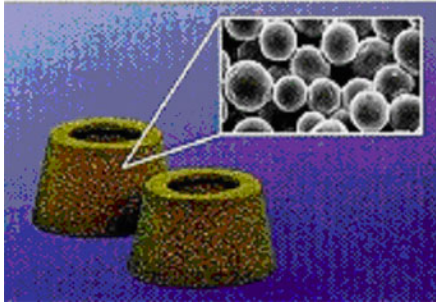


Bild (B932werZ) Sintergepresster Filter (grobporig)

Richtlinien für die Anwendung

Es ist von Vorteil, mit dem Hersteller die sintertechnisch zweckmässigste Gestaltung und den geeigneten Werkstoff festzulegen, denn die mechanischen und physikalischen Eigenschaften hängen auch von der Formgebung und der angewendeten Sintertechnologie ab.

Bezeichnung

Bezeichnungsbeispiel für Sinterstahl: SINT-D10

- SINT steht für die Kurzbezeichnung
- D gibt Auskunft über die Dichteklasse
- die erste Zahl bezeichnet die Werkstoffgruppe
- die zweite Zahl steht für die Unterteilung der Werkstoffgruppe

Dichteklassen

Dichteklasse	Dichte	Verwendung
AF	sehr niedrig	Filter, Flammensperren, Drosseln
A	niedrig	Gleitlager
B	niedrig	Gleitlager, Führungsringe; Gut dämpfende Eigenschaft
C	mittel	Gleitlager und Bauteile mittlerer Festigkeit
D	hoch	Bauteile hoher Festigkeit
E	sehr hoch	Bauteile sehr hoher Festigkeit
F	sehr hoch	Bauteile mit guten Korrosionsbeständigkeit

Tabelle (T035werZ) Dichteklassen

Werkstoffgruppen

Ziffer	Bedeutung
0	Sinter Eisen und Sinterstahl mit einem Massenanteil von 0–1% Cu
1	Sinterstahl mit einem Massenanteil von 1–5% Cu
2	Sinterstahl mit einem Massenanteil von mehr als 5% Cu
3	Sinterstahl mit oder ohne Cu bzw. C jedoch mit einem Massenanteil von höchstens 6% anderer Legierungselemente
4	Sinterstahl mit oder ohne Cu bzw. C jedoch mit einem Massenanteil von mehr als 6% anderer Legierungselemente
5	Sinterstahl mit einem Massenanteil von mehr als 60% Cu
6	Sinterbuntmetalle, die nicht in Ziffer 5 enthalten sind
7	Sinterleichtmetalle

Tabelle (T036werZ) Werkstoffgruppen

Beispiele für Sinterwerkstoffe

Kurzzeichen	Gruppe	Verwendung	Dichte ρ	Festigkeit	Bruchdehnung
			kg/dm ³	σ_B N/mm ²	ρ_B %
SINT AF 40	rostfreier Sinterstahl	Filter	3.8–5.6	–	–
SINT AF 50	Sinterbronze	Filter	5.0–6.5	–	–
SINT B 00	Sinter Eisen	Gleitlager	6–6.4	80	3
SINT A50	Sinterbronze	Gleitlager	6.4–6.8	70	2.5
SINT C00	Sinter Eisen	Formteile	6.4–6.8	130	4
SINT D10	Sinterstahl	Formteile	6.8–7.2	300	6
SINT E 10	Sinterstahl	Formteile	> 7.2	400	12
SINT D 50	Sinterbronze	Formteile	7.7–8.1	220	6
SINT E 73	Sinteraluminium	Formteile	2.55–2.65	200	2

Tabelle (T037werZ) Sinterwerkstoffe

8. Sonderwerkstoffe – Technische Keramik

Von der stofflichen Charakterisierung her unterscheidet man zwischen **Oxid-** und **Nichtoxidkeramiken**. Bei den Oxidkeramiken hat das **Aluminiumoxid** (Al_2O_3) mengenmässig die grösste Bedeutung erlangt und hat sich in vielen Anwendungsgebieten bewährt. **ZrO₂** weist ein gutes Eigenschaftsbild auf und gewinnt daher zunehmend an Bedeutung. Durch eine **Dotierung** des Al_2O_3 mit ZrO_2 lässt sich z.B. die Biegefestigkeit des Al_2O_3 zusätzlich deutlich steigern.

Eigenschaften verschiedener Ingenieurkeramiken	Einheit	Si_3N_4	SiC	ZrO_2	Al_2O_3 (+ ZrO_2)
Spez. Gewicht	g/cm^3	2.0–3.2	3.2	6	4
Biegefestigkeit bei 1400°C	MPa	200–600	200–400	100	100
Bruchzähigkeit	kJ/m^2	3–10	3–5	6–15	3 (8)
E-Modul	GPa	200–300	400	200	400 (300)
Wärmedehnung	10^{-6}	3	4	10	8
Wärmeleitfähigkeit	$\text{W/m}\cdot\text{K}$	10–40	100–140	2	30
Thermoschockbeständigkeit		hoch	hoch	mittel	gering
Abriebbeständigkeit		sehr gut	sehr gut	gut	gut
Biegefestigkeit	MPa	200–1000	400	500–1000	300 (600)

Tabelle (T038werZ) Eigenschaften verschiedener Ingenieurkeramiken

Oxidkeramiken haben prinzipiell den Nachteil einer nicht ausreichenden **Wärmeformbeständigkeit**. Bei Beanspruchung über längere Zeit mit erhöhten Temperaturen zeigt sie Kriechneigung. Andererseits ist das Sintern bei relativ niedrigen Temperaturen möglich. Aufgrund einer besseren Wärmeformbeständigkeit gewinnen die Nichtoxidkeramiken an Interesse. Nichtoxid-Verbindungen sind bereits seit langer Zeit in Form von metallischen Hartstoffen, also Carbide, Boride, Nitride und Silizide der Übergangsstoffe, bekannt. Zu den Nichtoxid-Keramiken zählen die binären Verbindungen zwischen Kohlenstoff, Silizium, Stickstoff und Bor (Siliziumkarbide SiC , Borkarbide BC , Borni-

tride BN), die aufgrund ihrer überwiegend kovalenten Bindung ihrer kurzen Atomabstände höchste Festigkeiten, Härte sowie chemische und thermische Stabilität aufweisen.

Von besonderem Interesse sind hier die Werkstoffe auf der Basis von Siliziumkarbid (SiC) und Siliziumnitrid (SiN), weil diese unter oxidierender Atmosphäre eine selbstheilende Schutzschicht bilden. Sie können deshalb, trotz thermodynamischer Unbeständigkeit, gegen Oxidation in oxidierender Atmosphäre bis zu hohen Temperaturen eingesetzt werden.

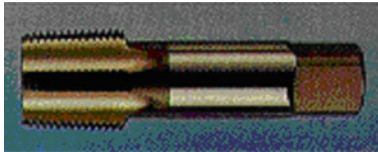


Bild (B933werZ) Pulvermetallurgisch hergestellter Gewindebohrer (Karbide)

9. Verbundwerkstoffe (Composites)

Unter Werkstoffverbund oder Verbundwerkstoffen versteht man die Kombination von mindestens zwei unterschiedlichen Werkstoffen mit verschiedenen Eigenschaftsspektren, die in der Kombination die Vorteile beider Systeme zum Tragen bringen und häufig die Nachteile der Einzelsysteme in der Kombination kompensieren.

Die heute wichtigsten Verbundwerkstoffe basieren auf einer faserförmigen Verstärkungskomponente als Kurz- oder Endlosfaser, gerichtet oder ungerichtet, eingebettet in eine polymere **Matrix**. Auch ist ein neues Potential auf dem Gebiet der faser- und partikelverstärkten Metalle und Keramiken zu verzeichnen, welche heute nicht zu verwirklichende Anforderungen erfüllen.

Die Entwicklung auf dem Gebiet der Faserverbundwerkstoffe – sowohl im Bereich der Verstärkungsfaser als auch bei den Matrixsystemen – hat zu einer Fülle neuer Halbzeuge und einer ganzen Reihe neuer Fertigungsverfahren geführt. Die Entwicklungsrichtungen umfassten dabei den „High volume market“ mit billigen Fasern und schnell zu verarbeitenden Matrixsystemen sowie den „High technical market“ mit hochwertigen Verstärkungsfasern und Matrixsystemen, die überwiegend lange Verarbeitungszeiten erfordern.

9.1. Fasermaterial

Auf dem Markt existieren eine ganze Reihe von Verstärkungsfasern. Durchgesetzt haben sich für Faserverbundwerkstoffe bis heute Glas-, **Aramid-** und Kohlenstofffasern.

Glasfasern

Diese Fasern stellen heute das gängigste Verstärkungsmaterial dar. Je nach Zusammensetzung lassen sich unterschiedliche mechanische Eigenschaften erzielen. Das **E-Glas** dominiert als Verstärkungsmaterial, die Fasern weisen hohe Festigkeiten bei vergleichsweise niedriger Steifigkeit auf. **R-** und **S-Glas**fasern besitzen gegenüber E-Glas ca. 20% höhere Festigkeiten und einen erhöhten E-Modul, sind allerdings wesentlich teurer.

Aramidfaser

Hierbei handelt es sich um organische Chemiefasern auf der Basis **aromatischer** Polyamide. Die „Normaltype“ (Twaron, Kevlar 29) besitzt bei hoher Festigkeit und hoher Bruchdehnung vergleichsweise einen

geringen E-Modul. Diese Type wird wegen ihres hohen Arbeitsaufnahmevermögens vorzugsweise in schlagbeanspruchten Bereichen eingesetzt (Splitterschutzwesten, ballistische Anwendungen usw.). Wegen der besseren Steifigkeitswerte, bei gleicher Festigkeit, findet die **Hochmodultype** (Twaron HM, Kevlar 49) überwiegend im Bereich der Faser-verbundwerkstoffe mit Struktureigenschaften Anwendung. Der grösste Nachteil der Aramidfaser ist ihre geringe Druckfestigkeit im **Laminat**.

Kohlenstofffaser

Diese können grundsätzlich auf der Basis von **Cellulose-** oder **Polyacrylnitril** (PAN)-Fasern sowie auf **Pech**basis hergestellt werden. Bis heute haben sich jedoch nahezu ausschliesslich Fasern auf PAN-Basis durchgesetzt.

Durch unterschiedliche Temperaturbehandlungen können Fasern mit sehr unterschiedlichem Eigenschaftsbild produziert werden. Die **hochfesten Fasertypen (HT)** weisen sehr hohe Festigkeiten bei vergleichsweise niedrigem E-Modul auf. Durch Steigerung der Behandlungstemperatur kann der E-Modul deutlich angehoben werden, allerdings sinkt die Festigkeit und damit analog die Bruchdehnung.

Bei Verwendung eines modifizierten Ausgangsmaterials lassen sich sowohl Modul als auch Festigkeit steigern, was zu den sog. **IM (Intermediate Modulus)-Fasern** führt. Die unterschiedlichen Verfahrensparameter bei der Fertigung erlauben es, eine ganze Familie von Kohlenstofffasern anzubieten, die auf den jeweiligen Anwendungsfall hin optimal auszuwählen sind.

Die wichtigsten mechanischen Kenndaten der beschriebenen Fasern sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Diese Tabelle zeigt eindrücklich die hohen mechanischen Eigenschaftswerte bei geringem, **spezifischem Gewicht**. Diese hervorragenden Kennwerte können jedoch nicht voll genutzt werden, da in einem realen Laminat der Fasergehalt auf ca. 60 Vol% beschränkt ist und zudem bei realen Beanspruchungen eine Faserorientierung in mehreren Richtungen notwendig ist.

Eigenschaften verschiedener Fasertypen	Durchmesser	Dichte ρ	Festigkeit	E-Modul	Bruchdehnung
	μm	kg/dm^3	$\sigma_B \text{ N}/\text{mm}^2$	kN/mm^2	$\rho_B \%$
Glasfasern					
E-Glas	9–17	2.52	3000	73	2.8
R-Glas	10	2.55	3600	86	4.2
S-Glas	10	2.49	3450	83	4.2
Aramidfasern					
Aramid	12	1.44	3200	80	3.3
Aramid HM	12	1.44	3200	125	2
Kohlefasern					
HT	7	1.74	3800	240	1.5
HS	7	1.8	4500	250	1.9
IM	5.5	1.8	5400	300	1.8
HM	6.5	1.81	2500	370	0.4–0.6
UHM	8.4	2	2100	470	0.3–0.5

Tabelle (T039werZ) Eigenschaften der verschiedenen Fasern

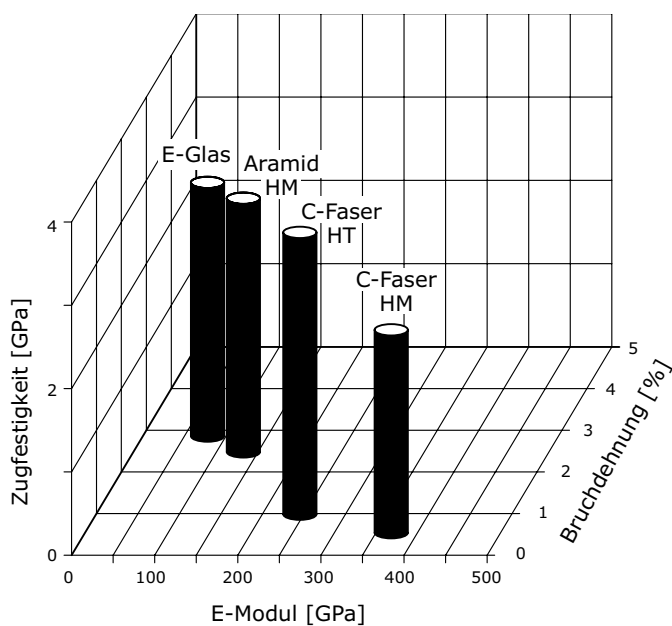


Bild (B011werZ) Mechanische Eigenschaften der verschiedenen Fasertypen

Die Preisentwicklung der Kohlenstofffasern zeigt stark sinkende Tendenz und macht den Einsatz von Kohlenstofffasern selbst dort interessant, wo heute noch ausschliesslich Glasfasern eingesetzt werden.

Die Auswahl einer bestimmten Bauweise bzw. einer Fertigungstechnologie hat auf die Auswahl der Verstärkungsfaser keine ausschlaggebende Bedeutung. Die Verarbeitungsmöglichkeiten sind für alle beschriebenen Fasertypen weitgehend identisch und selbst die Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit der Fasern sind bei schnellen Aufheiz- bzw. Abkühlprozessen von nur untergeordneter Bedeutung. Deshalb orientiert sich die Auswahl der Faser fast ausschliesslich an den Forderungen aus der Bauteilbeanspruchung.

9.2. Polymeres Matrixsystem

Die weitverbreitete Meinung, Matrixsysteme dienen lediglich als „Klebstoff“ für die Verstärkungsfaser, während die Verbundeigenschaften nur von der Faser bestimmt sind, ist nicht korrekt. Vielmehr ist zum Aufbau eines leistungsfähigen Faserverbundes genaue Kenntnis über die Matrix und deren Einfluss auf die Verbundeigenschaften notwendig.

So können nur Matrixsysteme verwendet werden, deren Bruchdehnung grösser ist als die der Faser, um die Zugfestigkeit der Faser voll zu nutzen. Das Festigkeits- und Dehnverhalten der Matrix bestimmen ganz wesentlich die Verbundeigenschaften senkrecht zur Faser. Der Matrixmodul ist schliesslich ausschlaggebend für die Druckfestigkeit des Verbundes parallel zur Faserrichtung. Besonders ausgeprägt ist die Abhängigkeit der Temperaturbeständigkeit der Verbunde von dem Temperaturverhalten der polymeren Matrix, da die meisten Fasern temperaturstabiler sind als die bekannten Matrixsysteme. Die Entwicklung hat sich in den vergangenen Jahren auf Faserverbundwerkstoffe mit duromeren Harzsystemen konzentriert. Dementsprechend sind bis heute die Fertigungstechniken auf duromere Systeme abgestimmt. Erst seit Beginn der achtziger Jahre existieren ausgewählte thermoplastische Faserverbundwerkstoffe auf dem Markt, die ein vielversprechendes Eigenschaftsbild aufweisen. Die dazu notwendigen Verarbeitungstechniken sind noch in der Entwicklung bzw. müssen dieser Materialklasse angepasst werden.

Verarbeitungscharakteristik-Vergleich Thermoplast zu Duroplast

Eigenschaft	Thermoplast	Duroplast
Imprägnierung von Faser und Gewebe	schwierig	Stand der Technik
Lagerstabilität des Halbzeuges	unbegrenzt	eingeschränkt
Handhabung bei der Verarbeitung	schwierig, steifes Halbzeug bei RT	bei Raumtemp. flexibel und klebrig
Integrationsgrad bei Bauteilherstellung	hoch	hoch
Vorrichtungsaufwand	hoch	weniger hoch
Prozesse	kurz (min.)	lang (Std.)
Recycling	eingeschränkt	nicht möglich

Tabelle (T042werZ) Verarbeitungscharakteristik-Vergleich Thermoplast zu Duroplast

Wesentliche Unterschiede erwartet man in der Verarbeitungszeit der unterschiedlichen Verbundsysteme.

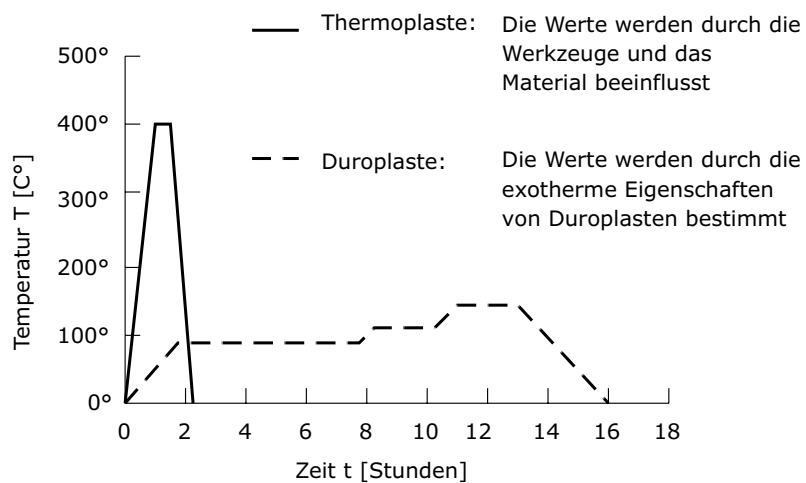


Bild (B012werZ) Temperatur-Zeit-Kurve der Verarbeitung

Bei diesem Vergleich zeigt sich prinzipiell, dass die Verarbeitung von faserverstärkten Thermoplasten einige markante Vorteile aufweist. Diese Vorteile sind allerdings heute nur begrenzt umsetzbar, da die

bekanntes Verfahren noch nicht optimiert bzw. nicht ohne Probleme auf beliebige Grossstrukturen übertragbar sind.

Prepreg

Grundsätzlich lassen sich Faser und Matrix in einem Arbeitsschritt zu einem Bauteil zusammenfügen, wie es bei der Herstellung von grossen Schiffsstrukturen oder bei der Anfertigung von Einzelteilen bekannt ist. Heute werden allerdings weitgehend kommerziell hergestellte Halbzeuge, sog. **Prepregs** (abgeleitet aus *preimpregnated material*) verwendet. Dies sind, wie sie in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt, ebene, flächige Fasergebilde, die in einem kontinuierlichen Verfahren im gewünschten %-Faser-Verhältnis in ein Matrixsystem eingebettet sind.

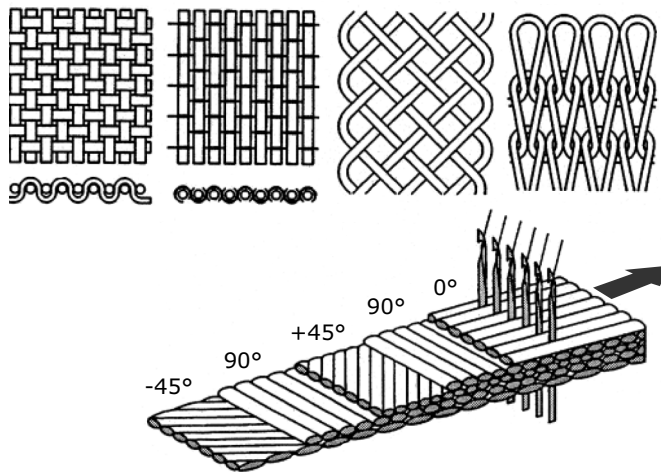


Bild (B013werZ) Unterschiedliche Faser-Legarten; oben von links: Gewebe, Gelege, Geflecht, Gestrick; unten: multiachsales Gelege

9.3. Sonstige Werkstoffverbunde

Bei Faserverbundwerkstoffen mit polymeren Matrixsystemen schränkt die Matrix in den meisten Fällen die **thermoformative** und **-oxidative Beständigkeit** ein.

Diese Einschränkung hat eine Forschungsbewegung in Gang gesetzt, die sich mit der Verstärkung von weiteren, meist anorganischen Systemen wie:

- Keramiken,
- Metallen und
- Kohlenstoffen auseinander setzt.

Folgende Verstärkungsmaterialien werden dabei eingesetzt:

- Partikel (i.w. Keramikpartikel)
- **Whisker**
- Fasern (Kurz-, Lang-, Endlosfasern), die analog den polymeren Faserverbundwerkstoffen in die Matrix eingebettet werden
- Metallisches Matrixsystem

Analog zu den Erkenntnissen und Regeln bei polymeren Matrixsystemen lassen sich mit Metallmatrizen ganz gezielt isotrope oder **anisotrope** Eigenschaften einstellen. Im Prinzip können alle bekannten Metalle mit Verstärkungskomponenten versehen werden. Die Literatur beschreibt allerdings vorzugsweise Leichtmetalle wie Aluminium (Al), Aluminium-Lithium (Al-Li), Magnesium (Mg) und Titan (Ti) sowie deren zugehörigen verschiedenen Legierungen. Dabei können Fasern als auch Partikel eingebettet werden.

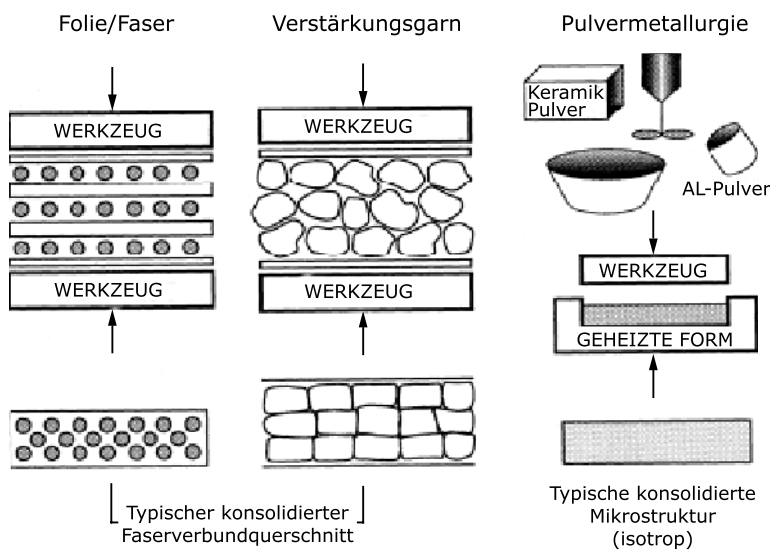


Bild (B014werZ) Verarbeitungsprozesse von verstärkten Metallen

Das nachfolgende Bild zeigt ein für die Aluminiumlegierung typisches Spannungs-Dehnungsdiagramm, das die Verstärkungswirkung von verschiedenen Materialien deutlich macht. Während das unverstärkte Al bei relativ niedriger Festigkeit und **Steifigkeit** ausgeprägtes, duktileres Verhalten zeigt, weisen die Kurven für endlosfaserverstärktes Material ein den Polymermatrixen vergleichbares Spannungs-Dehnungsverhalten auf. Der Borfaser/Al-Verbund zeigt dabei höchste Festigkeiten und das Laminat mit der Kohlenstofffaser den höchsten E-Modulkennwert. Die isotrope Partikelverstärkung erhöht das Festigkeitsverhalten sehr deutlich, ohne das ausgeprägte plastische Verformungsverhalten sehr nachteilig zu beeinflussen.

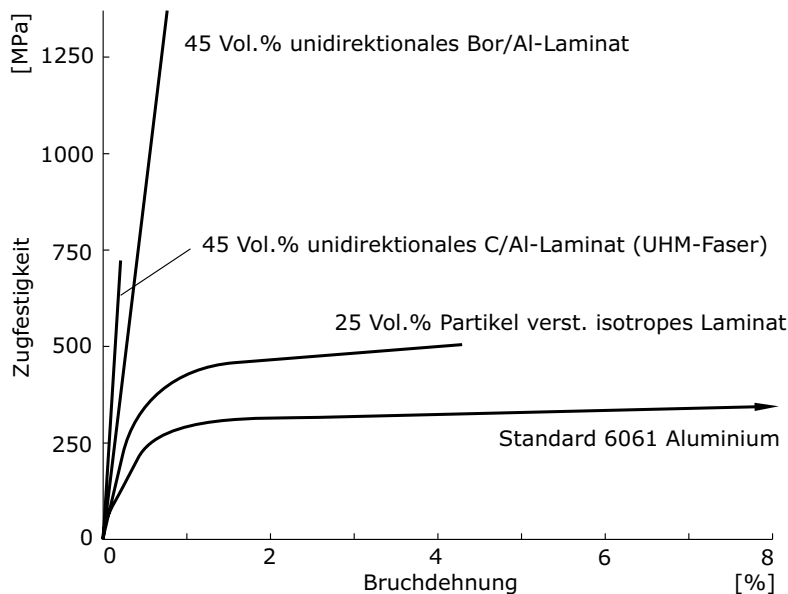


Bild (B015werZ) Dehnungsdiagramme von un- und verstärktem Aluminium

Diese kurze Beschreibung der faserverstärkten Metalle erhebt natürlich keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie soll darauf aufmerksam machen, dass durch Faser- oder Partikelverstärkung das Eigenschaftsbild von Metallen massiv beeinflusst werden kann. Bis heute fehlt allerdings – aufgrund der schwierigen und teuren Verarbeitung – eine Akzeptanz dieser verstärkten Metalle, abgesehen von Spezialanwendungen in der Luft- und Raumfahrt.

9.4. Faserverstärkte Keramik

Das Ziel bei der Entwicklung von faserverstärkten Keramiken unterscheidet sich deutlich von jenem für faserverstärkte Polymere und Metalle, die in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben sind. Bei letzteren strebt die Faserverstärkung eine Verbesserung von Steifigkeit und Festigkeit sowie Wärmeformbeständigkeit an. Keramiken weisen dagegen bereits in unverstärkter Form hohe Steifigkeiten und Wärmeformbeständigkeit mit hoher Sprödigkeit auf.

Bei den hochfesten, monolithischen, keramischen Werkstoffen behindert die hohe Sprödigkeit bzw. mangelnde Risszähigkeit dieser Werkstoffe noch immer einen erweiterten Einsatz in technischen Anwendungen. Verantwortlich für das spröde Versagen bei Zugbeanspruchungen ist die fehlende Ausbildung von plastischen Deformationszonen an der Risspitze, die einen Energieabbau bewirken können. Deshalb läuft ein einmal ausgebildeter Riss mehr oder weniger ungehindert durch das Bauteil und bewirkt ein katastrophales Versagen der gesamten Struktur. Dieses Verhalten bereitet erhebliche Schwierigkeiten, sowohl bei der Auslegung als auch bei der Fertigung, Montage und dem sicheren Betrieb von keramischen Maschinenbaukomponenten.

Ein erfolgversprechendes Konzept, das Spröbruchverhalten sowie die damit verbundene **Thermoschockempfindlichkeit** zu verbessern, ist die Verstärkung der Keramiken mit Fasern (Kurz- oder Endlosfasern) oder Whiskern. Die Faserkomponente übernimmt hier die Aufgabe, durch verschiedene Versagensmechanismen in hohem Mass Energie zu absorbieren, um damit ein quasi duktilen Versagensverhalten zu bewirken.

10. Weitere Werkstoffe

Selbstredend existieren noch eine Vielzahl von weiteren Konstruktionswerkstoffen mit unterschiedlichsten Eigenschaften. Es gibt noch weitere Nichtmetalle, wie:

- Glas,
- Holz (Harthölzer, Verbundhölzer, Presshölzer),
- Naturfasern,
- Beton,
- usw.

als auch weitere metallische Werkstoffe, wie:

- Nickel,
- Zink und
- Blei.

Zudem schreitet die Werkstoff-Forschung kontinuierlich fort, weshalb die Konsultation entsprechend spezialisierter Literatur empfohlen wird (siehe [Literaturverzeichnis](#)).

11. Korrosion, Korrosionsschutz

Grosse Wertvernichtungen erfolgen durch Verschleiss von Bauteilen und durch Korrosion. Dieses Kapitel wird überblicksweise der Korrosion und den Schutzmassnahmen dagegen gewidmet. In der Wirkungsweise unterscheidet man chemische und elektrochemische Korrosion.

11.1. Chemische Korrosion

Bei der chemischen Korrosion wirkt das angreifende Medium direkt auf den Werkstoff ein. Der Kontakt von Werkstoffen mit Gasen, Wasser (auch Feuchtigkeit, Kondenswasser), Säuren und Laugen sowie weiteren aktiven chemischen Stoffen erzeugt meist Sauerstoffverbindungen (Oxide). Bei Stahl mit Wasser entsteht beispielsweise FeO_2 , Rost (bei Al zu Al_2O_3) genannt. Der Prozess ist relativ langsam.

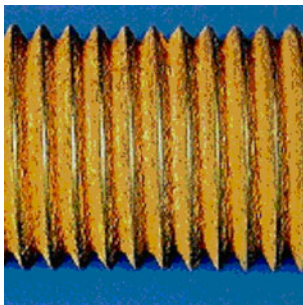


Bild (B934werZ) Beispiel einer Flächenkorrosion an einer Schraube (Bosshard)

Wesentlich für das Fortschreiten der Korrosion ist, inwiefern die Oxidschicht selbst eine schützende Deckschicht erzeugt, z.B. Aluminiumoxid oder Chrom bei Stahl etc.

Bei höheren Temperaturen (Stahl bei rund 600°C) erfolgt die Korrosion schnell (verzundern).

11.2. Elektrochemische Korrosion

Diese Korrosion erfolgt auf der Basis von zwei benachbarten, meist in Kontakt befindlichen oder eng anliegenden Bauteilflächen mit unterschiedlichen Potentialen auf der Spannungsseite der Metalle (**edlere** und unedlere Metalle). Falls zwischen diese Wirkflächen noch eine leitende Flüssigkeit (**Elektrolyt**) in Form von Feuchtigkeit, Wasser etc. gelangt, bildet sich ein galvanisches Element. Dabei korrodiert das unedlere Bauteil.

Spannungsreihe der Metalle

Kalium	-3.2	Eisen	-0.48	Wasserstoff	+0
Natrium	-2.8	Kadmium	-0.4	Kupfer	+0.84
Magnesium	-1.55	Kobalt	-0.49	Silber	+0.8
Aluminium	-1.28	Nickel	-0.22	Quecksilber	+0.86
Mangan	-1.08	Blei	-0.12	Gold	+1.5
Zink	-0.78	Zinn	-0.1	Platin	+1.8

Tabelle (T041werZ) Spannungsreihe der Metalle

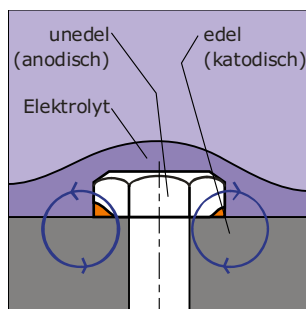


Bild (B017werZ) Beispiel einer Kontaktkorrosion zwischen dem edleren, kathodischen Material (Bronze-Flansch) und dem unedleren anodischen Material (verzinkte Schrauben) (Bosshard)

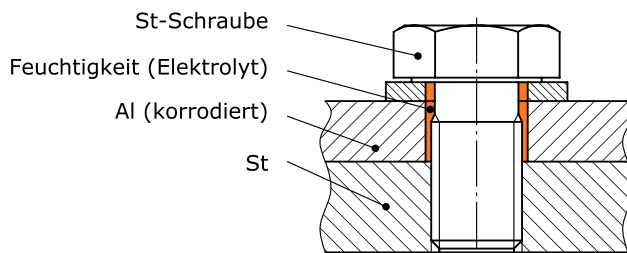


Bild (B018werZ) Kritische Verbindung zwischen Aluminium und Stahl mittels Stahlschraube (Korrosionsstellen zwischen den Platten und zwischen der Schraube und der Al-Platte)

Sehr gefährdet sind enge Spalte, da durch die **Kapillarwirkung** der Elektrolyt angezogen wird:

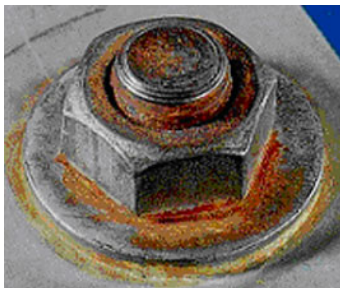


Bild (B200werZ) Spaltkorrosion

11.3. Korrosionsschutz

Die genaue Analyse des Umfeldes, in welchem das Bauteil genutzt wird, bestimmt sowohl die Wahl der Werkstoffe als auch deren Korrosionsschutz:

- Teile vor Feuchtigkeit schützen,
- durch günstige Formgebung Wasser zum Abfließen bzw. Trocknen (Belüften) bringen,
- Oberflächen sauber halten,
- Anzahl Trennfugen minimieren (Unterlagsscheiben nur wo notwendig) und
- Spaltstellen versiegeln.

Elektrochemische Korrosion wird verhindert, indem bestmögliche Werkstoffe mit gleichem oder benachbartem Potential eingesetzt werden oder z.B. die Stahlseiten verzinkt bzw. **phosphatiert**, die Al-Teile eloxiert oder lackiert, die Magnesiumteile **bichromatisiert** werden. Auch können die Teile durch isolierende Kunststoffteile galvanisch getrennt werden.

Korrosionsschutz blanker Stahlteile erreicht man durch eine glatte, eingeölte oder gefettete Oberfläche,

Korrosionsschutz durch Phosphatieren, Brünieren (schwärzliche Stahlteile), Chromatieren.

Die Werkstücke werden in ein Bad getaucht, sodass sich eine Schicht von wenigen μm aufbaut. Die Teile werden zusätzlich geölt. Dieser Korrosionsschutz ist jedoch nur innerbetrieblich genügend und für die Benutzung im Freien nicht geeignet.

Einen mehrjährigen Schutz, auch für Aussenanwendungen, erhält man durch eine Lackierung (**Spritz-** oder **Einbrennlackierung**) mit vorgängiger Phosphatierung oder einem Grundanstrich.

Feuerverzinken schützt Stahl im Aussenbereich sehr beständig. Verletzte Zinküberzüge können beschränkte Bereiche (rund 1 mm) wieder selbständig zudecken (**Selbstheilung**).

Verchromen oder Vernickeln wird wegen des hochglänzenden dekorativen Aussehens z.B. für Zierteile verwendet.

Al-Teile werden durch Eloxieren dauerhaft geschützt.

Verfahren zur Verhinderung von Korrosion

Verfahren	Anwendung	Grundwerkstoff	Übliche Schichtdicken
Einölen	Vorübergehender Schutz	Alle Metalle	
Brünieren (Oxidieren durch Tauchen in Brünierbäder)	Leichter Korrosionsschutz für Innenanwendungen, Braun- bis Schwarzfärbung	Stahl	1–2 mm
Phosphatieren	Leichter Korrosionsschutz, guter Haftgrund für Anstriche	Unlegierte und legierte Stähle	1–10 mm
Chromatieren	Zusätzlicher Schutz für Zinküberzüge, Einfärbungen möglich	–	< 1 mm
Anodisches Oxidieren (Eloxieren)	Verstärkung der natürlichen Oxidschicht. Dekorativ durch Einfärben	Aluminium- und Magnesiumlegierungen	5–30 mm
Anstriche	Je nach Grundwerkstoff und Anstrichart guter bis sehr guter Korrosionsschutz	Alle Werkstoffe	20–140 mm
Emaillieren (glasartige Überzüge)	Gute Beständigkeit gegen hohe Temperaturen	Stahl und Gusseisen	1 mm
Kunststoffbeschichtungen	Beschichten von Rohren (Aussenschutz) oder Behältern (Innenschutz) durch Thermoplaste und Elastomere	Stahl	0.5–3 mm
Bitumieren	Beschichten von Rohren und Kabeln	Stahl und Gusseisen	1–5 mm

Tabelle (T042werZ) Verfahren zur Verhinderung von Korrosion

Metallische Überzüge

Verfahren	Überzüge	Anwendung	Trägerwerkstoff	Übliche Schichtdicken
Galvanische Beschichtungen	Verzinken, Verkupfern, Vernickeln, Verchromen, Versilbern, Phosphor	Konstruktionsteile, metallisches Aussehen	Stahl, Schwermetalle	5–25 mm
Schmelztauchen (durch Eintauchen in flüssiges Metall)	Feuerverzinken, Vollbadverzinken, Vollbadverzinnen	Konstruktionsteile mit hohen atmosphärischen Anforderungen	Stahl	30–100 mm
	Durchlaufverzinken	Nur Halbzeug (Drähte)		
Thermisches Spritzen	Spritzverzinken	Grosse Teile	Stahl	40–80 mm
Chemische Beschichtungen	Chem. Vernickeln	Genaue Überzüge	Stahl, Guss-eisen, Kupferlegierungen	4–45 mm

Tabelle (T043werZ) Metallische Überzüge

12. Umweltproblematik

Die meisten im Maschinenbau eingesetzten Werkstoffe sind überwiegend unschädlich. Es gibt aber eine Reihe von gesundheitsschädlichen und umweltbelastenden Werk- und Hilfsstoffen. Dazu gehören zum Beispiel die Schwermetalle Blei und Cadmium sowie der vielverwendete Kunststoff PVC. Bei den Fertigungshilfsstoffen sind vor allem die Kühl- und Schmierstoffe sowie Härtesalze problematisch. Um eine ökologische Produktion durchzuführen, sollte auf diese problematischen Werk- und Hilfsstoffe möglichst verzichtet werden. Wenn sie dennoch zum Einsatz kommen, ist es wichtig sie sparsam einzusetzen und dann fachgerecht zu entsorgen oder noch besser zu recyceln.

12.1. Auswahl von ökologischen Werkstoffen

Es sollten möglichst nur Werk- und Hilfsstoffe eingesetzt werden, die nicht gesundheitsschädlich sind und die ohne Schädigung der Umwelt zu erzeugen, zu verarbeiten und zu entsorgen sind. Zu berücksichtigen ist bei der Bewertung eines Werkstoffs die Gesamtheit der umweltbelastenden Faktoren. Sie beginnt bei der Erzeugung des Werkstoffes und umfasst vor allem seine Recyclingfähigkeit.

12.2. Energieverbrauch und Umweltbelastung bei der Herstellung

Bei der Primärerzeugung ist meist ein hoher Energieaufwand erforderlich, wobei Eisenwerkstoffe und Kunststoffe deutliche Vorteile gegenüber Aluminium und Kupfer haben. Der Energieaufwand sinkt beachtlich bei der Sekundärerzeugung durch Recyclingmaterial. Das Recycling von Metallen gehört heute zum Standard. Die Methode ist zudem einfach auf Metallschrott anzuwenden. Bei den Kunststoffen ist Recycling relativ neu. Das Problem liegt in der sortenreinen Rückführung der verschiedenen Plaste.

Bei der Erzeugung von Metallen entsteht die Umweltbelastung vor allem durch Abgase und Stäube. Sie kann aber durch aufwendige Abgasreinigungsanlagen auf ein erträgliches Mass reduziert werden.

Bei den Kunststoffen gibt es bezüglich Umweltverträglichkeit grosse Unterschiede. Chlorhaltige Kunststoffe sind hierbei besonders problematisch.

Energieverbrauch in kWh zur Erzeugung von 1000kg Werkstoff

Werkstoffe	Primärerzeugung	Recyclinggewinnung
Eisen/ Stahl	4300	1670
Aluminium	16000	2000
Kupfer	13500	1730
Polyethylen	3500	–
PVC	4000	–

Tabelle (T044werZ) Energieverbrauch in kWh zur Erzeugung von 1000kg Werkstoff

12.3. Recycling

Recycling der Metalle

Bei den meisten Fertigungsverfahren fallen Werkstoffabfälle an, z.B. Späne, Stanzreste, Giessereiabfälle und Ausschussteile. Auch die Produkte landen meistens auf dem Schrottplatz oder einer Sammelstelle. Diese Abfälle und Altgeräte sind wertvoll und können wieder zu einwandfreien Rohmaterialien verarbeitet werden. Voraussetzung dafür ist eine sortenreine Trennung und Sammlung.

Bei den Metallen wird das Recycling schon lange praktiziert. Eisen- und Stahlwerkstoffe können so fast zu hundert Prozent, Aluminium und Kupfer zu etwa 75% wiederverwertet werden.

Recycling der Kunststoffe

Das Recycling der Kunststoffe befindet sich erst in den Anfängen. Thermoplaste werden zu Granulat verarbeitet woraus neue Bauteile gefertigt werden können. Voraussetzung hierfür ist wiederum das sortenreine Sammeln. Es wird durch leichte Demontierbarkeit und eingeprägte Sortenkennzeichnung erleichtert. Es wird auch vermehrt auf natürliche Werkstoffe umgestellt. So können z.B. Glasfasern durch Naturfasern ersetzt werden.

13. Zusammenfassung

Die Auswahl der Werkstoffe erfolgt auf der Basis von Anforderungen an ein Bauteil. Die Gesamtheit der Werkstoffe ist gegliedert in Metalle (Eisenwerkstoffe, Nichteisen-Metalle), Nichtmetalle und Verbundwerkstoffe.

Um möglichst optimale Konstruktionen zu gestalten, sind gute Werkstoffkenntnisse unabdingbar. Getroffen wird eine Werkstoffwahl häufig konservativ, d. h. nach Erfahrungswerten, die beispielsweise von Vorläuferteilen herrühren. Neben solcher Erfahrung ist aber gerade bei Neuentwicklungen ein profundes, theoretisches Wissen über die zur Verfügung stehenden Werkstoffe und deren Eigenschaften entscheidend. Nur so können die Anforderungen optimal erfüllt werden, die an das zu gestaltende Bauteil gestellt werden.

Viele Produktinnovationen werden erst durch den Einsatz von modernen Werkstoffen ermöglicht. Um das Innovationspotential solcher neuer Materialien auszuschöpfen, müssen Entwickler/-innen die Eigenschaften und die Charakteristik dieser Werkstoffe kennen.

Verständnisfrage 1

Strukturieren Sie die Gesamtheit der Werkstoffe in Klassen!

Verständnisfrage 2

Listen Sie Anforderungen auf, welche die Wahl von Werkstoffen beeinflussen!

Verständnisfrage 3

Strukturieren Sie die Gesamtheit der Stähle in Klassen!

Verständnisfrage 4

Was bewirkt der Kohlenstoff im Stahl; wie werden die Eigenschaften verändert?

Verständnisfrage 5

Zu welcher Klasse der Stähle gehören die Folgenden, und was sagen Ihnen die Bezeichnungen:

- E360
- S355J2
- G-S235J0
- 10CrMo9 10

- 42CrMn4
- X5CrNi18 8
- 9SMnPb28
- C10
- 16MnCr5
- 31CrMo12
- C70
- X10CrNiNb18 9
- X30WCrV53

Verständnisfrage 6

Was ist Einsatzhärten und was Nitrieren? Erklären Sie die Prozesse und die Unterschiede!

Verständnisfrage 7

Welche Legierungsanteile sind meist in Automatenstählen und wieso?

Verständnisfrage 8

Wo liegt die Grenze des Kohlenstoffgehaltes, oberhalb welcher nur noch mit Vorwärmen geschweisst werden kann?

Verständnisfrage 9

In welchen Formen kaufen Sie Stahl ein und wie nennt man diese Form?

Verständnisfrage 10

Welche Festigkeit hat ein GG-30 und wovon ist diese Festigkeit abhängig?

Verständnisfrage 11

Was ist der wesentliche Vorteil eines Gusseisens mit Kugelgraphit und was ein Nachteil?

Verständnisfrage 12

Was ist der Unterschied zwischen schwarzem und weissem Temperguss?

Verständnisfrage 13

Was ist Messing und wie wird es hauptsächlich unterteilt?

Verständnisfrage 14

Was sind wesentliche Eigenschaften von CuZn40?

Verständnisfrage 15

Wo liegt der E-Modul von Aluminium?

Verständnisfrage 16

Geben Sie Beispiele für Bauteile, die aus Al-Knetlegierungen gefertigt sind!

Verständnisfrage 17

Was ist beim Schweißen von Al-Legierungen zu beachten?

Verständnisfrage 18

Was ist speziell an Mg-Gusslegierungen und wie werden diese verwendet?

Verständnisfrage 19

Klassieren Sie die Plaste und geben Sie die wichtigsten Unterschiede an!

Verständnisfrage 20

Wie entsteht ein Elastomer?

Verständnisfrage 21

Wann werden Sinterwerkstoffe eingesetzt?

Verständnisfrage 22

Typisieren Sie die Korrosion!

Verständnisfrage 23

Erklären Sie die Kontaktkorrosion, wie kann diese verhindert werden?

Antwort 1

Werkstoffe lassen sich auf einer ersten Ebene in drei Gruppen ordnen: Metalle, Nicht-Metalle und Verbundwerkstoffe.

Auf einer nächsten Stufe werden Metalle in Eisenwerkstoffe und Nichteisen-Metalle unterteilt. Nicht-Metalle gliedern sich weiter in Natur-Werkstoffe und künstliche Werkstoffe.

Antwort 2

Die Anforderungen an den Werkstoff lassen sich aus dem zu erstellenden Bauteil und dessen Anforderungen ableiten:

- geometrische Formgebung
- mechanische Belastbarkeit
- Lebensdauer
- Oberflächenbeschaffenheit
- Hertz'sche Pressung
- Härte
- Verschleisswiderstand
- Dämpfung/Federung
- Gewicht
- Temperaturbeständigkeit
- Vereisungsbeständigkeit
- Strahlungsbeständigkeit
- Verbindbarkeit mit Nachbarbauteil
- Korrosionsbeständigkeit
- umgebendes Medium (Säure)
- geplante Stückzahl
- Budget, Kosten
- Verfügbarkeit
- Ästhetik, Trend, Gefallen

Antwort 3

- unlegierte Stähle
 - Grundstähle
 - Qualitätsstähle
 - Edelstähle
- legierte Stähle
 - Qualitätsstähle
 - Edelstähle

Antwort 4

Ein höherer Kohlenstoffgehalt

- *erhöht* Bruchgrenze, Streckgrenze, Härte, Härbarkeit, Kerbempfindlichkeit und Rissbildung,
- *vermindert* Schmelzpunkt, Zähigkeit, Schmiedbarkeit, Schweisbarkeit, Leitfähigkeit, Zerspanbarkeit,
- hat keinen Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit.

Antwort 5

- E360: Unlegierter Maschinenbaustahl, Mindeststreckgrenze 360 N/mm²
- S355J2: Unlegierter Stahl für Stahlbau, Mindeststreckgrenze 355 N/mm², Kerbschlagarbeit 27J bei -20 °C
- G-S235J0: Gegossener unlegierter Stahlbaustahl, Mindeststreckgrenze 235 N/mm², Kerbschlagarbeit 27J bei 0 °C
- 10CrMo9 10: Niedriglegierter Stahl, 10 / 100 = 0.1% Kohlenstoff, 9/4 = 2.25% Chrom, 10/10 = 1% Molybdän
- 42CrMn4: Niedriglegierter Vergütungsstahl, 42 / 100 = 0.42% Kohlenstoff, 4/4 = 1% Chrom, < 1% Mangan
- X5CrNi18 8: Hochlegierter Stahl, 5 / 100 = 0.05% Kohlenstoff, 18/4 = 4.5% Chrom, 5/4 = 1.25% Nickel
- 9SMnPb28: Automatenstahl, Streckgrenze 375 N / mm², Zugfestigkeit 460–710 N/mm²
- C10: Unlegierter Einsatzstahl, 0.1% Kohlenstoff, Streckgrenze 295 N/mm², 490–640 N/mm² Zugfestigkeit
- 16MnCr5: Niedriglegierter Einsatzstahl, 0.16% Kohlenstoff, 1.25% Mangan, < 1% Chrom, 440 N/mm² Streckgrenze, 780–1080 N/mm² Zugfestigkeit
- 31CrMo12: Niedriglegierter Vergütungsstahl, 12 / 4 = 3% Chrom, < 1% Molybdän
- C70: Unlegierter Vergütungsstahl, 0.7% Kohlenstoff
- X10CrNiNb18 9: Hochlegierter Einsatzstahl, 0.1% Kohlenstoff, 18/4 = 4.5% Chrom, 9/4 = 2.25% Nickel, < 1% Nb
- X30WCrV53: Hochlegierter Vergütungsstahl, 53 / 4 = 13.25% Wolfram, < 1% Chrom, Vanadium

Antwort 6

Einsatzhärten: Beim Einsatzhärten werden Stähle mit einem relativ geringen C-Gehalt von 0.1–0.22% verwendet. In einem ersten Schritt wird an der Oberfläche aufgekohlt. Der Kohlenstoff kann dabei in eine Tiefe von 1 mm vordringen und den C-Anteil auf bis zu 0.8% erhöhen. In einem anschliessenden Prozess kann diese Schicht gehärtet werden. So entsteht eine harte Oberfläche mit guter Verschleissfestigkeit und Gleiteigenschaften und ein zäher Kern für eine hohe

Dauerfestigkeit. Nach dem Härten erfolgt meist noch ein Schleifen der Teile, da sie sich durch die Wärmebehandlung verziehen können.

Nitrieren: Beim Nitrieren werden C-arme Stähle bei rund 500 °C einer stickstoffhaltigen Atmosphäre ausgesetzt. Dabei dringt Stickstoff in die Oberfläche ein, und es bilden sich harte Nitride mit den Legierungsbestandteilen. Wie beim Einsatzhärten entsteht so eine harte Oberfläche und ein zäher Kern. Im Unterschied zum Einsatzhärten ist Nitrieren verzugsarm, und die Bauteile können bereits fertig bearbeitet (auf Endmass) nitriert werden.

Antwort 7

Automatenstähle enthalten Phosphor und Schwefel oder Bleizusätze. Diese Legierungsanteile bewirken eine gute Zerspanbarkeit mit kurzbrechenden Spänen.

Antwort 8

Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt < 0.22 % sind ohne Vorbehandlung gut schweisbar.

Antwort 9

Stahl wird als sogenanntes Halbzeug bezogen. Es werden die unterschiedlichsten genormten Formen angeboten, wie:

- Form-Profile (U-Profile, T-Profile, I-Profile),
- Stabmaterial (rechteckig und rund),
- Hohlprofile (rund und eckig),
- Bänder und Bleche, darunter auch Feinbleche (< 0.5 mm) und
- Drähte (siehe Normenauszug).

Antwort 10

GG-30 hat eine Zugfestigkeit von 290 N/mm². Die Druckfestigkeit liegt 3–5 mal höher. Die Festigkeitswerte des GG sind stark von der Grösse der Lamellen und dem Gefüge abhängig. Beide Eigenschaften werden u. a. beeinflusst durch die Abkühlungsgeschwindigkeit und diese wiederum vom Querschnitt der Bauteile.

Antwort 11

Durch das kugelförmig ausgeschiedene Mg wird die innere Kerbwirkung vermindert und so die Zugfestigkeit und Zähigkeit erhöht. Dadurch ist eine verbesserte Wechselbelastbarkeit gegeben. Das Dämpfungsverhalten wird allerdings negativ beeinflusst.

Antwort 12

Schwarzer Temperguss (GTS) kann für schwere Teile verwendet werden und toleriert weniger identische Wandstärken, wogegen weisser Temperguss (GTW) nur für Bauteile bis zu 1 kg geeignet ist und konstantere Wandstärken erfordert. GTW kann u.U. geschweisst und durch die Randentkohlung einsatzgehärtet werden. GTS ist weder schweisst- noch lötlbar aber vergütbar.

Antwort 13

Als Messing bezeichnet man Cu-Zn-Legierungen mit $Zn < 45\%$. Messing wird in die beiden folgenden Gruppen unterteilt:

- α -Messing mit $Zn < 37\%$ für die günstige Kaltumformbarkeit (hohe Bruchdehnung) und
- α - β -Messing mit $37\% < Zn < 46\%$ für die gute Bearbeitbarkeit (Pb-Zusatz für kürzere Späne).

Antwort 14

Die goldene Farbe, die Korrosionsbeständigkeit, die Giessbarkeit, die ausgezeichnete Zerspanbarkeit, die Warm- und Kaltumformbarkeit und die gute Schweiss- und Lötbarkeit

Antwort 15

$$E_{\text{Alu}} = 70'000 \text{ N/mm}^2$$

Antwort 16

Beispielsweise Getränkedosen oder stranggepresste Profile. Al-Knetlegierungen werden auch häufig in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt.

Antwort 17

Al und Al-Legierungen sind unter Schutzgas schweisstbar, verlieren aber die Festigkeitswerte, welche sie durch das Kaltverfestigen bzw. durch den Aushärtungsvorgang erlangt haben. Aushärtbare Legierungen können nachträglich wieder wärmebehandelt werden (Al Zn4.5Mg1 härtet selbständig wieder aus).

Antwort 18

Mg-Gusslegierungen haben gegenüber Aluminium eine noch tiefere Dichte. Solche Legierungen werden vielfach als Druckgusswerkstoff für dünne Wandstärken eingesetzt.

Antwort 19

Die Plaste werden unterteilt in:

- Thermoplaste
- Duroplaste
- Elastomere

Thermoplaste werden bei erhöhter Temperatur elastisch bis teigig flüssig und sind damit schweisbar und umformbar.

Duroplaste bleiben unter Wärmeeinfluss formbeständig, schmelzen nicht. (Bei Erwärmung über die Zersetzungstemperatur zerfällt der Duroplast ohne vorher zu erweichen.) Duroplaste sind weder schweisbar noch umformbar.

Elastomere haben ein gummielastisches Verhalten. Sie werden bei erhöhter Temperatur weicher, erreichen aber nie den flüssigen Zustand bevor sie sich wie die Duroplaste zersetzen.

Antwort 20

Naturgummi wird von Kautschuk-Bäumen gewonnen indem diese angeschnitten und das Latex abgezapft wird. Die meisten Elastomere werden aber heute synthetisch auf Erdölbasis hergestellt.

Antwort 21

Gesinterte Bauteile können eingesetzt werden, wenn ein Bauteil eine gewisse Porosität aufweisen soll. Die gewünschte Porosität kann beliebig eingestellt werden. Anwendungsbeispiele sind:

- Gleitlager aus poröser Sinterbronze, die in Öl getränkt werden
- Filter aus nicht rostenden Stählen
- Schalldämpfer für Pneumatikanwendungen
- Allg. Bauteile als Alternative für das Giessen wenn Legierungsbestandteile mit stark unterschiedlichen Schmelzpunkten verwendet werden, für welche Giessen oder Schmieden technologisch nicht möglich ist
- einbaufertige Teile
- Hartmetallwerkzeuge und verschleissfeste Werkzeuge
- Wechselplättchen

Antwort 22

- chemische Korrosion
- elektrochemische Korrosion

Bei *chemischer Korrosion* wirkt das angreifende Medium direkt auf den Werkstoff ein

Elektrochemische Korrosion (Kontaktkorrosion) erfolgt auf der Basis von zwei benachbarten, meist in Kontakt befindlichen oder eng anliegenden Bauteilflächen mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen (edlere und unedlere Metalle)

Antwort 23

Kontaktkorrosion erfolgt auf der Basis von zwei benachbarten, meist in Kontakt befindlichen oder eng anliegenden Bauteilflächen mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen (edlere und unedlere Metalle). Falls zwischen diese Wirkflächen noch eine leitende Flüssigkeit (Elektrolyt) in Form von Feuchtigkeit, Wasser etc. gelangt, bildet sich ein galvanisches Element. Dabei korrodiert das unedlere Bauteil

Elektrochemische Korrosion wird verhindert, indem bestmögliche Werkstoffe mit gleichem oder benachbartem Potential eingesetzt werden oder z. B. die Stahlseiten verzinkt bzw. phosphatiert, die Al-Teile eloxiert oder lackiert, die Magnesiumteile bichromatisiert werden. Auch können die Teile durch isolierende Kunststoffteile galvanisch getrennt werden.

Relevante Cases

- [Exzentrerschleifer des Typs Rotex](#)
- [Materialbestimmung](#)

Related Documents

- [Auswahl Thermoplaste und Duroplaste](#)
- [Härten, Vergüten, Härteprüfung](#)

Publikationsverzeichnis – Literatur

- [1] DIN 53282 (1979): Winkelschälversuch; Beuth Verlag, Berlin
- [2] DIN 53288 (1981): Zugversuch; Beuth Verlag, Berlin
- [3] DIN 54452 (1981): Druckscher-Versuch; Beuth Verlag, Berlin
- [4] DIN EN 1465 (1994): Klebstoffe, Bestimmung der Zugscherfestigkeit hochfester Überlappungsklebungen; Beuth Verlag, Berlin
- [5] Künne, Bernd (2001): einföhrung in die Maschinenelemente. Gestaltung – Berechnung – Konstruktion; Teubner Verlag
- [6] Loctite (1998): World Wide Design Handbook; 2. Auflage, Erasmusdruck GmbH, Mainz

Publikationsverzeichnis – Weblinks

- Baumann Federn AG: <http://www.baumann-federn.ch/>; Kundenspezifische Produktion von Federn aller Art
- ThyssenKrupp Materials: <http://www.thyssen.ch,> Grund- und Qualitätsstahl, Edelstahl, Nichteisenmetalle und Sonderwerkstoffe (Titan-, Wolframlegierungen ...)
- Stahl und Metall AG: <http://www.stahl.ch>; Walzprodukte, Stahlrohre, Leichtprofile, Feinbleche, Kaltband, Rostfreier Stahl
- Häuselmann, Stahag: <http://www.haeuselmann.ch>; „einer für alle – Metalle“
- Debrunner & Acifer: <http://www.debrunner.ch>; Bewehrungsstahl, Blankstahl, Stahl, Metalle (Kupfer, Messing, Bronze, Blei, Aluminium)
- Omnia Plastica: <http://www.omniplastica.it>; interessante Auswahl von Kunststoffen
- Eine Anleitung zum Eloxieren von Aluminium: <http://www.uni-paderborn.de/StaffWeb/jogger/astronomy/eloxieren>
- Deutsches Kupferinstitut: <http://www.kupfer-institut.de>; Auskunfts- und Beratungsstelle für die Verwendung von Kupfer und Kupferlegierungen
- HUG Industrietechnik und Arbeitssicherheit GmbH: <http://www.hug-technik.com>

Fertigungsverfahren 1 – Urformen

Autor: Prof. Dr. M. Meier

1. Überblick

Motivation

Einerseits ist **Giessen** eines der ältesten Fertigungsverfahren, andererseits bildet es die Basis modernster Produkte des heutigen Alltags. Dazu zählt beispielsweise ein Mobiltelefon-Gehäuse aus Kunststoff oder das Motorengehäuse Ihres Autos.



Bild (B244urfZ) Glocke der St. Peter Pfarrkirche in Zürich, gegossen 1294

Wesentliche Charakteristiken des Giessens sind die fast unbeschränkte Gestaltungsfreiheit.

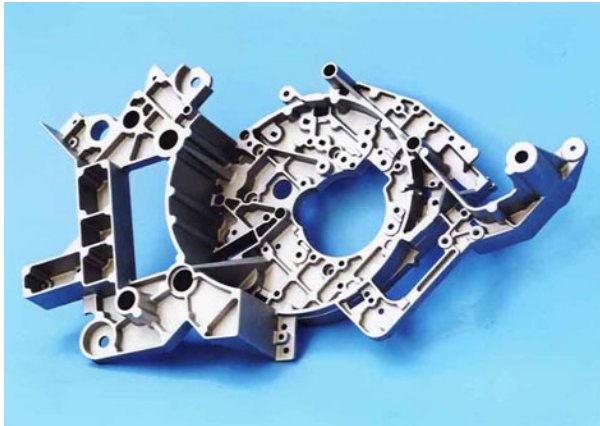


Bild (B245urfZ) Moderner Aluminium Druckguss (Druckguss Waghäusel)

Lernziele

Die Studierenden

- können die Fertigungsverfahren in die Klassifikation einordnen,
- sind in der Lage die wichtigsten Verfahren zu erklären,
- kennen die benachbarten Fertigungsschritte detailliert und
- kennen mehrere Anwendungsfälle der einzelnen Verfahren.

Im Speziellen kennen sie die Konstruktionsrichtlinien dieser Verfahren und können mit der Kenntnis der Verfahren auch Richtlinien ableiten und in eigenen Konstruktionen berücksichtigen.

Einleitung

Im abstrakten Begriff „**Urformen**“ werden verschiedenste Verfahren vereint. Hauptsächlich versteht man darunter jedoch das Giessen von Werkstoffen. Zum Giessen selbst gehört eine enorme Bandbreite von Verfahren, die vom Vergiessen von **Gusseisen** in **Sandformen** für die Einzelstück-Fertigung bis zur millionenfachen Herstellung eines Kunststoffteils auf einer **Spritzgiessmaschine** reicht. Dabei variieren folgende Charakteristika:

- Werkstoff: von Metallen, Nichtmetallen bis zu Keramiken
- Werkstoff-Zustand: von flüssig bis zu **plastisch**
- Stückzahl: von Einzelfertigung bis zur Grosserie
- Teilegrösse: von tonnenschweren Turbinengehäusen bis zu Mikroteilen

Eine Grundunterteilung besteht im Unterschied zwischen dem Urformen aus flüssigem und Urformen aus plastischem Zustand.

2. Urformen aus flüssigem Zustand: Schwerkraftgiessen

Durch Giessen werden flüssige oder teigige Werkstoffe in eine geometrisch bestimmte Form gefüllt, welche unter Berücksichtigung der Metallschwindung möglichst genau die Abmessungen und Konturen des definitiven Werkstücks wiedergibt. Beim **Schwerkraftgiessen** erfolgt das Füllen der Form mit einem flüssigen Werkstoff durch die Schwerkraft.

Gussstücke, z.B. die, die nach dem **Feingiess-Verfahren** gefertigt werden, benötigen oft nicht einmal eine nachträgliche Bearbeitung für die tolerierten **Passflächen**, sondern erfüllen die Funktion direkt. Meist folgt jedoch eine spanende Endbearbeitung.

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Giessverfahren mit entsprechenden Vor- und Nachteilen in Bezug auf das vorliegende Bauteil. Eine Gruppierung kann nach den folgenden Kriterien vorgenommen werden:

- *Form*: Art und Einsatz des umschliessenden Giessbereiches, des Negatives
- *Modell*: Art und Einsatz des umformten Abbildes des Bauteiles
- *Giessdynamik*: Art des Vergiessens

Giessvorgang

Die **Schmelze** wird in die Hohlform eingegossen und erstarrt an der Formwand. Die Erstarrungsfront bewegt sich gegen das Innere. Beim Erstarren schwindet das Volumen markant.

Anhaltswerte für die Schwindung:

	flüssig-fest	fest-fest abgekühlt
Gusseisen	bis 2.8%	1.0%
Sphäroguss	bis 5.0%	1.6%
Temperguss	bis 5.5%	1.5%
Stahlguss	bis 6.0%	2.0%

Tabelle (T001urfz) Schwindungswerte

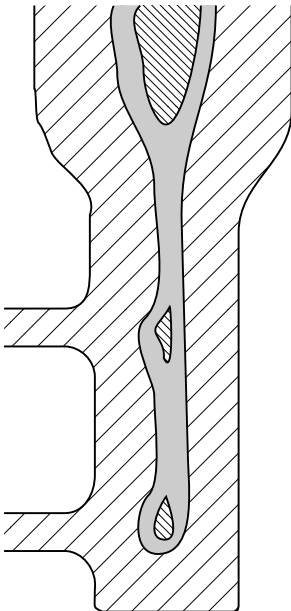


Bild (B001urfZ) Giessprozess – Erstarrungswand schliesst kontinuierlich die noch flüssigen Bereiche

2.1. Eigenschaften

Lunker

Falls sich jedoch flüssige Bereiche durch die Erstarrungsfront einschliessen kann kein flüssiges Material diesen Bereich erreichen und es ergeben sich **Lunker** (Poren, Risse) (siehe Konstruktionsrichtlinien).

Während des Abkühlens im erstarrten Zustand erfährt das Bauteil ein nochmaliges, reduziertes Schwinden (Tabelle der Schwindmasse, siehe Richtlinien).

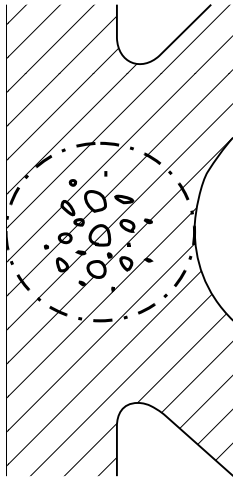


Bild (B002urfZ) Lunkerbildung infolge eingeschlossenem flüssigem Bereich und anschließende Schrumpfung

Sandkanten-Effekt

An Sandkanten staut sich die Wärme ebenfalls auf. Dadurch kann sich auch dort das Erstarren verzögern, wodurch Risse in Folge der Schrumpfung und dem Aufbau von dreidimensionalen **Zugspannungen** entstehen können.

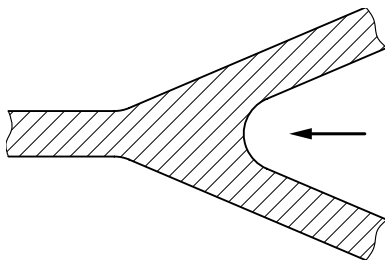


Bild (B003urfZ) Sandkanteneffekt

Spannungen, Verzug

Giessen ist ein dynamischer Prozess. Jede Art von Gussstücken hat seine eigene, ort- und zeitabhängige Abkühlodynamik. Die einzelnen Bereiche beeinflussen sich dabei zeitlich stark infolge des Schwindens von flüssigem zum festen Zustand. Nach dem vollständigen Abkühlen resultieren Restspannungen und Verzug. Ein nachgelagerter **Glühprozess** baut die Gussspannungen ab.

2.1.1. Giessformen und -modelle

Beim Giessen bestimmt die Form die Geometrie des Werkstücks. Meist ist für die Herstellung der Form zuerst ein Positiv-Modell erforderlich.

Formen

Verlorene Formen sind meist aus einem mineralischen, feuerfesten, körnigen Grundstoff mit einem **Bindemittel** sowie oft noch verschiedenen weiteren Zusätzen (z. B. zum Erzielen guter Gussoberflächen). Die Formen werden mechanisch verdichtet und nach jedem Abguss zerstört.

Mit Dauerformen werden jeweils eine grosse Anzahl von Gussteilen hergestellt. Diese nehmen eine überragende Stellung bei den vergleichsweise niedrigschmelzenden **Nichteisen-Gusswerkstoffen** ein. Sie bestehen meist aus **Werkzeugstählen** (Warmarbeitsstähle).



Bild (B010urfZ) Verlorene Giessform (R.Frei AG)

Modelle

Verlorene Modelle, z. B. Wachs- und **Harnstoffmodelle**, die nach dem Einformen ausgeschmolzen bzw. herausgelöst werden (Feinguss) oder **Polystyrol-Schaum-Modelle**, die beim Giessen vergast werden, und Dauermodelle, die nach dem Einformen aus der geteilten Form herausgezogen werden und daher wiederholt verwendbar sind. Sie bestehen je nach Stückzahl der herzustellenden Formen meist aus Metall wie Stahl, Gusseisen, Aluminiumlegierungen und Schwermetall-Legierungen (z. B. **Messing**, **Rotguss**, **Weissmetall**), Holz, Kunststoff und Gips.



Bild (B011urfZ) Modellhälften für ein Turbinengehäuse (Giesserei Hegi)

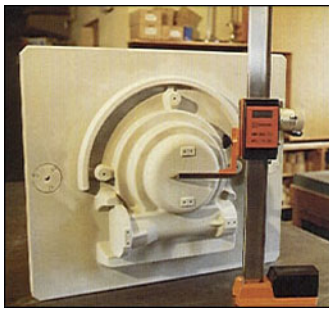


Bild (B012urfZ) Giessmodell-Hälfte (R.Frei AG)

Es ist üblich, Schwerkraftgiessverfahren nach der Art der Formenherstellung zu unterscheiden, daher tauchen in dieser Rubrik auch Angaben über geeignete Werkstoffe und Stückzahlen auf.

2.2. Einsatzgebiet und Teilebeispiele beim Schwerkraftgiessen

Aufgrund der grossen Gestaltungsfreiheit und der Bewährtheit des Verfahrens sind dem Schwerkraftguss nur wenige Schranken gesetzt.



Bild (B019urfZ) Erstarren eines Feigussteiles (Otto Kälin)



Bild (B020urfZ) Feigussteil (Otto Kälin)



Bild (B021urfZ) Traube mit Feigussteilen (Schmidt&Clemens)



Bild (B022urfZ) Räder für jeden Zweck werden gegossen. (Kurtz)



Bild (B023urfZ) Kokillenguss (Nuova Fondal)

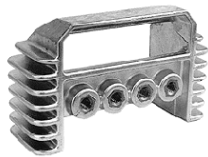


Bild (B024urfZ) Kokillengussteil (Giesserei Hegi AG)

2.3. Verfahren des Schwerkraftgiessens

Unter die Verfahren des Schwerkraftgiessens werden

- das [Sandgiessen](#),
- das [Feingiessen](#),
- das [Vollformgiessen](#),
- das [Kokillengiessen](#),
- das [Handformen](#),
- das [Maschinenformen](#),
- das [Vakuumformen](#),
- das [Maskenformen](#) und
- das [Keramikformen](#)

gezählt.

Überblick über die verschiedenen Giessverfahren

Gliederung Giessen			Serien-grösse			Genauig-keit			Material
			k	m	g	k	m	g	
Dauerform	ohne Modell	Druckgies-sen		x	x			x	Leichtmetall
		Kokillen-giessen		x	x		x	x	Leicht-Bunt-metalle, Gus-seisen
		Schleuder-giessen		x	x		x		alle Metalle
				x	x		x	x	alle Metalle
verlorene Form	Dauermodell	Handfor-men	x			x			alle Metalle
		Maschi-nenformen	x	x	x	x			alle Metalle
		Masken-formen		x	x		x		alle Metalle
		Keramik-formen	x	x			x	x	alle Metalle
	verlore-nes Mo-dell	Feingies-sen	x	x	x		x	x	alle Metalle
		Vollform-giessen	x	x	x	x			alle Metalle

Tabelle (T 011urfZ) Überblick über die verschiedenen Giessverfahren
(k = klein, m = mittel, g = gross)

2.3.1. Verfahren: Sandgiessen

Das älteste Giessverfahren. Hier dient ein Holz- oder Kunststoffmodell zu Herstellung zweier Formhälften aus Sand. Die Präzision dieses Verfahrens hält sich in Grenzen.

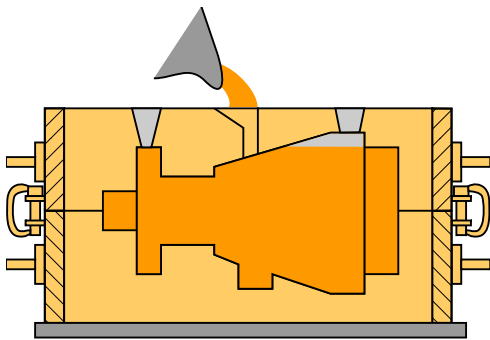


Bild (B004urfZ) Sandgiessen

2.3.2. Verfahren: Feinggiessen

Giessen mit verlorenen Keramikformen ergibt präzise Gussteile

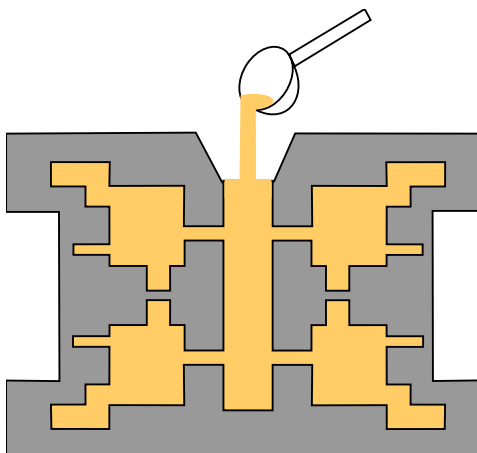


Bild (B005urfZ) Feinggiessen

Feinggiessen, auch Lost Wax oder Investment Casting genannt, erfordert für jedes Gussstück ein verlorenes Modell.

Die Modelle, meist kleiner Grösse, werden z. B. aus Thermoplasten oder Wachs in der Spritzgiessmaschine hergestellt (2) und, falls nicht schon so hergestellt, zu ganzen Giessbäumchen verhängt (3). Diese auch **Trauben** genannten Modelle werden in zähflüssige, keramische Überzüge getaucht (4) und eingeformt (5). Durch Erwärmen wird das Modell ausgeschmolzen und die Formen gebrannt (6).

Anschliessend wird gegossen (7), die Formschale zerschlagen (8) und die einzelnen Teile abgetrennt (9). Es erfolgt die Endbearbeitung (10) und Kontrolle (12) der Gussteile, welche enge Toleranzen und gute Oberflächen aufweisen.

Das Giessen erfolgt häufig in die heisse Form. Verwandt mit dem Feingiessen ist das **Unicast-Giessverfahren** (siehe [Film: Wolfensberger](#)).



Bild (B006urfZ) Die Formschalen mit flüssigem Metall gefüllt (Giesserei Hegi AG)

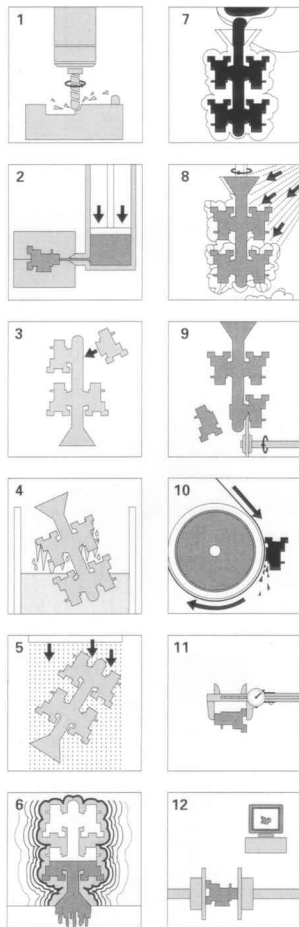


Bild (B007urfZ) Herstellungsprozess Feingießen (Giesserei Hegi AG)

Werkstoffe	Stahlguss meist hochlegiert, Kupfer-, Nickel- und Kobaltlegierungen
Werkstück	1g–10kg
Stückzahl	mehr als 1
Toleranzen	0.4–0.7%
Oberflächen	N7–N9

Tabelle (T002urfz) Feingiessen

2.3.3. Verfahren: Vollformgiessen

Die Verwendung von verlorenen Schaumstoffmodellen ermöglicht den Einsatz ungeteilter Formen. Das Schaumstoffmodell vergast beim Einfüllen des Giessmetalls.

Dieses englisch Evaporative Pattern Casting genannte Verfahren wurde mitte letzten Jahrhunderts entwickelt.

Das Verfahren ist dem Feingiessen ähnlich, jedoch auch für grössere Teile geeignet. Das Modell besteht aus einem Schaumstoff, welcher nicht ausgeschmolzen werden muss, sondern während des Giessens vergast. **Vollformgiessen** ist einfach und günstig und kann auch für die Prototypenfertigung eingesetzt werden.



Bild (B008urfz) Schaumstoffmodell für innenbelüftete Bremsscheiben (Kurtz)

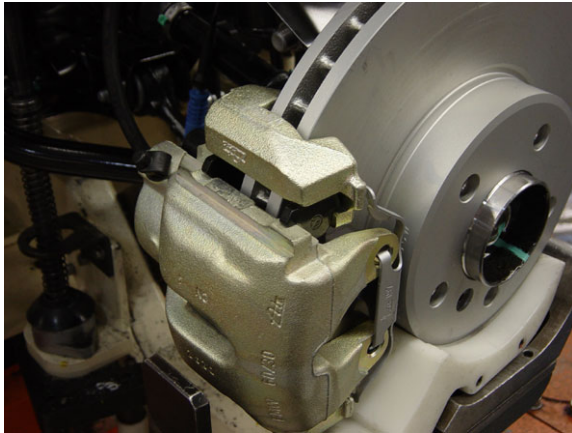


Bild (B252urfz) Bremsscheibe BMW X5

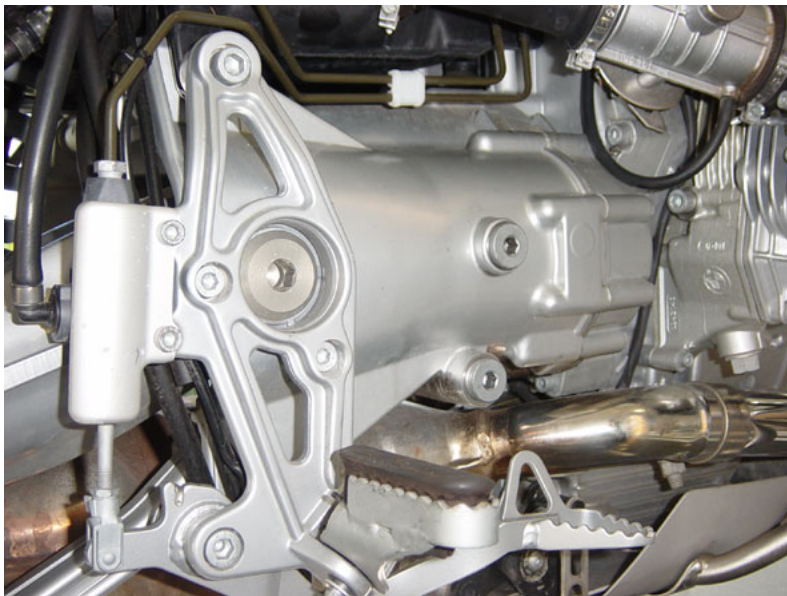


Bild (B254urfz) Al-Druckgussteil an BMW-Motorrad

Werkstoffe	Eisengusswerkstoffe und NE-Gusswerkstoffe
Werkstücke	schwerer als 50 kg
Stückzahl	mehr als 1
Toleranzen	3–5%

Tabelle (T003urfz) Vollformgiessen

2.3.4. Verfahren: Kokillengiessen

Das Giessmetall wird in metallische **Dauerformen** gegossen und kühlt sich dort sehr schnell ab.

Kokillen sind Dauerformen und durch ihre wiederholte Verwendbarkeit gekennzeichnet.

Die Dauerform wird im Allgemeinen drucklos gefüllt, d. h. unter dem Einfluss der Schwerkraft. Die Gussstückgestalt ist durch die Form vollständig vorgegeben. Werden auch die Kerne zur wiederholten Verwendung aus Kokillenmaterial, z. B. aus Eisenwerkstoffen, hergestellt, so spricht man von **Voll-Kokillen**. Durch Einlegen von Sandkernen (**Gemischt-Kokillen**) lässt sich vielfach eine höhere Gestaltungsfreiheit erzielen (zerstörende Entformbarkeit des Kernes).



Bild (B009urfZ) Flüssiges Metall wird in die Kokille gegossen. (R. Frei AG)

Werkstoffe	Gusseisen und NE-Metalle
Werkstücke	< 100kg
Wanddicke	> 3mm
Stückzahl	Kleinere Serien bis Grossserien
Toleranzen	0,3–0,6% (± 0,2–0,3mm)

Tabelle (T004urfz) Kokillengiessen

2.3.5. Verfahren: Handformen

Verfahrensbeschreibung:

- Die Basis bildet eine Werkstückzeichnung des Bauteiles, von welchem unter Beachtung des Schwindmasses ein zweiteiliges (Definition der Trennebene) Modell (meist aus Holz) erstellt wird.
- Die beiden Modellhälften werden je in einen Unter- und Oberkasten eingelegt. Die Kästen werden mit Formsand (Natursand, synthetische Sande, teilweise mit Binder) hinterfüllt und verdichtet. In den Oberkasten wird gleichzeitig der Einguss und die Steiger (auch Speiser genannt; dies sind eigentliche Überlaufbereiche für das flüssige Material, welche während des Erstarrens und Schwindens neues, noch flüssiges Material nachspeisen) eingeformt.
- Modellhälften werden entformt und, falls vorhanden, das vorgeformte, verdichtete Kernstück (Kerne) eingelegt. Diese entstehen gleichfalls durch die obigen Verfahrensschritte.
- Formhälften schliessen, verriegeln und das flüssige Metall eingiessen.
- Das Eingiessen der Schmelze erfolgt über den Einguss, die Gase entweichen durch die Steiger. Von dort wird auch der Schwund kompensiert.



Bild (B250urfZ) Kern (Exponat des Deutschen Museums, München)

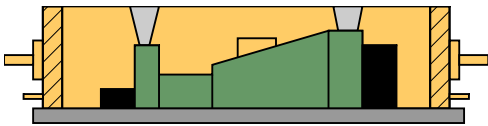


Bild (B013urfZ) Unterkasten mit Modell hinterfüllt

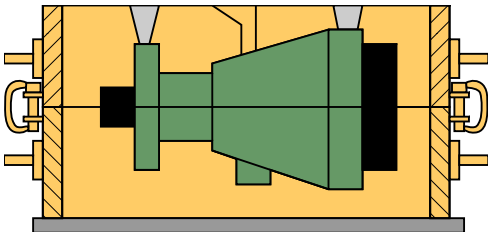


Bild (B014urfZ) Ober- und Unterkasten montiert und Oberkasten gefüllt

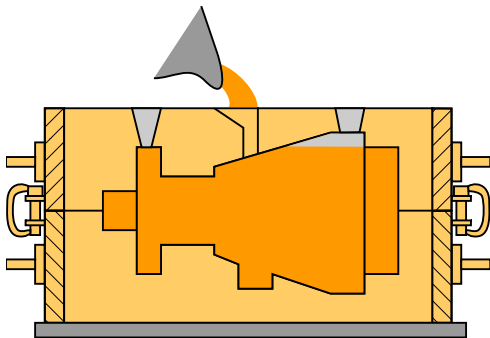


Bild (B004urfZ) Formhälften wieder getrennt und Modell entfernt; Kern eingelegt; wieder montiert und vergossen

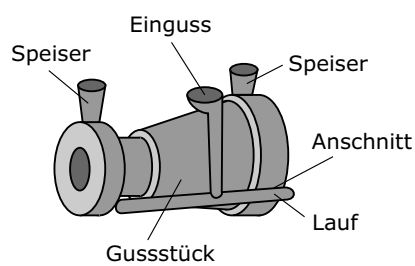


Bild (B015urfZ) Fertiges Gussteil, entformt und anschliessend geputzt

Überblick Einsatzgebiete, -grenzen

Werkstoffe	breite Palette von giessbaren Metallen (Gusseisen und NE-Metalle) ohne sehr hochschmelzende Werkstoffe
Bauteilgrösse (grösste Seiten)	grösser als 50 mm; bis einige Meter
Minimale Wanddicke	3.5 mm
Stückzahl	mehr als 1 bis mittlere Serie
Toleranzen	3–5%
Oberfläche	Nur für nicht funktionelle Flächen geeignet
Einsatzgebiete	Maschinenständer, Grossgetriebegehäuse

Tabelle (T005urfz) Einsatzgrenzen, -gebiete Handformen

2.3.6. Verfahren: Maschinenformen

Ablauf:

- Die Arbeitsgänge (Sandfüllen, Verdichten, Heben, Senken, Wenden, Umsetzen, Kerneinlegen, Zulegen, Übersetzen, Transportieren, Beschweren, Giessen, Ausleeren, Trennen, Reinigen) sind im Prinzip weitgehend die gleichen wie beim **Handformen**, jedoch automatisch, maschinell ausgeführt.
- Den Aufbau einer Anlage bestimmen im Wesentlichen Gussprogramm, Seriengrösse, Produktionsleistung und Raumverhältnisse. Formanlagen eignen sich nicht nur für ein Gussprogramm mit grossen Stückzahlen, sondern - nicht zuletzt auch wegen des schnellen Modellplattenwechsels - ebenfalls für das vielseitige Programm einer Kundengiesserei mit oft kleinen Serien. Es gibt mechanisierte, teilweise automatisierte und voll automatisierte Formanlagen.

Überblick Einsatzgebiete (weitgehend identisch mit Handformen)

Stückzahl	Mittlere bis grosse Serien
Toleranzen	1.5–3%
Einsatzgebiete	Motorengehäuse, Kompressorengehäuse, Pumpengehäuse

Tabelle (T006urfZ) Einsatzgebiete Maschinenformen

Konkurrenz-Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Schweissen	Verputzen
Fließpressen	Drehen
Gesenkformen	Fräsen
Freiformen	

Tabelle(T007urfZ) Konkurrenz und nachgelagerte Verfahren des Maschinenformen

2.3.7. Verfahren: Vakuumformen

Dieses Verfahren unterscheidet sich vom Handformen insofern, dass der Verdichtungsprozess durch Vakuum erzeugt wird. Das Modell besitzt kleine Bohrungen, durch welche eine Folie eng an das Modell angezogen wird. Eine abdichtende Folie über dem Sand schliesst die ganze Form stabil ab, so dass der eingefüllte Sand unter Unterdruck gesetzt werden kann. Die Folie verdampft beim Vergiessen. Die erreichbaren Toleranzen sind leicht besser als beim Handgiessen.

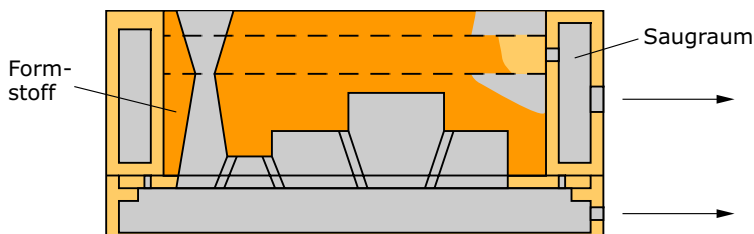


Bild (B016urfZ) Vakuumformen (Fachkunde Metall)

Werkstoffe	Gusseisen und NE-Gusslegierungen
Werkstücke	100 g–120 kg
Kleinste Wandstärken	3.5 mm
Stückzahl	mehr als 1
Toleranzen	0.3–0.6%

Tabelle (T008urfz) Einsatzgebiete Vakuumformen

2.3.8. Verfahren: Maskenformen

Anstelle von Formsand wird ein **Phenolharz**-Sandgemisch eingesetzt, welches entlang des beheizten Modells aushärtet und eine starre Formschale ergibt. Diese einige Millimeter dicke Maske dient als Giessform.

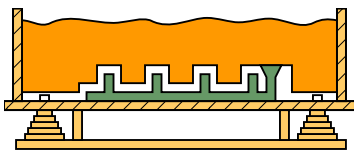


Bild (B017urfZ) Entlang der Kontur der beheizten Form (grün) härtet das Phenolharz-Sand-Gemisch (orange) zu einer Schale aus (weiss).

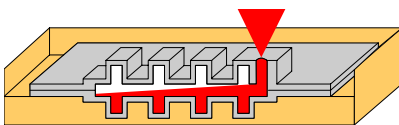


Bild (B018urfZ) Das flüssige Metall wird in die Form gegossen.

Werkstoffe	Gusseisen und giessfähige NE-Metalle
Werkstücke	bis 150 kg
Toleranzen	1–2%
Stückzahl	> 100

Tabelle (T009urfz) Einsatzgebiete Maskenformen

2.3.9. Verfahren: Keramikformen

Hier wird als Formmaterial eine hochfeste Keramikmasse verwendet. Diese wird gebrannt und ergibt so eine hochkompakte, feingliedrige verlorene Form feiner Oberfläche.

Werkstoffe	Gusseisen, vielfach hochlegierte, NE-Gusslegierungen
Stückzahl	> 1
Toleranzen	Masse < 100 mm \pm 0.2; > 100 mm \pm 0.3 bzw. 0.8%
Oberflächen	Funktionsflächen möglich

Tabelle (T010urfz) Einsatzgebiete Keramikformen

2.4. Konstruktionsrichtlinien Schwerkraftgiessen

Beanspruchungsgerechte Gestaltung von Gussteilen

Verfahrensbedingt eröffnet das Giessen eine Fülle von Gestaltungsmöglichkeiten. Diese sollten beim beanspruchungsgerechten Konstruieren der Bauteile gut genutzt werden. Das heisst, eine Konzentration des Werkstoffes ist nur dort gewünscht, wo er aufgrund der mechanischen Beanspruchung gebraucht wird. Eine solche Konzentration ist neben der Variation der Wanddicken der Bauteile zum Beispiel durch Anordnen von Rippen und Wülsten, die die Herstellung beim Giessen nicht unbedingt erschweren oder verteuern, zu erreichen.

Grundsätzlich sollten folgende Regeln eingehalten werden:

- möglichst einfachen Kraftfluss anstreben
- den Werkstoff möglichst in Richtung der **Kraftlinien** legen
- einfache Formen (Zylinder, Kegel) wählen
- von innen nach aussen gestalten

- bevorzugte Beanspruchungsart des Gusswerkstoffes berücksichtigen

Der letzte Punkt ist vor allen wichtig bei der Verwendung von Grauguss.

Grauguss kann wesentlich höhere Druckspannungen als Zugspannungen ertragen. Die zulässige Druckspannung liegt circa vier mal so hoch wie die zulässige Zugspannung. Die Biegefestigkeit von Grauguss ist etwa doppelt so hoch wie die Zugfestigkeit. Diese charakteristische Eigenart des Graugusswerkstoffes muss unbedingt bei der Formgebung berücksichtigt werden. Daher sind möglichst nur druckbeanspruchte Konstruktionen anzustreben.

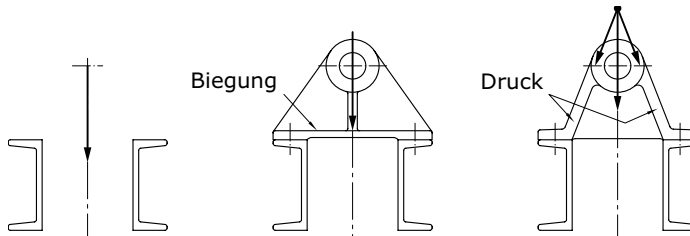


Bild (B083urfZ) Konstruktion von Gussteilen auf Druckbeanspruchung

Das obige Bild zeigt zwei verschiedene Gussalternativen. Die mittlere Ausführung ist nicht empfehlenswert, da sie Biegebeanspruchungen im unteren Träger aufweist. Die Ideale Ausführung als Graugusskonstruktion auf der rechten Seite. Das Gussmaterial ist angeordnet in Richtung der Kraftlinien, die Beanspruchung erfolgt ausschliesslich auf Druck.

Durch geschickte Anordnung der Bauteile können Zugbeanspruchungen in Druckbeanspruchungen umgewandelt werden:

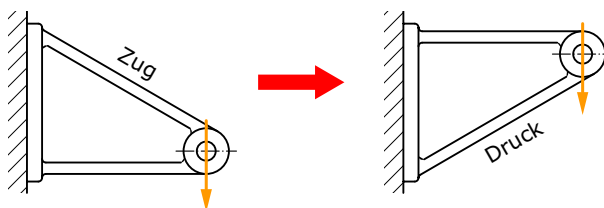


Bild (B082urfZ) Wandlung eines Zugstabes in einen Druckstab

Beispiele für die Gestaltung von Gussteilen aus Grauguss beim Auftreten von Biegebeanspruchungen zeigen die folgenden Bilder.

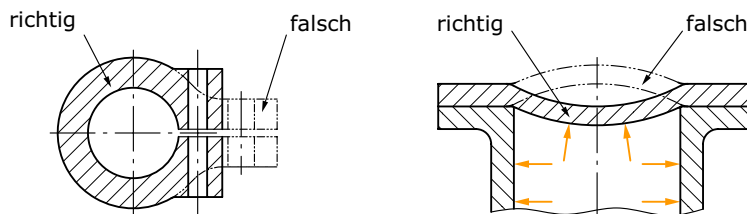


Bild (B075urfZ) Gestaltung bei Biegebeanspruchung

Entweder kann durch entsprechende konstruktive Gestaltung die Biegebeanspruchung gering gehalten werden oder umgesetzt werden in eine Druckbeanspruchung.

Gestalterische Möglichkeiten der Gusskonstruktionen eröffnen viele Wege zur Erhöhung der Gestaltfestigkeit von Gussteilen. Durch geeignete Verrippung oder Anbringen von Randwülsten können **Biege-** und **Torsionssteifigkeit** ohne formtechnische Schwierigkeiten und ohne wesentliche Gewichtszunahme erhöht werden. Zu betrachten sind hier die speziellen Kriterien der Gestaltung bei Rippen, Wandstärken etc. Durch geschickte Formgebung ist es möglich, örtlich überhöhte Spannungsspitzen zu vermeiden.

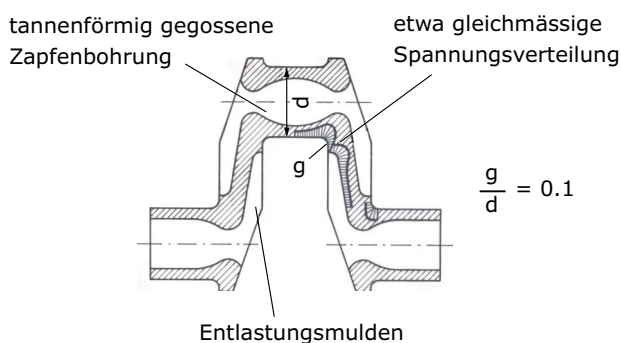


Bild (B086urfZ) Kurbelwelle mit beanspruchungsgerechter Gestaltung

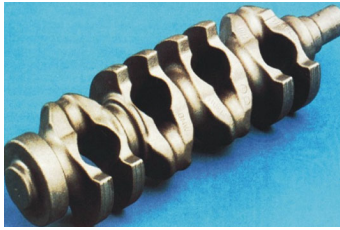


Bild (B087urfZ) Kurbelwelle mit beanspruchungsgerechter Gestaltung

Hier ist eine Gegossene Kurbelwelle in beanspruchungsgerechter Gestaltung dargestellt. Weiche Übergänge, tonnenförmiges Hohlgiesen, Entlastungsmulden und übergrosse Radien ergeben ein Verflachen der Spannungsspitzen. Damit ist die Kurbelwelle einsetzbar für dynamische Höchstbeanspruchungen.

Bei der Werkstoffauswahl sind unbedingt die Beanspruchungsart und der Beanspruchungsverlauf zu berücksichtigen. Zum Beispiel ist Grauguss zwar sehr schwingungsdämpfend aufgrund seiner inneren hohen Dämpfung. Der Werkstoff ist jedoch nicht geeignet für schlagartig beanspruchte Teile und für dynamische Beanspruchungen.

Bei der Verwendung von **Stahlguss** statt Grauguss sind auch Zugbeanspruchungen möglich.

2.4.1. Werkstoff- und verfahrensbedingte Gestaltungsregeln

Die verschiedenen Gusswerkstoffe mit ihren spezifischen Eigenschaften erfordern eine werkstoffentsprechende Gestaltung. Gusswerkstoffgerecht Konstruieren heisst: Alle mechanischen, physikalischen, chemischen und technologischen Werkstoffeigenschaften auszunutzen.

Spezifische Eigenschaften der Gusswerkstoffe

- *Gusseisen mit Lamellengraphit (Grauguss)*: Gute giesstechnische Eigenschaften, daher geeignet zur Herstellung komplizierter und hochbeanspruchter Maschinenteile. Grauguss ist gut bearbeitbar, verschleiss- und korrosionsfest. Infolge der Graphiteinlagerungen hat er eine sehr hohe innere Werkstoffdämpfung.
- *Gusseisen mit Kugelgraphit (GGG)*: Besonders für dauerbeanspruchte Werkstücke.

- *Stahlguss*: Hohe Dehnung, **Schlagzähigkeit** und **Festigkeit**, daher geeignet für hochbeanspruchte Werkstücke. Stahlguss ist schweisbar.
- *Temperguss*: **Schwarzer Temperguss** ist besonders gut bearbeitbar. **Weisser Temperguss** ist schweisbar und **zäh**.
- *Kupfer-Guss-Legierungen*: Kupfer-Zink-Legierungen (Messing). Legierung aus mindestens 50% Kupfer und ca. 44% Zink. Gute Zerspanbarkeit und hohe **Korrosionsbeständigkeit**.
- *Bronzen*: Legierungen mit mindestens 60% Kupferanteil und einem oder mehreren Hauptlegierungszusätzen, z. B. Zinn oder Aluminium. Gute Giesseigenschaften und **Lagerlaufeigenschaften** sowie hohe Korrosionsbeständigkeit. Guss-Zinn-Bronzen mit Zinngehalten bis zu 20%. Guss-Aluminium-Bronzen mit hoher Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Schweisbar. Verwendet für säurebeständige Armaturen und hochbeanspruchte Schneckenräder. Guss-Blei-Bronzen für Gleitlager.
- *Aluminium-Guss-Legierungen*: Aluminium-Silizium-Legierungen sind feinkörnig, gut zerspanbar und gut schweisbar. Aluminium-Magnesium-Legierungen sind in der Festigkeit geringer und mit zunehmendem Magnesiumgehalt schlechter giessbar. Gut **zerspanbar** und schweisbar. Aluminium-Kupfer-Legierungen schlechter giessbar, bedingt schweisbar und sehr gut zerspanbar.
- *Magnesium-Guss-Legierungen*: Geringe Dichte und geringer Elastizitätsmodul, dadurch hohe Formänderung. Gute Giessbarkeit unter Berücksichtigung sanfter Querschnittsübergänge. Gut schweisbar und sehr gut zerspanbar.

-Wandstärke und Festigkeit

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften eines Gussteils hängen wesentlich von der Abkühlgeschwindigkeit und somit auch von den Wanddicken ab. Je langsamer die Abkühlgeschwindigkeit, desto grösser wird zum Beispiel bei Grauguss der ausgeschiedene Graphit. Dadurch ergibt sich bei gleichem Gusswerkstoff und bei gleicher Qualität eine verminderte Zugfestigkeit bei grösseren Wandstärken.

Bei gleichem Gusswerkstoff nimmt die Festigkeit mit zunehmender Wandstärke ab. Die Festigkeitsangaben der Gusswerkstoffe beziehen sich stets auf 30 mm dicke Proben. Auch der **Elastizitätsmodul** ist keine konstante Grösse, sondern von der Graugussart und der Wandstärke abhängig. Die **Brinell-Härte** ist eine Funktion von Wandstärke, Werkstoff und Zugfestigkeit. Der Einfluss der Wanddicke auf Zugfes-

tigkeit und Härte bei Gusseisen mit Lamellengraphit ist im Diagramm nach DIN 1691 dargestellt.

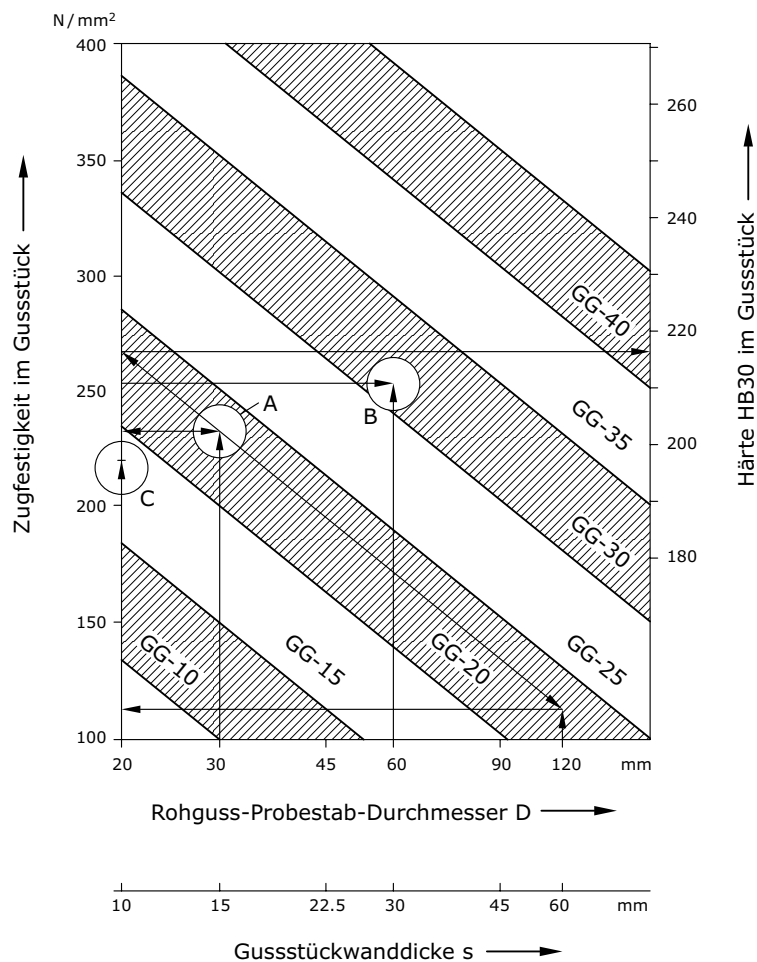


Bild (B088urfZ) Einfluss der Wanddicke auf Zugfestigkeit und Härte bei Grauguss

- Zu A: Für einen 30 mm Probestab wird eine Zugfestigkeit 230 N / mm² ermittelt, also Qualität GG 20. Bei einer Wandstärke des Gusstückes von 60 mm ergibt sich eine Zugfestigkeit von 115 N/mm², bei Einsatz einer 10 mm dicken Wand eine Zugfestigkeit von 265 N/mm².
- Zu B: Wird für eine 30 mm starke Wand eine Zugfestigkeit von 250 N / mm² gefordert, muss hierfür als Werkstoff GG 30 gewählt werden.
- Zu C: Wird für eine 10 mm dicke Wand eine Zugfestigkeit von 220 N/mm² gefordert, reicht hierfür als Werkstoff ein GG 15.

Der Wunsch nach möglichst leichten Bauteilen führt zu kleinen Wanddicken. Zu beachten sind die minimalen Wanddicken in Abhängigkeit vom Gussmaterial und vom Giessverfahren. Bei Grauguss liegen die minimalen Wanddicken in der Handformerei bei ca. 8 mm, bei kleineren Teilen und Maschinenformerei bei circa 5 mm. Die folgende Tabelle gibt für die verschiedenen Gusswerkstoffe einen Überblick über die minimalen Wandstärken und die erreichbaren Massgenauigkeiten.

alle Werte für Sandguss (03.03.010a)	GG GGG GT (GS)	Al- Legie- rungen	Mg- Legie- rungen	Zn- Legie- rungen	Messing
Wandstärke	≥ 3 (5) mm	≥ 3,5 mm	≥ 3,5 mm	≥ 3,5 mm	≥ 3,5 mm
erreichbare Massgenauigkeit	± 1 mm	± 0,8 mm	± 0,8 mm	± 0,8 mm	± 1 mm

Tabelle (T012urfZ) Überblick über minimale Wandstärken und erreichbare Massgenauigkeiten

Bei Unterschreitung der minimalen Wanddicken kommt es zu einer **Versprödung** des Werkstoffes.

2.4.2. Modell- und formgerechtes Gestalten

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen Einformen, Ausformen, Modell- und Formteilung, Lage der Elemente zur Teilungsebene sowie Gestaltung und Anordnung von Kernen behandelt. Die angeführten Beispiele beziehen sich im wesentlichen auf Hand- und Maschinenformverfahren beim Sandguss.

Modellschrägen

Um zu vermeiden, dass beim Ausheben des Modells Formsand am Modell hängen bleibt und die Form beschädigt wird, sind sog. **Form-** oder Aushebeschrägen erforderlich.

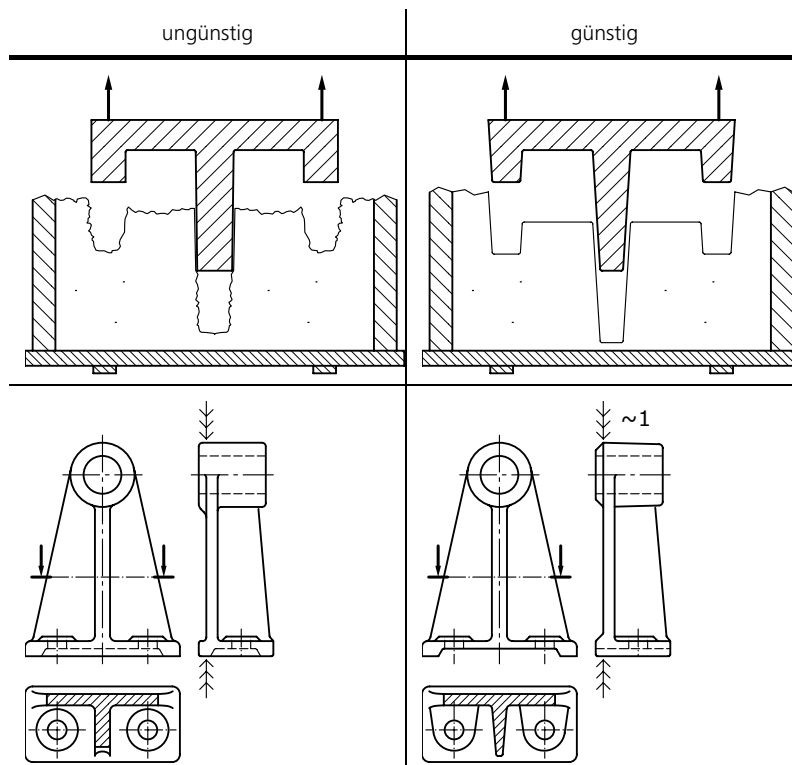


Tabelle (T013urfZ) Aushebeschrägen vorsehen

Die Modellschrägen sollen generell so gross wie möglich gewählt werden. Ferner sind sie abhängig von der Aushebeart (Losklopfen oder Ziehen) und von der Aushebetiefe:

- grosse loszuklopfende Modelle: Neigung 1:100
- kleinere, zu ziehende Modelle: Neigung 1:50 bis 1:20
- Naben, Augen, Bearbeitungsleisten: Neigung 1:10 bis 1:5

Je grösser die Neigung der Aushebeschräge, desto risikoloser ist die Entformung. Auch bei der Gestaltung von Augenverstärkungen ist das Ausheben des Modells aus der Form zu beachten (siehe Bild oben).

Form- und Modellteilung

Durch zweckmässiges Anordnen der **Teilfugen**, das heisst durch geschickte Teilung der Form und Modelle können die Kosten einer Gusskonstruktion stark beeinflusst werden. Die **Teilebenen** sind grundsätzlich so zu legen, dass die unbearbeitet bleibenden Flächen, die noch gut aussehen und masshaltig sein sollen, nicht von einer Teilfuge durchschnitten werden.

Bei jedem Werkstück gibt es meist mehrere Möglichkeiten zur Formteilung. Der Konstrukteur sollte schon beim Entwurf eines Gussstückes die Teilungsebene festlegen und einzeichnen. Damit ergibt sich meist eine modell- und formtechnisch richtige Gestaltung des Werkstückes.

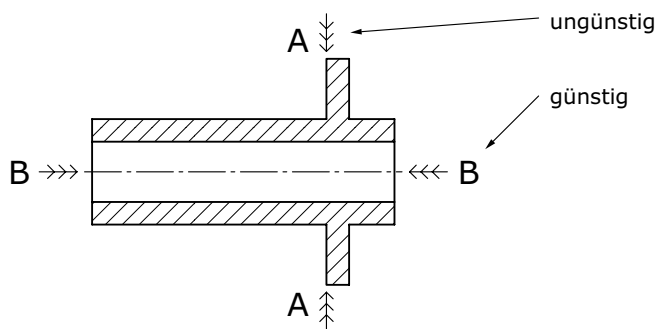


Bild (B221urfZ) Modell- und formtechnisch richtige Gestaltung des Werkstückes

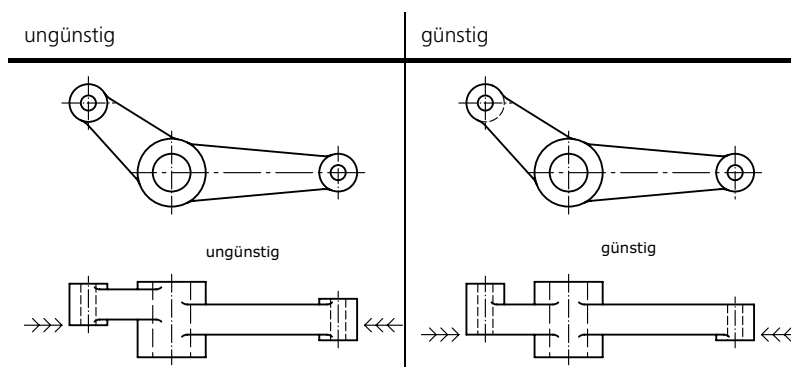


Tabelle (T014urfZ) Möglichkeiten zur Teilung einer Gussform

Im ersten Beispiel (oben) erscheint die Teilungsebene A-A auf den ersten Blick günstiger (kein **Kern** notwendig). Dafür ist beim Herausziehen des langen zylindrischen Teiles aus der Form mit Problemen zu

rechnen. Aus diesem Grund ist hier Teilungsebene B-B trotz Kern die bessere Wahl. Im zweiten Beispiel ist klar ersichtlich, wie durch richtige Wahl der Teilungsebene komplizierte Formen vermieden werden können.

Vermieden werden sollten gebrochene Teilungsebenen, anzustreben sind gerade Teilungsebenen.

Hinterschneidungen und Einschnürungen müssen umgangen werden. Sie führen oft dazu, dass komplizierte Modelle oder Kerne erforderlich sind bzw. dass auch bei relativ einfachen Teilen ein Mittelkasten erforderlich wird. Durch zweckmässige Lage der Teilfuge zwischen Ober- und Unterkasten lässt sich die Gefahr von Formkastenversatz verringern (siehe folgendes Bild). Mittige Lage der Teilfuge führt unter Umständen zu Versatz und zu einer unerwünschten Gussnaht.

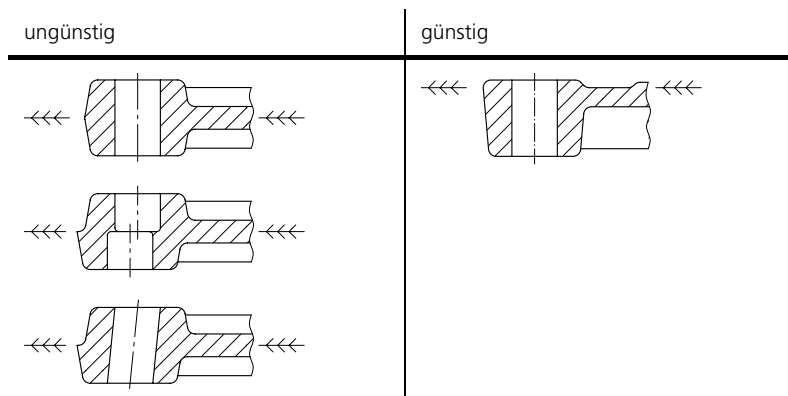


Tabelle (T015urfZ) Formkastenversatz vermeiden durch geschickte Wahl der Teilungsebene

Für das Ein- und Ausformen von Rippen und offenen Profilen ist die richtige Formteilung entscheidend für die Kosten. Die beiden rechten Konstruktionen (folgendes Bild) lassen sich einfach unter Anwendung eines oberen und unteren Formkastens herstellen. Die Anordnungen auf der linken Seite lassen sich nur mit komplizierten und teuren Aussenkernen realisieren.

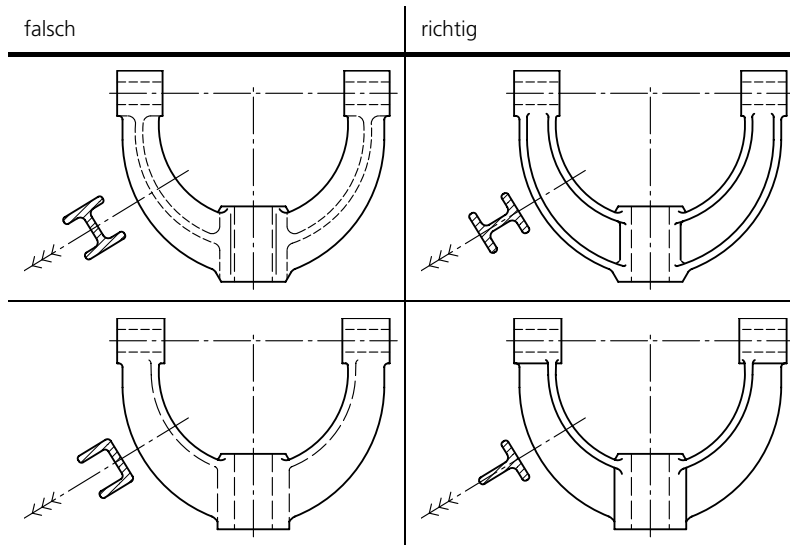


Tabelle (T016urfZ) Formteilung bei offenen Profilen

Die Einförmigkeit hat Auswirkungen auf die Formteilung sowie die Kasten- und Kernzahl. Kasten- und Kernzahl beeinflussen massgeblich die Gusskosten und den späteren Gussputzaufwand.

Kerngestaltung und -lagerung

Die in komplizierten Gussteilen erforderlichen Hohlräume lassen sich nur mit Hilfe von Kernen realisieren. Soweit möglich sollen aus Kostengründen möglichst einfache Kernformen gewählt werden. Beim Giessen erfahren Kerne in der Metallschmelze einen Auftrieb, dieser wiederum ist Ursache für Massabweichungen. Wichtig ist deshalb die ausreichende Fixierung der Kerne durch Kernmarken und Kernstützen. Auch durch Verbinden der Kerne untereinander kann eine einwandfreie Festlegung erreicht werden.

Es sollte nicht nur eine einfache Kernform, sondern auch eine einfache Kernherstellung angestrebt werden. Durch Änderung der Konstruktion können unter Umständen Kerne insgesamt vermieden werden.

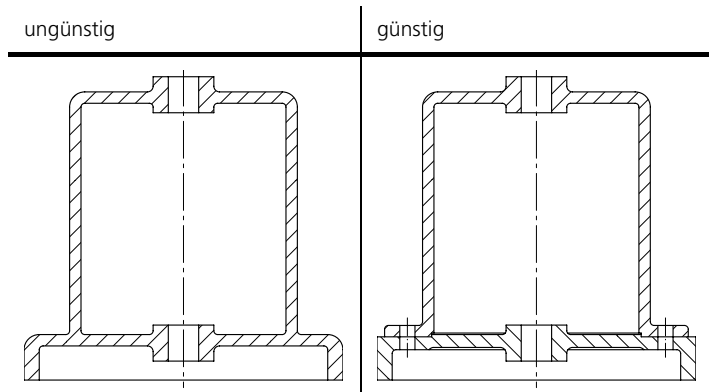


Tabelle (T017urfZ) Vermeidung quasi geschlossener Hohlformen

Eine geschlossene Hohlform kann zum Beispiel aufgelöst werden in zwei Einzelwerkstücke, die miteinander verschraubt werden.

Jedoch ist bei der Vereinfachung und Einsparung von Kernen zu beachten, *dass ein komplizierter, ohnehin erforderlicher Kern, unter Umständen billiger ist, als mehrere Kerne mittlerer Schwierigkeit.*

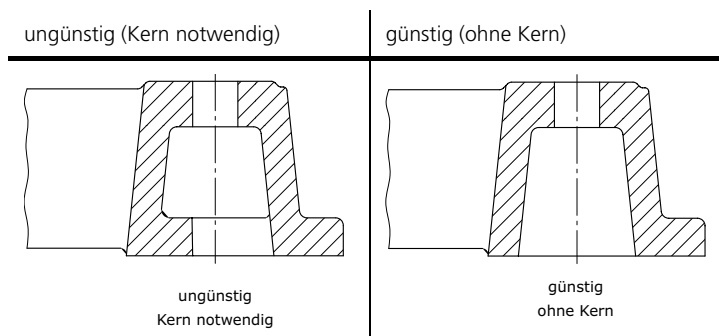


Tabelle (T018urfZ) Gussgerecht und kostengünstig gestalteter Kernzug

Durch geschickte konstruktive Gestaltung können Kerne, wie im obigen Bild zu sehen ist, manchmal sogar ganz entfallen.

Einen Einblick in die Komplexität der Kerngestaltung gibt das folgende Bild. In dieser Kernstruktur sind zehn Einzelkerne zu einem Kernpaket zusammengefasst.

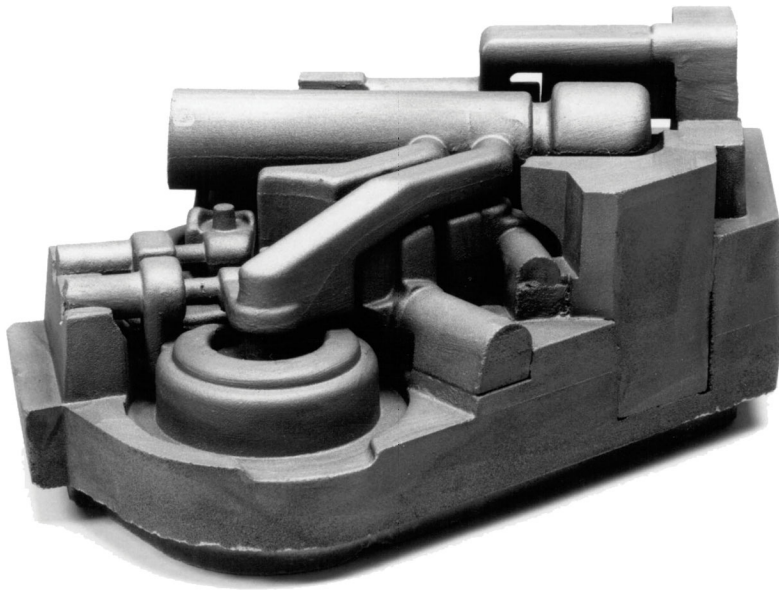


Bild (B101urfZ) Kernpaket aus zehn Einzelkernen [Foto: Schenk]

2.4.3. Giessgerechtes Gestalten

Beim giessgerechten Konstruieren sind im wesentlichen die folgenden Gestaltungsregeln einzuhalten:

- Vermeidung von Materialanhäufung, da sonst Gefahr von Lunkern
- Übergänge nicht mit zu grossen Radien versehen
- Giesstrichter und Steiger ausreichend gross
- grosse horizontale Flächen vermeiden, da sonst Luft- und Gasblasenbildung
- gleichmässige Wanddicken vorsehen, sonst Gefahr von Schrumpfspannungen und Rissbildung
- günstige Querschnitts- und Masseverteilung
- Übergänge zur Aufnahme von Spannungen durch Rippen verstärken

Vermeiden von Materialanhäufungen

Durch Materialanhäufungen entsteht ein ungleichmässiger Erstarungsprozess durch langsames Erkalten der Bereiche mit Stoffanhäufungen. Dadurch steigt die Lunkergefahr stark an. Beim Zusammentreffen mehrerer Wände treten häufig Materialanhäufungen auf, die sich durch Ausnehmungen oder Verlegung einer Wand beseitigen lassen.

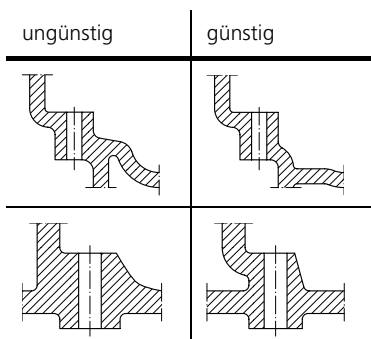


Tabelle (T019urfZ) Materialanhäufung: Günstige und ungünstige Formen

Erscheint aus Festigkeitsgründen eine Materialanhäufung erforderlich zu sein, so kann diese häufig durch eine Rippenverstärkung vermieden werden.

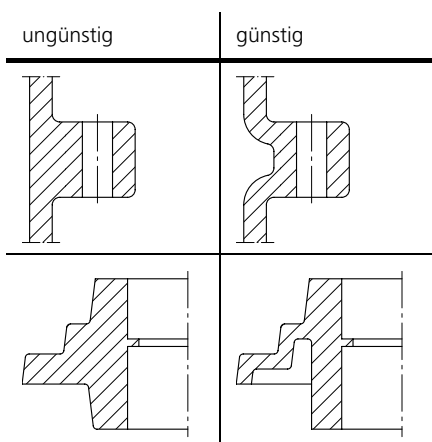


Tabelle (T020urfZ) Rippenverstärkung zur Verbesserung der Festigkeit

Eine Umkonstruktion entsprechend der punktierten Linie ergibt zwar eine gleichmässige Wanddicke, würde aber durch die dann auftretende Hinterschneidung zwischen den beiden Flanschen zusätzlichen Formaufwand erfordern; rechts die fertigungsgerechte Ausführung mit gleichmässigen Wanddicken.

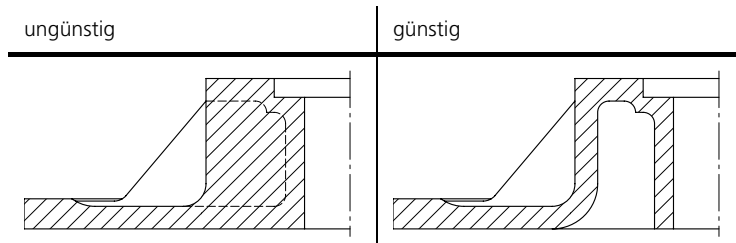


Tabelle (T021urfZ) Günstige und ungünstige Gestaltung

Lunker bilden sich an allen Stellen, an denen sich Werkstoff anhäuft.

Wichtig: *Übergänge gut abrunden, jedoch Radius nicht zu gross wählen, da sonst Gefahr von Rissbildung.*

Oberstes Ziel beim Konstruieren mit Gusswerkstoffen ist die Forderung nach gleichen Wandstärken und sanften Übergängen. Eine kontrollierte Abkühlung mit zum **Speiser** gerichteter Erstarrung und günstiger Massenverteilung kann mit der **Heuverschen Kontrollkreis-methode** erreicht werden.

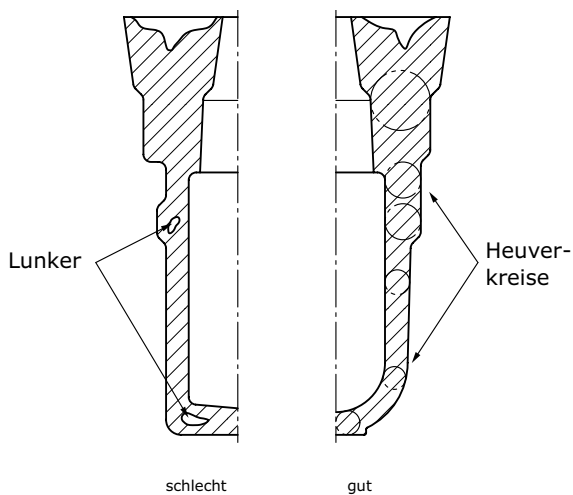


Bild (B105urfZ) Querschnittsgestaltung bei Gussteilen

Die Kreise werden zum Speiser hin stetig grösser. Das Thermisches Zentrum liegt damit ausserhalb des Gussstückes und kann die Nachspeisung übernehmen. Eine lunkerfreie Erstarrung ist somit gewährleistet.

Zu beachten ist: *Eine Vermeidung von Materialanhäufung und eine kontrollierte Erstarrung sind bei Werkstoffen mit grosser Volumenkontraktion (wie zum Beispiel Stahlguss) besonders wichtig.*

Die Ausbildung von Knotenpunkten mit sanften Übergängen sowie nicht zu grossen und zu kleinen Radien ist wichtig, um Materialanhäufungen zu vermeiden. Ausserdem sollten spitze Winkel vermieden werden, da diese auf Grund von Wärmekonzentration die Form extrem belasten.

Zu grosse Ausrundungen führen zu Materialanhäufungen (Bild unten), der Radius sollte deshalb etwa 30% der Wanddicke betragen. Durch ein „Einziehen“ der Wand erreicht man einen gleichmässigen Querschnitt über die Wand hinweg. Beim Zusammentreffen von Wänden unterschiedlicher Dicke ist ein allmählicher Querschnittsübergang vorteilhaft.

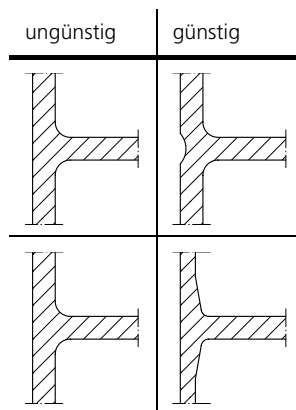


Tabelle (T022urfZ) Allmählicher Querschnittsübergang

Kreuzknoten lassen sich oft in mehrere T-Knoten mit geringerer Materialanhäufung umwandeln. Dies entspricht auch den Grundregeln für eine spannungsarme Konstruktion. Auch bei Y-Knoten ist darauf zu achten, dass der Ausrundungsradius nicht zu gering ist.

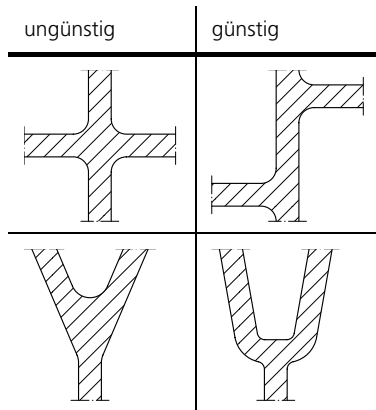


Tabelle (T023urfZ) T-Knoten statt Kreuzknoten

Je grösser die Wanddicken und je mehr Wände in einem Knotenpunkt zusammentreffen, desto umfangreicher wird die Materialanhäufung. Die Materialanhäufung kann mit einem Ringwulst aufgelöst werden.

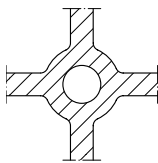


Bild (B206urfZ) Ringwulst Variante 1

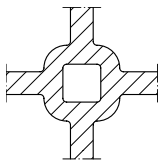


Bild (B207urfZ) Ringwulst Variante 2

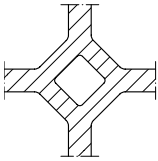


Bild (B208urfZ) Ringwulst Variante 3

Da Querschnittsunterschiede in vielen Fällen jedoch unumgänglich sind, sollte hier zumindest auf sanfte Übergänge geachtet werden.

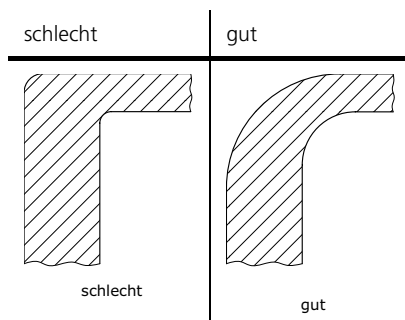


Tabelle (T024urfZ) Giessgerechtes Gestalten von Rundungen bei unterschiedlichen Wanddicken

Richtige Ausbildung der Radien ist äusserst wichtig, denn:

- scharfe Innenecken sind Ausgangspunkte für Risse,
- grosse Innenradien ergeben Lunker Gefahr und
- an scharfen Aussenecken und -kanten entsteht durch den kalten umgebenden Sand durch rasche Abkühlung ein hartes Gefüge (Kantenhärte führt zu erschwerter Zerspanbarkeit).

Vermeidung von Spannungen und Rissen

Durch die Volumenkontraktion während der festen Schwindung entstehen Schrumpfspannungen. Diese führen zu Verziehungen und Rissen. Wichtig ist daher die elastische, schrumpfspannungsarme und rissfreie Gestaltung.

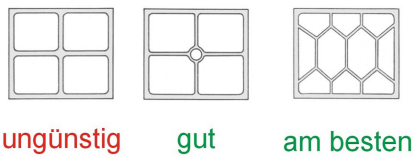


Bild (B110urfZ) Spannungsvermeidung in einem Rechteckquerschnitt

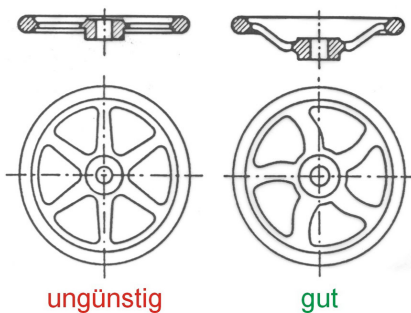


Bild (B111urfZ) Spannungsvermeidung an einem Handrad

Vermeidung von Gasblasen

An grossen, waagrecht liegenden Gussteilflächen bilden sich leicht Luftblasen, da die Schmelze in grösseren waagerechten Räumen den Zusammenhang verliert. Dieses Problem kann durch eine schräge Anordnung der Flächen gelöst werden, was zudem spannungsmässige Vorteile hat.

Die Vermeidung von Gasblasen ist ebenfalls durch die richtige Anordnung der Speisetrichter und durch Eliminieren von Drosselstellen zu vermeiden.

Dichtes Gefüge bildet sich jeweils im unteren Bereich des Gussstückes aus. Diese Eigenschaft kann bewusst ausgenutzt werden, indem die Einformlage gleich der Einbaulage ist. Als Beispiel seien hier Führungsbahnen für Werkzeugmaschinen angeführt, bei denen eine lunkerfreie, gleichmässige und dichte Ausführung erforderlich ist.

Vermeiden sperriger Formen

Ohne die gusstechnische Gestaltungsfreiheit einengen zu wollen, sollten sperrige Teile vermieden werden. Eine Endzerlegung in zwei oder mehrere einfache Werkstücke, die anschliessend durch Schweiessen oder Schrauben miteinander gefügt werden, kann wirtschaftlicher sein. Sperrige Formen erfordern:

- ein aufwendiges Modell,
- grosse Formkästen und
- unter Umständen komplizierte Kerne.

Darüber hinaus erschweren sperrige Formen die Zugänglichkeit beim Gussputzen und bringen ein hohes Ausschussrisiko mit sich.

Deshalb gilt:

- Einfache und sicher aufliegende Kerne verwenden!
- Aussenkerne vermeiden!
- Stoffanhäufungen und schroffe Übergänge vermeiden!
- Übergänge gut runden!
- Aushebeschrägen vorsehen!
- Hinterschneidungen vermeiden!
- Versteifungsrippen dünner als Wände vorsehen!
- verwickelte Teilstücke getrennt giessen!
- Bearbeitungszugabe vorsehen!
- Bearbeitete Flächen möglichst in eine Ebene legen!

In den beiden folgenden Gehäusevarianten sind verschiedene Richtlinien dargestellt:

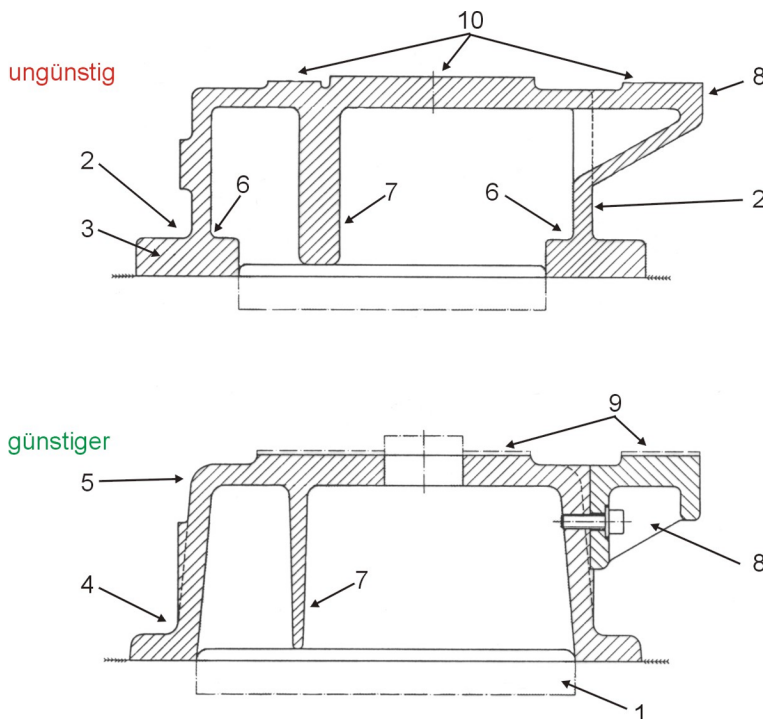


Bild (B112urfZ) Giessgerechte Gestaltung von Gehäusen

2.4.4. Bearbeitungsgerechtes Gestalten

Kosten für die spanende Bearbeitung beeinflussen die Wirtschaftlichkeit der Fertigung wesentlich. Deshalb bereits bei der Konstruktion der Gussteile die nachfolgende spanende Bearbeitung berücksichtigen und Massnahmen zu ihrer Erleichterung treffen.

Es sind dies im einzelnen:

- Minimierung bzw. Vermeidung von spanender Bearbeitung,
- Spannen und Umspannen der Werkstücke auf den verschiedenen Maschinen,
- Werkzeuganschnitt und Werkzeugauslauf sowie Freiräume,
- eingesetzte Fertigungsverfahren und Maschinenarten,
- Grösse, Lage und Richtung der zu bearbeitenden Flächen,
- Massbezugsebene sowie Ausmitteln zwischen Roh- und Fertigteil,
- gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Stücke,
- Komplettbearbeitung.

Spannen und Umspannen

Da die giesstechnische Gestaltung eine Fülle von Freiheitsgraden erlaubt, ergeben sich häufig Werkstückformen, die das Spannen bei nachfolgenden Arbeitsschritten erschweren.

Deshalb muss man bei komplizierten Werkstückformen spezielle Spannflächen oder angegossene Spannplatten vorsehen. Bei kleineren Gussstücken in komplizierter Form können mehrere Teile zusammen durch einen Spannrahmen verbunden abgegossen werden. Dieser wird erst nach Beendigung der spanenden Bearbeitung abgetrennt. Wie bereits anfangs erwähnt, ertragen Gussmaterialien zumeist erheblich mehr Druck als Zug oder Scherung. Aus diesem Grund sollte man Spannungspunkte generell so festlegen, dass Spannkraften möglichst nur Druckspannungen im Gussstück erzeugen.

Die erste Aufspannung des Rohteils muss die Bearbeitung einer Massbezugsebene ermöglichen. Das heisst, dass möglichst früh Bezugspunkte oder eine Bezugsebene bearbeitet werden, von denen/der ab dann weitere Bearbeitungsmasse vergeben werden können. Für möglichst geringe Abweichungen vom Sollmass müssen so viele Flächen wie möglich innerhalb der selben Aufspannung ohne ein Umspannen bearbeitet werden. Dies wird zum Beispiel relativ einfach erreichbar durch eine Konzentration der Bearbeitung auf wenige Seiten des Werkstückes.

Bearbeiten

Voraussetzung für einwandfreie spangebende Bearbeitung ist die gute und sichere Spannung der Werkstücke.

Zu bearbeitende Flächen müssen zugänglich liegen für die Werkzeuge. Bei ungünstiger Ausführung des Gussteils ist unter Umständen weder eine Bearbeitung mit dem **Stirnfräser** noch mit dem **Wälzfräser** möglich. Da eine Vielzahl von Gussteilen gehäuse- oder kastenartig gestaltet ist, muss speziell für die Innenbearbeitung Rücksicht auf die Werkzeugabmessungen sowie ggf. auf die Abmessungen der Werkzeughalterungen, den Anschnitt und den Auslauf des Werkzeugs sowie auf die Zugänglichkeit für den Werkzeughalter genommen werden.

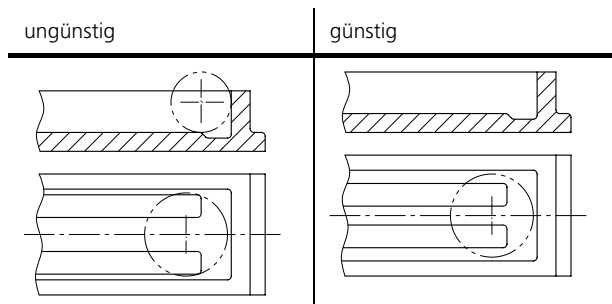


Tabelle (T025urfZ) Bearbeitungsgerechtes Gestalten von Anschnitt und Auslauf

Da Rippen nur aussteifende Elemente sind und daher keine direkte Auflage- oder Anschlagelemente darstellen, sind sie niedriger auszuführen als die spanend zu bearbeitenden Flächen.

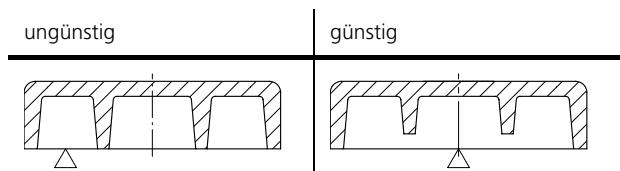


Tabelle (T026urfZ) Bearbeitungsgerechtes Gestalten von Rippen

Schrägliegende Bearbeitungsflächen sind unerwünscht. Die Bearbeitungsflächen sollten immer senkrecht zur Vorschubrichtung des Werkzeugs liegen, um den Werkzeugverlauf zu minimieren und ein sauberes Anschneiden zu gewährleisten. Vorzuziehen sind rechtwinklig aufeinanderstehende Bearbeitungsflächen.

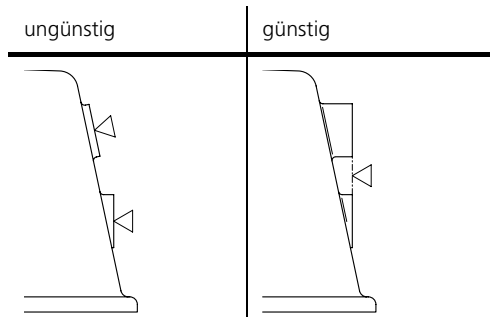


Tabelle (T027urfZ) Bearbeitungsgerechtes Gestalten von Bearbeitungsflächen

Nicht nur am Werkzeugeintritt sind rechtwinklig zur Fläche verlaufende Bohrungen anzustreben. Auch am Werkzeugaustritt sollen schräge Flächen vermieden werden, da sonst die Gefahr eines Bohrerbruchs besteht. Wegen möglicher Massabweichungen sind am Bauteil ausreichende Verstärkungen für Bohrungen und Gewindelöcher vorzusehen.

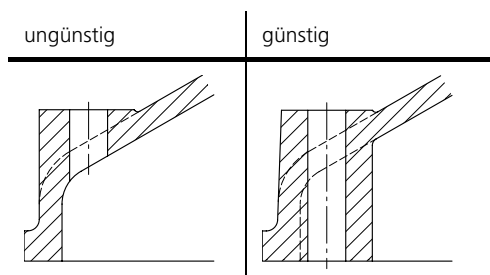


Tabelle (T028urfZ) Bearbeitungsgerechtes Gestalten von Bohrungen

Bearbeitungsflächen auf unterschiedlichem Niveau sind zu vermeiden, da dies die Bearbeitungszeit durch Werkzeugwechsel usw. nach oben treibt. Folge: Herstellung wird teuer. Ausserdem sind unterbrochene Flächen (Einzelaugen) auf gleichem Niveau durch grossflächige Bearbeitungsstellen zu ersetzen. Dadurch wird ein kontinuierlicher, schnellerer Prozess möglich; die Probleme, die durch oftmaliges Anschneiden der Werkzeuge erzeugt werden (Verringerung der Standzeit der Werkzeuge, erhöhte Ungenauigkeit), können so umgangen werden. Grosse Standflächen, zum Beispiel Sockel für Maschinen, sind zu unterteilen, um den Zerspanungsaufwand zu ver-

ringern. Präzise zu bearbeitende Flächen sollen möglichst klein gehalten werden.

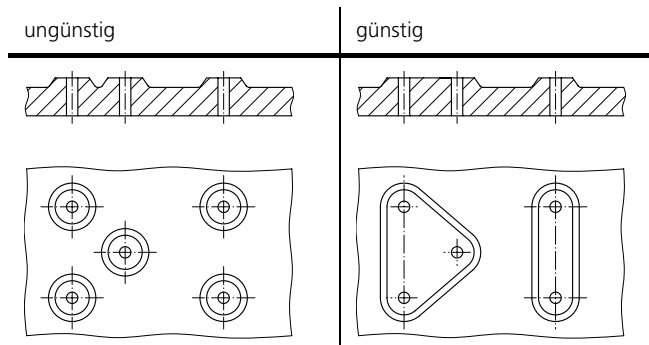


Tabelle (T029urfZ) Bearbeitungsgerechtes Gestalten von Standflächen

Bearbeitungszugaben

Die erforderlichen Bearbeitungszugaben sind bei der Zeichnungsbe-messung und bei der Modellerstellung zu berücksichtigen und sind in Abstimmung zwischen Konstrukteur und Giessereifachmann festzule-gen. Einfluss auf die Bearbeitungszugaben haben:

- Gusswerkstoff
- erforderliche Spantiefe des Bearbeitungsverfahrens
- Massgenauigkeit und Oberflächenforderungen am Fertigteil
- zulässige Abweichung des Rohteilnennmasses in Bearbeitungs-richtung (Grösse des Werkstücks)

Zugaben auf jeden Fall ausreichend vorsehen (Bild in Tabelle T067urfZ, rechts), um bei eventuellem Bauteilverzug (links) noch ausreichend Material für die Bearbeitung zu haben. Angaben über Bearbeitungszugaben in den DIN-Blättern DIN 1680-1 und -2, 1683-1, 1685-1 und 1686-1.

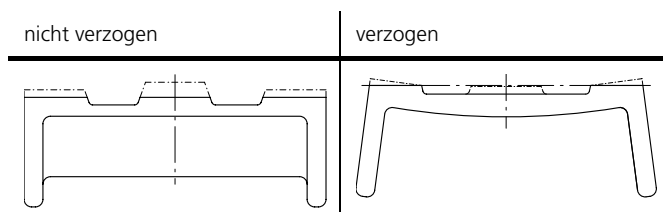


Tabelle (T067urfZ) Bearbeitungszugaben um Verzug vorzubiegen

2.5. Firmen und Organisationen zum Schwerkraftgiessen

Siehe auch: [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Medimet Feinguss AG	Medizinische Teile
Kessel Feinguss GmbH	Werbegeschenke
I.B.O	Automobilzulieferer, Feinguss und Sintern
Otto Kälin	Gussteile
Leichtmetallgiesserei Rolf Brunner	Sand- und Kokillenguss
Kurtz Industrial Technologies Company	Giessereianlagen
Metallgiesserei Matzensdorf	Kokillengiesserei
R.Frei AG	Leichtmetallgiesserei
Von Roll	Industrieguss
Giroud Fonderie	Gehört zu Von Roll
Giesserei Hegi AG	Alu-Guss

Tabelle (T030urfZ) Firmen Schwerkraftgiessen

Organisation	Beschreibung
Giesserei-Verband Schweiz	Giessereiverband
Verband schweizerischer Schrott-Verbraucher	Verband
Eurometaux	Europ. Nichteisenmetallindustrie
Aluminium	Europäische Aluminium Gesellschaft
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Eisen-, Blech- und Metallverarbeitende Industrie	Wirtschaftsverband
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
SMU	Schweizerische Metall-Union
Verband deutscher Maschinen- und Anlagebau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T031urfZ) Organisationen Schwerkraftgiessen

3. Urformen aus flüssigem Zustand: Druckgiessen

Beim **Druckgiessen**, engl. *Pressure Die-Casting*, wird das flüssige Giessmetall maschinell unter hohem Druck und mit relativ grosser Geschwindigkeit in eine sehr genau gefertigte, metallische zweiteilige Dauerform aus Warmarbeitsstahl gepresst.

Druckgiessen ist heute eines der gängigsten Giessverfahren für mittlere bis grosse Serien.

3.1. Eigenschaften

Druckgussteile zeichnen sich durch hohe Masshaltigkeit und sehr gute Oberflächenbeschaffenheit aus. Der Putzaufwand ist gering, Entgratung der Kanten erfolgt häufig durch **Trovalisieren**: Die Teile werden innerhalb eines Behälters zusammen mit „Schleifsteinen“ umgewälzt. Die Nachbearbeitung beschränkt sich auf eng tolerierte Passflächen und das Einschneiden von Gewinde, falls dies nicht bereits in einigen Sonderfällen als Grobgewinde mitgegossen oder als **Einsatzteil (Insert)** mit eingegossen wurde.

Der Materialaufwand ist niedrig, zumal auch die Anwendbarkeit dieses Verfahrens auf Gussstücke mit verhältnismässig dünnen Wandstärken beschränkt ist. Kerne werden durch mechanisch rückziehbare Schieber im Werkzeug realisiert.

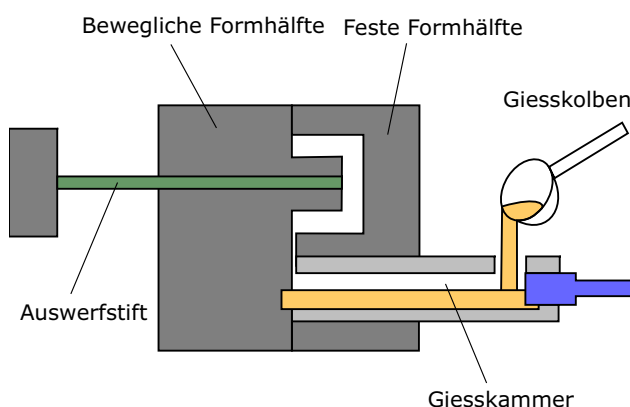


Bild (B025urfZ) Das flüssige Giessmetall wird in den Kolben gegeben

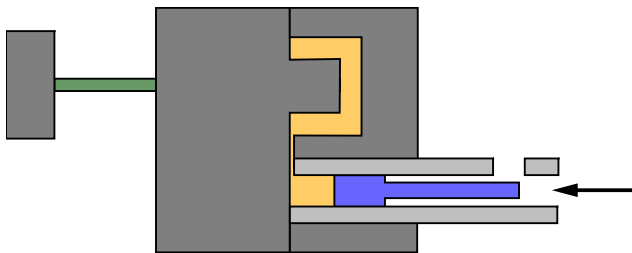


Bild (B026urfZ) Der Kolben drückt das flüssige Metall in das Werkzeug

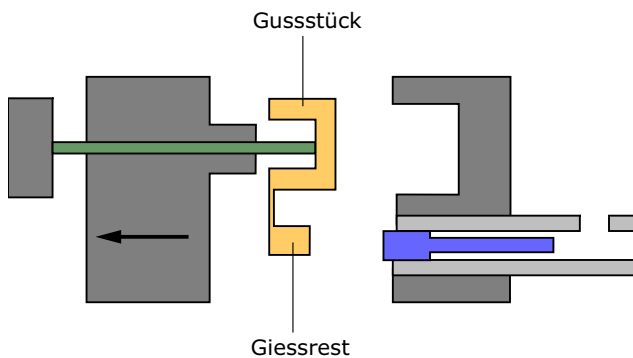


Bild (B027urfZ) Nach der Abkühlung wird das Gussteil von Stößeln ausgeworfen

Als Werkstoffe kommen NE-Metalle wie Alu-, Zink-, Blei-, Kupfer-Zink- oder Magnesiumlegierungen in Frage.

Vermehrt, infolge der noch geringeren (trotz tieferen Festigkeitswerte) Dichte, wird Mg-Druckguss eingesetzt. Die tiefen Festigkeitswerte werden durch verrippte Formgebung, also Erhöhung der Bauteilfestigkeit ausgeglichen. Überall dort, wo geringes Gewicht, moderate Belastung, Feingliedrigkeit gefragt sind, kann Mg-Druckguss sinnvoll sein (z. B. Lenkrad-Innenteil).

Eine neuere Verfahrensvariante des Druckgiessens ist das **Thixo-Casting**; dabei wird der Werkstoff nicht im flüssigen, sondern im halbflüssigen Zustand ab Stangenmaterial eingepresst.

Eignung des Verfahrens

Werkstoffe	NE-Metalle, vor allem Leichtmetalle auf Al- oder Mg-Basis
Werkstücke	< 45 kg
Wandstärke	> 0,8 mm
Stückzahl	> mittlere bis grosse Serien
Toleranzen	0,1-0,4% (0,3-0,1 mm)
Oberfläche	einbaufertig bis auf exakte Toleranzflächen und Gewindepertien

Tabelle (T032urfZ) Einsatzgebiete Druckgiessen

3.2. Einsatzgebiet und Teilebeispiele beim Druckgiessen

Druckgiessen findet seine Anwendung in: Motorengehäuse, Getriebegehäuse, Elektronikgehäuse, Armaturen, Verbindungstechnik, Felgen, Leichtbau, Fahrzeugbau sowie elektrische Gehäuse und Stecker.



Bild (B028urfZ) Flugplatz-Begrenzungsleuchte (Matthies)



Bild (B029urfZ) (Fondarex)



Bild (B100urfZ) (Fondarex)



Bild (B031urfZ) (Bühler)



Bild (B102urfZ) Dübel (Zinc Fonderie)

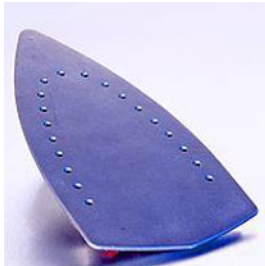


Bild (B030urfZ) Bügeleisen (Bühler)



Bild (B032urfZ) (Metallic)

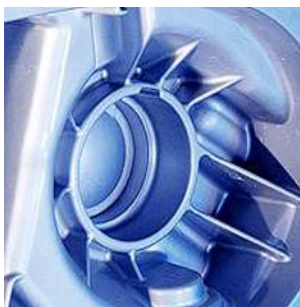


Bild (B033urfZ)

Typisches Merkmal druckgegossener Bauteile: Rippenartige Verstrebungen (Bühler)

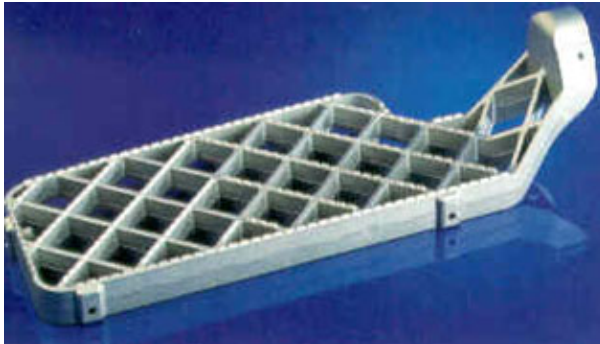


Bild (B034urfZ) Trittbrett (Metallic)

3.3. Konstruktionsrichtlinien Druckgiessen

Grundsätzlich gelten für Druckgussteile die gleichen Richtlinien wie für Schwerkraftguss. Zusätzlich sind jedoch einige spezifische Gegebenheiten zu berücksichtigen. Die Werkzeugkosten für die Druckgussform sind im allgemeinen sehr hoch, da aus dem Vollen gearbeitet wird. Daher folgende Gesichtspunkte wichtig:

- einfache Gestalt des Werkstücks anstreben
- Vermeidung von Hinterschneidungen
- ggf. komplizierte Werkstücke in mehrere einfache Einzelstücke zerlegen

Kastenförmige Gussstücke sind in den Ecken zu verstärken, da hier besonders bei höheren Wänden Einrissgefahr besteht.

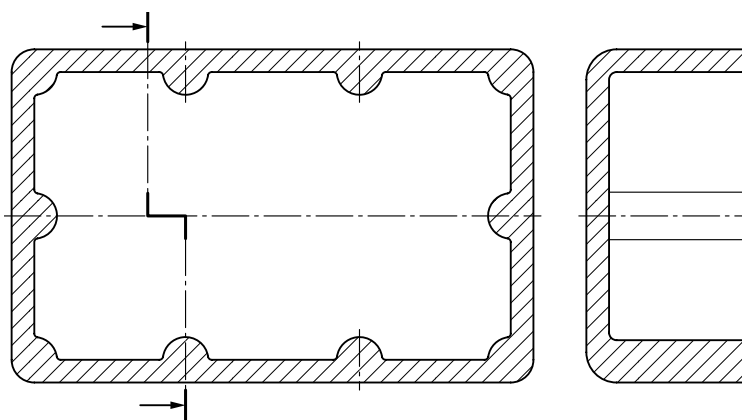


Bild (B099urfZ) Druckgussgerechtes Gestalten kastenförmiger Bauteile

Lange durchgehende Bohrungen sind zu vermeiden, da diese das Ausformen erschweren. Stattdessen kann eine lange Bohrung in mehrere fluchtende Einzelbohrungen aufgeteilt werden.

Hinterschneidungen erfordern eine aufwendige Kernzugkinematik (siehe Bild). Aus diesem Grund ist es auch im Druckguss anzustreben, möglichst auf Hinterschneidungen zu verzichten.

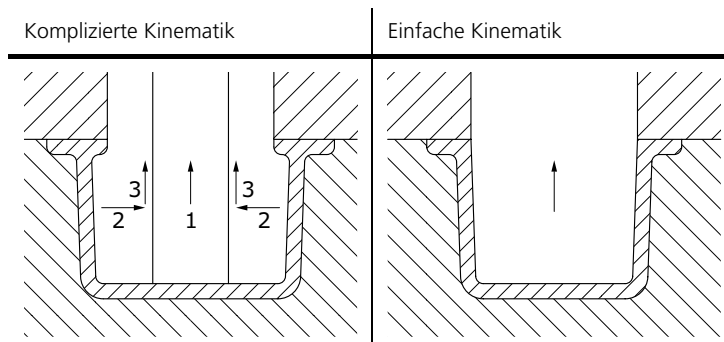


Tabelle (T033urfZ) Kernzug bei Druckgussteilen

Da Druckguss praktisch ausschliesslich mit Leichtmetalllegierungen ausgeführt wird, kann bei hochbeanspruchten Elementen des Werkstückes die Festigkeit des Werkstoffes unter Umständen nicht ausreichen. Durch die Verwendung von Einlegeteilen kann dieses Problem gelöst werden. Stahlteile, wie zum Beispiel Gewindebuchsen, Gewindestifte, Lagerbuchsen, Führungsstifte etc. werden direkt in der Form mit eingespritzt. Die so mit dem Gusswerkstück verbundenen Teile sind – möglichst formschlüssig – gegen Verdrehen und Herausziehen zu sichern. Stahl- bzw. Gusseisenteile lassen sich direkt mit Leichtmetall verbinden. Vorhandene Stahl-Gussteile werden durch Umgiessen mit Druckgussmetall zu einer Einheit. Damit ist auch eine unlösbare Verbindung ohne mechanische Sicherung realisierbar.

Eine besondere Variante des Druckgusses ist der Feinguss. Auch hier gelten grundsätzliche Richtlinien vergleichbar zum Sandguss, wie keine abrupten Wanddickenübergänge, Vermeidung von Materialanhäufungen etc. Beim Feinguss sind – im Gegensatz zu den übrigen Giessverfahren – normalerweise keine Formschrägen erforderlich. Nur in Ausnahmefällen werden Formschrägen zwischen 1 und 3 Grad benötigt.

3.4. Firmen, Organisationen zum Druckgiessen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Fondarex	Vakuumdrukussanlagen
Schlicht Druckguss	Druckgussteile
Bühler Druckguss	Druckgussmaschinen
Von Roll Druckguss	Druckgussteile
Kletterer Druckguss	
Matthies Druckguss	
Giesserei Erlau	

Tabelle (T034urfZ) Firmen Druckgiessen

Organisation	Beschreibung
Zinc Fonderie	Zinklegierungshersteller, Giessereien und Lieferanten von Giessereiausrüstungen
I.Z.A.	Internationale Zink-Verienigung
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T035urfZ) Organisationen Druckgiessen

4. Urformen aus flüssigem Zustand: Niederdruckgiessen

Beim **Niederdruck-Kokillenggiessverfahren**, engl. *Low-pressure die casting*, wird die Form über ein Steigrohr von unten durch einen geringen Überdruck von etwa 0,2 bis 0,8 bar, elektromagnetisch oder durch ein Vakuum in der Kokille gefüllt. Nach einem ruhigen Füllen der Form lässt man das Gussstück unter Aufrechterhaltung des geringen Über-/Unterdrucks erstarren.

Durch die im Vergleich zum Formsand erhöhte Wärmeleitfähigkeit der metallischen Form und somit schnellere Abkühlung, resultiert feinkörniges Gefüge mit besseren Festigkeitseigenschaften.

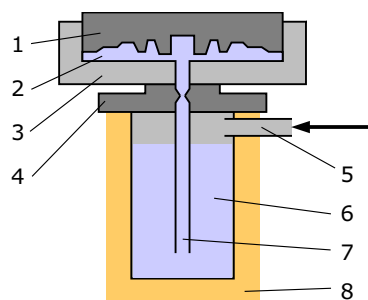


Bild (B035urfZ) 1 Oberform 2 Werkstück 3 Unterform 4 Deckel 5 Druckluft 6 Schmelze 7 Steigrohr 8 Ofen

Siehe auch Schwerkraftgiessen ([Kokillenggiessen](#))

Werkstoffe	Gusseisen und NE-Metalle
Werkstücke	< 100 kg
Wanddicke	> 3 mm
Stückzahl	kleinere Serien bis Grossserien
Toleranzen	0,3... 0,6% ($\pm 0,2-0,3$ mm)

Tabelle (T036urfZ) Einsatzgebiete Niederdruckgiessen

5. Urformen aus flüssigem Zustand: Schleudergiessen (Spin Casting)

Das Giessmetall wird in eine um ihre Achse rotierende, rohr- oder ringförmige Kokille gefüllt, in der es unter Einwirkung der Zentrifugalkraft zu Büchsen, Ringen und Rohren (z. B. Druckrohre aus Gusseisen mit Kugelgraphit, Rohre aus Kupfer und Kupferlegierungen, Kolbenringe, Zylinderlaufbüchsen, Rippenzylinder) geformt wird. Beim Schleuderguss wird die auf das Giessmetall wirkende Zentrifugalkraft in rotierenden Formen zur besseren Formfüllung ausgenutzt – es entsteht ein hochverdichtetes Gefüge mit gleichmässig gerichteter Erstarrung.

Die Rohre werden nach dem Giessen 1–2 mal geglüht, anschliessend erhalten sie innen und aussen dem Verwendungszweck angepasste Beschichtungen (Zink, Bitumen, Mörtel, Kunststoff).

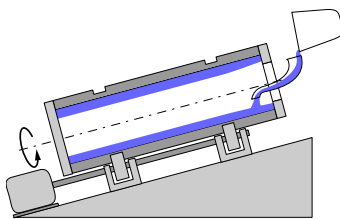


Bild (B036urfZ) Prinzip einer Schleudergussmaschine

Zu erwähnen sei das **Rapid-Prototyping-Schleudergiessen**. Rapid Prototyping deshalb, weil eine mehrfach verwendbare **SLS-Urform** zur Herstellung eines Schleuderguss-Modelles benutzt wird. Mehrere Modelle werden radial in die Form eingebettet. Auf diese Weise können Serien bis 200 Stück produziert werden. Als Werkstoffe kommen **Duroplasten** und Zinklegierungen in Frage. Typischerweise werden Druckguss-Prototypen hergestellt.

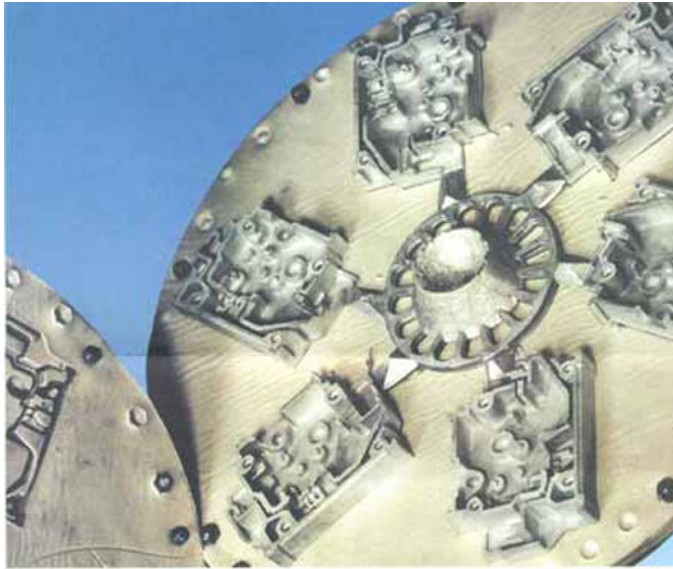


Bild (B037urfZ) Schleudergussteile nach Öffnen der Form (Modelltechnik RP GmbH)

5.1. Firmen und Organisationen zum Schleudergiessen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Schmidt+Clemens	Schleuderguss
Klaus Kuhn Edelstahlgiesserei	Schleuderguss
Fritz Werner Industrieausrüstungen	Schleudergusseinrichtungen
Modell-Technik Rapid Prototyping GmbH	Vertikal-Schleuderguss

Tabelle (T037urfZ) Firmen Schleudergiessen

Organisation	Beschreibung
giesserei.de	Branchenverzeichnis
Swissmem	Verband der Maschinen & Metallindustrie
metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T038urfZ) Organisationen Schleudergiessen

6. Urformen aus plastischem Zustand: Stranggiessen

Das **Stranggiessen** dient der Herstellung von **Halbzeug**, primär für das **Walzen**. Das flüssige Metall wird in eine aktiv gekühlte offene Kokille gegeben, wo es während des Durchlaufens durch die Kokille erstarrt. Charakteristisch für das Stranggiessen ist, dass die Kokille stets kleiner als das hergestellte Produkt ist. Beim Verlassen der Kokille ist das Produkt u. U. im Innern noch flüssig.

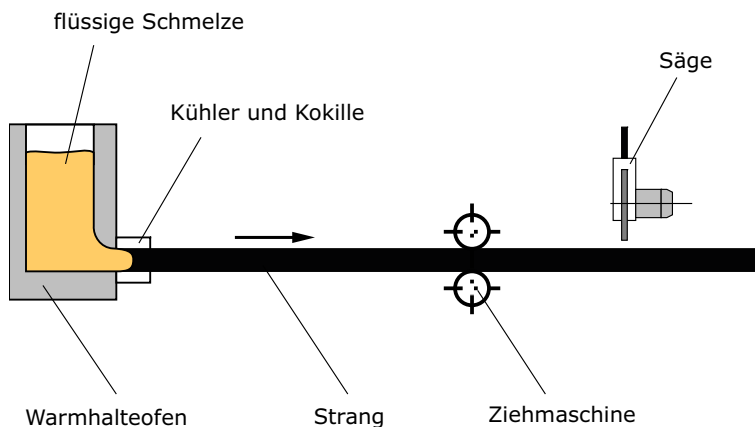


Bild (B038urfZ) Strangguss-Anlage

Wenn Stranggussprodukte (**Brammen**, **Barren**, **Knüppel**) warm umgeformt werden sollen, ist man bestrebt, sie möglichst ohne Erkaltung weiter zu verarbeiten. Walzwerke und Stahlwerke mit Stranggussanlagen stehen daher meist am gleichen Standort. Eine optimale Abstimmung von Stahl- und Walzwerk spart Kosten und schont die Umwelt, da die Erwärmung im Walzwerk minimiert wird.

Ein [Video](#) zeigt das Stranggiessen von Alu-Brammen (Film: The Aluminium Association).

Eine Möglichkeit der Nachbearbeitung ist, Stranggussprofile durch Drehen oder Fräsen zu **Blankstahl** zu verarbeiten.



Bild (B039urfZ) Unterseite einer Stranggussanlage (Giesserei Hegi AG)



Bild (B040urfZ) Halbzeug in Stangenform (Giesserei Hegi AG)

Verwandte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Strangpressen	Walzen
Schwerkraftgiessen	Fräsen
	Drehen
	Wärmebehandeln

Tabelle (T039urfZ) Verwandte und nachgelagerte Verfahren

6.1. Firmen und Organisationen zum Stranggiessen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Stahl Gerlafingen	Betonrippenstahl, Breitflachstahl
Schulenburg	Vertrieb von Stranggussprofilen
Giesserei Hegi AG	Herstellung von Stranggussprofilen

Tabelle (T040urfZ) Firmen Stranggiessen

Organisation	Beschreibung
giesserei.de	Branchenverzeichnis
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T041urfZ) Organisationen Stranggiessen

7. Urformen aus flüssigem Zustand: Schäumen

Das **Schäumen** dient der Urformung von hoch porösen Materialien und wird hauptsächlich auf Kunststoffe appliziert. Neuerdings sind Bestrebungen im Gange, metallische Schäume herzustellen, die im Leichtbau ihre Anwendung finden könnten.

Die Herstellung und Verarbeitung metallischer Schäume, die erst seit kurzem kommerziell verfügbar sind, ist aber noch Gegenstand intensiver Forschung, ein Serieneinsatz ist nicht bekannt. Trotzdem handelt es sich um ein sehr interessantes Verfahren, insbesondere, weil die Kombination von Leichtmetallen wie Alu oder Magnesium mit einer porösen Struktur (Poren machen etwa 75% des Volumens aus) gleich doppelt Gewicht spart. Um eine glatte Oberfläche zu erzielen, werden Schäume normalerweise in **Sandwichbauweise** eingesetzt.



Bild (B041urfZ) Montagerückwand eines Mercedes CLK, unten Stahl-, oben 7x steiferes Schaumteil (Karmann)

Kunststoffschäume sind recht verbreitet, da sie einfach und billig herstellbar sind.



Bild (B042urfZ) Kunststoffschäume fühlen sich gut an und sind in (Eurofoam)

Vorgelagerte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Mischen	Laserschweissen
Strangpressen	TIG-Schweissen
Tiefziehen	

Tabelle (T042urfZ) Verwandte und nachgelagerte Verfahren

7.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele beim Schäumen

Schäumen eignet sich für viele Anwendungen: Fahrzeugsitze, Automobilbau (metallisch), Schalldämmung, Isolation, Gymnastikmatten, Auftriebskörper, Schwämme, Filter und Brandschutz.



Bild (B043urfZ) PKW- Sitze (Cannon)



Bild (B045urfZ) Gymnastikmatten vom ETH-Sportverband



Bild (B044urfZ) Polster in Sitzmöbeln werden üblicherweise geschäumt (Eurofoam)

7.2. Firmen und Organisationen zum Schäumen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Alulight	Aluminium-Schäume
Cymat	Metallische Schäume
Karmann	Automobilzulieferer und Aluschaum-Pionier
Eurofoam	Stellt Kunststoffschäume her
Cannon Deutschland	Stellt Kunststoffschäume her

Tabelle (T043urfZ) Firmen Schäumen

Organisation	Beschreibung
Metalfoam NET	Weltweite Metallschaumseite
Uni Erlangen, WTM	Forschung
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T044urfZ) Organisationen Schäumen

8. Urformen aus flüssigem Zustand: Urformen von Faser-Verbund-Werkstoffen (FVW)

Faserverstärkte Werkstoffe erfreuen sich angesichts des Trends zu leichteren und ästhetischeren Konstruktionen zunehmender Beliebtheit. Durch den Verbund von Verstärkungsfasern mit einer **Matrix** (meist Epoxydharz oder Polyester) ergeben sich extrem leichte Bauteile mit hoher Festigkeit. Das besondere an FVW ist, dass der Werkstoff erst durch das Zusammenfügen von Matrix und Faser entsteht, die Herstellung des Werkstoffes geht mit der Formgebung einher.

8.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele FVW

Einsatzgebiet von FVW sind: Leichtbau für Strassen-, Schienen-, Luft- und Raumfahrzeuge, Schiffe, Möbel, Antennenbau, Prototypen-Werkzeugbau und Windenergie-Rotoren.



Bild (B058urfZ) Kardangehäuse (Neuform Composites)



Bild (B059urfZ) Scheinwerfer (Neuform Composites)



Bild (B062urfZ) Profile (Topglas)



Bild (B064urfZ) Antennenabdeckungen (Topglas)



Bild (B061urfZ) Briefkasten im Heisspressverfahren (Compotech)

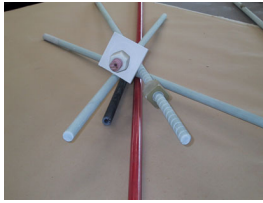


Bild (B060urfZ) Felsanker (Topglas)



Bild (B063urfZ) Flugzeugrumpf und Flügel mit Prepregs gefertigt (Europa Aircraft Company)

8.2. Verfahren

Die wichtigsten Technologien zur Herstellung von FVW sind:

- das [Handlaminieren](#),
- das [Wickeln](#),
- das [Vakuumpressen](#),
- das [Strangziehen](#) (Pultrusion),
- das [Injektionsverfahren](#),
- die [Diaphragmatechnik](#) und
- das [Prepreg](#).

8.2.1. Verfahren: Handlaminieren

Das Gewebe wird von Hand in die Form gelegt und mit Pinsel oder Walze mit Harz getränkt.

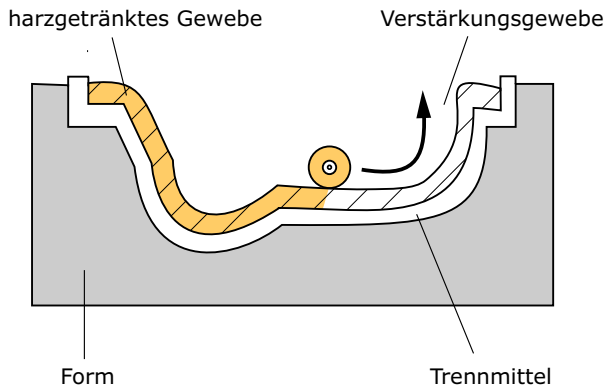


Bild (B046urfZ) Beim Handlaminieren wird das Gewebe von Hand mit Pinsel oder Roller getränkt

Das **Handlaminieren** ist das einfachste Verarbeitungsverfahren für faserverstärkte Kunststoffe. Es ist immer eine Form aus Holz oder anderen Modellmaterialien notwendig, welche die spätere Bauteiloberfläche bestimmt. Um eine gute Oberfläche zu erhalten, muss zuerst eine ungefärbte oder eingefärbte **Gelcoatschicht** (teilweise zusammen mit **Vlies**) auf die Form aufgebracht werden. Dies ist eine gefüllte Reinharzschicht, die ein Durchzeichnen der Faserstruktur verhindern soll. Auf diese Gelcoat-Schicht wird das eigentliche Laminat aufgebaut. Es besteht aus der Matrix (meist ein **Polyesterharz**) und den Verstärkungsfasern.

Zunächst wird das Harz auf die Form aufgebracht und anschließend werden **Wirrfasermatten**, Gelege oder Gewebe mit einem Pinsel oder einer Laminierrolle eingearbeitet. Für ein gutes Durchtränken werden mehrere Faserlagen nacheinander laminiert, bis die gewünschte Wandstärke erreicht ist. Das Handlaminierverfahren ist ein sehr lohnintensiver, aber investitionsarmer Prozess, welcher sich zur Herstellung von sehr grossen und komplexen Formteilen geringer Stückzahl eignet. Typische Anwendungen findet dieses Verfahren in der Herstellung von grossen Bauteilen wie Boote oder Grossbehälter und Prototypen.

8.2.2. Verfahren: Wickeln

Endlose Faserstränge werden mit Harz getränkt und um einen Kern gewickelt.

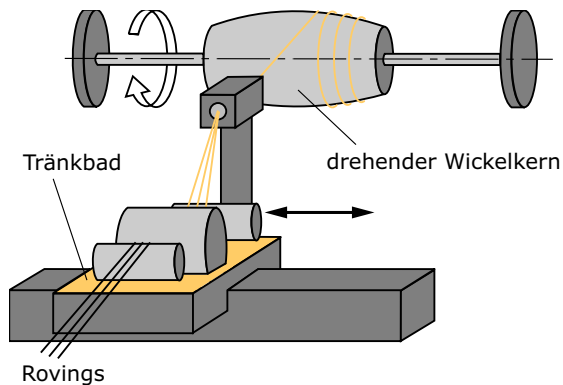


Bild (B047urfZ) Darstellung einer Wickelmaschine

Das **Wickeln** ist ein weitgehend automatisiertes Verfahren zur Herstellung von Hohlkörpern aus faserverstärkten Kunststoffen. Dabei werden die Verstärkungsfasern über einen sich drehenden Kern gewickelt, der je nach Geometrie im Bauteil verbleibt oder wieder entfernt wird. Bei Rohren werden häufig Metallkerne verwendet, die nach dem Aushärteprozess entformt werden. Dies ist bei komplizierter Geometrie nicht immer möglich. Hier werden teilbare Kerne oder solche aus einem löslichen Material (z. B. Salz/Sand-Gemische) eingesetzt. Der Kern kann auch im Bauteil verbleiben (verlorener Kern) und strukturelle Aufgaben übernehmen. So werden Schaumkerne eingesetzt, um das Laminat bei Druckbelastung gegen Beulen zu stützen. Dünnwandige Metallkerne werden Liner genannt und schützen das Laminat vor sehr aggressiven Medien oder wirken als Diffusionssperre für Gasbehälter.

Die **Rovings** (Garne) werden von einem separaten Spulenständer abgezogen. Im Tränkbad werden die von der Schlichte verklebten Rovings aufgefächert, mit Harz benetzt und in einer Walk-strecke gut durchtränkt. Das sich parallel zur Wickelachse bewegende Fadenauge führt die getränkten Rovings, die sich auf dem drehenden Wickelkern definiert und kontrolliert ablegen. Dem Wickelmuster kommt eine entscheidende Bedeutung zu, da der Werkstoff nur dann optimal ausgenutzt werden kann, wenn die Fasern in Richtung der wirkenden Kräfte liegen und der Kern möglichst gleichmässig bedeckt ist.

Nach der Wickelphase ist das Bauteil noch nicht formstabil, da die flüssige Matrix noch vernetzen muss. Während dieser Härtingsphase wird das gewickelte Bauteil weiter gedreht, da es sonst zu ungleichmässigem Abtropfen der Matrix und zu Bauteilunwuchten kommen kann.

Um das Verrutschen des abgelegten Rovings auf der Kernoberfläche zu vermeiden, wird der Roving im Allgemeinen auf der **geodätischen Linie** abgelegt. Die geodätische Linie ist die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten auf einer gekrümmten Oberfläche. Es wirken dann zwischen dem Roving und dem Wickelkern keine Reibungskräfte.

8.2.3. Verfahren: Vakuumpressen

Werkstücke, die zuvor handlamiert wurden, können zur Erhöhung des Fasergehaltes und zur Verbesserung der Haftung mit Waben oder Kernen **vakuumpress** werden. Dabei wird das Bauteil mit einer Folie abgedeckt oder in einen Foliensack geschoben. Eine Vakuumpumpe saugt die Luft ab, mit der Folge, dass nun der Umgebungsdruck mit mehreren hundert Kilo / m² auf das Bauteil drückt. Überschüssiges Harz wird verdrängt – das Bauteil wird steifer und leichter.

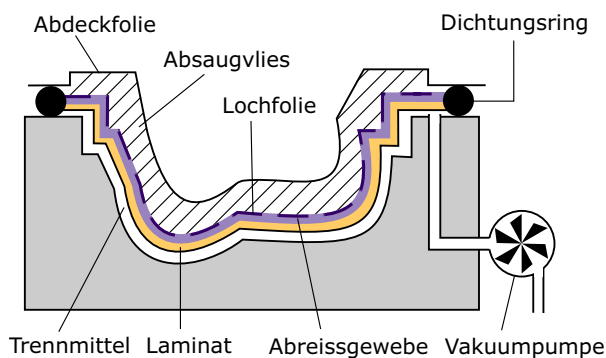


Bild (B048urfZ) Prinzip des Vakuumpressens

8.2.4. Verfahren: Strangziehen (Pultrusion)

Das Verfahren für die kontinuierliche Herstellung von FVW-Profilen

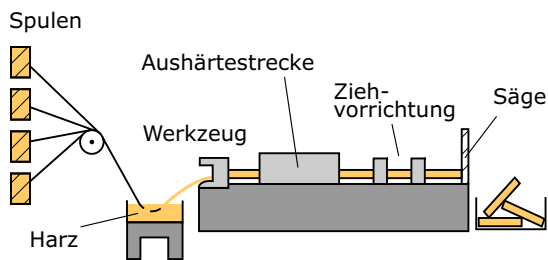


Bild (B049urfZ) Zu Spulen aufgewickelte Rovings werden mit dünnflüssigem Harz getränkt, durch die Düse gezogen und ausgehärtet.

Die **Pultrusion** stellt ein leistungsfähiges Verfahren für die kontinuierliche Herstellung von faserverstärkten Profilen dar. Das Verfahren vergleicht sich am besten mit dem Extrudieren von Thermoplasten. Während beim Extrudieren eine Druckkraft das plastische Material durch das Werkzeug drückt, wird beim Strangziehen das ausgehärtete Profil durch die Düse gezogen. Hinter der Düse befindet sich eine Spulhalterung und ein Tränkbad, durch welches die in Spulenform gelieferten Faserstränge, Rovings genannt, gezogen werden.

Wurden früher ausschliesslich Vollprofile produziert, existiert heute ein breites Angebot an Voll- und Hohlprofilen in den verschiedensten Durchmessern und Querschnitten. Durch den kontinuierlichen und vollständig automatisierten Fertigungsablauf sind Stranggezogene Halbzeuge im Vergleich zu anderen FVW-Teilen sehr günstig. Nicht zuletzt deshalb erlebt die Pultrusionsindustrie zur Zeit einen Boom.



Bild (B053urfZ) Mit Pultrusion lassen sich anspruchsvolle Geometrien herstellen (Pultron)

8.2.5. Verfahren: Injektionsverfahren

Das Gewebe wird trocken in eine Form eingelegt, die Form wird geschlossen und das Harz eingespritzt.

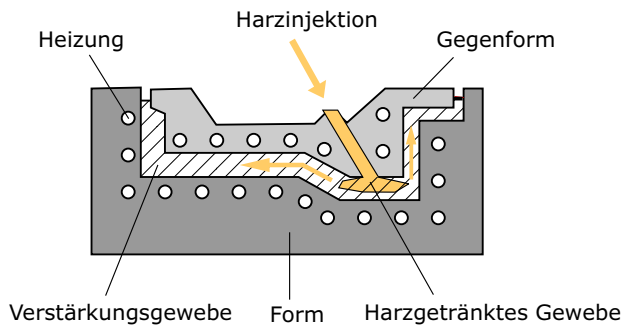


Bild (B050urfZ) Verfahrensschritte des RTM-Prozesses

Ähnlich verhält sich mit dem **RIM-Verfahren** (Resin Injection Moulding): Dort wird das Harz unmittelbar vor dem Einspritzen gemischt.

8.2.6. Verfahren: Diaphragmatechnik

Das Laminat wird zwischen zwei plastisch dehnbaren Folien (Diaphragmen) unter Vakuum fixiert und erwärmt. Nach Erreichen der Schmelztemperatur wird von oben ein Druck aufgebaut und das Laminat auf das Werkzeug drapiert und unter Druck abgekühlt.

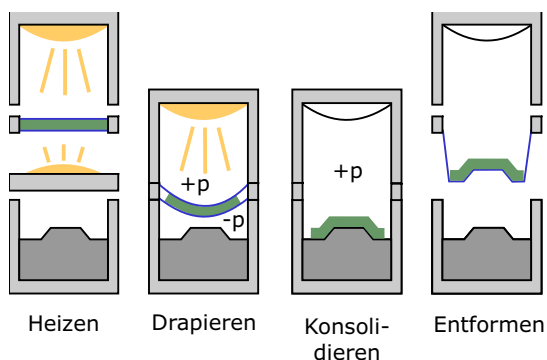


Bild (B051urfZ) Prinzip der Diaphragmatechnik

8.2.7. Verfahren: Prepreg

Verarbeitung von vorimprägnierten Geweben

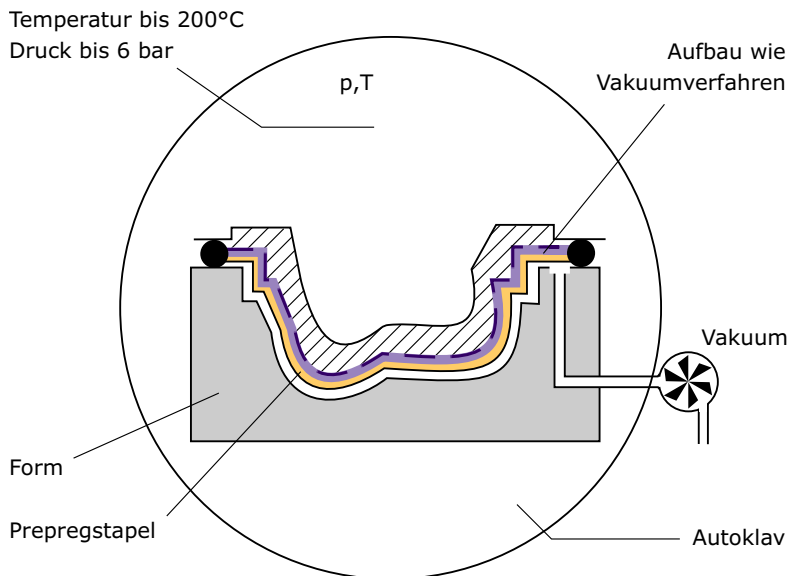


Bild (B052urfZ) Prepreg Verfahren

Das **Tapelegeverfahren** wird zur Herstellung von flächigen Bauteilen hoher Qualität eingesetzt, wie es beispielsweise das Seitenleitwerk eines Flugzeuges ist. Man verarbeitet dabei ausschliesslich sog. **Prepregs** (*Preimpregnated*), vorimprägnierte Kohlenstoff- oder Glasfamentgewebe.

Vor der Verarbeitung müssen die Prepregs langsam auf Raumtemperatur aufgewärmt werden, um die zur Verarbeitung notwendige Klebrigkeit (auch Tack genannt) zu bekommen.

Die Prepregs werden dann manuell mit Schablonen oder mit rechnergesteuerten Zuschneidemaschinen entsprechend der gewünschten Faserorientierung im Bauteil zugeschnitten und manuell in einer Form abgelegt.

Bei grossen flächigen Bauteilen, wie Flugzeugtragflächen, ist ein manuelles Ablegen der Prepregs nicht möglich. Man verwendet hier sogenannte Tapeleger; das sind rechnergesteuerte Portalroboter, die einen speziellen Legekopf als Werkzeug haben. Dieser Legekopf bevorratet das Prepreg auf Spulen und legt es auf einer Form ab.

Zur Aushärtung muss das Laminat unter erhöhter Temperatur verpresst werden. Dies kann in einer Presse mit einer festen Gegenform

oder in einem Autoklaven (beheizbarer Druckkessel) geschehen. Der Autoklavprozess bietet gegenüber der Gegenform den Vorteil, dass auch bei komplexer Geometrie auf das gesamte Bauteil ein hydrostatischer Druck wirkt. Hierzu wird die mit den Prepregs belegte Form mit mehreren verschiedenen Geweben und einer luftdichten Abdeckfolie überzogen und anschliessend in einem Autoklaven unter Druck und erhöhter Temperatur gebracht, so dass die Vernetzungsreaktion der Matrix einsetzt. Durch Anlegen von Vakuum zwischen der Form und der Abdeckfolie wird die Luft aus den einzelnen Prepreglagen entzogen und die Vakuumfolie legt sich gleichmässig auf das Laminat auf. Der Verdichtungsdruck kann durch den im Autoklaven herrschenden Überdruck weiter erhöht werden.

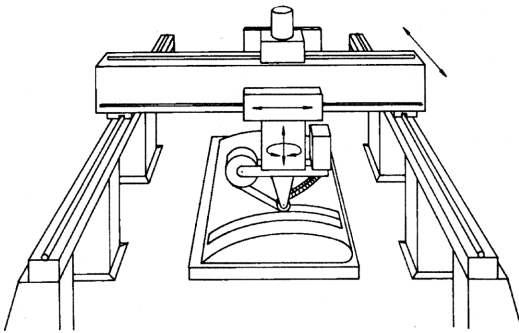


Bild (B057urfZ) Automatisierter Tapeleger

Man erhält mit dem aufwendigen Autoklav-Verfahren Bauteile höchster Qualität und Reproduzierbarkeit. Durch den hohen, aber tendenziell sinkenden Investitionsbedarf erschliessen Prepregs neben der Luft- und Raumfahrtindustrie zunehmend andere Märkte.

Konkurrenz-Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Giessen	Besäumen
	Ablängen
	Lackieren

Tabelle (T045urfZ) Konkurrenz und nachgelagerte Verfahren

8.3. Konstruktionsrichtlinien faserverstärkte Kunststoffe

Faserverstärkte Kunststoffe werden selbstverständlich nicht nur urgeformt. Da bei der generellen Gestaltung mit faserverstärkten Kunststoffen jedoch grosse Ähnlichkeiten zu urformenden Verfahren bestehen, reihen sich diese Kunststoffe hier mit ein.

Polyesterharze und Epoxydharze lassen sich durch Einbettung von Glasfasern und Kohlenstofffasern in enormer Weise verstärken und erreichen als Verbundwerkstoffe teilweise Zugfestigkeiten, die den metallischen Werkstoffen nahe kommen oder diese sogar übertreffen. Durch Faserverstärkung wird überdies auch eine befriedigende Temperaturbeständigkeit der sonst so temperaturkritischen Kunststoffe erreicht. Durch Einbetten der Fasern in Richtung der Kraftlinien lassen sich in hohem Masse belastungsgerechte Konstruktionen verwirklichen.

Gestaltungsregeln

Regel: Harzansammlungen vermeiden, sonst Spannungsrisse!

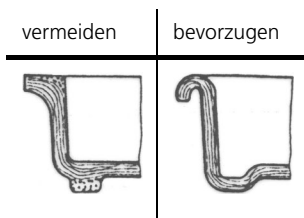


Tabelle (T046urfZ) Harzansammlungen vermeiden, sonst Spannungsrisse

Regel: Kanten und Ecken mit möglichst grossen Radien versehen, sonst Störung des Kraftflusses und Beschädigung der Armierung!

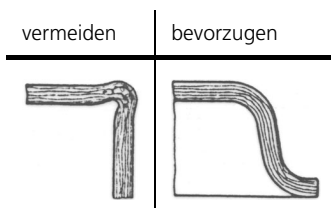


Tabelle (T060urfZ) Kanten und Ecken mit möglichst grossen Radien versehen

Regel: Allseitige Seitenneigung 1:25 bis 1:100 je nach Verfahren, Formtiefe und Verstärkung!

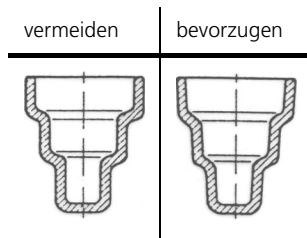


Tabelle (T061urfZ) Seitenneigung

Regel: Grosszügige Übergänge an Rippen vorsehen!

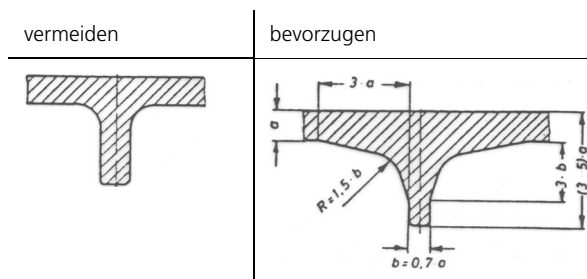


Tabelle (T062urfZ) Grosszügige Übergänge an Rippen vorsehen

Regel: Wegen des geringen E-Moduls von GFK ist eine steife Gestaltung erforderlich!

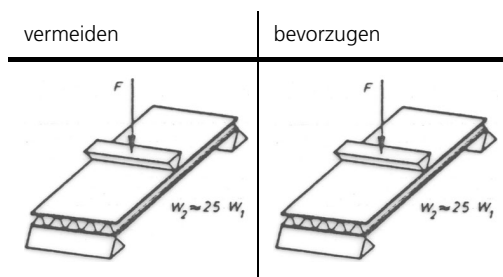


Tabelle (T063urfZ) Steife Gestaltung wegen geringem E-Modul

Regel: Die Bauteilkanten versteifen durch Formgebung oder Einbettungen; bei Einbettungen aus einem anderen Werkstoff unterschiedliche Dehnung bei Wärme und Beanspruchung berücksichtigen!

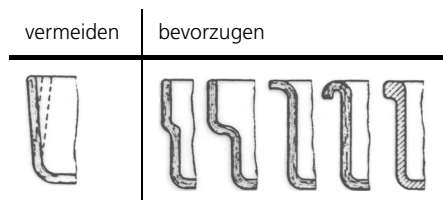


Tabelle (T064urfZ) Bei Einbettungen unterschiedliche Dehnung bei Wärme und Beanspruchung berücksichtigen

Regel: Versteifungen von grossen Flächen durch Formgebung oder Sandwich-Bauweise!

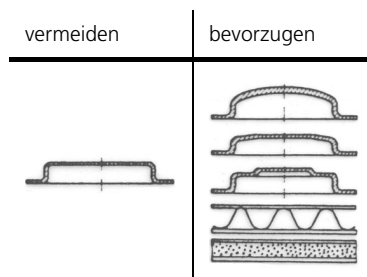


Tabelle (T065urfZ) Versteifungen von grossen Flächen durch Formgebung oder Sandwich-Bauweise

Regel: Aufgeklebte und auflaminierte Profile aus GFK, Al, Hartschaum oder Holz mit ausreichend grosser Bindungsfläche versehen!

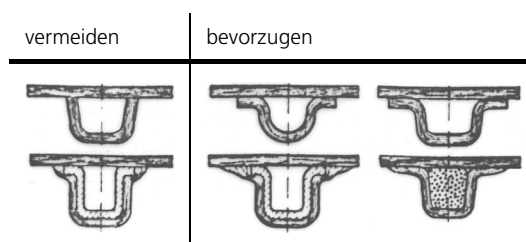


Tabelle (T066urfZ) Aufgeklebte und auflaminierte Profile

Regel: Bei Verwendung von Schrauben und Nieten richtige Einbettungen zur Krafteinleitung vorsehen!

Regel: Bohrungen und Einfräsungen senkrecht zu den Verstärkungen anbringen!

8.4. Firmen und Organisationen zu FVW

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Swisscomposites	Vertrieb von FVW-Material und Zubehör, CH
R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH	Vertrieb von FVW-Material und Zubehör, D
SP Systems	Fasern und Harze
Bastian Wickeltechnik	Wickelmaschinen
Neuform Composites GmbH	
Bakelite AG	Harze und Klebstoffe
Topglass S.p.a.	Profile aus FVK
Pultron Composites, Inc.	Pultrusionsprofile und Maschinen, NZ
Twaron Products	Aramidfasern

Tabelle (T047urfZ) Firmen FVW

Organisation	Beschreibung
Composites Fabricators Association	Verband
Society for the Advancement of the Materials and Process Engineering	Verband
European Pultrusion Technology Association	Verband für Pultrusion
Wwcomposites.com	Verbundwerkstoff-Suchmaschine
Kunststoff Web	Forum der Kunststoffindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis

Tabelle (T048urfZ) Organisationen FVW

9. Urformen aus plastischem Zustand: Spritzgiessen

Kaum ein anderes Verfahren hat unseren Alltag in den letzten hundert Jahren stärker verändert als das Spritzgiessen. Es ist heute das übliche Verfahren zur kostengünstigen Verarbeitung von **thermoplastischen Kunststoffen** in riesigen Stückzahlen und in keinem Bereich mehr wegzudenken.

Die Gestaltungsfreiheiten sind ähnlich gross wie beim Giessen von Metallen, somit können ergonomische und optisch ansprechende Bauteile aus verschiedensten Thermoplasten gefertigt werden.

Doch was geschieht eigentlich beim Spritzgiessen? Im Wesentlichen besteht eine Spritzgiessmaschine aus einem beheizbaren Schneckenkolben, einem formgebenden Werkzeug und einer Steuerung. Das Kunststoffgranulat rinnt durch einen Einfülltrichter in den Zylinder, wo es über mehrere Stufen erhitzt und in den plastischen Zustand überführt wird. Die sich drehende Schnecke erzeugt am Ende des Zylinders einen Druck, welcher zum Füllen der Werkzeugkavität(en) genutzt wird. Gleichzeitig sichert sie den kontinuierlichen Materialnachschub.

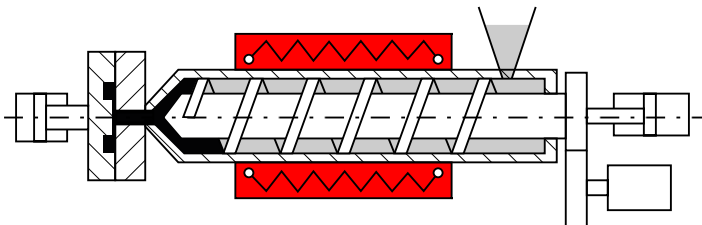


Bild (B065urfZ) Schnecke (rechts) und Werkzeug (links) einer Spritzgiessmaschine

Eine Schliesseinheit dient dazu, die zur Gussstückentnahme geteilte Form zu schliessen und zu verriegeln bzw. sanft zu trennen, schnell zu öffnen und das Spritzgiessteil auszuwerfen bzw. dem Entnahmeroboter zu übergeben. Wie bereits angetönt können in einem Werkzeug eine oder mehrere **Kavitäten** untergebracht werden. Damit fertigen moderne Maschinen einige 10'000 einfache Werkstücke pro Stunde.

Kleinere Spritzgussmaschinen besitzen eine hydraulisch betriebene Presse zum Schliessen der Kavitäten, in grösseren Maschinen verrichten meist **Kniehebelpressen** ihren Dienst. Vorab über grössere Spritzgussmaschinen berichtet folgendes [Video](#) (Film: Demag Ergotech).

Der Antrieb der Schnecken erfolgt elektrisch oder hydraulisch.



Bild (B066urfZ) kleine Spritzgussmaschine mit Schliesseinheit (links), Schneckenkolben (rechts) und Steuerung (mitte, unten) (Demag Ergotech GmbH)



Bild (B253urfZ) moderne Spritzgussmaschine der Firma Netstal

9.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele beim Spritzgiessen

Spritzgiessen hat ein fast unbegrenzt grosses Einsatzgebiet. Es reicht vom Fahrzeugbau über Verbrauchergeräte zum Maschinenbau. Hervorgehoben sei die Herstellung von optischen Speichermedien (CD, DVD).

Werkstoffe	Thermoplaste
Werkstücke	Klein- bis Grossteile
Stückzahlen	> 10'000
Toleranzen	Meist einbaufertig

Tabelle (T049urfZ) Einsatzgebiete Spritzgiessen

Verwandte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Formpressen	Meist Einbaufertig
Einbetten (Insert-Technik)	

Tabelle (T050urfZ) Verwandte und nachgelagerte Verfahren



Bild (B068urfZ) Motorabdeckung (Demag Ergotech GmbH)



Bild (B069urfZ) Handyvorder...



Bild (B070urfZ) ...und Hinterseite (Demag Ergotech GmbH)



Bild (B072urfZ) Reinraumtauglicher Spritzgussmaschinen sei Dank eignet sich das Verfahren auch für Medizintechnik und Mikromechanik. (Demag Ergotech GmbH)



Bild (B073urfZ) Preforms für PET-Flaschen (Netstal)



Bild (B074urfZ) Pkw Innenausrüstung (Demag Ergotech GmbH)

9.2. Konstruktionsrichtlinien Spritzgiessen

Die Nachteile von Kunststoffe sind:

- relativ geringe Zugfestigkeit
- geringe **Zeitstandfestigkeit**
- grosse **Wärmedehnung**

Bei allen Vorteilen, die Kunststoffe der Konstruktion bieten, dürfen diese Punkte nie vernachlässigt werden. Aus diesem Grund sind bei der Gestaltung grundsätzlich auch die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- werkstoff- und werkzeuggerechte Gestaltung (z. B. Einhaltung der Mindestwanddicken, Vorsehen von Neigungen und Abrundungen, Vermeiden von Hinterschneidungen)
- festigkeitgerechte Gestaltung (z. B. Rippen, Wölbungen, **Profilierungen**, Randgestaltungen)
- Toleranzen und Nachbearbeitungen
- Einpressen bzw. Einbetten von Metallteilen (z. B. Gewinde)
- wirtschaftliche Gesichtspunkte (Stückzahl, Form, Anforderungen an das Fertigteil)

Thermoplastische Kunststoffe zeigen beim Spritzgiessen und Formpressen relativ grosse Schwindungen. Die Schwindung ist auf den Massunterschied zwischen kalter Form und erkaltetem Spritzgussteil zurückzuführen. Bei der Gestaltung der Formwerkzeuge ist sie zu berücksichtigen, das heisst, von vornherein in die Formgestalt mit einzurechnen.

9.2.1. Gestaltungsrichtlinien

Für die Gestaltung von Spritzguss- und Formpressteilen aus Kunststoff gelten u.A. folgende Richtlinien:

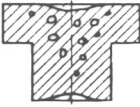
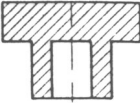
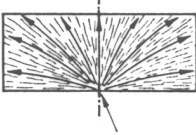
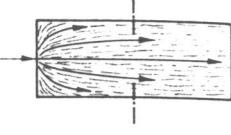


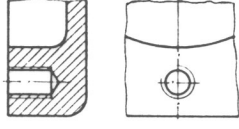
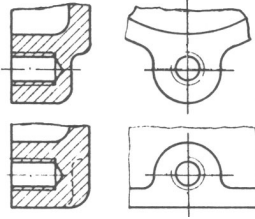
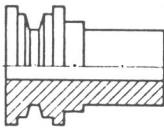
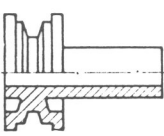
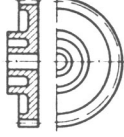
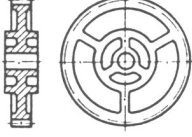
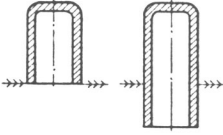
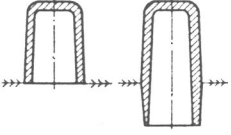
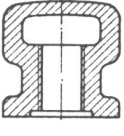
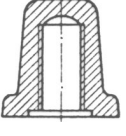
Regel	vermeiden	bevorzugen
Vermeidung von Einfall durch Anspritzstelle im Bereich der grössten Massehäufung		
Anspritzstelle beanspruchungsgerecht wählen		
Werkstoffanhäufung vermeiden		
Augen mit dünnem Steg an Wand anbinden		
gleiche Wanddicken bevorzugen, sonst Verzug		
Anbringen von Rippen zur Vermeidung von Verzug		
Neigung von ca. 1:100 vorsehen		
seitliche Hinter-schneidungen vermeiden, sonst mehrteilige Spritzgiess-Werkzeuge vorsehen		

Tabelle (T051urfZ) Gestaltungsregeln für Spritzgussteile

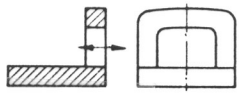
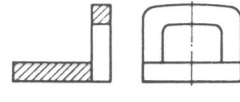
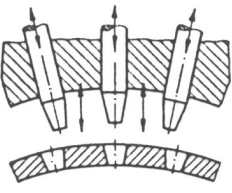
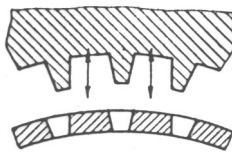
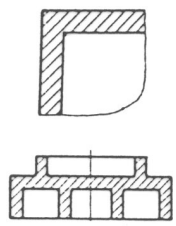
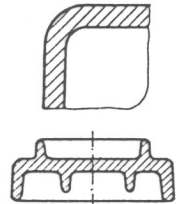
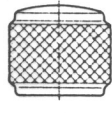
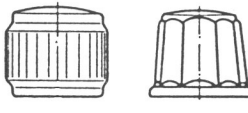
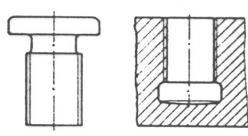
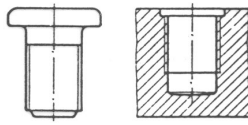
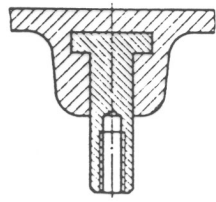
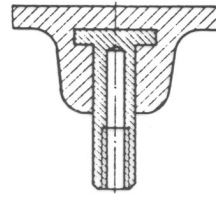
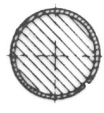
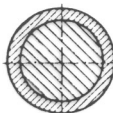
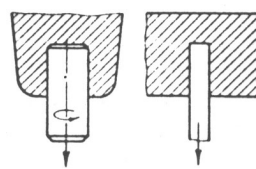
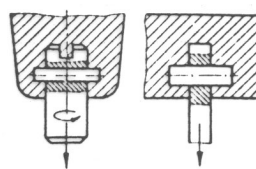
Regel	vermeiden	bevorzugen
Querzüge des Werkzeuges durch Formgebung möglichst vermeiden		
mehrteilige Durchbrüche eckig ausführen, bei runden Durchbrüchen grösserer Werkzeugaufwand		
Kanten runden, sonst Behinderung des Füllvorganges und erhöhter Werkzeugverschleiss		
Knöpfe, Muttern und Schraubkappen mit Längsrillen oder Mehrkantflächen ausführen		
Aussen- und Innengewinde ohne Hinterschnitt		
Masse eingegossener Metallteile möglichst gering halten, sonst zu starke Abkühlung beim Spritzen		
bei umgossenen Metallteilen ausreichende Wanddicke vorsehen		
Sicherung eingegossener Metallteile gegen Herausziehen und/oder Verdrehen		

Tabelle (T051urfZ) Gestaltungsregeln für Spritzgussteile

Regel	vermeiden	bevorzugen
bei Verbundteilen für möglichst einachsigen Spannungszustand sorgen		
grössere, dünnere Bauteile bewusst wölben oder durch Rippen versteifen		
Ausbrechwände für Montage ausreichend dünn wählen oder Kerbung vorsehen		
scharfe Ränder wegen Ausbruchgefahr vermeiden		
Trennfugen auf ebener Fläche vermeiden, andernfalls einen Wulst vorsehen		
Dreipunktlagerung von Grundplatten wegen sicherer Auflage bevorzugen		
Bodenflächen durch Wulste günstig versteifen		
bei Verbundbauteilen Schwindung bzw. unterschiedliche Wärmeausdehnung berücksichtigen		

Tabelle (T051urfZ) Gestaltungsregeln für Spritzgussteile

Günstige Wanddicken bei Spritzgussteilen liegen bei 0.6–3 mm. Zu geringe Wanddicken führen durch schnelles Abkühlen zu Fließbehinderungen und Verschweissfehlern. Dicke Wände kühlen langsam ab

und zeigen Lunker und Einfallstellen. Eine ausreichende Gestaltfestigkeit ist durch eine geschickte Verrippung zu erzielen.

Polyesterharze und Epoxidharze lassen sich durch Einbettung von Glasfasern und Kohlenstofffasern in enormer Weise verstärken und erreichen als Verbundwerkstoffe teilweise Zugfestigkeiten, die den metallischen Werkstoffen nahe kommen oder diese sogar übertreffen. Durch die Faserverstärkung erreicht man auch eine befriedigende Temperaturbeständigkeit der Kunststoffe. Das Einbetten der Fasern in Richtung der Kraftlinien ermöglicht es, in hohem Masse belastungsgerechte Konstruktionen zu verwirklichen.

Als oberstes Gesetz für Kunststoffkonstruktionen gilt: *Gleichmässige Wandstärken vorsehen!*

Bei der Gestaltung grundsätzlich auch die folgenden Aspekte berücksichtigen:

- werkstoff- und werkzeuggerechte Gestaltung (Formgebung derart, dass geringe Werkzeugkosten gegeben sind. Einhaltung der Mindestwanddicken. Vorsehen von Neigungen und Abrundungen. Vermeidung von Hinterschneidungen. Kegelförmige Gestaltung von Löchern, Schlitzern und Durchbrüchen.
- festigkeitsgerechte Gestaltung (Rippen, Wölbungen, Profilierungen, Randgestaltungen)
- Toleranzen
- Nachbearbeitungen
- Einpressen bzw. Einbetten von Metallteilen (z. B. Gewinde)
- wirtschaftliche Gesichtspunkte (Stückzahl, Form, Anforderungen an das Fertigteil)

9.3. Firmen und Organisationen zum Spritzgiessen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Demag Ergotech GmbH	Spritzgussmaschinen
Matess	Spritzgussmaschinen
Netstal-Maschinen AG	Spritzgussmaschinen
Hofbauer GmbH	Blasform- und Spritzgusstechnik

Tabelle (T052urfZ) Firmen Spritzgiessen

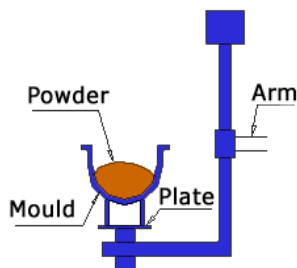
Organisation	Beschreibung
Kunststoffe	Branchenverzeichnis
Kunststoff Verband Schweiz	
Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V.	
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T053urfZ) Organisationen Spritzgiessen

10. Urformen aus plastischem Zustand: Rotationsgiessen

Rotationsgiessen eignet sich für hohle und nahtlose Produkte, welche teilweise oder ganz geschlossen sind. Das Verfahren lässt sich sowohl für kleine als auch für grosse Serien bei relativ niedrigen Formkosten anwenden.

Meistens handelt es sich bei den verarbeiteten Rohstoffen um PE oder PP, es können aber auch Metalle zum Einsatz kommen.



1. Mould charging

Bild (B249urfZ) Vertikal und horizontal gelagerte, noch offene Form (Plastigi, Belgien)

Beim Rotationsgiessen wird eine genau abgestimmte Menge an Rohstoff als Pulver in eine Form gebracht. Diese Form wird dann geschlossen und auf die Schmelztemperatur des enthaltenen Rohstoffs erwärmt. Während diesem Vorgang wird die Form kontinuierlich um die horizontale sowie auch um die vertikale Achse gedreht. Durch diese biaxiale Rotation verteilt sich das Pulver gleichmässig an der Innenseite der Form und schmilzt. Die Partikeloberflächen schmelzen dabei zusammen, was einem **Sinterprozess** entspricht.

Die Abkühlung erfolgt durch Wasser- oder Luftkühlung. Das Produkt kann danach aus der Form geholt werden.



Bild (B246urfZ) Vier fertige Behälter auf dem Rotationskarussell (Plastigi, Belgien)

Typischerweise sind rotationsgegossene Produkte im Gartenbau, in der Fischerei, in der Kühl- bzw. Agrarindustrie und in der Chemiebranche anzutreffen. Sie werden aber ebenso beispielsweise in der Automobilindustrie oder für Produkte im Bereich der Telekommunikation verwendet.



Bild (B247urfZ) Rotationsgegossener Aussentank

11. Urformen aus plastischem Zustand: Strangpressen (Extrudieren)

Das Strangpressen in der Hauptgruppe Urformen, auch **Extrudieren** oder englisch *Extrusion* genannt, gleicht dem Verfahren nach dem Strangpressen von Aluminium oder dem Spritzgiessen von Kunststoff. Im Unterschied zum Strangpressen aus der Untergruppe **Durchdrücken**, wo eine Profil umgeformt wird, wird beim Extrudieren eine Form geschaffen. Extrudieren ist das übliche Verfahren zur kontinuierlichen Verarbeitung von Kunststoffen und dient der Herstellung von Kunststoffprofilen vielfältiger Formgebung.

Wo sich beim Spritzgiessen eine geschlossene Kavität befindet, sitzt beim Extruder eine offene Profildüse. Anders als beim Strangpressen erzeugt kein **Kolben**, sondern eine **Schnecke** den Druck.

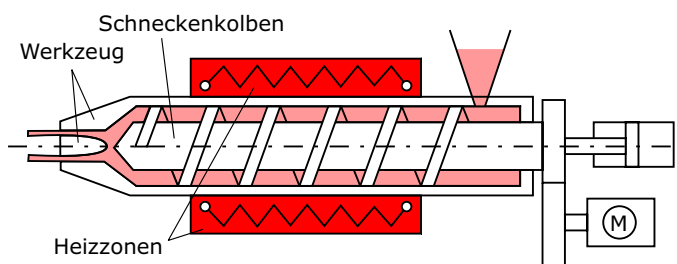


Bild (B076urfZ) Der Aufbau einer Strangpressanlage gleicht demjenigen der Spritzgiessanlage, anstelle des geschlossenen Werkzeuges befindet sich eine Profildüse hinter dem Schneckenkolben

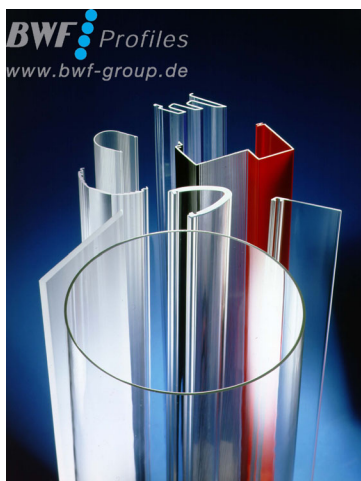


Bild (B077urfZ) Beispiele extrudierter Kunststoffprofile (Halbzeuge) (BWF Group)

Verwandte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Spritzgiessen	Trennverfahren
Durchdrücken (Strangpressen)	

Tabelle (T054urfZ) Verwandte und nachgelagerte Verfahren

11.1. Firmen und Organisationen zum Extrudieren

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Wagner+Wagner GmbH	Extrusionsprofile, Gummi

Tabelle (T055urfZ) Firmen Extrudieren

Organisation	Beschreibung
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T056urfZ) Organisationen Extrudieren

12. Urformen aus plastischem Zustand: Blasformen

Ein weiteres Herstellungsverfahren für Kunststoffteile (Behälter) ist das **Blasformen**. Dabei werden spritzgegossene Preforms (Vorformlinge) aus Thermoplasten dickerer Wandstärken in einem Werkzeug aufgeblasen.

So werden z.B. Benzintanks für Pkw, PET-Flaschen für Softdrinks, Fruchtsäfte, Mineralwasser, Trinkwasser, Spülmittel und Öle hergestellt.

Es existiert auch ein Extrusions-Blasformen, wo ein extrudiertes Profil direkt aufgeblasen wird. (Herstellung von Folien)

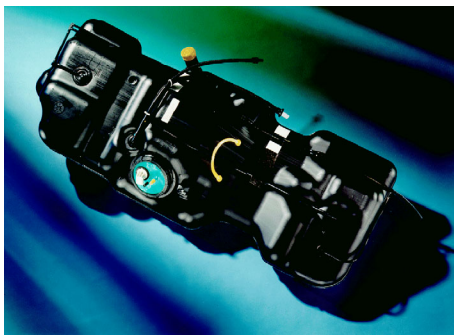


Bild (B078urfZ) Kunststoff-Kraftstoffbehälter (Photo: [SIG Blowtec GmbH & Co. KG])



Bild (B079urfZ) Behälter bis 5000 l werden Blasgeformt (SIG Plastics)



Bild (B080urfZ) Blasformen sind typischerweise dreiteilig: Boden und 2 Formhälften (Röders)



Bild (B081urfZ) Sie begegnen uns jeden Tag: PET- Flaschen (SIG Plastics)



Bild (B073urfZ) Aus diesen spritzgegossenen Preforms entstehen Flaschen (Netstal)

Vorgelagerte Verfahren	Verwandte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Spritzgiessen	Weiten (IHU)	

Tabelle (T057urfZ) Verwandte, vor- und nachgelagerte Verfahren

12.1. Konstruktionsrichtlinien Blasformen

Bemerkenswert scheint, dass die gestalterischen Möglichkeiten der Blastechnologie vielen Konstrukteuren nicht bekannt oder bewusst sind. So lassen sich nicht nur grossvolumige Behälter blasformen, sondern auch flächige doppelwandige Teile, die zur zusätzlichen Versteifung mit **Sicken** versehen und an den Sickeninnenseiten verschweisst werden. Beispiele hierfür sind Sitzschalen oder eine Ablageschale eines PKW. Dieses Prinzip wird auch bei den bandagenlosen Heizölbehältern angewendet. Hier werden die beiden Seitenflächen des Behälters partiell kegelstumpfförmig so weit nach innen eingezogen, bis sie bei geschlossenem Blaswerkzeug stirnseitig miteinander verschweisst werden.

Wanddickenregulierung

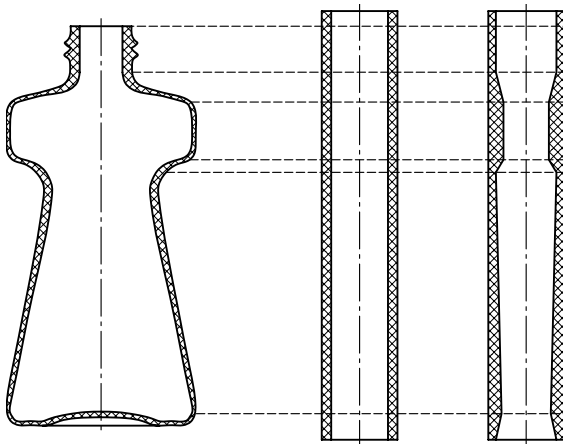


Bild (B184urfZ) Wanddickenregulierung bei einer Petflasche

Aus Schlauchwanddicke und Aufblasverhältnis ergibt sich die Wanddicke des Blaskörpers. Bei über die Schlauchlänge stark unterschiedlichem Aufblasverhältnis ergeben sich Dick- und Dünnstellen. Dem wird durch eine Wanddickenregulierung entgegengewirkt. Durch Verschieben eines konischen Dorns in einer zylindrischen oder konischen Düse wird der Querspalt verändert und die Wanddicke des Vorformlings variiert. Ein statisch flexibel deformierbarer Ring (SFDR) bietet die Möglichkeit die Wanddicke über dem Umfang zu variieren. SFDR ist gerade bei nicht runden Formteilen wie z.B. Kanistern für die Wanddickenkonstanz von Vorteil. Kennzeichnend ist die Aufteilung des Dorns

in ein Ober- und ein Innenteil, das dem Fixieren eines deformierbaren Stahlrings dient. Dieser selbst kann mittels Schrauben verformt werden, wodurch sich die Düsenspaltweite örtlich verändert. Längs des Umfangs lässt sich die Düsenspaltweite mittels der Verstellerschrauben verändern. Diese Veränderung ist statisch und bleibt während der Extrusion eines Vorformlings erhalten. Der Düsendurchmesser muss mindestens 130 mm betragen, damit genügend Raum für die zur Deformation notwendigen Stellschrauben vorhanden ist.

12.2. Firmen und Organisationen zum Blasformen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
ESDA Kunststoffverarbeitung	Behälter
Röders	Blasformwerkzeuge
Sidel	Verpackungstechnik, FR
SIG Plastics	Blasformmaschinen und Werkzeuge
Hofbauer GmbH	Blasform- und Spritzgusstechnik

Tabelle (T058urfZ) Firmen Blasformen

Organisation	Beschreibung
Kunststoffe	Branchenverzeichnis
Petcycle	Über den PET-Kreislauf
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T059urfZ) Organisationen Blasformen

13. Zusammenfassung

Allen Urformverfahren gemeinsam ist, dass Werkstoffe in flüssigem oder teigigem Zustand in einer Form vergossen werden.

Das Schwerkraftgiessen bildet den Ausgangspunkt für eine unendliche Variation des Verfahrens. Die wichtigsten sind das Sandgiessen, Feingiessen, Vollformgiessen, Kokillengiessen, Druckgiessen vor allem für Nichteisenmetalle, Spritzgiessen vor allem für Plaste, Stranggiessen, Schleudergiessen und Blasformen. Auch viele Herstellverfahren von Compositwerkstoffen zählen zum Urformen.

Trotz der grossen Gestaltungsfreiheit der Bauteile müssen sehr viele Gestaltungsrichtlinien berücksichtigt werden. diese verhindern beispielsweise Lunkerbildung, Verzug und Spannungsrisse.

Verständnisfrage 1

Wie entsteht ein Lunker? Wie wird dieser in den Konstruktionsrichtlinien berücksichtigt?

Verständnisfrage 2

Was ist ein „verlorenes Modell“?

Verständnisfrage 3

Nennen Sie ein typisches Urformverfahren für die Einzelstückfertigung, für mittlere Serien, für Grossserien!

Verständnisfrage 4

Zählen Sie einige Konstruktionsrichtlinien für das Schwerkraftgiessen auf, und begründen Sie diese!

Verständnisfrage 5

Nennen Sie die Vorteile des Druckgiessens!

Verständnisfrage 6

Was ist ein Schieber?

Verständnisfrage 7

Schauen Sie sich in Ihrer nächsten Umgebung um und finden Sie zehn urgeformte Bauteile. Überlegen Sie, um welches Material es sich handelt und welche Herstellschritte nötig waren, es zu produzieren!

Verständnisfrage 8

Wie würden Sie die Zukunftsaussichten für Giessverfahren bewerten?
Begründen Sie Ihre einzelnen Behauptungen!

Verständnisfrage 9

Besuchen Sie im Internet eine Giessfirma, und schauen Sie deren Leistungsangebot an!

Verständnisfrage 10

Erklären Sie die Herstellung von Petflaschen!

Antwort 1

- Flüssige Zonen werden durch die Erstarrungsfront eingeschlossen. Der Volumenschwund in diesem Gebiet führt zu Poren (Lunker)
- Verschiedene Richtlinien verhindern die Lunkerbildung:
 - kontinuierliche Querschnittserweiterung in Richtung der Werkstoffzufuhr
 - keine Werkstoffanhäufungen z.B. bei Knoten, Ausrundungen usw.

Antwort 2

Verlorene Modelle werden in die Form eingebaut und schmelzen/verdampfen während des Giessvorgangs. Verlorene Formen können also nur einmal eingesetzt werden.

Antwort 3

- Einzelteilherstellung: Handformen, Laminieren, Vollformgiessen
- Mittlere Serien: Kokillengiessen, Keramikgiessen
- Grossserien: Druckguss, Spritzgiessen, Maschinenformen

Antwort 4

- Kraftflussüberlegungen, bevorzugter Druck
Begründung: Vorallem Grauguss ist um Faktoren höher auf Druck beanspruchbar.
- Wandschrägen vorsehen
Begründung: Entformbarkeit
- Konstante Wandstärken
Begründung: Lunkerbildung

- Minimale Wandstärke einhalten:
Begründung: Fließbarkeit des Werkstoffs
- Toleranzen nicht zu eng gestalten
Begründung: Reduktion von weiteren Fertigungsschritten
- Wenig Hohlräume
Begründung: Reduktion von Kernen; einfacheres Putzen
- Ebene Formteilung
Begründung: einfachere Formherstellung
- Keine spitzen Kanten
Begründung: Sandkanten-Effekt
- Bearbeitungsflächen zugänglich gestalten
Begründung: günstigere Nachbearbeitung

Antwort 5

- Hohe Leistung der Fertigung, kurze Zykluszeiten
- Kleine Wandstärken, leichte Bauteile
- Hohe Varianz von Werkstofflegierungen
- Automatisierbar
- Hohe Toleranzen und Oberflächengüten

Antwort 6

Ein Schieber ist ein „automatisierter“ Kern beim Druck- und Spritzgiessen. Über einen Mechanismus wird ein Formteil eingefahren, um Hinterschneidungen auszuformen. Nach dem Giessen fahren diese Teile zurück und das Werkzeug kann öffnen

Antwort 7

individuelle Antworten

Antwort 8

individuelle Antworten

Antwort 9

individuelle Antworten

Antwort 10

1. In einem Mehrfachwerkzeug (z.B. 64-fach) werden Vorformlinge aus PET in einem Spritzgiessverfahren hergestellt.
2. In einem Blaswerkzeug werden die Vorformlinge erwärmt und durch Innendruck gegen das Werkzeug aufgeblasen.

Publikationsverzeichnis – Literatur

- [1] Awiszus, Birgit; Bast, Jürgen und Dürr, Holger (2004): Grundlagen der Fertigungstechnik; Fachbuchverlag, Leipzig
- [2] Beitz, Wolfgang und Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.) (2001): Doppel - Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [3] DIN 1681 (1985): Stahlguss für allgemeine Verwendungszwecke; Ausgabe: 1985-06
- [4] Fischer, Ulrich (2002): Tabellenbuch Metall; Europa Lehrmittel, Hahn
- [5] Hintzen, Hans; Laufenberg, Hans und Matek, Wilhelm (1998): Konstruieren und Berechnen; Vieweg-Verlag, Wiesbaden
- [6] Hintzen, Hans; Laufenberg, Hans und Kurz, Ulrich (2002): Konstruieren, Gestalten, Entwerfen; Vieweg-Verlag, Wiesbaden
- [7] Koether, Reinhard und Rau, Wolfgang (2004): Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure; Fachbuchverlag, Leipzig
- [8] Pahl, Gerhard und Beitz, Wolfgang (2004): Konstruktionslehre; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [9] Pokorny, Joachim; Köhler, Günter und Rögnitz Hans (2004): Maschinenteile; Teubner-Verlag, Stuttgart
- [10] Richter, Rudolf (1986): Form- und giessgerechtes Konstruieren; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- [11] Sautter, Rudolf (1997): Fertigungsverfahren; Vogel Fachbuch Kamprath Reihe, Würzburg
- [12] Steinhilper, Waldemar und Röper, Rudolf (2000): Maschinen und Konstruktionselemente. Band1: Grundlagen der Berechnung und Gestaltung; Springer-verlag, Berlin, Heidelberg

Publikationsverzeichnis – Weblinks

Firmen:

- Medimet Feinguss AG: <http://www.medimet.de>
- Kessel Feinguss GmbH: <http://members.aol.com/KesselGuss/feinguss/index.htm>
- I.B.O: <http://www.i-b-o.com/>
- Otto Kälin: <http://www.formteile.ch/>
- Leichtmetallgiesserei Rolf Brunner: <http://www.aluguss.ch>
- Kurtz Industrial Technologies Company: <http://www.kurtz.de>
- Metallgiesserei Matzensdorf: <http://www.metmat.ch>
- R.Frei AG: <http://www.frei-ag.ch>
- Von Roll: <http://www.vonroll.ch>
- Giroud Fonderie: <http://www.giroudfonderie.com>

- Giesserei Hegi AG: <http://www.hegi.ch>
- Fondarex: <http://www.fondarex.com>
- Schlicht Druckguss: <http://www.druckguss-schlicht.de>
- Bühler Druckguss: <http://www.buhlergroup.com>
- Von Roll Druckguss:
<http://www.vonroll-infratec.ch/druckguss>
- Kletterer Druckguss: <http://www.ketterer-druckguss.de>
- Matthies Druckguss: <http://www.matthies-druckguss.de>
- Schmidth und Clemens: <http://www.schmidt-clemens.de>
- Klaus Kuhn Edelstahlgiesserei: <http://www.kuhn-edelstahl.de>
- Fritz Werner Industrieausrüstungen:
<http://www.fritz-werner.com>
- Modell-Technik Rapid Prototyping GmbH:
<http://www.modelltechnik.de>
- Stahl Gerlafingen: <http://www.stahl-gerlafingen.com>
- Schulenburg: <http://www.schulenburg.de>
- Alulight: <http://www.alulight.com>
- Cymat: <http://www.cymat.com>
- Karmann: <http://www.karmann.com>
- Eurofoam: <http://www.euro-foam.com>
- Cannon Deutschland: <http://www.cannon-deutschland.com>
- Metalfoam: <http://www.metalfoam.net>
- Swisscomposites: <http://www.swiss-composite.ch>
- R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: <http://www.r-g.de>
- SP Systeme: <http://www.spsystems.de>
- Bastian Wickeltechnik: <http://www.bastian-co.de>
- Neuform Composites GmbH:
<http://www.neuform-composites.de>
- Bakelite AG: <http://www.bakelite.de>
- Topglass S.p.a.: <http://www.topglass.it>
- Pultron Composites, Inc.: <http://www.pultron.co.nz>
- Twaron Products: <http://www.twaron.com>
- Demag Ergotech GmbH: <http://www.demag-ergotech.com>
- Matess: <http://www.matess.it>
- Netstal-Maschinen AG: <http://www.netstal.ch>
- Wagner+Wagner GmbH: <http://www.gummi-technik.de>
- ESDA Kunststoffverarbeitung: <http://www.esda.de>
- Röders: <http://www.roeders.de>
- Sidel: <http://www.sidel.fr>
- SIG Plastics: <http://www.sigplastics.de>
- Druckguss Waghäusel: <http://www.druckguss-waghaeusel.de>
- Plastigi: <http://www.plastigi.be>

- Hofbauer GmbH: <http://www.hofbauer.de>

Organisationen:

- Giesserei-Verband Schweiz <http://www.giesserei-verband.ch>
- Verband schweizerischer Schrott-Verbraucher: <http://www.jgp.ch/vssv>
- Eurometaux: <http://www.eurometaux.org>
- Aluminium: <http://www.aluminium.org>
- Eisen-, Blech- und Metallverarbeitende Industrie: <http://www.ebm.de>
- Swissmem: <http://www.swissmem.ch>
- SMU Schweizerische Metall-Union: <http://www.smu.ch>
- Metallbauer.ch: <http://www.metallbauer.ch>
- Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: <http://www.vdma.org>
- Zinc Fonderie: <http://www.zinc-fonderie.asso.fr>
- I.Z.A. <http://www.iza.com>
- Giesserei.de: <http://www.giesserei.de>
- Society for the Advancement of the Materials and Process Engineering: <http://www.sampe.org>
- Composites Fabricators Association: <http://www.cfa-hq.org>
- European Pultrusion Technology Association <http://www.pultruders.com>
- wwcomposites.com: <http://www.wwcomposites.com>
- Kunststoff Web: <http://www.kunststoffweb.de>
- Kunststoff Verband Schweiz: <http://www.kvs.ch>
- Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V.: <http://www.gkv.de>
- Petcycle: <http://www.petcycle.de>

Fertigungsverfahren 2 – Umformen

Autor: Prof. Dr. M. Meier

1. Überblick

Motivation

Was ist der erste Gedanke, den man mit Umformen verbindet? Vielleicht eine alte Schmiede, in welcher ein Schwert geformt wird?



Bild (B250umfZ) Altes chinesisches Soldatenschwert

Oder vielleicht die Karosserie eines Fahrzeugs, welche aus Blech oder Verbundwerkstoffen windschnittig geformt ist?



Bild (B251umfZ) Wiesmann Roadster, Handgefertigt

Schon diese zwei Beispiele zeigen die enorme Varianz des Umformens von älteren, neueren Schmiedeprodukten, von warm und kalt umgeformten Teilen, von Blechumformungen zu massiver Umformung, von der Einzelanfertigung zur Massenproduktion.

Lernziele

Die Studierenden

- können die Fertigungsverfahren in die Klassifikation einordnen,
- sind in der Lage die wichtigsten Verfahren zu erklären,
- kennen detailliert die benachbarten Fertigungsschritte und
- kennen mehrere Anwendungsfälle der einzelnen Verfahren.

Im Speziellen kennen sie die Konstruktionsrichtlinien dieser Verfahren und können mit der Kenntnis der Verfahren auch Richtlinien ableiten und in eigenen Konstruktionen berücksichtigen

Einleitung

Umformen gliedert sich in die Hauptklassen: Kalt- und Warmumformen bzw. Blech- und Massivumformung. Zur Kaltumformung zählen das Tiefziehen und seine Varianten sowie das Biegen. Viele Bauteile aus dem Alltagsgebrauch werden so hergestellt: Karosserien, Kochgeschirr, Beschläge oder Gestelle. Ebenso verbreitet ist die Massivumformung durch Schmieden, Fliesspressen, Prägen oder Strangpressen. Zu den so gefertigten Teilen gehören beispielsweise Fahrradbremsen, Bestecke, Münzen oder Profile. Der Vielfalt der durch Umformen hergestellten Produkte sind kaum Grenzen gesetzt, ebenso wenig der Varianz des umgeformten Materials.

2. Druckumformen – Freiformen DIN 8583 Teil 3

Freiformen ist in die Hauptgruppe Druckumformen einzuordnen und bezeichnet das Umformen mittels nicht oder nur teilweise das Werkstück umschliessendem Werkzeug.

Ihre wichtigste Rolle spielen die hier gezeigten Verfahren im Verfahrensverbund Schmieden (Freiformen, Gesenkformen, Reck- und Ringwalzen, Einprägen, u. A.). Schmieden wiederum ist das älteste Verfahren zur Formgebung von Metallen.

Beim Freiformen wird der Rohling ohne begrenzende Werkzeuge, nur durch geeignetes Führen des Werkstückes unter dem Werkzeug geformt. Im Maschinenbau wird Freiformen meist zum Herstellen von Vorformen für das Gesekschmieden eingesetzt. Aber auch besonders grosse Werkstücke werden freiformgeschmiedet, dazu ein [Video](#) (Film: Stooss AG)

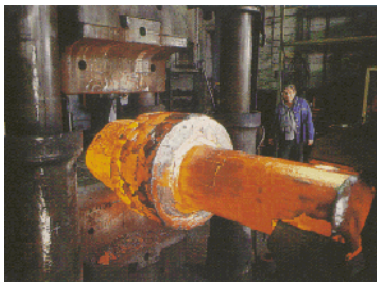


Bild (B001umfZ) Schmiedestück in Bearbeitung (Stooss)

2.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Schmieden wird eingesetzt für: Wellen von Turbinen, Verbrennungsmotoren, Nockenwellen, Tripoden, Muttern, Achsen, Zapfen, Hebel, Uhrenschalen, Pleuel, Seilrollen, Zahnräder, Hüftgelenke und Radnaben.

Generell wird Schmieden bei höher belasteten Teilen eingesetzt.



Bild (B008umfZ) (Stooss)



Bild (B009umfZ) Gewalzte Rollen (Stooss)



Bild (B005umfZ) Muttern (Lippische Eisenindustrie)



Bild (B010umfZ) Gewalzte Rollen (Stooss)



Bild (B006umfZ) Achszapfen gesenkgeformt (Eumuco)



Bild (B007umfZ) Gelenkring und Gelenknabe (Eumuco)

2.2. Verfahren

Zum Freiformen zählen:

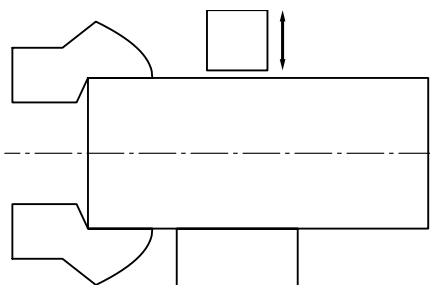
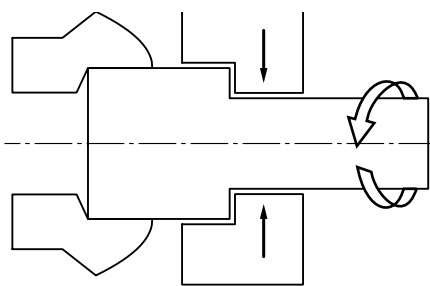
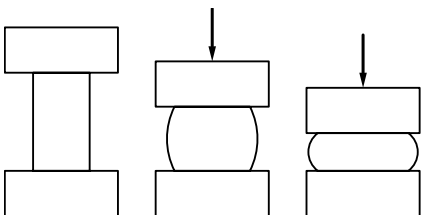
<p>Recken Schrittweises Vermindern des Querschnitts unter Verdrängung des Materials in Längsrichtung.</p>	
<p>Rundkneten Querschnittsvermindern von Stäben oder Rohren unter schrittweiser Drehung des Schmiedestückes.</p>	
<p>Stauchern Vermindern einer Werkstückabmessung zwischen zwei meist ebenen, parallelen Wirkflächen.</p>	

Tabelle (T001umfZ) Freiform-Methoden

2.3. Konstruktionsrichtlinien Freiformen

Beim Freiformen sind folgende Punkte zu beachten:

- Schmiedbarkeit: Den schmiedbaren Temperaturbereich der Werkstoffe beachten.
- Mit zunehmendem C-Gehalt nimmt die Dehnbarkeit und damit die Schmiedbarkeit ab!
- Angaben der Werkstoffhersteller bezüglich Schmiedetemperaturen und Anwärmzeiten beachten!
- Freiformschmieden ist am wirtschaftlichsten bei Einzelstücken und kleinen Stückzahlen einsetzbar. Kostenintensive Spezialwerkzeuge sind hier nicht erforderlich.

Als Gestaltungsrichtlinien für Freiformschmiedeteile sind zu nennen:

- Einzelne Schmiedestücke nicht zu schwer machen, da sonst nicht handhabbar.
- Einfache Formen mit möglichst parallelen Flächen anstreben.
- Runde Konturen durch Schmieden schwierig herzustellen, deshalb möglichst an einer geraden Kante absetzen.
- Grosse Verformungen und schroffe Querschnittsübergänge vermeiden.
- Schwierige Schmiedestücke in mehrere einfache Einzelteile unterteilen.

3. Gesenkformen, DIN 8583 Teil 4

Gesenkformen ist in die Hauptgruppe Druckumformen einzuordnen und bezeichnet das Umformen mit ganz oder nur teilweise das Werkstück umschliessendem Werkzeug. Ihre wichtigste Rolle spielen die hier gezeigten Verfahren im Verfahrensverbund Schmieden (u. a. Freiformen, Gesenkformen, Reck- und Ringwalzen, Einprägen). Schmieden wiederum ist das älteste Verfahren zur Formgebung von Metallen.

Beim Gesenkformen ist der Rohling meist ein Stangenabschnitt oder zweckmässig ein vorgeformter Rohling: Der Werkstofffluss ist durch das Werkzeug begrenzt. Der Rohling wird im Werkzeug durch mehrere Stufen, teilweise durch Zwischenerwärmung, in die endgültige Form gebracht. Es muss beachtet werden, dass Materialverschiebungen beim Massivumformen nicht unbeschränkt erfolgen können. Die Schmiede-Folgeschritte zielen deshalb darauf ab, kontinuierlich die Massen zu verteilen und die relativen Materialverschiebungen klein zu halten.

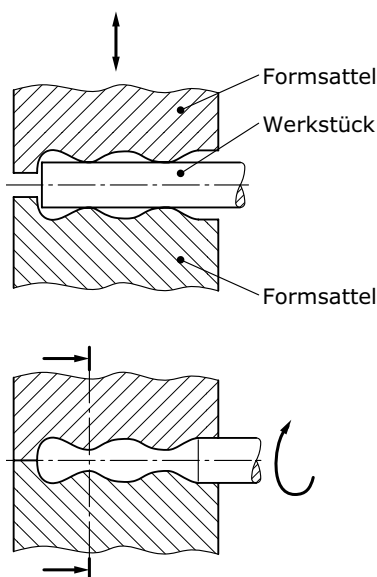


Bild (B011umfZ) Prinzip des Gesenkformens, hier mit einer Stufe

Der grosse Vorteil gegenüber spanenden Verfahren liegt darin, dass die Fasern des Materials nicht durchschnitten werden und somit grössere Wechselfestigkeiten ertragen werden. Zusätzlich sind massive Materialeinsparungen möglich.



Bild (B008umfZ) (Stooss)



Bild (B012umfZ) Umformstufen einer Getriebewelle (SMS Eumuco)



Bild (B013umfZ) Vom Stangenabschnitt zum Pleuel: Reckwalzen, Gesenkformen, Lochen, Entgraten (SMS Eumuco)

Obige Beispiele einer Getriebewelle und eines Pleuels machen den Unterschied zwischen Gesenkformen und Gesenkschmieden deutlich: Gesenkformen bezeichnet nur den Umformvorgang zwischen den geschlossenen Werkzeugen, zum Gesenkschmieden gehören auch die Scherschneidverfahren, das Lochschneiden und das Entgraten dazu. Ein [Video](#) zeigt, wie diese Verfahren in der Praxis angewandt werden (Film: Hatebur Umformmaschinen)

Giessen und Gesenkformen stehen im Einsatzgebiet häufig in Konkurrenz. Beide Verfahren ergeben genaue Bauteile, sowohl in Toleranzen ($< 0.3 \text{ mm}$) als auch in der Oberflächengüte. Schmiedeteile ergeben kleinere Kerbwirkung durch die gute Verknetung, den vorhandenen ununterbrochenen Faserverlauf und das Fehlen von inneren Kerben durch Graphit und u. U. Lunker. Schmiedeteile sind aber meistens teurer. Schmieden wird eingesetzt für hoch belastete Teile als

auch Teile, bei welchen eine rationelle Fertigung im Vordergrund steht. Der Entscheid kann erst im Einzelfall, nach Abwägen der technischen, wirtschaftlichen Wertanalyse, gefällt werden.

Im Vergleich zu spanender Bearbeitung sind der geringere Werkstoffverbrauch, die kurze Fertigungszeit und die reduzierte Kerbwirkung hervorzuheben.



Bild (B014umfZ) Blick in eine Gesenkformmaschine mit mehreren Umformstationen (Hatebur)

Vorgelagerte Verfahren	Verwandte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Freiformen	Freiformen	Drehen
Reckwalzen		Fräsen
		Schleifen

Tabelle (T005umfZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

3.1. Werkstoffe zum Schmieden

Es existiert eine Fülle von Werkstoffen, welche geschmiedet werden können. Meist werden Stahl-, Aluminium- und Kupferknetlegierungen eingesetzt. Das Schmieden erfolgt im glühenden Zustand. Bei Stählen lassen sich Werkstoffe mit weniger C-Gehalt einfacher schmieden, der Schmiedetemperaturbereich ist grösser.

Es können sowohl nicht legierte, als auch niedrig bis hochlegierte Stähle geschmiedet werden. Es lassen sich für nahezu jeden Verwendungszweck passende Stähle finden.

Es wird hier der Übersicht halber auf eine Liste mit Werkstoffen verzichtet. Im konkreten Fall bieten Firmen, welche ein Verfahren anbieten, auch Werkstoffprogramme an.

3.2. Konstruktionsrichtlinien Gesenkformen

Beim Gesenkschmieden lassen sich ohne besondere Vorkehrungen Genauigkeiten bis zur Qualität IT 8 erreichen. Durch Sondermassnahmen lassen sich ebenso wie beim Kaltfliesspressen noch günstigere Genauigkeitsreihen erreichen. Dadurch ist es in vielen Fällen möglich, geschmiedete Bauteile ohne zusätzlich spanende Nachbearbeitung direkt einzusetzen. Schmieden wird aber auch oft eingesetzt, um Roh-teile zu erstellen, die anschliessend einer spanenden Weiterverarbeitung unterzogen werden. Durch geeignete Gestaltung des Schmiedeteils in Abstimmung auf den Schmiedeprozess ist eine wesentliche Einsparung bei der spanenden Bearbeitung möglich. Denn wenn durch die Fertigung des Schmiedeteils eine Form möglichst nahe an der gewünschten Endform (near netshape) entsteht, wird ein Teil der nachfolgenden Bearbeitung überflüssig.

Beim Gesenkschmieden werden dem Werkstoff durch Ober- und Untergesenk die Fliessrichtung und die Fertigform aufgezwungen. Für das Gesenkschmieden gelten im einzelnen die folgenden Gestaltungsrichtlinien:

- Vermeiden von Hinterschneidungen.
- Vermeiden geknickter Teilfugen.
- Dünne Böden und schlanke Rippen vermeiden.
- Vermeiden schroffer Querschnittsübergänge.
- Aushebeschrägen vorsehen.
- Formen anstreben, wie sie sich bei freier Stauchung ergeben.
- Einfache, möglichst rotationssymmetrische Teile.
- Grosse Rundungen vorsehen.
- Anpassen an Fertigform bei hohen Stückzahlen.

Bei kleiner Stückzahl ist nur eine geringe Anpassung des Schmiedeteils an die spätere Fertigform sinnvoll. Bei grösserer Stückzahl sind Gesenkschmiedeteile zu verwenden, die der Fertigform enger angepasst sind. Je höher die Anpassung an die spätere Fertigform, desto grösser ist der Werkzeugaufwand, der zu treiben ist, desto geringer ist aber auch der Anteil der noch durchzuführenden spanenden Bearbeitung. Die Gesamtkosten des Fertigteils sinken mit wachsender Stückzahl durch genauere Anpassung des Gesenkschmiedeteils an die Fertigform, obwohl die Rohteilkosten ansteigen.

Der Verlauf und die Lage der Gesenkteilung haben grossen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Herstellung und die Eigenschaften des Gesenkschmiedeteils (zum Beispiel durch Beeinflussung des Faserverlaufes). Bei der Festlegung der Gesenkteilung sind gegenläufige Einflussgrössen zu berücksichtigen, zum Beispiel schmiedetechnische Vorzüge und kostengünstige Gesenkteilungen. Die Kosten für eine spanende Bearbeitung des Gesenks ist durch eine günstige Lage der Teilung beeinflussbar.

Um Gesenkschmiedeteile aus der Gravur heben zu können, müssen ihre in Umformrichtung liegenden Flächen geneigt sein. Die erforderliche Seitenschräge ist je nach Umformverfahren an Innen- und Aussenflächen verschieden. Bei der Gestaltung von Querschnittsübergängen sind Rundungen so gross zu wählen, wie es ohne Nachteil für die Funktionseigenschaften des Schmiedeteils möglich ist. Abrupte Querschnittsübergänge von grossen auf kleine Querschnitte sind zu vermeiden. Schroffe Querschnittsübergänge sind aus schmiedetechnischen Gründen und auch wegen der Gefahr von Spannungsrissen beim nachträglichen Vergüten zu vermeiden. Beim Gesenkschmieden dünner Böden ist darauf zu achten, dass die Bodendicke von der Mitte nach aussen zunimmt, und zwar stetig in einem Winkel von circa 3 bis 5 Grad. Jeder Boden sollte in die anschliessenden Formelemente über Hohlkehlen mit ausreichend grossem Rundungshalbmesser übergehen. Bei Rippen und Wänden ist eine gedrungene Querschnittsform günstiger als ein schlanker Querschnitt. Grundsätzlich gilt: je weniger der Werkstoff steigen muss, desto geringer ist der Verschleiss an der Werkzeugoberfläche sowie die erforderliche Umformkraft.

3.3. Firmen und Organisationen zum Schmieden

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Stooss	Schmieden, Ringwalzen, Feuerverzinken
SMS Eumuco	Gesenkschmiedemaschinen
Lippische Eisenindustrie	Muttern und Warmumformteile
Albert Weber	Gehäuse, Kurbelwellen
Drösser	Stahlhandel mit Verfahrenskatalog
Hatebur Umformmaschinen AG	Gesenkschmiedeautomaten

Tabelle (T006umfZ) Firmen Schmieden

Organisation:	Beschreibung:
Stahl Online	Homepage der Stahlindustrie
Profzone	Homepage über Stahl
Studiengesellschaft Stahlanwendung	
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T007umfZ) Organisationen Schmieden

4. Durchdrücken, DIN 8583 Teil 6

Beim Durchdrücken wird ein Werkstück ganz oder teilweise durch eine formgebende Werkzeugöffnung hindurchgedrückt. Diese Verfahren haben in der heutigen Zeit eine immense Bedeutung erlangt, da sie die vollautomatisierte Herstellung von einbaufertigen Teilen und komplexem Stangenmaterial erlauben.

4.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Einsatzgebiete des Strangpressens: Rundprofile, Rohre und fast beliebig komplizierte Profile für Bau, Fahrzeuge, Möbel sowie Messeinrichtungen.

Das Fließpressen eignet sich dagegen vorallem für: Tuben, Zahnräder, Wellen, Bolzen und Nieten sowie Schrauben.



Bild (B024umfZ) (SMS Hasenclever)

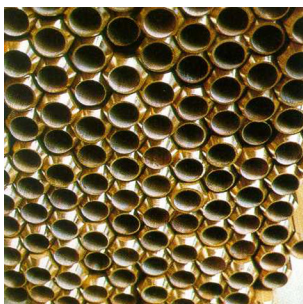


Bild (B025umfZ) (SMS Hasenclever)



Bild (B026umfZ) (SMS Hasenclever)



Bild (B029umfZ) Zwei Strangpressprofile für Küchenaufhängesystem
(Zeitschrift Design 3/98)



Bild (B030umfZ) Stranggepresstes Halbzeug aus Messing (SMS Hasenclever)

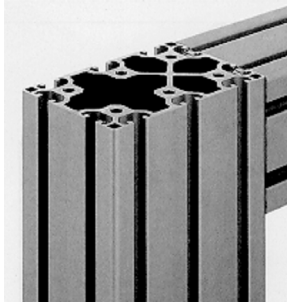


Bild (B031umfZ) Auch in der Verbindungstechnik und für Messebau sind Strangpressprofile gut geeignet



Bild (B032umfZ) Fließgepresste Zahnräder sind preisgünstig und nennen einen günstigen Faserverlauf ihr Eigen (Neumeyer Fließpressen)



Bild (B033umfZ) Durch geschickte Konstruktion lassen sich mehrere geschweisste Teile auf ein einziges fließgepresstes reduzieren. (Neumeyer Fließpressen)

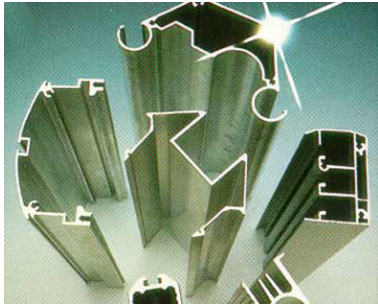


Bild (B027umfZ) (SMS Hasenclever)

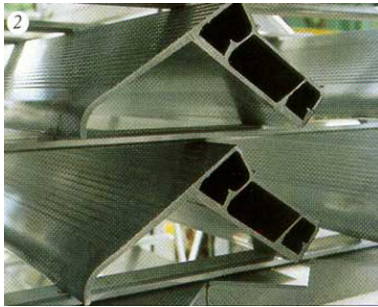


Bild (B028umfZ) (SMS Hasenclever)

4.2. Verfahren

Die wichtigsten Verfahren des Durchdrückens sind:

- das Strangpressen und
- das Fließpressen.

4.2.1. Verfahren: Strangpressen

- Herstellung von komplexen Voll- und Hohlprofilen, vorzugsweise aus Aluminium

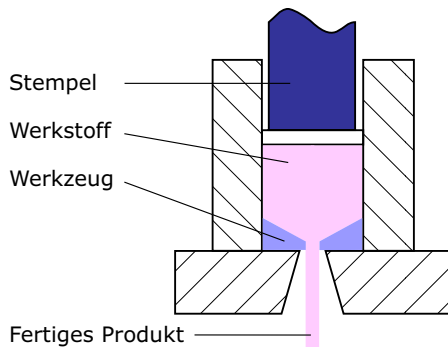


Bild (B015umfZ) Schema Strangpressen

Die Möglichkeit, komplexe und ästhetische Voll- und Hohlprofile zu erzeugen haben dem Strangpressen, engl. Extrusion, in den letzten 100 Jahren zu seinem heutigen Siegeszug verholfen. Der Trend zu leichteren Konstruktionen hat dem Strangpressen, welches für Aluminium geradezu prädestiniert ist, zusätzlich Auftrieb verliehen. Kaum ein Fahrzeug oder Gebäude, kommt heute ohne die ästhetischen Strangpressprofile aus.

Was geschieht beim Strangpressen? Ein Stempel drückt das erwärmte Material durch eine oder mehrere hintereinander angeordnete Matrizen (Werkzeuge). Bei Hohlprofilen wird zuerst die Innenform mit einem sternförmigen Werkzeug geformt, um die aufgeteilten Stränge im Werkzeug für die Aussenform miteinander zu verschweißen. Wie das geschieht, zeigt folgendes [Video](#) (Film: SMS Eumuco).



Bild (B017umfZ) So sieht eine moderne Strangpressanlage aus (SMS)

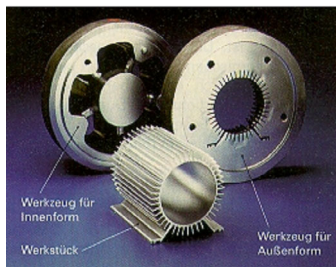


Bild (B018umfZ) Stranggepresste Teile

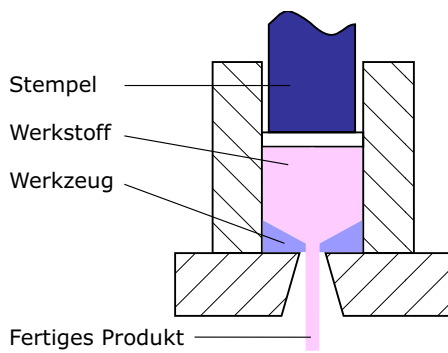


Bild (B015umfZ) Beweglicher Stempel

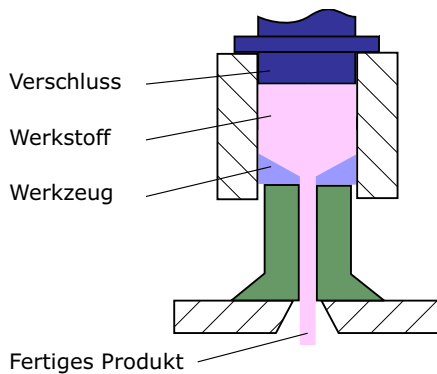


Bild (B019umfZ) Bewegliches Werkzeug

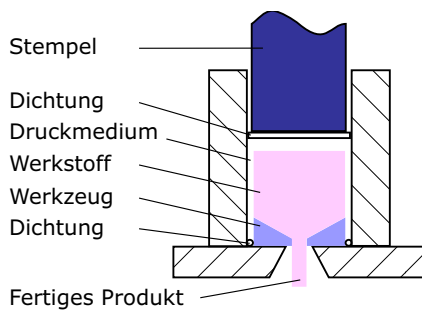


Bild (B020umfZ) Druckmedium

Man kennt verschiedene Strangpressverfahren. Einerseits existiert das direkte und indirekte Strangpressen, andererseits auch das hydrostatische Strangpressen, wo eine Flüssigkeit den Druck erzeugt. Das indirekte und hydrostatische Verfahren wird vor allem angewandt, da zwischen Block und Aufnehmer keine Reibung entsteht. Da bei jedem Block ein Pressrest ausfällt, ist man bestrebt, möglichst lange Profile herzustellen – 50 m lange Profile sind üblich.

Vorgelagerte Verfahren	Verwandte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Stranggiessen	Ziehen	Eloxieren
	Walzen	Sandstrahlen (Stahlteile)
		Beizen

Tabelle (T009umfZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

4.2.2. Verfahren: Fließpressen

Einzelne Werkstücke werden durch Durchdrücken zwischen 2 Werkzeughälften hergestellt.

Zur Herstellung von günstigen Massenteilen, meist rotationssymmetrischer Formgebung, eignet sich das Fließpressen: Ein Stangenabschnitt wird in ein Werkzeug gelegt und durch einen Stempel unter hoher Krafteinwirkung umgeformt. Es sind prinzipiell alle duktilen Werkstoffe dazu geeignet. Je nach Art der Kraftübertragung und Fließrichtung unterscheidet DIN 8580 und auch die Praxis zwischen Vorwärts-, Rückwärts-, Quer- und Hydrostatischem Fließpressen, wobei das Vor- und Rückwärtsfließpressen sowie Kombinationen davon sehr häufig angewandt werden.

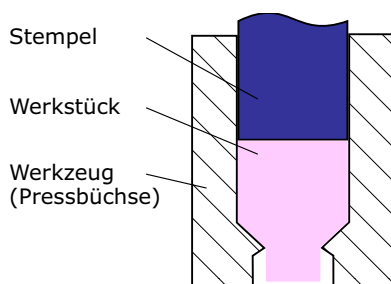


Bild (B021umfZ) Vorwärts-Fließpressen

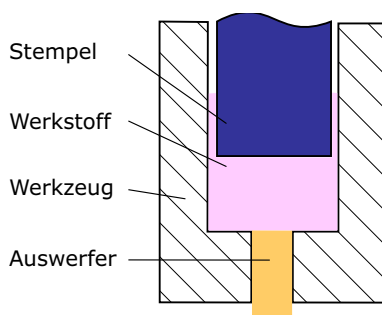


Bild (B016umfZ) Rückwärts-Fließpressen

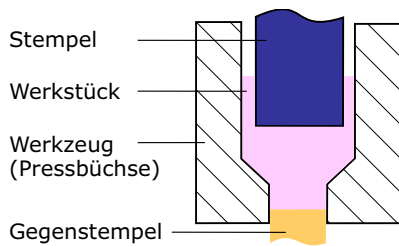


Bild (B022umfZ) Vor-/Rückwärts-Fliesspressen

Beim Rückwärtsfliesspressen können auch sehr dünnwandige Hohlkörper hergestellt werden – es werden Wandstärken von 0.1–1.5 mm und FlieSSHöhen bis 250 mm in einem Hub erreicht. Grenzen des Verfahrens bestehen in der Beanspruchung der Werkzeuge. Vielfach sind mehrere Folgeschritte notwendig.

Es kann sowohl kalt als auch halbwarm und warm FlieSSgepresst werden. Grosse Teile vorausgesetzt, wird KaltflieSSpressen ab 3000–5000 Teilen pro Los wirtschaftlich. Darunter lassen sich die hohen Werkstückkosten kaum amortisieren.

Ein grosser Vorteil des FlieSSpressens ist, dass Teile, die sonst durch SchweiSSen oder Drehen hergestellt werden müssten, durch ein einziges Bauteil mit ununterbrochenem Faserverlauf ersetzt werden können.

Nachteilig wirkt sich aus, dass FlieSSpressteile bei engen Toleranzen nachgeschliffen werden müssen. In diesem Zusammenhang sind Bemühungen im Gang, die Genauigkeiten zu erhöhen und das Bearbeitungsaufmass zu reduzieren (Near Net Shape Technology).

Ein weiterer Nachteil sind die hohen Kräfte zum Auswerfen der Teile, die bis zu 10–20 % der Pressen-Nennkraft betragen können.

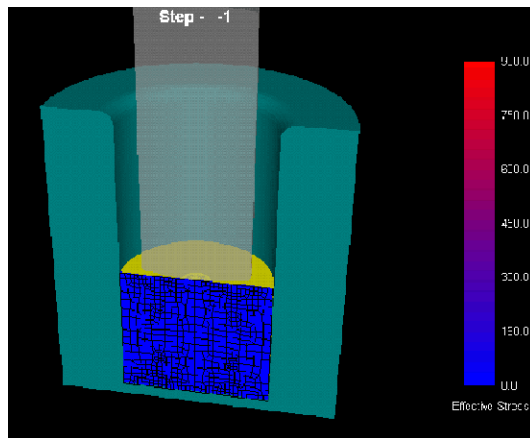


Bild (B023umfZ) FEM-Simulation eines Fließpressvorganges (FH Hannover)

Vorgelagerte Verfahren	Verwandte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Walzen	Gesenkbiegen	Drehen
Giessen	Gesenkformen	Schleifen
		Teile möglichst Einbaufertig

Tabelle (T011umfZ) Vorgelagerte, verwandte und Nachgelagerte Verfahren

4.3. Konstruktionsrichtlinien Durchdrücken

Die durch Durchdrücken (Fließpressen) herstellbaren Bauteile sollen weitgehend axialsymmetrisch, insbesondere rotationssymmetrisch sein. Die Werkstückmasse bei fließgepressten Teilen liegt im Bereich von einigen Gramm bis hin zu maximal 40 kg.

Prinzipiell sind alle duktilen Werkstoffe fließpressbar. Besonders geeignete Werkstoffe sind Blei, Zinn, Kupfer, Aluminium, Aluminiumlegierungen, weiche Cu-Zn-Legierungen und Stahl mit niedrigem Kohlenstoffgehalt und grosser Dehnung. Beim Kaltfließpressen gibt es Einschränkungen hinsichtlich der Beanspruchbarkeit der Werkzeuge.

Die Gestaltung der Werkzeuge und der Rohlinge soll fließgerecht vorgenommen werden. Die Fasern im Werkstück sollen so sanft wie möglich umgelenkt werden, um die Kerbwirkung möglichst klein zu halten. Der Faserverlauf fließgepresster Formlinge ist bei einwand-

freier Gestaltung festigkeitsgerecht. Bei nachfolgender spanender Bearbeitung sind die Fasern möglichst nicht anzuschneiden. Andernfalls ergibt sich eine Kerbwirkung.

Beim Warmfliesspressen gelten weitgehend die Gestaltungsregeln wie für das Gesenkschmieden.

Die Gestaltungsregeln für das Kaltfliesspressen sind wie folgt:

- Hinterschneidungen innen und aussen in Richtung des Werkstoffflusses sind zu vermeiden.
- Seitenschrägen sind sowohl innen als auch aussen zu vermeiden.
- Unsymmetrische Werkstoffverteilungen vermeiden, Rotations-symmetrie anstreben.
- Schroffe und sprungartige Querschnittsänderungen vermeiden.
- Rundungen vorsehen, scharfe Kanten vermeiden.
- Kleine und schlanke Bohrungen vermeiden

4.4. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Neumeyer	Massivumformtechnik
Hatebur	Fliesspressen und Schmiedemaschinen
Honsel	Strangpressen

Tabelle (T012umfZ) Firmen Fliess- und Strangpressen

Organisation:	Beschreibung:
Euroblech	Blech-Messe
Eisen-, Blech- und Metallverarbeitende Industrie	Wirtschaftsverband
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T013umfZ) Organisationen Fliess- und Strangpressen

5. Zugdruckumformen – Tiefziehen, DIN 8584 Teil 3

Das Tiefziehen (engl. *Deep drawing*) ist in der Gruppe „Zugdruckumformen“ das mit Abstand am meisten angewandte Verfahren. Allen Tiefziehverfahren ist gemein, dass sie ein Blechzuschnitt (Platine) ohne beabsichtigte Veränderung der Blechdicke in einen Hohlkörper umwandeln.

Obschon DIN 8584 viele verschiedene Tiefziehverfahren kennt, dominiert heute das „Tiefziehen mit starrem Werkzeug“ bei der Blechumformung und das Vakuumtiefziehen bei den Kunststoffen den Markt.

Vorgelagerte Verfahren	Verwandte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Stanzen	Hohlprägen	Schneiden
Walzrichten	Streckziehen	Glühen
Walzen	Gesenkformen (Kümpeln)	Verzinken
		Abstreckgleitziehen

Tabelle (T014umfZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

5.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Tiefziehen wird in vielen Bereichen eingesetzt. Ein Beispiel ist die Automobilindustrie, bei welcher Karosserien, Längs- und Querträger mit diesem Verfahren hergestellt werden. Weitere Einsatzgebiete sind: Gefässe, Schüsseln, Pfannen, Verpackungen aus Blech oder Kunststoff, Druckbehälter und die Flugzeugindustrie.



Bild (B042umfZ) Elektromotorgehäuse (Schürholz)



Bild (B043umfZ) Karosserie und Spaceframe (Mercedes)

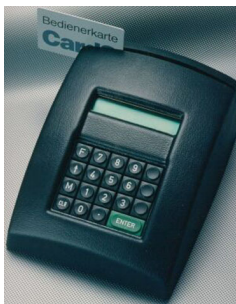


Bild (B044umfZ) Kartenlesegerät (Vakuumtiefgezogen)

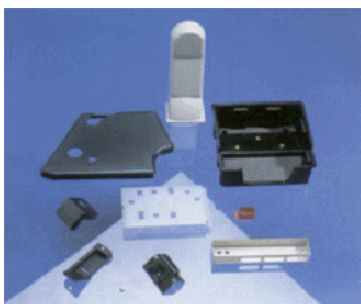


Bild (B045umfZ) Abdeckungen (Niebling)



Bild (B046umfZ) Gasflaschen (AGA)



Bild (B047umfZ) Spülbecken (Oskar Steffen)

5.2. Verfahren

Tiefziehen mit starrem Werkzeug beinhaltet die folgenden typischen Verfahren:

- Tiefziehen im Erstzug
- Tiefziehen im Weiterzug
- Kümpeln

Zum Tiefziehen gehören weitere exotische Verfahren, wegen ihrer sehr beschränkten Verbreitung wird auf diese Verfahren allerdings nicht weiter eingegangen.

5.2.1. Verfahren: Tiefziehen im Erstzug

Hier wird das flache Blech in einen Hohlkörper umgeformt.

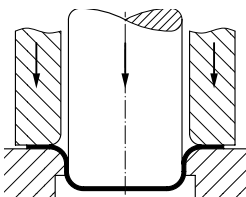


Bild (B034umfZ) Umformung des Blechs in einen Hohlkörper

5.2.2. Verfahren: Tiefziehen im Weiterzug

Ein durch Tiefziehen im Erstzug vorgeformtes Blech wird weiter umgeformt.

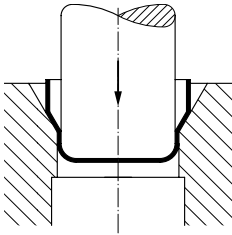


Bild (B035umfZ) Weitere Umformung des vorgeformten Blechs

5.2.3. Verfahren: Kümpeln

Ebene Platten werden ohne Niederhalter zu Kesselböden und Ähnlichem umgeformt.

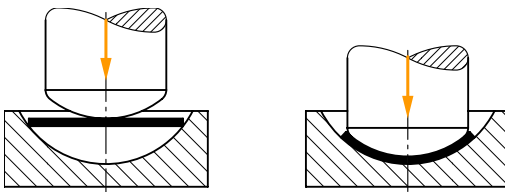


Bild (B036umfZ) Umformung ebener Platten ohne Niederhalter

Beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug wird ein ebener Blechzuschnitt (Platine) mit einem Stempel in ein Werkzeug gezogen, wobei der Außenrand durch einen Niederhalter eben gehalten wird. So werden nicht nur Falten vermieden, es werden auch höhere Ziehtiefen möglich. Allerdings ist nur ein bestimmtes Verhältnis Platinendurchmesser/ Napfdurchmesser möglich, sonst reißt das Blech. Daher werden tiefe Teile in mehreren Zügen gezogen – so wird der maximale Umformgrad pro Zug nie überschritten.



Bild (B038umfZ) [Video](#) über das Tiefziehen von Karosserieteilen
(Bild und Film: Schuler Group)

Beim Tiefziehen mit nachgiebigem Kissen ist es möglich, mehrere Züge in einem Pressenhub durchzuführen. Zusätzlich verhindert eine regelbare Zugspannung zwischen Kissen (blau) und Ziehring (rot) Falten. Der Ziehring des 2. Zugs (violett) steht still. Beim Fertigziehen im 2. Zug wird der Flansch (blau) des Beckens dem schnelleren inneren Stempel (grün) nachgeführt.

Eine [Animation von Reitter](#) zeigt die Herstellung eines Hohlkörpers im Stufenverfahren. Die verwendete Flüssigkeit ist ein Schmiermittel und erhöht die Werkzeuglebensdauer erheblich.

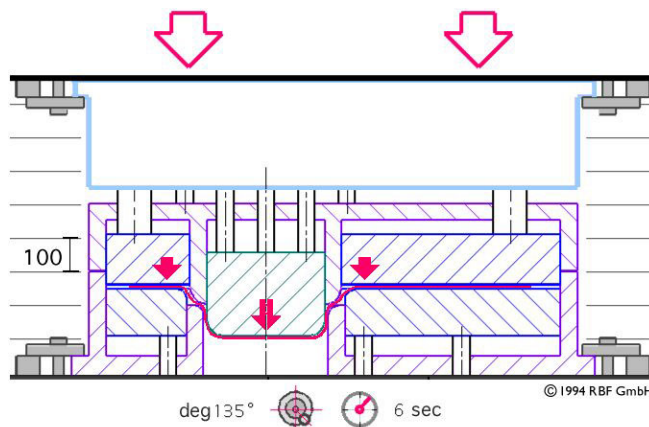


Bild (B039umfZ) [Animation Tiefziehen](#) (Bild und Video: Reitter Blechformsysteme)

Teilweise wird zwischen den Zügen geblüht, um das Material wieder zu entfestigen. Beim Tiefziehen kreisrunder Teile können Erstzüge (ausgehend von der ebenen Platine mit Durchmesser D zum Hohlkörper mit Durchmesser d) von $m = D/d$ von 1.8–2.3 erreicht werden. Ohne Zwischenglühen erreichen Weiterzüge $m = 1.2–1.5$, mit Glühen

wieder bis 2.0. Zu beachten ist, dass meist ein Flanschbereich verbleibt, der in einem Folgeschritt (Formschnitt) abgetrennt wird. Meist geschieht dies im gleichen Hub mit dem Tiefziehen oder in der nächsten Pressenstation.

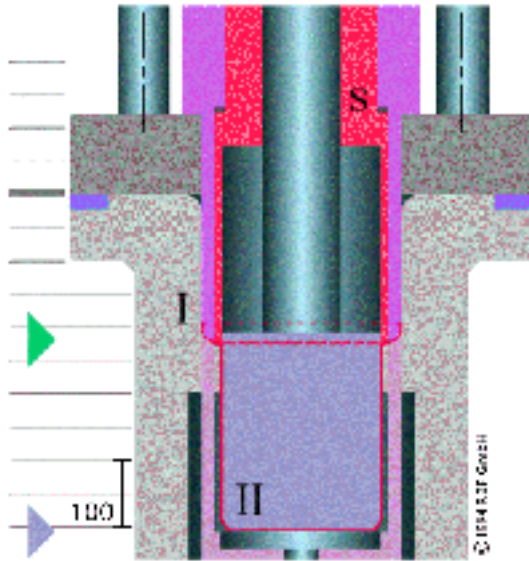


Bild (B040umfZ) [Animation Tiefziehen-Schneiden](#)
(Bild und Video: Reitter Blechformsysteme)

Bei grösseren Ziehverhältnissen und komplizierten Geometrien, wie sie z. B. im Karosseriebau vorkommen, wird meist auch das Tiefziehen auf mehrere Pressen verteilt. Man spricht dann von Stufenpressen. Nebenstehende Abbildung zeigt die Herstellung einer Ölwanne für ein Auto. Erst in der letzten Stufe werden die Löcher gestanzt.



Bild (B041umfZ) Tiefziehen einer Ölwanne [7]

Blechdicken bis 15 mm werden kalt tiefgezogen, dickere Bleche müssen auf Schmiedetemperatur erwärmt werden. Ab 30 mm entfällt der Niederhalter, da sich das Blech durch das Eigengewicht hält, und selbst aus Blechen von 100 mm Dicke lassen sich Böden für Druckbehälter ziehen (sog. Kumpeln). (Bild und Video: Schuler)

Neben dem Tiefziehen mit starren Werkzeugen existiert noch das Tiefziehen durch Gasen mit kraftgebundener Wirkung, dessen Vertreter das Vakuumtiefziehen ist.

5.2.4. Verfahren: Vakuumtiefziehen

Thermoplaste werden warm durch ein Vakuum in eine Form gezogen.

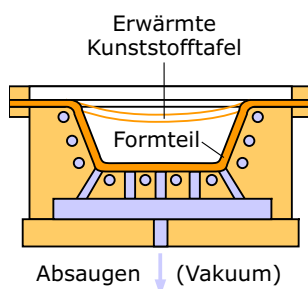


Bild (B037umfZ) Vakuumtiefziehen von Thermoplasten

5.3. Werkzeuge

Werkzeuge für Stanz-, Druckgiess-, Gesenkform- und Tiefziehpressen gleichen sich punkto Aufbau und Anforderungen. Die Werkzeugform bestimmt in gewissem Masse die Werkstückform, dementsprechend nimmt die Komplexität des Werkzeugs auch mit der Komplexität des Werkstückes zu.

Die Herstellung der Werkzeuge, sprich der Positiv- und Negativformen bildet einen eigenen Industriezweig. Die in der Werkzeugfertigung angewandten Verfahren wie Freiformfräsen Schleifen, Polieren, Läppen oder Erodieren der meist schwer zerspanbaren Werkzeugstähle ist arbeitsintensiv und somit sehr teuer. Vielfach werden zuerst Prototypen-Werkzeuge aus einfach zu bearbeitenden Materialien (Al, FVW) gefertigt. Neue Werkzeuge müssen zuerst auf sogenannten Tryout-Pressen getestet werden, bevor sie in einer anderen Presse die Produktion aufnehmen können.

Grosse Werkzeuge sind mehrere Tonnen schwer und erfordern spezielle Transport- und Wechselsysteme. Hochqualitative Präzisionswerkzeuge sind über mehrere Jahre im Einsatz.

5.3.1. Einzelwerkzeuge

Grosse Tiefziehteile mit geringem Umformgrad werden in Einzelwerkzeugen tiefgezogen.



Bild (B054umfZ) Al-Prototyp-Ziehwerkzeug (Schuler)

5.3.2. Mehrfachwerkzeuge

Für Kunststoffteile (Tiefziehen, Blasformen und Spritzgiessen) werden gerne Mehrfachwerkzeuge eingesetzt. In einem Schuss entstehen mehrere Bauteile.

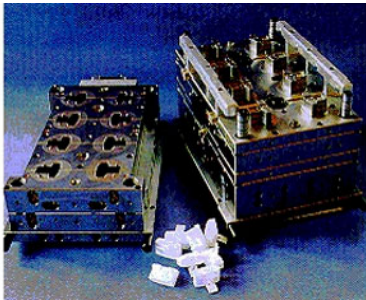


Bild (B055umfZ) Spritzgusswerkzeug mit verschiedenen Kavitäten

5.3.3. Stufenwerkzeuge

Mehrere Einzelwerkzeuge hintereinandergereiht bilden ein Stufenwerkzeug. Die Platinen werden von Station zu Station befördert. Pressen mit automatisiertem Beförderungssystem werden Transferpressen genannt.

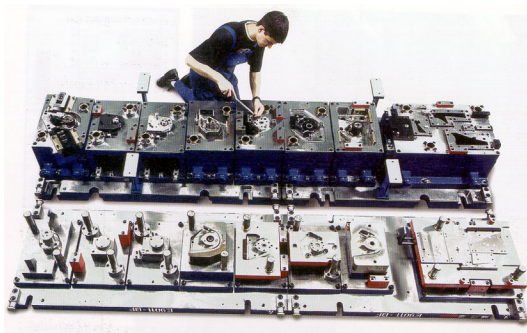


Bild (B056umfZ) (Schuler)

Vielfach werden Stufenwerkzeuge auch kombiniert mit sogenannten [Folgewerkzeugen](#) eingesetzt. (Folgewerkzeuge führen hierbei Stanzooperationen aus - siehe auch [Sektion „Trennen: Verfahren: Feinschneiden“](#))


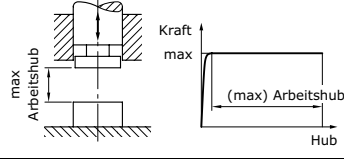
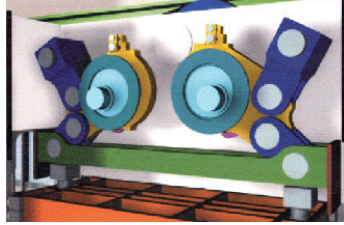
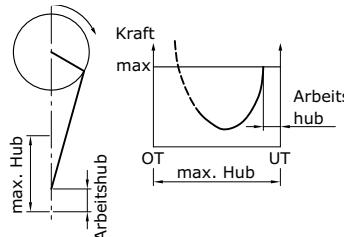

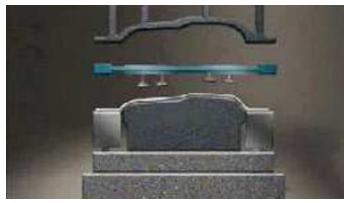
Als Werkstoffe dienen je nach Einsatzgebiet Kaltarbeits-, Warmarbeits- oder Schnellarbeits-Werkzeugstähle (z. B. ein Kaltarbeitsstahl X210CrW12). Um die Verschleissfestigkeit zu erhöhen, werden stark beanspruchte Werkzeuge randschichtgehärtet oder beschichtet. In diesem Zusammenhang hat das PVD-Verfahren (Physical Vapor Deposition) grosse Bedeutung erlangt.

5.3.4. Pressen

Kernstück der meisten Umform- und Stanzanlagen ist eine Presse. Im Automobilbau eingesetzte Tiefziehpressen für Karosserieteile haben eine Presskraft von ca. 8 MN. Der Grösse sind aber praktisch keine Grenzen gesetzt, es existieren Pressen mit 400 MN.

Tabelle T015umfZ zeigt die verschiedenen existierenden Pressmechanismen.

Pressen, welche Endlosmaterial (Coils) verarbeiten, besitzen eingangs meist eine Tafelschere, welche den Trennabfall in Stücke schneidet.

Typ	Verbreitung	Einsatzgebiet	
Spindel- presse	Sehr gering	Spezialpressen für sehr hohe Presskräfte, Schmiede- pressen, antike Traubentrotten	
Hydrau- lische Presse	Gering	Tryout-Pre- sen, Spritz- und Druckguss	
(Bild: HTW Dresden)			
Knie- hebel- presse	Gross	Tiefziehen, Prä- gen, Stanzen, Spritzgiessen	
Video Kniehebelprinzip (Bild und Film: Gräbener Pressen)			
Tabelle (T015umfZ) Pressmechanismen (Bildquellen: HTW Dresden & Schuler)			
Exzenter presse	Gross	Tiefziehen, Prä- gen, Stanzen, Schmieden	
(Bild: HTW Dresden)			
Hybrid- pressen	Wachsend	Mechanisch- Hydraulische Tiefziehpres- sen, gute Blechfluss- steuerung	
(Bild: Schuler)			
Für komplexe Tiefziehteile (z. B. aus dem Automobilbau) werden Press-Strassen ein- gesetzt. Die Platinen werden von ausgeklü- gelten Transfersystemen zur nächsten Presse befördert. Während bei grossen Werkstücken bevorzugt Saugertransfersy- steme eingesetzt werden, kommen bei klei- neren oder heissen Werkstücken (z. B beim Gesenkformen) Greifersysteme zum Zug			
Video Saugtransfersystem (Quelle: Schuler)			

5.4. Übersicht verbreiteter Blechwerkstoffe

Stahlart	Bezeichnung	Daten	Anwendungsgebiete, Beispiele
Unlegierte Stähle	St 12	Wn: 1,0330 R _m : 270-410 R: max. 280 A ₈₀ : 28	Fahrzeugbau
	USt 13	Wn: 1,0333 R _m : 270-370 R: max. 250 A ₈₀ : 32	Fahrzeugbau
	St 14	Wn: 1,0338 R _m : 270-350 R: max. 225 A ₈₀ : 38	Fahrzeugbau
Phosphorlegierte Stähle	ZStE 220 P	Wn: 1,0397 R _m : 340-420 R: 220-280 A ₈₀ : 30	Fahrzeugbau
	ZStE 260 P	Wn: 1,0417 R _m : 380-460 R: 260-320 A ₈₀ : 28	Karosseriebau: Türen, Hauben, Dächer
	ZStE 300 P	Wn: 1,0448 R _m : 420-500 R: 300-360 A ₈₀ : 26	Fahrzeugbau
Bake-hardening-Stähle	ZStE 180 BH	Wn: 1,0395 R _m : 300-380 R: 180-240 A ₈₀ : 32	Fahrzeugbau
	ZStE 220 BH	Wn: 1,0396 R _m : 320-400 R: 220-280 A ₈₀ : 30	Fahrzeugbau
	ZStE 260 BH	Wn: 1,0400 R _m : 360-440 R: 260-320 A ₈₀ : 28	Fahrzeugbau
	ZStE 300 BH	Wn: 1,0444 R _m : 400-480 R: 300-360 A ₈₀ : 26	Fahrzeugbau

Tabelle (T016umfZ) Verbreitete Blechwerkstoffe; Quelle [7]

Wn: Werkstoffnummer, R_m in N/mm², R ist R_{p0.2} oder Rel. in N/mm² und A₈₀ in %;

Stahlart	Bezeichnung	Daten	Anwendungsgebiete, Beispiele
Ferritische Chromstähle	X 6 Cr 17	Wn: 1,4016 R _m : 450-600 R: 250-270 A ₈₀ : 20	Fahrzeugbau: Stossstangen, Radkappen, Nahrungsmittelindustrie: Haushaltgeräte: Tiefziehteile mit höherer Korrosionsbeständigkeit: Spültischauklungen, Bestecke
	X 6 CrMo 17 1	Wn: 1,4113 R _m : 480-630 R: 260-280 A ₈₀ : 20	Radkappen, Stossstangen, Fensterrahmen im Fahrzeugbau, Kühlerverkleidungen
	X 6 CrTi 12	Wn: 1,4512 R _m : 390-560 R: 200-220 A ₈₀ : 20	Fahrzeugbau: Schalldämpfer, Teile der Abgasanlagen
	X 6 CrNb 17	Wn: 1,4511 R _m : 450-600 R: 250-260 A ₈₀ : 20	Molkerei, Brauerei, Nahrungsmittelindustrie, Seifenindustrie und Färbereien: Teile, die geschweisst werden und schwachen Säuren ausgesetzt sind
Austenitische CrNi-Stähle	X 5 CrNi 18 10	Wn: 1,4301 R _m : 500-700 R: min. 195 A ₈₀ : s < 3 mm : längs: 35; quer: 40 / 3 < s < 75 mm A ₅ : 40	Haushaltsgegenstände, Nahrungsmittelindustrie: verschleissfeste, tiefziehbare, schweisbare apparate, Geräte, Behälter
	X 5 CrNi 18 12	Wn: 1,4303 R _m : 490-690 R: min. 185 A ₈₀ : s < 3 mm längs: 35 quer: 40 3 < s < 75 mm A ₅ : 40	Chemische Industrie, Papier-, Textilindustrie: Kaltfliesspressteile, Schrauben, Muttern
	X 15 CrNiSi 25	R _m : 590-740	Tiefziehstahl

Tabelle (T016umfZ) Verbreitete Blechwerkstoffe; Quelle [7]

Wn: Werkstoffnummer, R_m in N/mm², R ist R_{p0,2} oder Rel. in N/mm² und A₈₀ in %;

Stahlart	Bezeichnung	Daten	Anwendungsgebiete, Beispiele
Mikrolegierte Stähle	ZStE 260	Wn: 1,0480 R _m : 350-450 R: 260-340 A ₈₀ : 24	Fahrzeugbau: Karosserieteile
	ZStE 300	Wn: 1,0489 R _m : 380-480 R: 300-380 A ₈₀ : 22	Fahrzeugbau
	ZStE 340	Wn: 1,0548 R _m : 410-530 R: 340-440 A ₈₀ : 20	Fahrzeugbau
	ZStE 380	Wn: 1,0550 R _m : 460-600 R: 380-500 A ₈₀ : 18	Fahrzeugbau
	ZStE 420	Wn: 1,0556 R _m : 480-620 R: 420-540 A ₈₀ : 16	Fahrzeugbau

Tabelle (T016umfZ) Verbreitete Blechwerkstoffe; Quelle [7]

Wn: Werkstoffnummer, R_m in N/mm², R ist R_{p0.2} oder Rel. in N/mm² und A₈₀ in %;

Stahlart	Bezeichnung	Daten	Anwendungsgebiete, Beispiele
Cu und Cu-Legierungen	SF-Cu F 22	Wn: 2,0090,10 R _m : 220-260 R: max. 140 A ₈₀ : 42	Halbzeug, sehr gut schweiss- und hartlötbar
	CuZn 28 F 27	Wn: 2,0261,10 R _m : 270-350 R: max. 160 A ₈₀ : 50	Tiefziehteile aller Art, Instrumente und Hülsen aller Art
	CuZn 33 F 28	Wn: 2,0280,10 R _m : 280-360 R: max. 170 A ₈₀ : 50	Drahtgeflecht, Kühlerbänder, Rohrniete
	CuZn 36 F 30	Wn: 2,0335,10 R _m : 300-370 R: max. 180 A ₈₀ : 48	Metall- und Holzschrauben, Druckwalzen, Kühlerbänder, Reissverschlüsse, Blattfedern, Hohlwaren, Kugelschreiberminen
	CuZn 37 Pb 0,5 F 29	Wn: 2,0332,10 R _m : 290-370 R: max. 200 A ₈₀ : 50	Tiefziehteile
	CuZn 40 F 34	Wn: 2,0360,10 R _m : min. 340 R: max. 240 A ₈₀ : 43	gut warm- und kaltumformbar: Warmpressteile, geeignet zum Biegen, Nieten, Stauchen, Bördeln

Tabelle (T016umfZ) Verbreitete Blechwerkstoffe; Quelle [7]

Wn: Werkstoffnummer, R_m in N/mm², R ist R_{p0.2} oder Rel. in N/mm² und A₈₀ in %;

Stahlart	Bezeichnung	Daten	Anwendungsgebiete, Beispiele
Al und Al-Legierungen	Al 99,5 W 7	Wn: 3,0255,10 R _m : 65-95 R: max. 55 A ₈₀ : 40	Apparatebau, Elektroanlagenbau, Hochfrequenztechnik, Antennen, Koaxialkabel, Abschirmungen, Folien in Kondensatoren, Verpackungsmaterial, Wärmdämmung, Haushaltsgeschirr
	AlMg 1 W 10	Wn: 3,3319,10 R _m : 100-140 R: 35-60 A ₈₀ : 23	Architektur, Fahrzeugbau, Metallwaren: Bleche, Bänder, Profile, Stangen, Rohre, Schmiedestücke, sehr gut kaltverformbar, schweisssbar, sehr seewasserbeständig
	Al 99,9 Mg 1 W 10	Wn: 3,3318,10 R _m : 100-140 R: 35-60 A ₈₀ : 23	dito
	Al 99,85 Mg 1 W 10	Wn: 3,3317,10 R _m : 100-140 R: 35-60 A ₈₀ : 23	dito
	AlMg 2,5 G 25	Wn: 3,3523,29 R _m : 250-290 R: min. 180 A ₈₀ : 7	Fahrzeugkarosserie, Dosenaufreissdeckel
	AlMg 3 W 19	Wn: 3,3535,10 R _m : 190-230 R: min. 80 A ₈₀ : 20	Nahrungsmittelindustrie, Apparatebau, Fahrzeug- und Schiffbau, Architektur: Halbzeuge, Bedachung, Verpackung, Schrauben, Niete
	AlMn 1 F 12	Wn: 3,0515,24 R _m : 120-160 R: min. 90 A ₈₀ : 7	Apparatebau, Kältetechnik, Wärmetauscher, Bedachungen, Verkleidungen

Tabelle (T016umfZ) Verbreitete Blechwerkstoffe; Quelle [7]

Wn: Werkstoffnummer, R_m in N/mm², R ist R_{p0.2} oder Rel. in N/mm² und A₈₀ in %;

Stahlart	Bezeichnung	Daten	Anwendungsgebiete, Beispiele
Al und Al-Legierungen	AlCuMg 1 W	Wn: 3,1325,10 R _m : max. 215 R: max. 140 A ₈₀ : 13	Berg- Fahrzeug-, Flugzeugbau, Maschinenbau: Bleche, Profile, Stangen, Rohre, Schmiedstücke, Schrauben, Nieten
	AlMg 2 Mn 0,8 F 22	Wn: 3,3527,24 R _m : 220-260 R: max. 165 A ₈₀ : 9	Fahrzeug-, Schiff- und Apparatebau: Teile beanspruchbar bei höheren Temperaturen
	AlMgSi 0,8 F 28	Wn: 3,2316,71 R _m : min. 275 R: min. 200 A ₈₀ : 12	Maschinenbau, Fahrzeugbau
	AlMgSi 1 W	Wn: 3,2315,10 R _m : max. 150 R: max. 85 A ₈₀ : 18	Halbzeuge aller Art, Schrauben
Ti und Ti-Legierungen	Ti 99,8	Wn: 3,7025,10 R _m : 290-410 R: 290-410 A ₈₀ : 30	chemischer Apparatebau, Galvanotechnik, Luft- und Raumfahrzeugbau, Chirurgie und Orthopädie: Prothesen, Knochennägel, -schrauben, Schienen
	Ti 99,7	Wn: 3,7035,10 R _m : 390-540 R: 390-540 A ₈₀ : 22	dito
	TiAl 6 V 4 F 89	Wn: 3,7165,10 R _m : min. 890 R: min. 890 A ₈₀ : 6	Maschinenbau, Luft- und Raumfahrzeugbau, Elektrotechnik, Optik, Feinmechanik, Medizinaltechnik, Armaturen
	TiAl 5 Sn 2 F 79	Wn: 3,7115,10 R _m : min. 790 R: min. 790 A ₈₀ : 6	Maschinenbau, Luft- und Raumfahrzeugbau, Armaturen

Tabelle (T016umfZ) Verbreitete Blechwerkstoffe; Quelle [7]

Wn: Werkstoffnummer, R_m in N/mm², R ist R_{p0.2} oder Rel. in N/mm² und A₈₀ in %;

5.5. Konstruktionsrichtlinien Tiefziehen

Beim Ziehen werden flache Platinen (Ronden) mittels Ziehstempel durch den Ziehring hindurchgedrückt. Dadurch können Hohlteile mit mehr oder weniger starker Werkstückumformung hergestellt werden.

Das Ziehen der Ronden ist mit und ohne Niederhalter möglich. Beim Ziehen ohne Niederhalter sollte zur Verhinderung von Faltenbildung der Zuschnittsdurchmesser das 20–25fache der Blechstärke nicht überschreiten. Hauptsächlich werden runde Werkstücke ohne Niederhalter gezogen.

Beim Tiefziehen treten erhebliche Druck- und Zugumformungen auf. Dadurch kommt es zu einer erheblichen Verfestigung des Werkstoffs mit einer Vergrößerung des Formänderungswiderstands und einer Verringerung der Bildsamkeit des Werkstoffes.

Für das Tiefziehen lassen sich folgende Gut-/Schlecht-Beispiele zusammenfassen:

Regel: Komplizierte Teile und asymmetrische Grundformen sind nach Möglichkeit zu vermeiden. Auf normalen Werkzeugmaschinen leicht zu fertigende Umrisslinien sind anzustreben.

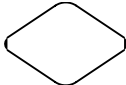
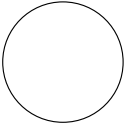


ungünstig	günstig
	
	
	

Tabelle (T017umfZ) Regeln Tiefziehen, Asymmetrien vermeiden

Regel: Runde Böden sind schwieriger durch Tiefziehen herzustellen als ebene mit genügend grosser Bodenrundung. Die günstigste Bodenrundung entspricht dem 0,15-fachen Stempeldurchmesser.

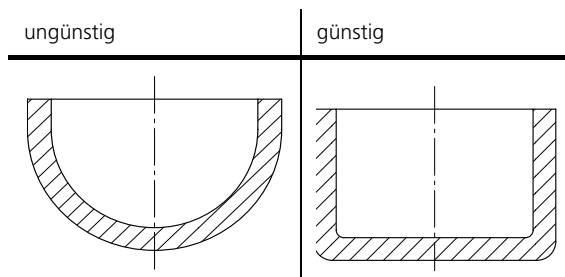


Tabelle (T039umfZ) Regeln Tiefziehen, günstige Bodenrundungen

Regel: Tiefe Teile mit breitem Flansch erfordern einen grossen Ronden-durchmesser sowie grosse und teure Werkzeuge. Es kann wirtschaftli-cher sein, den Flansch nachträglich anzubringen.

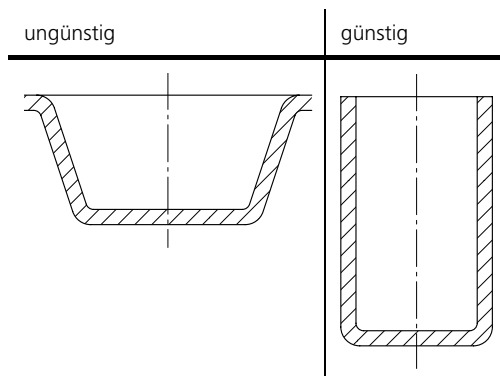


Tabelle (T040umfZ) Regeln Tiefziehen, Ronden-durchmesser im Auge behalten

Regel: Die Höhen ausgezogener Vertiefungen (Augen oder Stutzen) sind niedrig zu halten und sollen mit möglichst grosser Schräge und grossen Radien ausgeführt werden. Sie sind dann ohne Rissgefahr meist in einem Zug zu fertigen.

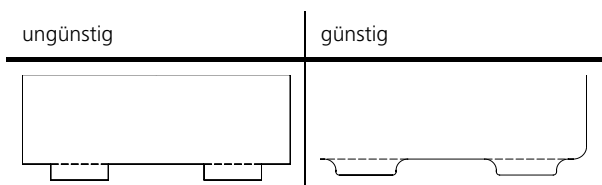


Tabelle (T041umfZ) Regeln Tiefziehen, Rissgefahr durch Rundungen vermindern

Regel: Kegel- und kurvenförmig verlaufende Mantelflächen haben eine ungleichmässige Werkstoffbeanspruchung zur Folge und neigen in besonderem Masse zur Faltenbildung. Bei bauchigen Mantelflächen schmiegt sich der Werkstoff an die Stempelform an. Daraus ergibt sich eine gleichmässigeren Werkstoff- und Werkzeugbeanspruchung.

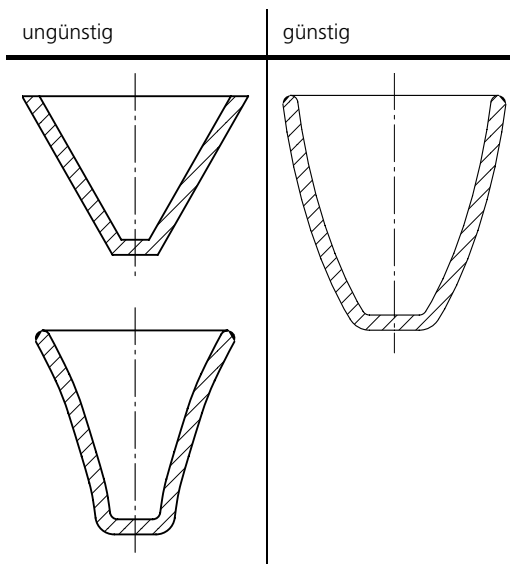


Tabelle (T042umfZ) Regeln Tiefziehen, vermeiden von Faltenbildung

Regel: Senkrechte Zargen sind billiger als Kegelflächen. Eine Aussenrolle gelingt leichter als eine Innenrolle.

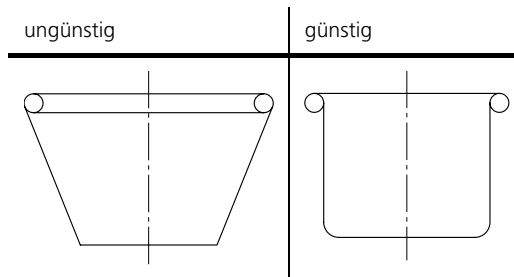


Tabelle (T043umfZ) Regeln Tiefziehen, Aussenrolle vs. Innenrolle

Regel: Teile mit Hinterschnidungen sind nicht ziehbar. In diesen Fällen ist das Werkstück so zu teilen, dass einfache Grundformen entstehen.

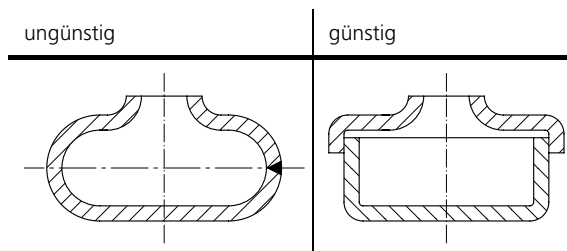


Tabelle (T044umfZ) Regeln Tiefziehen, Hinterschnidungen vermeiden

Regel: Ebene Verschalungsbleche mit Randbördel neigen eher zum Umklappen in eine windschiefe Lage als leicht gewölbte Bleche.

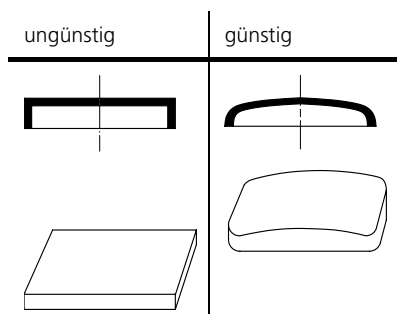


Tabelle (T045umfZ) Regeln Tiefziehen, Stabilität erhöhen

Das Ziehverhältnis β muss besonders beachtet werden. β ist abhängig von den Zieheigenschaften des Bleches (Gefügestand), dem Ziehverfahren (konventionell oder mit Wirkmedien) und den Gleitverhältnissen im Werkzeug (Ziehspalt, Kantenabrundung, Rauheit des Bleches/Werkzeugs, Schmierung, Blechhalterung). Generell sollten extreme Umformungen so selten wie möglich eingesetzt werden, da dies in der Herstellung mehrere Ziehstufen und eventuell sogar ein Zwischenglühen erfordert.

Als Gestaltungsrichtlinien für Tiefziehteile sind zu nennen:

- Zu starke Konizität und konkave Formen der Tiefziehteile vermeiden.
- Zu grosse Napfziehverhältnisse vermeiden.
- Bei grossen Ziehtiefen unbedingt Kragen vermeiden.
- Kugelige Werkstückformen vermeiden, stattdessen zylindrische Formen anstreben.
- Statt komplizierter Formen mit Hinterschneidungen besser eine Aufteilung des Werkstücks in zwei Einzelteile vornehmen.

5.6. Firmen und Organisationen zum Tiefziehen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Schuler	Pressen
Gräbener Pressen	Pressen
Reitter Blechformsysteme	Kissen, Werkzeuge
Müller Weingarten	Pressen, Kompletanlagen
Hylatechnik	Blechhalter, Zubehör
Siempelkamp	Pressen
V-Zug AG	Haushaltsgeräte und Dienstleistungen im Tiefziehen

Tabelle (T018umfZ) Firmen Tiefziehen

Organisation:	Beschreibung:
Euroblech	Blech-Messe
Studiengesellschaft Stahlanwendung	Wissenschaftliche Publikationen
Informationsstelle Edelstahl Rostfrei	Publikationen und Links
Eisen-, Blech- und Metallverarbeitende Industrie	Wirtschaftsverband Deutschland
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
www.metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T019umfZ) Organisationen Tiefziehen

6. Zugumformen – Weiten, DIN8585 Teil 3

Beim Weiten wird der Umfang eines Hohlkörpers unter vergrößert. Speziell erwähnt sei hier nur das relativ neue Innen-Hochdruck-Umformen (IHU) – ein Verfahren, welches zunehmend an Bedeutung gewinnt.

6.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele (IHU)

Folgende Einsatzgebiete sind denkbar: T-Stücke bei Armaturen, beim Automobilbau Krümmer, Träger sowie beim Fahrradrahmen die Knoten.



Bild (B061umfZ) Schuler [7]



Bild (B062umfZ) Schuler [7]

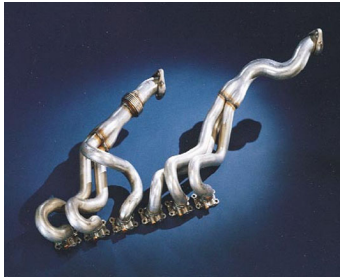


Bild (B063umfZ) Schuler [7]

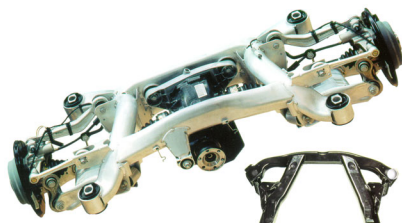


Bild (B064umfZ) Vorderachshilfsrahmen (Müller Weingarten)

6.2. Verfahren

Es gehören vor allem zwei Verfahren zum Zugumformen,

- das Innen-Hochdruck-Umformen (IHU) und
- das Weiten mit Wasserbeutel, Gasdruck oder Spreizwerkzeug.

6.2.1. Innen-Hochdruck-Umformen (IHU)

Rohre werden mit Flüssigkeit gefüllt und unter hohem Innendruck an ein Werkzeug gepresst.

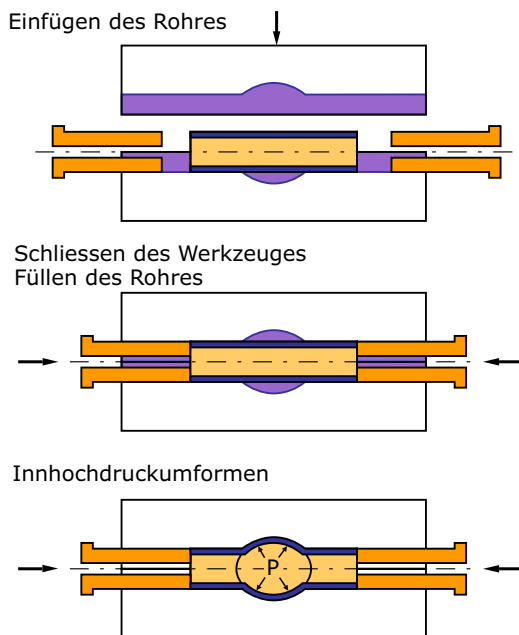


Bild (B058umfZ) Innen-Hochdruck-Umformen

Innen-Hochdruck-Umformen (engl. Hydroforming) dient der Herstellung von Rohren mit wechselndem Querschnitt. Ein Rohrstück, gegebenenfalls schon vorgebogen, wird unter sehr hohem hydraulischen Innendruck in ein Werkzeug geformt. Dabei wird das Rohr meist auch axial gestaucht, um Material nachfliessen zu lassen. Wie eine solche Hydroforming-Maschine aussieht zeigt dieses [Video](#) (Film: Huber und Bauer).

Die Herstellung von T-Stücken (Fittingen) ist das Paradebeispiel bei der Anwendung des IHU. Ein gerades Rohrstück, egal ob geschweisst, stranggepresst oder gezogen wird in das Werkzeug eingelegt. Das Werkzeug, welches prinzipiell längs oder quer geteilt sein kann, wird von einer Presse zusammengehalten. Die seitlich angebrachten Druckzylinder dienen zum axialen Stauchen des Rohres und der Einleitung des Druckmediums. Ein dritter Zylinder, senkrecht zu den beiden anderen angeordnet, kontrolliert den Blechfluss für den dritten Flansch, indem er mit zunehmendem nach aussen fährt. Mit Höchst- druck von bis 6000 Bar wird das Rohr aufgeweitet, zylindrisch gestaucht und an das Werkstück gepresst (Expandiert), daher wird das IHU auch ASE-Verfahren genannt (Aufweiten, Stauchen, Expandieren).



Bild (B060umfZ) T-Stücke (SPS)

6.2.2. Weiten mit Wasserbeutel, Gasdruck oder Spreizwerkzeug

Tiefgezogene Hohlkörper werden aufgeweitet zu Kannen und Behältern.

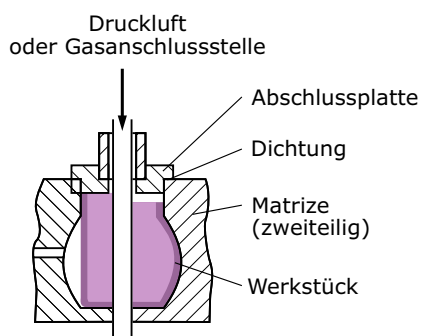


Bild (B059umfZ) Weiten mit Gasdruck

Vorgelagerte Verfahren	Verwandte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Vorbiegen	Stauchern	
	Tiefziehen	

Tabelle (T020umfZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

7. Zugumformen – Tiefen, DIN8585 Teil 4

Das Tiefen aus der Hauptgruppe „Zugumformen“ dient der Anbringung von Vertiefungen in ein Blech. Definitionsgemäss wird die Oberflächenvergrösserung durch Verringerung der Blechdicke erzielt. Daher sind die möglichen Umformgrade kleiner als etwa beim Tiefziehen.

7.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele beim Tiefen

Tiefen kann eingesetzt werden für: Münzprägen, Verschaltungen von Schienenfahrzeugen, Aussenhaut alter Flugzeuge und Normcontainer



Bild (B069umfZ) 20' Normcontainer, durch Prägen verstärkt (Renz Container)



Bild (B070umfZ) Geprägte und gestauchte Münze (Europ. Kommission)



Bild (B071umfZ) Die Seitenwände der RE 4/4 460 sind mit Sicken verstärkt (Modellbahn.com)

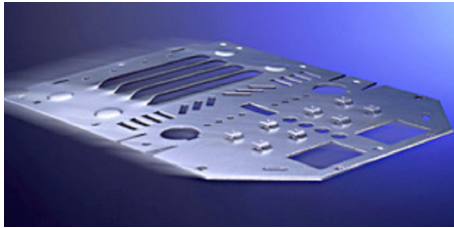


Bild (B067umfZ) Kiemen, in Stanzmaschine getieft (Trumpf)



Foto: Deutsche Lufthansa AG / 124101084-1-3
Nur für redaktionelle Zwecke / For editorial purpose only

Bild (B068umfZ) Mit Sicken verstärkter alter Flugzeugrumpf (Lufthansa)

7.2. Verfahren

Von den vielen möglichen Tiefziehverfahren sind vor allem Streckziehen und Hohlprägen relevant.

7.2.1. Verfahren: Streckziehen (engl. Stretch Drawing)

Das Streckziehen unterscheidet sich vom [Tiefziehen](#), mit dem es eng verwandt ist, durch das gesamthafte oder teilweise Hindern des Flansches am Fließen. Durch z. B. Sicken wird der Flanschbereich eingeklemmt und die Umformung geschieht hauptsächlich aus der Dicke. Dies reduziert die Rückfederung nach dem Ziehen. Grossflächige Tiefziehteile wie z. B. Karosserieteile im Automobilbau mit relativ wenig Umformgrad (meist 1) werden häufig durch Streckziehen oder eine Kombination von Tiefziehen und Streckziehen hergestellt. Zu beachten ist, dass nach dem Ziehen Restspannungen im Bauteil verbleiben.

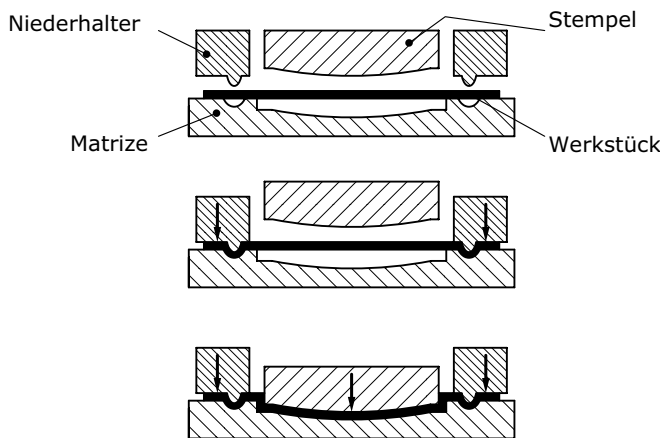


Bild (B065umfZ) Streckziehen

7.2.2. Verfahren: Hohlprägen

Beim Hohlprägen wird ein Blechzuschnitt mit einem starren, beweglichen Stempel in ein Gegenwerkzeug (Matrize) gedrückt. Verglichen mit den Abmessungen des Zuschnittes sind die Vertiefungen klein, üblicherweise ist die Höhe der Sicken (rinnenartige Vertiefungen) $h < 2s$ (s = Blechdicke).

Feinbleche sind infolge der dünnen Blechdicke einerseits leicht, haben jedoch entsprechend tiefe Trägheitsmomente (biegeschlaff). Sowohl bei ebenen als auch bei gezogenen Formteilen können durch nachträgliches Einformen von Sicken die Steifigkeit und Stabilität der Bauteile erheblich verbessert werden. Dünne, leichte Blechkonstruktionen können durch geschickte Anordnung der Sickenstruktur erhebliche Bauteilfestigkeiten erreichen.

Kleinere Prägeprozesse werden normalerweise direkt in den Stanz- oder Tiefziehpresse vorgenommen.

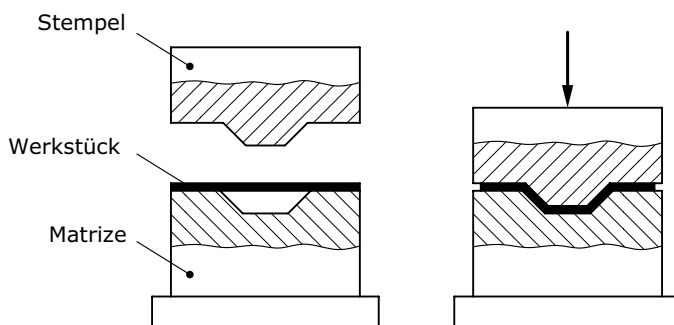


Bild (B066umfZ) Prinzip des Hohlprägens, siehe auch [Video Münzprägen](#) (Film: Schuler)

Vorgelagerte Verfahren	Verwandte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Scherschneiden	Tiefziehen	Schweissen
Walzen	Verfestigen durch Ziehen	

Tabelle (T021 umfZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

8. Biegen, DIN 8586

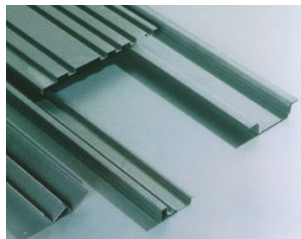
Das Biegen ist ein sehr universelles und günstiges Fertigungsverfahren, welches sich in idealer Weise mit anderen Verfahren kombinieren lässt. Blechteile werden vielfach durch Biegen hergestellt. Man unterscheidet zwischen Biegen mit gradliniger und Biegen mit drehender Werkzeugbewegung.

8.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele des Biegens

Folgende Einsatzgebiete sind möglich: Schiffsrümpfe, Profile, elektrische Schalter, Federn, Metallbau, Aufzugsbau, Kücheneinrichtungen und Klimatechnik.



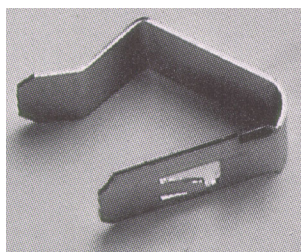
(Hämmerle)



Profile für Bau, Möbel, Maschinen- und Fahrzeugbau (Hämmerle)

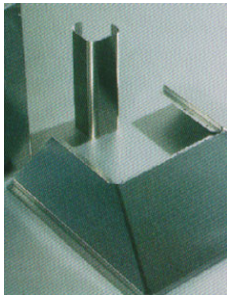


Hohlprofil (Hämmerle)

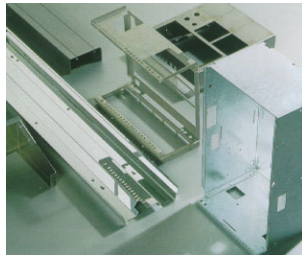


Feder für PKW Innenleuchte (Burberg)

Tabelle (T028umfZ) BeispieleBiegen



Dunstabzugshaube (Hämmerle)



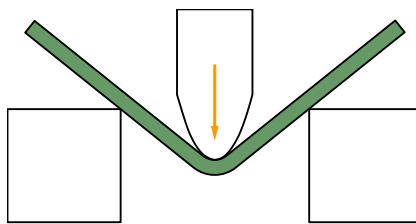
Auch dies ist ein Blech... (SPS)

Tabelle (T028umfZ) BeispieleBiegen

8.2. Verfahren

Biegen mit gradliniger Werkzeugbewegung beinhaltet:

freies Biegen:
Ein Blechzuschnitt wird durch zwei
Auflagen gehalten und mit einem
Stempel gebogen



Gesenkbiegen:
Die Form von Stempel und Gesenk
bestimmen die Geometrie des Bie-
geteils.

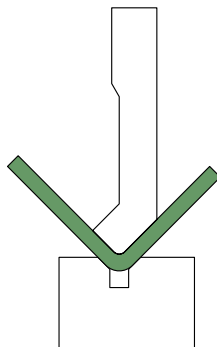


Tabelle (T022umfZ) Biegen (geradlinig)

Biegen mit drehender Werkzeugbewegung beinhaltet u. a.:

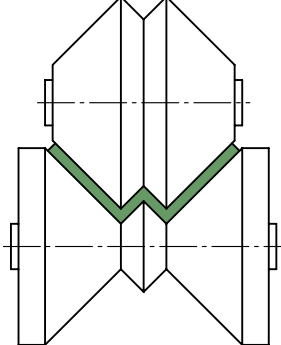
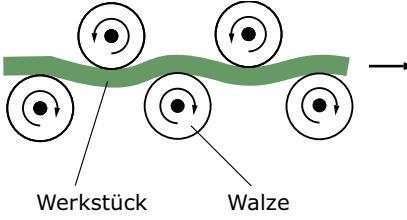
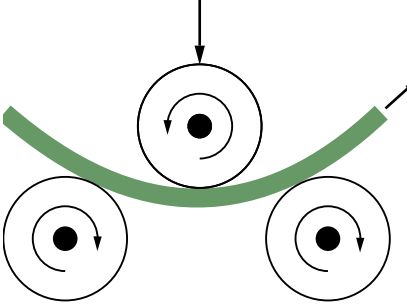
<p>Gesenkbiegen: Die Form von Stempel und Gesenk bestimmen die Geometrie des Biegeteils.</p>	 <p>The diagram shows a cross-section of a die bending process. A green workpiece is being bent between two dies. The upper die is a V-shaped punch, and the lower die is a matching V-shaped die. The workpiece is shown in a bent position, with the punch and die forming the curve.</p>
<p>Walzrichten: Aufgewickeltes Blech oder Draht wird vor der Weiterverarbeitung gerade gebogen.</p>	 <p>The diagram illustrates the roll leveling process. A green workpiece is being fed from left to right between three rollers. The top roller rotates clockwise, and the two bottom rollers rotate counter-clockwise. The workpiece is shown being flattened as it passes between the rollers. Labels 'Werkstück' and 'Walze' point to the workpiece and a roller respectively.</p>
<p>Runden: Runde Werkstücke, insb. Rohre, werden mit Walzen gebogen</p>	 <p>The diagram shows the roll rounding process. A green workpiece is being fed from left to right between three rollers. The top roller rotates clockwise, and the two bottom rollers rotate counter-clockwise. The workpiece is shown being rounded as it passes between the rollers.</p>

Tabelle (T023umfZ) Biegen (drehend)

Charakteristisch beim Biegen ist die meist starke elastische Rückfederung, die abhängig ist von:

- Material (grössere Rückfederung bei Materialien hoher Festigkeit)
- Biegeradius (grössere Rückfederung bei grossem Biegeradius)
- Vorverformung des Bauteiles.

Biegeteile müssen demnach gezielt überbogen werden.

Vorgelagerte Verfahren	Verwandte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Walzen	Walzen	Schweissen
	Gleitziehen	

Tabelle (T024umfZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

Vorteile	Nachteile
Günstig	Ungenau
Flexibel	Rückfederung

Tabelle (T025umfZ) Vorteile, Nachteile Biegen

8.2.1. Biegen mit gradliniger Werkzeugbewegung

Zum Biegen mit gradliniger Werkzeugbewegung gehören hauptsächlich das freie Biegen und das Gesenkbiegen. Das freie Biegen oder Schwenkbiegen, wie in diesem [Video](#) (Film: Trumpf) zu sehen, ist das einfachste Verfahren, bietet jedoch den Nachteil relativ starker Rückfederung. Beim Biegen im Gesenk erfolgt ein Nachdrücken mit hohen Kräften, um die Rückfederung zu minimieren.



Bild (B175umfZ) Biegemaschine

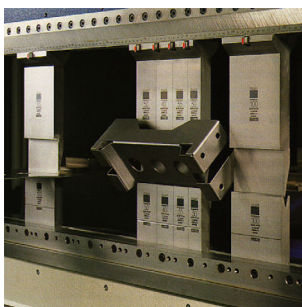


Bild (B084umfZ) Biegemaschine im Einsatz

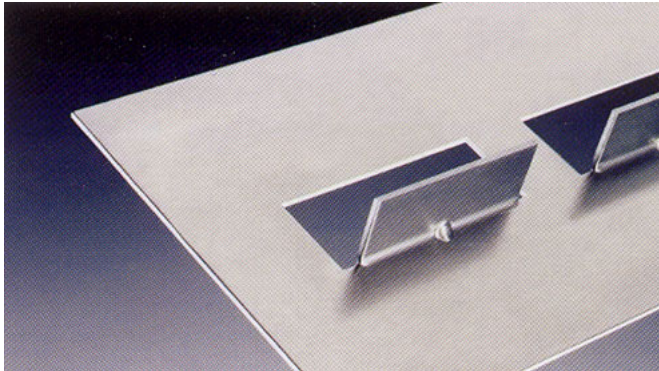


Bild (B176umfZ) Biegeteil mit Verstärkungsrippe

Ein neuerer Ansatz, die Rückfederung besser zu kontrollieren und engere Toleranzen zu erzielen, ist das Dreipunktbiegen, wie es die Fa. Hämmerle anwendet. Mit einem hydraulisch gefederten Kissen kann gezielt überbogen werden. Hierzu ein [Video](#) (Film: Hämmerle)

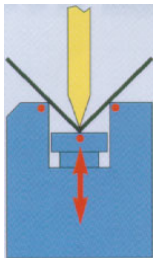


Tabelle (T026umfZ) Dreipunkt-Biegeverfahren (Hämmerle)

Das Berechnen der Biegefolge bei komplexeren Werkstücken wird heute am PC erledigt. Dieser übernimmt auch die Steuerung der Anschläge und der Führungen, damit die Bedienung der Maschinen möglichst einfach wird

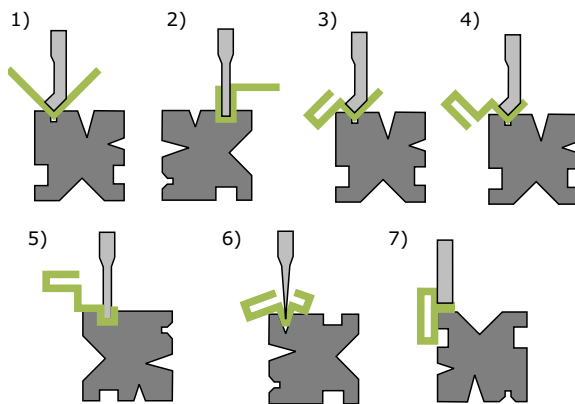


Bild (B087umfZ) Biegefolge bei Herstellung eines Biegeprofils durch Gesenkbiegen

8.2.2. Biegen mit drehender Werkzeugbewegung

Das Walzrunden ist ein preisgünstiges Verfahren zur Herstellung von Rohren und anderen gebogenen Teilen jeder Grösse. Anstelle der Walzen werden auch Stempel eingesetzt, dann nennt sich das Verfahren freies Runden und gehört eigentlich zum Biegen mit gradliniger Werkzeugbewegung.

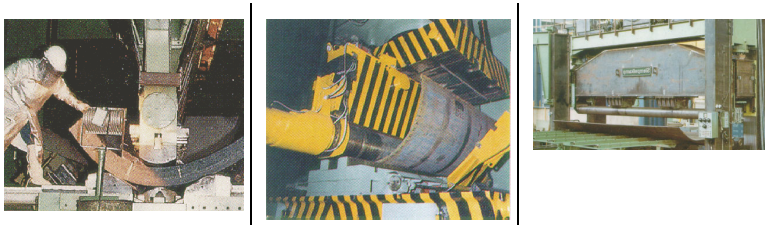


Tabelle (T027umfZ) freies Runden (links), Walzrunden (mitte) und Schiffsbaupresse (rechts)

Insbesondere für dünnwandige Standard-Hohlprofile eignet sich das Walzprofilierverfahren. Bei geschlossenen Profilen wird anschliessend die Profilhaft zugeschweisst (LASER/konventionell).



Bild (B080umfZ) geschlossenes Profil (Hämmerle)

Drahtteile werden heutzutage in grossen Serien automatisiert hergestellt. Hierbei kommt meistens das Schwenkbiegeverfahren zum Einsatz. In denselben Maschinen kann auch ein Gewinde geschnitten werden und das fertige Bauteil abgetrennt werden.

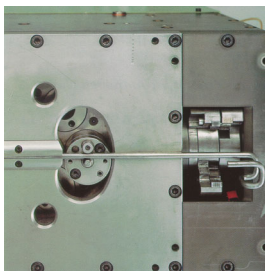


Bild (B081umfZ) 2D-Biegeautomat (Post)

Die beiden Abbildungen machen deutlich, dass die Werkzeuge beim Biegen sehr einfach aufgebaut sind und sich trotzdem für eine Vielzahl von Biegeoperationen eignen. Im Wesentlichen braucht es zum Biegen nur eine Halterung und einen Stempel, beim Drahtbiegen Biegefingerring genannt.

Zur Kostenoptimierung sind die Biegeradien nach DIN 6935 genormt.

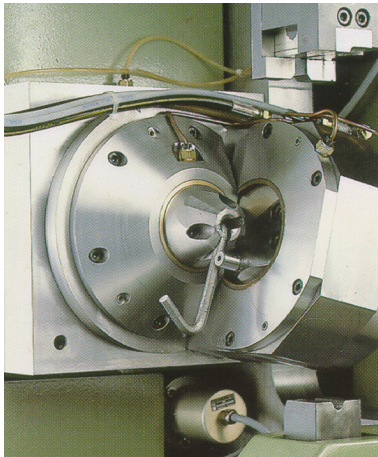


Bild (B082umfZ) 3D-Biegeautomat (Post)

Kaum eine Stanz, Biege, Tief- und Streckziehanlage kommt heute ohne Richtmaschine aus, da Walzprodukte aufgehaspelt in Bunden (Draht) oder Coils (Blech) geliefert werden. Vor der Weiterverarbeitung muss das Material gerichtet und Spannungen abgebaut werden. Das Prinzip besteht darin, dass die Richtwalzen in abnehmender Weise gegeneinander versetzt sind. Ein einlaufender Draht (Blech) wird dadurch zuerst auf eine Seite gebogen, um bei der nächsten Walze wieder zurückgebogen zu werden. Von Walze zu Walze wird der Biegeradius grösser, bis das Werkstück annähernd gerade und spannungsfrei ist.



Bild (B083umfZ) Richtmaschine für Draht (Post Maschinen)

8.3. Konstruktionsrichtlinien Biegeumformen

Beim Biegen von Blechen werden die innenliegenden Fasern gestaucht und die äusseren gedehnt. Der Querschnitt im Biegebereich wird dadurch verzerrt, wobei die Dicke in der Biegezone bis zu 20 % abnehmen kann.

Gestaltung bei Biegeteilen:

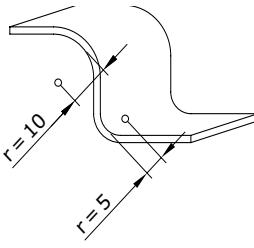
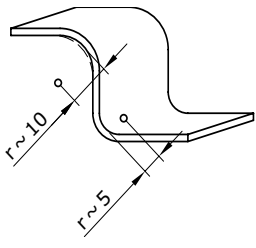
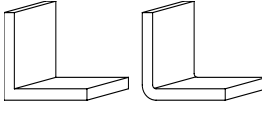
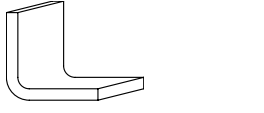
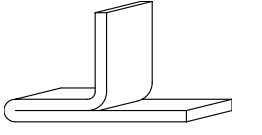
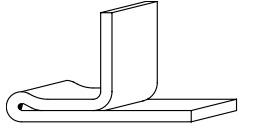
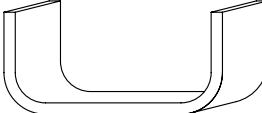
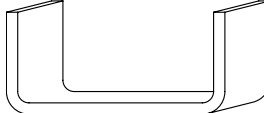
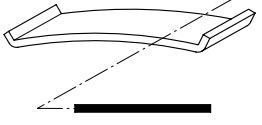
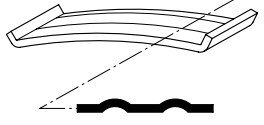
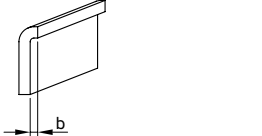
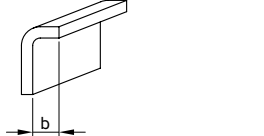
Regel	ungünstig	günstig
Unnötiges genaues Einhalten des Biegehalbmessers erfordert höhere Biegekraft und teurere Werkzeuge. Daher möglichst Freibiegen anwenden.		
Bruchgefahr bei zu schaffkantigem Biegen. Ausführung links nur mit Hilfe teurer Sonderwerkzeuge möglich.		
Festigkeitsminderung durch zu scharfkantiges Zudrücken des Umschlages über die ganze Fläche.		
Zu grosse Biegehalbmesser erhöhen die Rückfederung.		
Biegeteile sehr grossen Verhältnisses r/s sind in Richtung der Biegelinie zu versteifen.		
Biegeschenkelbreite b nicht zu kurz wählen.		

Tabelle (T029umfZ) Gestaltungsregeln für gebogene Blechteile

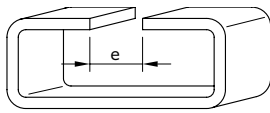
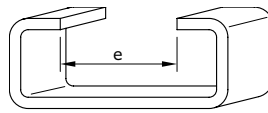

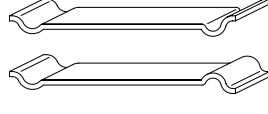


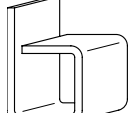
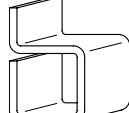
Regel	ungünstig	günstig
Für unterschrittene Biegungen Abstand e so gross wie möglich wählen, sonst teure Werkzeuge.		
Wegen einfacher Abkantwerkzeuge beide Randprofile gleichförmig gestalten.		
Rundungen im Grunde steilschräger Sikken gestatten einfache Werkzeuge und schnelles Arbeiten unter Abkantpressen.		
Verfügbare Maschinentypen beachten! B auf Standard-Abkantpresse möglich; A nicht möglich, allenfalls mit Beilageklotz auf Abkantmaschinen.		

Tabelle (T029umfZ) Gestaltungsregeln für gebogene Blechteile

Allgemein gelten folgende Gestaltungsregeln:

- Durch Wahl genügend grosser Toleranzen können die Werkzeugkosten verringert werden. Enge Toleranzen erfordern teurere Werkzeuge. Deswegen stets nur so knapp wie nötig tolerieren.
- Biegekante senkrecht zur Aussenkante des Rohlings legen. Schräge Lage führt zu höherer Werkzeugbeanspruchung
- Biegeränder sollen frei liegen.
- Bei dicken Zuschnitten gerundete Kanten vorsehen.
- Bei U-förmigen Querschnitten möglichst gleich lange Biegekanten wählen.
- Zur Verhinderung falschen Einlegens in die Aufnahme sollten bei symmetrischen Zuschnitten unsymmetrische Aufnahmen vorgesehen werden.
- Bei allseitig umgebogenen Schenkeln Aussparungen vorsehen (siehe unten).

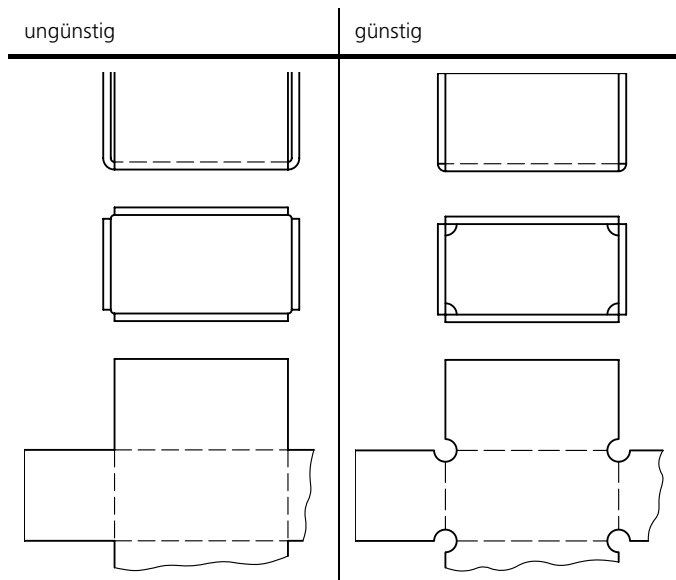


Tabelle (T030umfZ) Freisparungen bei allseitig umgebogenen Schenkeln

Bei umlaufenden Blechteilen spitze Ausläufe und schräge Übergänge vermeiden.

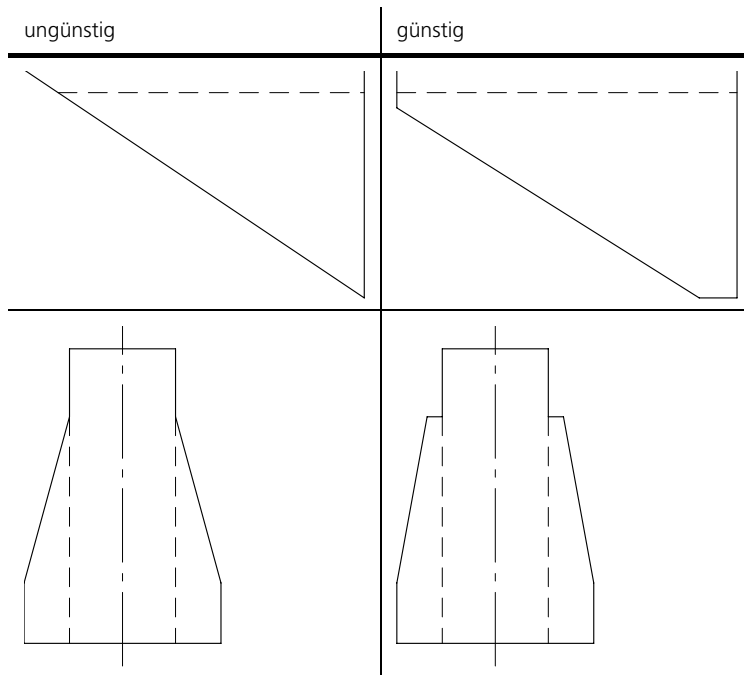


Tabelle (T031umfZ) Vermeiden spitzer Ausläufe und schräger Übergänge

Bei komplizierten Werkstückformen können komplizierte und teure Werkzeuge vermieden werden durch Aufteilen des Werkstücks in 2 Einzelteile. Die beiden Einzelteile werden separat gefertigt, d.h. gebogen und anschliessend zusammengebaut.

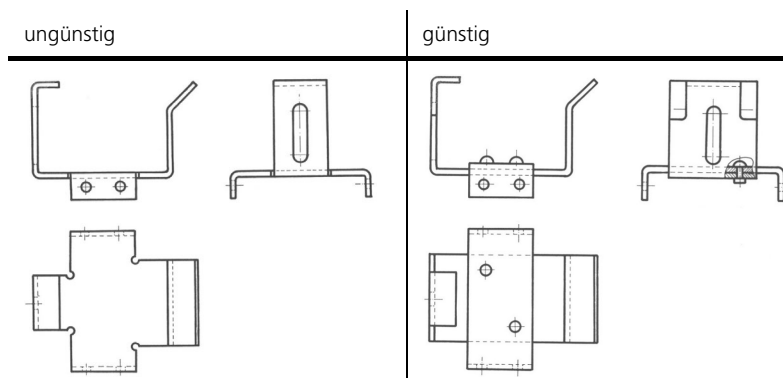


Tabelle (T032umfZ) Vermeiden komplizierter Werkzeuge durch Aufteilen

Bei Blechteilen mit Mehrfachbiegungen sind Ausklinkungen zum Spannungsabbau vorzusehen. Diese meist etwas komplizierter durchzuführenden Biegevorgänge können sehr gut von einer Mehrfach-NC-Biegemaschine verarbeitet werden. Zu beachten ist hierbei, dass möglichst schon bei der Konstruktion die spätere Fertigungsanlage bekannt sein muss, um deren Möglichkeiten und Spezifikationen nicht durch zu komplexe Biegeteile zu überschreiten.

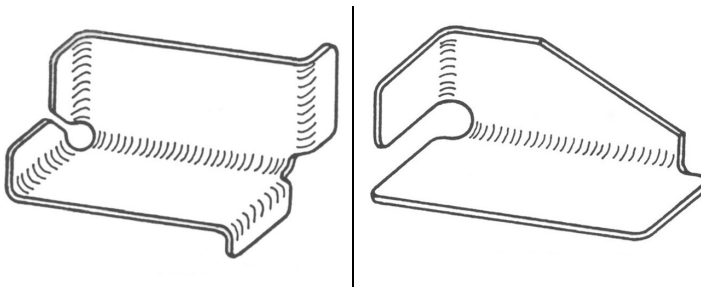


Tabelle (T033umfZ) Ausklümpungen bei Blechteilen mit Mehrfachbiegungen

8.3.1. Sicken zur Blechversteifung

Bauteile aus Feinblech zeichnen sich durch geringes Gewicht aus, haben jedoch aufgrund der geringen Blechdicke und des damit verbundenen Trägheitsmomentes auch nur eine verhältnismässig geringe Formsteifigkeit. Eine Versteifung derartiger Bleche ist möglich mittels Rippen, Stegen und Sicken. Dadurch erreicht man eine Verbesserung der Biegesteifigkeit und Knicksteifigkeit.

Bei Torsionsbeanspruchung sind geschlossene Querschnitte anzustreben, da geschlossene Querschnitte die Steifigkeit stark erhöhen! Zum Beispiel liegt bei einer geschlossenen Limousine die Steifigkeit bei 100%, beim Cabrio, das einen geöffneten Querschnitt darstellt, jedoch nur noch bei 20%! Aus diesem Grund müssen hier sogar die Scheiben in die Festigkeitsrechnung mit einbezogen werden)

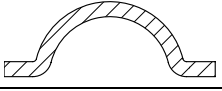
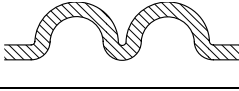
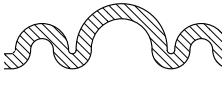

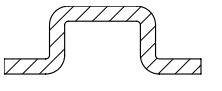
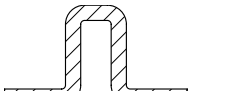
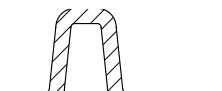
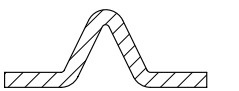
		Halbrunde Sicken
		Formsicken
		Kastensicken
		Trapez- / Dreieckssicken

Tabelle (T034umfZ) Sicken zur Blechversteifung

Tabelle (T034umfZ) zeigt, dass unterschiedliche Sickenformen möglich sind. Form, Lage und Anordnung der Versteifungen müssen unter Berücksichtigung sowohl der Beanspruchungsart als auch der Beanspruchungsrichtung festgelegt werden.

Regel	ungünstig	günstig
Linienartige Sicken – wenn möglich – im Blechrand auslaufen lassen. Scharfkantige Sickenenden vermeiden		
Trägheitsaxialbevorzugte Bereiche bei tafelligen Blechen vermeiden.		
Bei grossen Blechen unregelmässige Sickenformen mit krummlinigen Begrenzungen bevorzugen (Beispiel: Containerwand).		
Knotenpunkte bei sich kreuzenden Sicken wegen des Auftretens von Spannungsspitzen vermeiden.		
Lange Diagonalversteifungen an flachen Blechen wegen „Schneider“ vermeiden; umlaufende flächenartige Sicken mit kurzen dornartigen Ausläufen bevorzugen.		
Bei dynamischer Beanspruchung des Blechteils aufgelöstes Sickenbild wählen; sonst Dauerbruchgefahr an den Sickenrändern (Beispiel: Batteriemulde eines Kfz).		
Bei Z- und U-förmigen Abstandsstegen linienartige und flächige Sicken wegen Knickgefahr vermeiden; räumliche Sicken vorsehen.		

Tabelle (T035umfZ) Anbringen von Sicken an Blechteilen

Regel	ungünstig	günstig
Behälterbefestigungen mit Entspannungssicke versehen; sonst Dauerbruchgefahr bei dynamischer Beanspruchung.		
Faltenbildung durch sinnvoll angebrachte Hilfssicken vermeiden.		

Tabelle (T035umfZ) Anbringen von Sicken an Blechteilen

Achtung: Eine nicht genau in Krafrichtung liegende Sicke wirkt negativ.

Der starke Einfluss der Ausrichtung der Sicken zeigt sich bei einer Betrachtung der Knickkraft in Abhängigkeit zur Sickenlage in Bild (B166umfZ):

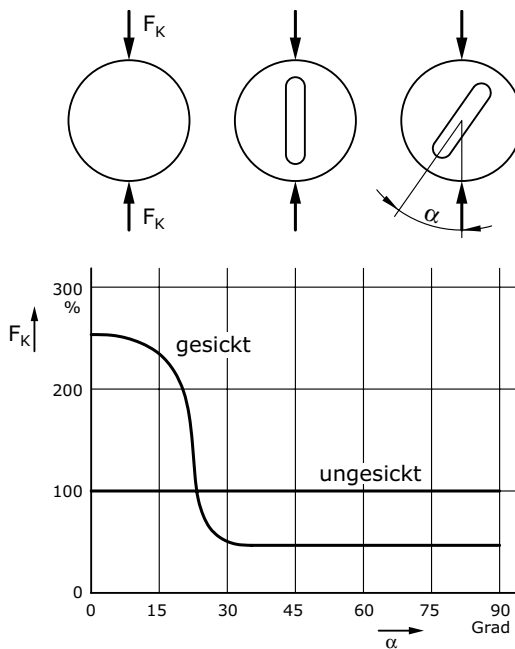


Bild (B166umfZ) Einfluss der Ausrichtung einer Sicke zur Krafrichtung

Möglichkeiten zur Versteifung von Blechrändern:

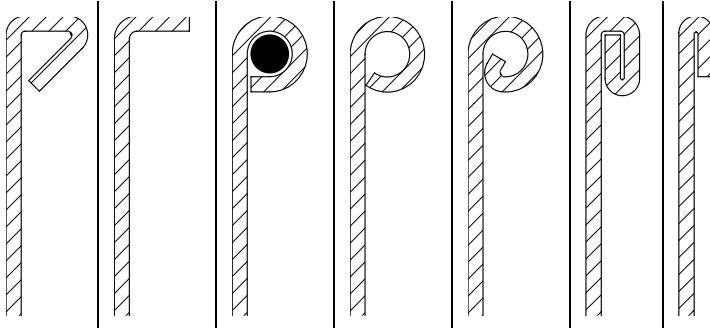


Tabelle (T036umfZ) Randversteifungen

Bei Randversteifungen von Blechteilen gehen vielfach Sicke und Falz ineinander über. Das Bild gibt eine Übersicht über die wichtigsten Versteifungsarten.

8.3.2. Hinweis: Scherschneiden

Das Scherschneiden gehört zu den trennenden Fertigungsverfahren. Beim Scheren und Schneiden erfolgt ein mechanisches Trennen von Werkstücken ohne Entstehung von formlosem Stoff. Die Bleche und Bänder werden jeweils spanlos mit einer über die Fließgrenze hinausgehenden Werkstoffbeanspruchung getrennt. Eine gewisse Verwandtschaft zu den Umformverfahren ist dadurch gegeben, dass die Schneidvorgänge mit einer plastischen Verformung verbunden sind. Nachfolgend eine Zusammenstellung der wichtigen Gestaltungsrichtlinien die für das Scherschneiden gelten:

- Einfache Schnittformen bevorzugen, unregelmässige Formen vermeiden.
- Durch geschickte Ausnutzung des Materials Abfall möglichst gering halten.
- Schnittteile mit grossen Flächen mit Durchbrüchen versehen.
- Grosse Radien wählen, andernfalls unsauberes Aussehen der Schnittkanten.
- Bei Lochungen Querschnitt so wählen, dass einfache Werkzeugformen gegeben sind.
- Einfache Konturen als Werkstückbegrenzung anstreben, Rundungen vermeiden.
- Beim Durchreissen von Nasen, Ösen oder Lappen zähe Werkstoffe verwenden.
- Vorsprünge mit Bohrungen geradlinig begrenzen, weil dadurch Lochversatz weniger auffällt.

Anzustreben ist grundsätzlich eine optimale Werkstoffausnutzung des Vormaterials. Durch geschickte Anordnung und Schachtelung der Formen innerhalb des Blechstreifens kann man zu einer besseren Materialausnutzung kommen. Das Optimum wird durch flächenschlüssige Formen erreicht. Oft kann durch Übergang vom Ausschneiden zum Abschneiden unnötiger Verschnitt vermieden werden.

8.4. Firmen und Organisationen zum Biegen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Hämmerle	Biegepressen
Bihler	Kombinierte Biege-, Schweiß- und Montagemaschinen
Post Maschinen	Biege- und Stanztechnik
Burberg Eicker	Hersteller von Federelementen

Tabelle (T037umfZ) Firmen Biegen

Organisation:	Beschreibung:
Euroblech	Blech-Messe
Eisen-, Blech- und Metallverarbeitende Industrie	Wirtschaftsverband
Studiengesellschaft Stahlanwendung	Wissenschaftliche Publikationen
Informationsstelle Edelstahl Rostfrei	Publikationen und Links
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T038umfZ) Organisationen Giessen

9. Zusammenfassung

Umformverfahren gehören zu den ältesten und weitverbreitetsten Verfahren. Sie können in Kalt- und Warmformen, sowie Blech- und Massivumformungen unterteilt werden.

Verständnisfrage 1

Wo wird das Freiform noch eingesetzt?

Verständnisfrage 2

Wie entstehen Strangpressprofile mit geschlossenem Hohlbereich?

Verständnisfrage 3

Listen Sie einige Konstruktionsrichtlinien des Schmiedens auf?

Verständnisfrage 4

Finden Sie in Ihrer näheren Umgebung ein umgeformtes Bauteil, und versuchen Sie die Fertigungsschritte zu durchdenken.

Verständnisfrage 5

Was ist ein Stufenwerkzeug (oder Folgewerkzeug)? Nennen Sie ein Bauteil welches wahrscheinlich so gefertigt wurde.

Verständnisfrage 6

Was ist ein Hydroformverfahren? Wo wird es eingesetzt?

Verständnisfragen 7

Was ist der Unterschied zwischen Freiform- und Gesenkbiegen? Wo würden Sie das Dreipunktbiegen zuordnen?

Verständnisfrage 8

Listen Sie einige Konstruktionsrichtlinien des Biegens auf!

Antwort 1

Beim Vorformen von grossen Turbinenwellen bevor das Teil zum Drehen gelangt.

Antwort 2

Der Strang wird in einem ersten Werkzeugbereich aufgeteilt in Teilstränge, welche sich im zweiten Bereich kaltverschweissen.

Antwort 3

Beim Freiformen sind folgende Punkte zu beachten:

- Schmiedbarkeit: Den schmiedbaren Temperaturbereich der Werkstoffe beachten.
- Mit zunehmendem C-Gehalt nimmt die Dehnbarkeit und damit die Schmiedbarkeit ab!
- Angaben der Werkstoffhersteller bezüglich Schmiedetemperaturen und Anwärmzeiten beachten!
- Freiformschmieden ist am wirtschaftlichsten bei Einzelstücken und kleinen Stückzahlen einsetzbar. Kostenintensive Spezialwerkzeuge sind hier nicht erforderlich.

Als Gestaltungsrichtlinien für Freiformschmiedeteile sind zu nennen:

- Einzelne Schmiedestücke nicht zu schwer machen, da sonst nicht handhabbar.
- Einfache Formen mit möglichst parallelen Flächen anstreben.
- Runde Konturen durch Schmieden schwierig herzustellen, deshalb möglichst an einer geraden Kante absetzen.
- Grosse Verformungen und schroffe Querschnittsübergänge vermeiden.
- Schwierige Schmiedestücke in mehrere einfache Einzelteile unterteilen.

Antwort 4

individuelle Antworten

Antwort 5

- Werkzeuge welche im Takt mehrere Umform (und z.T. Strang-)operationen vornehmen.
- z.B. Uhrengehäuse, Rosette bei Türschloss, Schlüssel, ...

Antwort 6

- Ein Rohstück wird in einem Werkzeug unter Innendruck gebracht und umgeformt bis die Kontur am Werkzeug anliegt.
- verschiedenste Anwendungen z.B. Armaturen oder Lenksäulen bei Automobilen

Antwort 7

Freiformbiegen ist ein weggesteuertes Umformen; Gesenkbiegen führt die Umformung auf eine Reaktionskraft zurück. Die Winkelgenauigkeit im Gesenk ist grösser, die Herstellung durch Gesenkwechsel aufwändiger.

Antwort 8

siehe Kapitel 4.3.4 „[Konstruktionsrichtlinien Biegeumformen](#)“

Publikationsverzeichnis – Literatur

- [1] Awiszus, Birgit; Bast, Jürgen und Dürr, Holger (2004): Grundlagen der Fertigungstechnik; Fachbuchverlag, Leipzig
- [2] Beitz, Wolfgang und Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.) (2001): Doppel - Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [3] Fischer, Ulrich (2002): Tabellenbuch Metall; Europa Lehrmittel, Hahn
- [4] Koether, Reinhard und Rau, Wolfgang (2004): Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure; Fachbuchverlag, Leipzig
- [5] Pahl, Gerhard und Beitz, Wolfgang (2004): Konstruktionslehre; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [6] Sautter, Rudolf (1997): Fertigungsverfahren; Vogel Fachbuch Kamprath Reihe, Würzburg
- [7] Schuler GmbH (Hrsg.) (1998): Handbuch der Umformtechnik; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [8] Steinhilper, Waldemar und Röper, Rudolf (2000): Maschinen und Konstruktionselemente. Band1: Grundlagen der Berechnung und Gestaltung; Springer-verlag, Berlin, Heidelberg

Publikationsverzeichnis – Weblinks**Firmen**

- Stooss: <http://www.stooss.com>
- SMS Eumuco: <http://www.sms-eumuco.de>
- Lippische Eisenindustrie: <http://www.lippische-eisen.de>

- Albert Weber: <http://www.a-weber.de>
- Drösser: <http://www.droesser.de>
- Hatebur Umformmaschinen AG: <http://www.hatebur.com>
- Neumeyer: <http://www.neumeyer-fliesspressen.de>
- Hatebur: <http://www.hatebur.com>
- Schuler: <http://www.schuler.de>
- Gräbener Pressen: <http://www.graebener-pressen.de>
- Reitter Blechformsysteme: <http://www.tiefziehen.de>
- Müller Weingarten: <http://www.mwag.de>
- Hylatechnik: <http://www.hylatechnik.de>
- Siempelkamp: http://www.siempelkamp.de/flash_intro.html
- V-Zug AG: <http://www.vzug.ch>
- Hämmerle: <http://www.haemmerle.ch>
- Bihler: <http://www.bihler.de>
- Post Maschinen: <http://www.post-maschinen.de>
- Burberg Eicker: <http://www.federn.de>
- Honsel International Technologies: <http://www.honsel.com>

Organisationen:

- Stahl Online: <http://www.stahl-online.de>
- Profzone: <http://www.profzone.ch>
- Studiengesellschaft Stahlanwendung:
<http://www.stahlforschung.de>
- Swissmem: <http://www.swissmem.ch>
- Metallbauer.ch: <http://www.metallbauer.ch>
- Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus:
<http://www.vdma.de>
- Euroblech: <http://www.euroblech.de>
- Eisen-, Blech- und Metallverarbeitende Industrie:
<http://www.ebm.de>
- Informationsstelle Edelstahl Rostfrei:
<http://www.edelstahl-rostfrei.de>
- Euroblech: <http://www.euroblech.de>
- Eisen-, Blech- und Metallverarbeitende Industrie:
<http://www.ebm.de>

Fertigungsverfahren 3 – Trennen

Autor: Prof. Dr. M. Meier

1. Überblick

Motivation

Schauen wir ein unscheinbares Teil an, die kleine Messing-Spitze eines Kugelschreibers. Auf hochautomatisierten Automaten werden diese Teile durch „Trennen“, in diesem Fall Drehen und Bohren, hergestellt. (Bsp. Maschine „Multistar“; www.mikron-tg.com/products)



Bild (B267umfZ) Kugelschreiberspitze



Bild (B268umfZ) Mikron Special Purpose Machine „Multistar“

Der Fertigungsprozess Trennen begegnet uns in fast jedem Produkt in unserem Umfeld.

Lernziele

Die Studierenden

- können die Fertigungsverfahren in die Klassifikation einordnen, sind in der Lage die wichtigsten Verfahren zu erklären,
- kennen die benachbarten Fertigungsschritte detailliert und
- kennen mehrere Anwendungsfälle der einzelnen Verfahren.

Im Speziellen kennen sie die Konstruktionsrichtlinien dieser Verfahren und können mit der Kenntnis der Verfahren auch Richtlinien ableiten und in eigenen Konstruktionen berücksichtigen

Einleitung

Alle Fertigungsverfahren, wo Material abgetragen wird oder wo der materielle Zusammenhalt aufgetrennt wird, fällt in die Fertigungs-Gruppe „Trennen“. Eine unendliche Varianz in Bezug auf die Materialien, auf die Trennaufgabe, die Trenntechnologie, die Bauteilform und -grösse öffnet sich.

In dieser Sektion sollen die wichtigsten Gruppen vom mechanischen Stanzen von Blechen bis zum chemischen Abtragen vorgestellt werden.

2. Zerteilen – Scherschneiden, DIN 8588

Scherschneiden ist durch zwei Schneiden definiert, welche sich aneinander vorbeibewegen und dabei das Werkstück zerteilen. Zur Verdeutlichung des Funktionsprinzips erinnere man sich der im Alltag bekannten Scheren. Scherschneiden ist wichtiger Bestandteil des Verfahrensverbundes Stanzen (Scherschneiden, Hohlprägen, Biegen, Schweissen ...), wird aber auch einzeln angewandt. Ein [Video](#) (Film: Trumpf) zeigt die Herstellung einer Türe in einer Stanzmaschine.

2.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Scherschneiden wird eingesetzt für: Kettenräder im Fahrzeugbau, Gurtstraffer, Elektronikteile Transformatoren, Schalter, Relais, Elektromotoren, Zuschneiden von Tiefziehteilen, Blechgehäuse und Dichtungen.



Bild (B010treZ) Feingeschnittene Mitnehmerscheibe im Automatikgetriebe des SMART (Feintool)



Bild (B011treZ) Feingeschnittene Teile (Fritz Schiess AG)

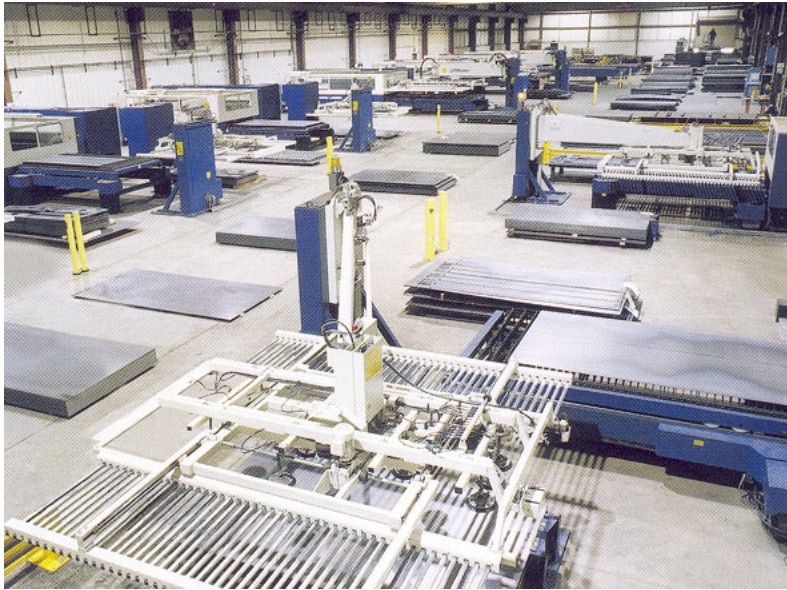


Bild (B197treZ) Blechzentrum

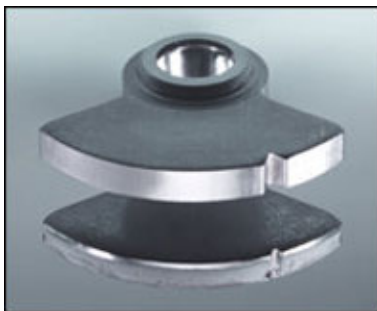


Bild (B012treZ) Die Schnittkanten feingeschnittener Teile sind sehr glatt (Feintool)

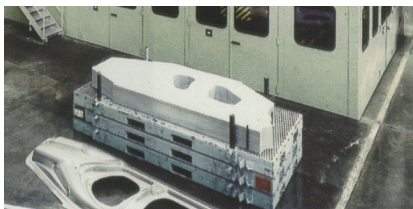


Bild (B013treZ) Vorgestanzte Karosseriebleche vor einer Tiefziehstrasse (Müller Weingarten)

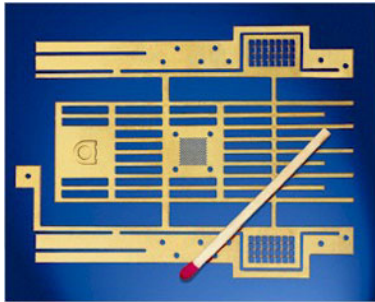


Bild (B014treZ) Auch sehr feine Strukturen lassen sich stanzen (Amada)

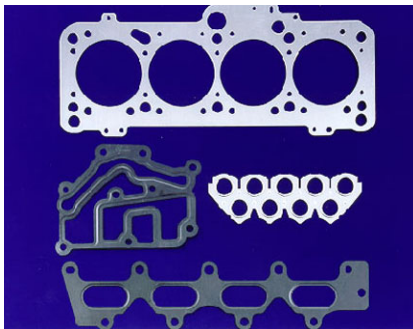


Bild (B015treZ) Zylinderkopf- und andere Dichtungen werden gestanzt.
(Gräbener Pressensysteme)

2.2. Verfahren

Es kommen folgende Verfahren zum Einsatz: Scherschneiden einhubig, Feinschneiden, kontinuierliches Scherschneiden und Nibbeln. Nachfolgend werden die verschiedenen Verfahren genauer betrachtet.

2.2.1. Verfahren: Scherschneiden, einhubig

Hier erfolgt der Schnitt entlang der gesamten Schnittlinie in einem Hub.

Scherschneiden ist ein mechanisches Schneidverfahren. Es können sowohl geschlossene als auch offene Schnittkanten realisiert werden, daher eignet es sich für das Abtrennen von Endlosmaterial wie für das Heraustrennen einer Teilegeometrie.

Das Schneiden offener Schnittlinien wird meist durch Scheren, dasjenige der geschlossenen Linien durch Stanzen realisiert. Der Trennvorgang erfolgt in jedem Fall zwischen Trennwerkzeug und Matrix innerhalb eines engen Spaltes (ungefähr 5% der Blechdicke).

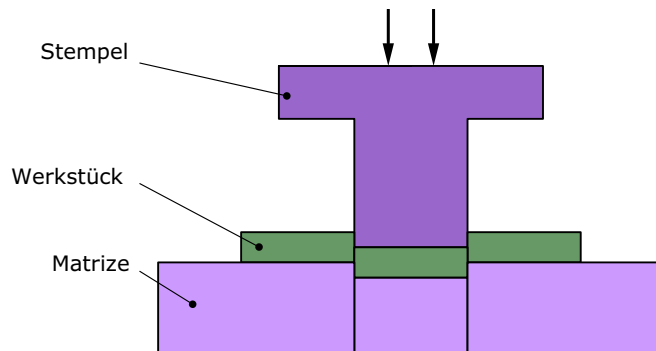


Bild (B001treZ) Schema Scherschneiden



Bild (B004treZ) Stanzwerkzeug (Amada)

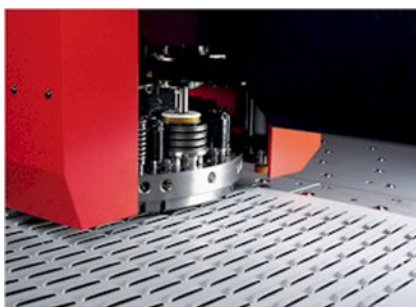


Bild (B005treZ) Einbringen von Kiemen mit Standardwerkzeug (Amada)

Beim Schneiden erfolgt in der letzten Phase ein Reißen des Restquerschnitts mit charakteristischer Bruchoberfläche. Die Bemühungen zielen darauf ab, diesen Bereich möglichst klein zu halten.

Dies wird erreicht durch: engere Schneidspalte, schärfere Werkzeuge und zäheres Material (harte Werkstoffe haben hingegen kleinere Gräte).

2.2.2. Verfahren: Feinschneiden

Beim Feinschneiden wird der Aussenflansch mittels gesicktem Niederhalter am Querfließen gehindert und der Schneidvorgang wird durch einen Gegenstempel durchgeführt. Der Schneidspalt beträgt lediglich rund 0.5% der Blechdicke.

Die notwendige Schneidkraft lässt sich abschätzen durch die Schneidfläche und der vorliegenden Scherfestigkeit (diese beträgt rund $0.8 \cdot \sigma_B$).

Ein [Video](#) von Hydrel zeigt den Feinschneideprozess.

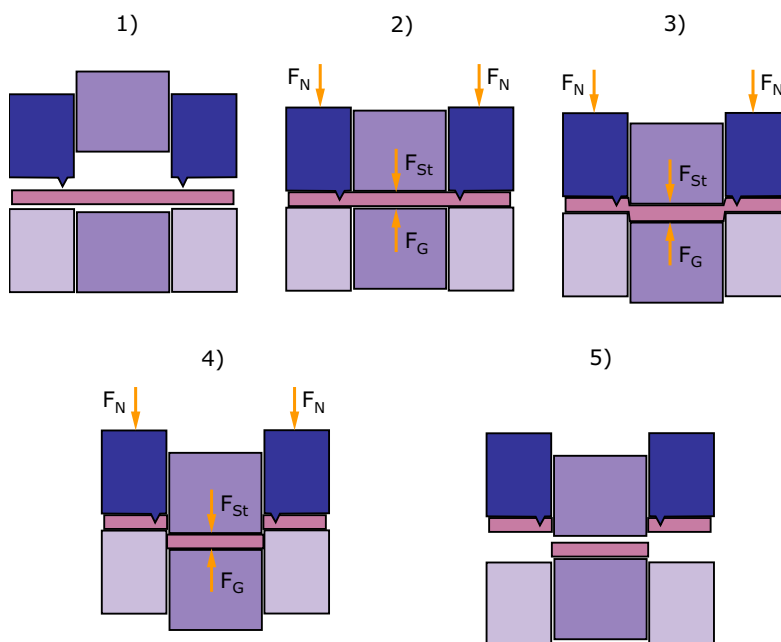


Bild (B007treZ) Feinschneidvorgang

1: Ausgangslage; 2: Einpressen der Ringzacke; 3 und 4: Schneiden mit Gegenstempel; 5: Abschluss des Vorganges und Ausstossen des Schnittteils

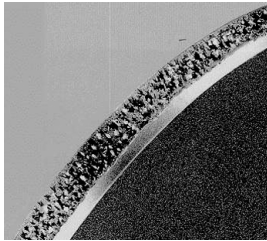


Bild (B006treZ) Schnittbild eines Stanzteiles

Bei den Stanzmaschinen unterscheidet man im Wesentlichen zwischen Folgeschnittmaschinen mit mehreren hintereinander angeordneten Werkzeugen, welche parallel arbeiten und Stanzmaschinen, welche mit Standardwerkzeugen und Werkzeugwechsel arbeiten.

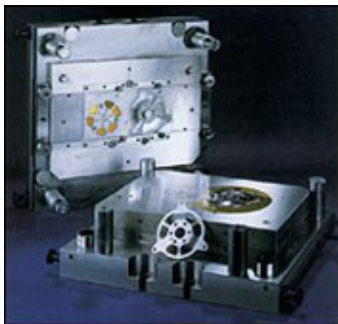


Bild (B008treZ) Folgeschnitt zur Herstellung eines Massen-Stanzteiles (Fertigteil rechts). Gut erkennbar das beschichtete Prägwerkzeug (Quelle: Feintool)

Folgeschnittwerkzeuge

So werden die Werkzeuge in Feinschneide- und gewissen Stanzmaschinen genannt. Die Werkzeuge sind so konstruiert, dass das Werkstück bis zur letzten Station mit dem Blechband verbunden bleibt. Erst im letzten Hub wird das Werkstück vom Abfall getrennt.



Bild (B057umfZ) Folgeschnittwerkzeug und Blechabschnitt (Quelle: Feintool)

2.2.3. Verfahren: Kontinuierliches Scherschneiden

Scherschneiden mit zwei kreisförmigen Messern.

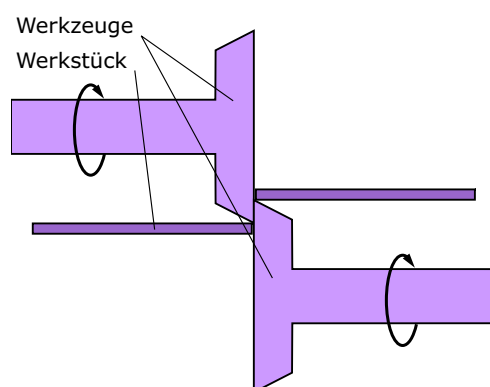


Bild (B002treZ) Schema Scherschneiden

2.2.4. Verfahren: Nibbeln

Ein Schneidstempel trennt entlang der Schnittlinie kleine Stückchen ab.

Das Nibbeln ist ein wirtschaftliches Verfahren insbesondere bei kleineren bis mittleren Stückzahlen. Da beim Nibbeln die Standardwerkzeuge für verschiedenste Teile verwendet werden können und die Stempelführung die NC-Steuerung übernimmt, können Teile in vollautomatischen Fertigungsstrassen hergestellt werden.

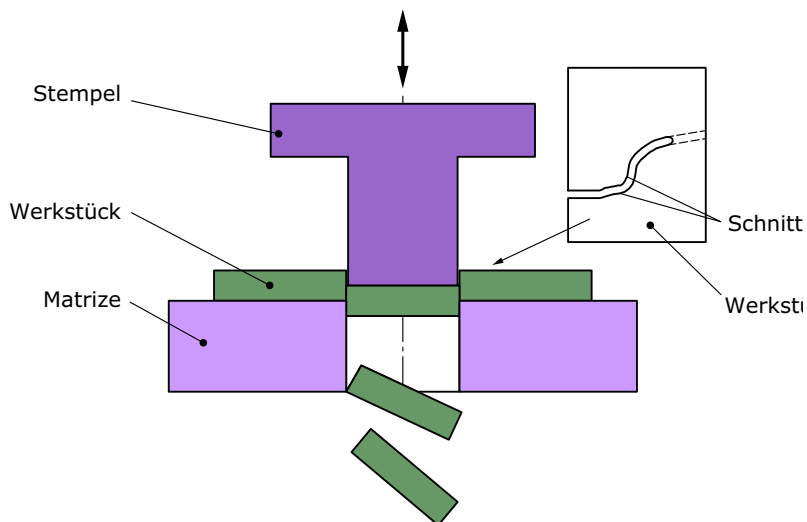


Bild (B003treZ) Schema Nibbeln

Nibbelmaschinen können durch geeignete Stempelwahl auch für andere Verfahren eingesetzt werden. So existieren etwa standardisierte Stempel für Kiemen, rechteckige und runde Löcher. Ein [Video](#) (Film: Trumpf) zeigt die Herstellung einer Türe in einer kombinierten Stanz/Nibbel/Biegemaschine.



Bild (B009treZ) Nibbelmaschine (Safran-Rainer)

Bei den Stanzmaschinen unterscheidet man im Wesentlichen zwischen Folgeschnittmaschinen mit mehreren hintereinander angeordneten Werkzeugen, welche parallel arbeiten und Stanzmaschinen, welche mit Standardwerkzeugen und Werkzeugwechsel arbeiten. Letztere eignen sich fürs Nibbeln und damit auch für kleinere Serien und Prototypen.

Vorgelagerte Verfahren	Verwandte Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Walzen	Plasmaschneiden	Tiefziehen
Richten	Autogenes Brennschneiden	Biegen
		Schweissen

Tabelle (T001treZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

2.3. Allgemeine Konstruktionsrichtlinien

Gestaltungsregel für alle trennenden Verfahren:

- Spanende Bearbeitung auf ein Mindestmass beschränken (zum Beispiel beeinflussbar durch Form des Ausgangsmaterials).
- So konstruieren, dass nicht an unzugänglichen Stellen spanend bearbeitet werden muss.
- So konstruieren, dass mit dem jeweils wirtschaftlichsten Verfahren und mit möglichst großen und stabilen Werkzeugen gearbeitet werden kann (zum Beispiel Scheibenfräser statt Schaftfräser, Messerkopf statt Walzenstirnfräser).
- Werkstück und Werkzeug müssen für das Spanen eindeutig, leicht und sicher gespannt werden können. Jegliches Umspannen oder Neueinstellen ist teuer und verringert zudem die Genauigkeit. (Also: Bearbeitung in möglichst wenig Bearbeitungsstationen.)
- Sonderwerkzeuge sehr teuer, deshalb möglichst Einsatz gleichartiger Werkzeuge und möglichst Einsatz von Standardwerkzeugen anstreben. (Beachte: Bei Großserienfertigung können andere Gesichtspunkte maßgebend sein, hier kann der Einsatz eines Sonderwerkzeuges unter Umständen wirtschaftlich sein.)
- Werkzeuge müssen gut anschneiden, sich freiarbeiten und auslaufen können.
- Anstreben von Bearbeitungsflächen, die später parallel oder senkrecht zur Aufspanfläche liegen.

- Bevorzugen von Dreh- oder Bohroperationen statt Fräs- und Hobelbearbeitung.
- Toleranzen so groß wählen wie es die Funktion gerade noch zulässt.

2.3.1. Konstruktionsrichtlinien Scherschneiden

Beim Scheren und Schneiden erfolgt ein mechanisches Trennen von Werkstücken ohne Entstehen von formlosem Stoff. Die Bleche und Bänder werden jeweils spanlos mit einer über die Fließgrenze hinausgehenden Werkstoffbeanspruchung getrennt. Eine gewisse Verwandtschaft zu den Umformverfahren ist dadurch gegeben, dass die Schneidvorgänge mit einer plastischen Verformung verbunden sind.

Tabelle 002treZ zeigt die zusammengestellten Gestaltungsrichtlinien zum Scherschneiden:

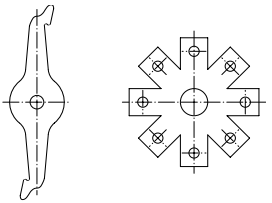
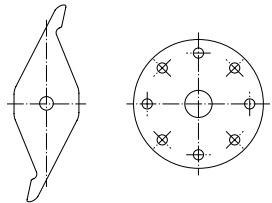
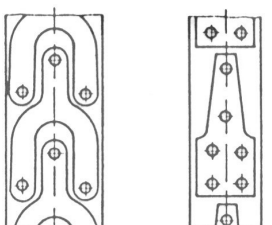
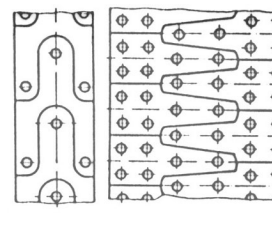
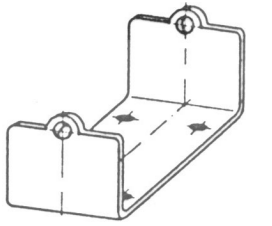
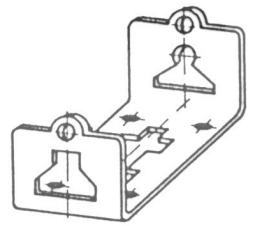
Regel	vermeiden	bevorzugen
Einfache Schnittformen bevorzugen; Vermeidung unregelmäßiger Formen.		
Abfall möglichst gering halten durch Übergang vom Ausschneiden zum Abschneiden, durch zweckmäßige Gestaltung oder günstige Anordnung.		
Schnittteile, die große Flächen aufweisen, mit Durchbrüchen versehen; Verschnitt für kleine Teile nutzen.		

Tabelle (T002treZ) Gestaltungsregeln für schergeschnittene Blechteile

Regel	vermeiden	bevorzugen
R > B/2 wählen, weil durch Fertigungstoleranz die Schnittteile sonst unsauber aussehen.		
Für Lochungen werkzeuggünstige Formen wählen.		
Möglichst wenige verschiedenartige Formen und Maße vorsehen; unnötige Abrundungen vermeiden; Ecken abschrägen.		
Beim Durchreißen von Nasen, Ösen oder Lappen zähe Werkstoffe verwenden, Ausklinkungen vorsehen und Klemmen des Werkzeuges durch Formgebung vermeiden.		
Vorsprünge mit Bohrungen geradlinig begrenzen; Lochversatz fällt dann weniger auf.		
Ausklinkungen an hochbeanspruchten Bauteilen abrunden mit R³ 2 mal Blechdicke.		

Tabelle (T002treZ) Gestaltungsregeln für schergeschnittene Blechteile

2.3.2. Optimierung der Werkstoffausnutzung

Die Formen der auszuschneidenden Werkstücke sind wenn möglich so zu wählen, dass eine optimale Werkstoffausnutzung des Vormaterials möglich ist. Auch geschickte Anordnung und Schachtelung der Formen innerhalb des Blechstreifens kann zu einer besseren Materialausnutzung führen. Das Optimum wird erreicht durch flächenschlüssige Formen. Oft kann durch einen Übergang vom Ausschneiden zum Abschneiden unnötiger Verschnitt vermieden werden.

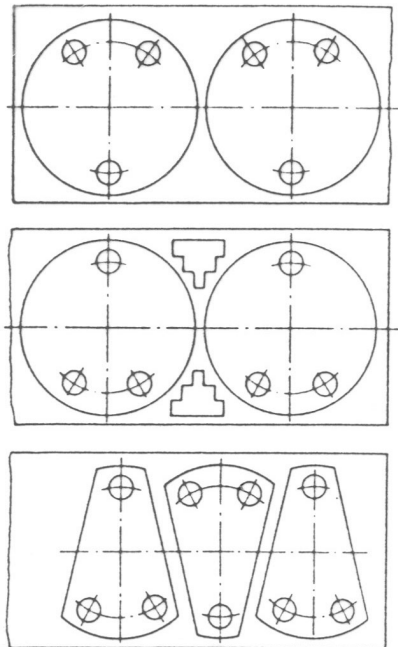


Bild (B132treZ) Werkstoffausnutzung beim Schneiden i)

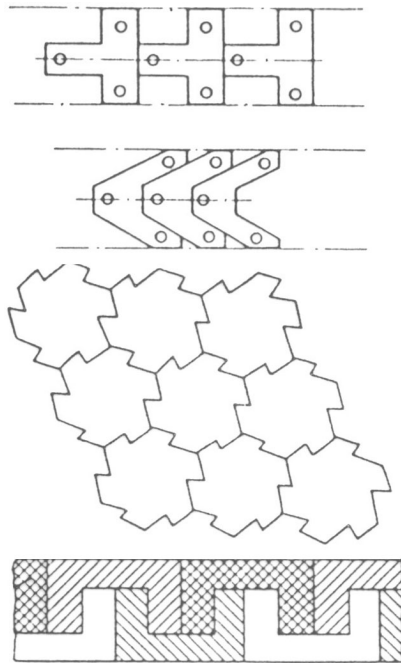


Bild (B133treZ) Werkstoffausnutzung beim Schneiden ii)

Die zu schneidenden Teile möglichst so konstruieren, dass sie mit gro-
ßen Maßtoleranzen und mit Grat verwendet werden können. Je grö-
ßer die Toleranzen gewählt werden, desto größer ist die Stückzahl der
Teile, die mit dem selben Werkzeug hergestellt werden können (Werk-
zeugverschleiss).

Bei Anordnung der Ausschnitte für Stanzteile unbedingt Weiter-
verarbeitung berücksichtigen. Grundsätzlich gilt, dass Biegekanten
möglichst senkrecht auf dem Walzstrich stehen sollen. Das Beispiel
ganz links (Bild unten) berücksichtigt nur den Gesichtspunkt optimaler
Stoffausnutzung. Hierfür sind Tafeln und Bänder als Ausgangspunkt
verwendbar. Das Stanzteil im mittleren Beispiel erfordert ein streifen-
förmiges Ausgangsmaterial, da bei Bandmaterial die Biegekante paral-
lel zur Walzrichtung liegen würde. Die rechts gezeigte Ausführung des
Stanzteiles zwingt zur Schräglage, da Biegekanten aufeinander senk-
recht stehen.

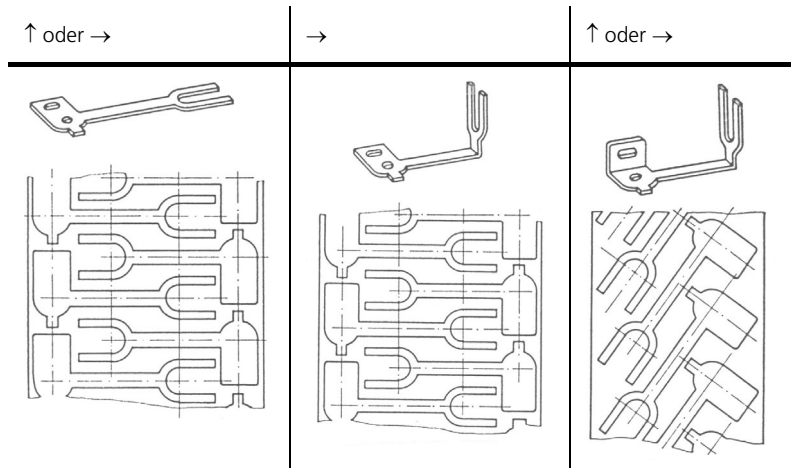


Tabelle (T003treZ) Walzstrich und Werkstoffausnutzung

Durch Übergang vom Ausschneiden zum Abschneiden lässt sich Materialersparnis und Optimierung des Zuschnitts erzielen:

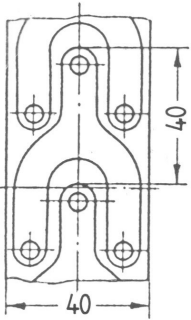
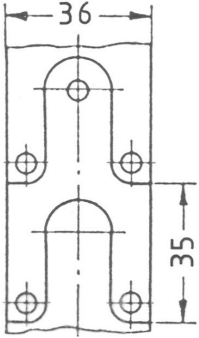
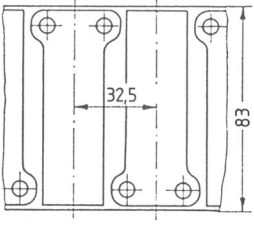
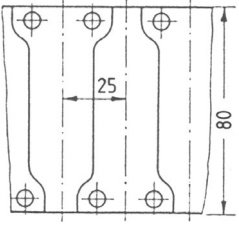
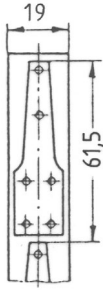
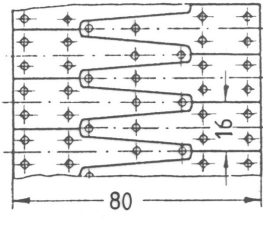
ungünstig	günstig	Ersparnis
		21%
		26%
		45%

Tabelle (T004treZ) Werkstoffeinsparung

Beim Ausschneiden von Blechen außerdem schmale Ausschnitte vermeiden, da dadurch empfindliche und teure Werkzeuge erforderlich würden mit hohem Werkzeugverschleiß und der Gefahr von Stempelbruch.

2.4. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Feintool	Feinschneide-Stanzmaschinen
Schuler Pressen	Pressen
Osterwalder	Pressen für Stanz- und Sinterteile
Amada	Stanz- und Nibbelmaschinen
Pullmax	Schneidmaschinen, AT

Tabelle (T005treZ) Firmen Scherschneiden

Organisation:	Beschreibung:
Swissmem	Verband der Maschinen- und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T006treZ) Organisationen Scherschneiden

3. Zerteilen – Messerschneiden, DIN8588

Beim Messerschneiden wird ein Werkstück von einer einzigen, meist keilförmigen Schneide zerteilt. Im Gegensatz zum Scherschneiden ist hier nur eine Schneide vorhanden. Man spricht auch von kontinuierlichem Messerschneiden.

Diesem Verfahren liegt demzufolge eine andere Kinematik zugrunde. Das Verfahren ist für den Maschinenbau von untergeordneter Bedeutung. Ausnahmen sind einzig das Schneiden von Furnier ab Baumstämmen und das Schneiden von Rohren im Sanitärbereich!

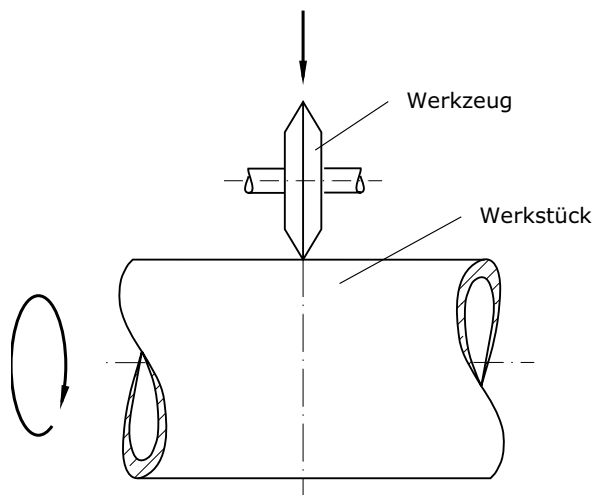


Bild (B016treZ) Ablängen von Rohren

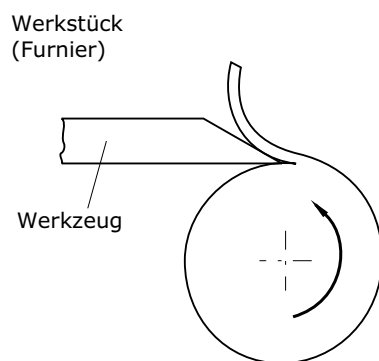


Bild (B017treZ) Herstellung von Furnieren und Folien



Bild (B018treZ) Zange zum Schneiden von Kunststoffrohren

4. Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden – Drehen, DIN 8589 Teil 1

Drehen ist ein Spanverfahren zur Herstellung meist rotationssymmetrischer Bauteile aus unterschiedlichsten Werkstoffen. Schon lange vor der Erfindung des Elektromotors wurden Drehverfahren mit Handantrieb oder Wasserkraft auf Ton oder Stein angewandt.

Die heute noch im Einsatz stehenden Drehbänke für Metalle mit elektrischem Antrieb und manueller Werkzeugführung werden zunehmend durch CNC-Maschinen mit automatischem Werkzeugwechsel und angetriebenen Werkzeugen ersetzt. Somit können Fräs- und Bohrvorgänge in der gleichen Maschinen durchgeführt werden.

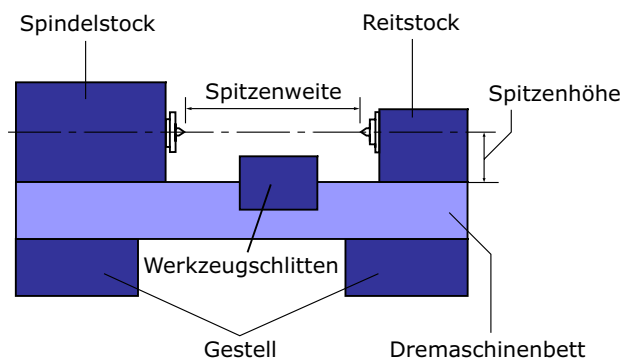


Bild (B019treZ) Aufbau einer Drehbank: Das Werkstück wird zwischen Spindelstock und Reitstock eingespannt, der Drehmeissel ist auf dem Werkzeugschlitten befestigt.

Drehoperationen können mittels CAM-Software direkt am CAX-Arbeitsplatz durchgeführt, getestet und optimiert werden. Die Daten werden auf die CNC-gesteuerte Maschine übertragen und der Drehvorgang sowie der notwendige Werkzeugwechsel erfolgen vollautomatisch bis zum fertigen Bauteil.

Drehen eignet sich für Einzelstücke wie für Grosserien. Oberflächengüten bis N6 erreichbar.

Für den Entwickler relevant ist die Frage, mit welchem Drehverfahren das entsprechende Formelement hergestellt werden soll.

Werkzeuge

Drehmeissel: Der Fantasie sind keine Grenzen gesetzt: Für jeden Geometrie und jeden Werkstoff gibt es Drehmeissel.



Bild (B032treZ) Drehmeissel (Sandvik)

4.1. Überblick über einige der unzähligen Drehoperationen

Längs-Runddrehen: Werkzeugbewegung parallel zur Drehachse. Reduzieren des Durchmessers.

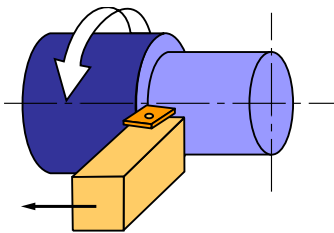


Bild (B020treZ) Längs-Runddrehen

Abstechen: Teile ab Stange werden am Ende des Drehvorganges abgestochen.

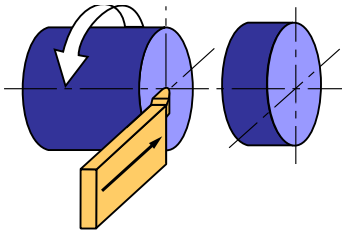


Bild (B021treZ) Abstechen

Gewindedrehen, -schneiden, -strehlen: Das Drehen eignet sich für grosse Aussen- und Innengewinde.

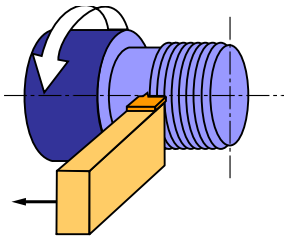


Bild (B022treZ) Gewindedrehen, -schneiden, -strehlen

Innendrehen: Bei entsprechend grossem Durchmesser kann auch die Innenseite eines Werkstücks bearbeitet werden.

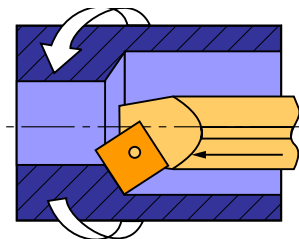


Bild (B023treZ) Innendrehen

Kegeldrehen: Kegeldrehen erfolgt entweder durch Schrägstellen des Werkzeug- schlittens oder durch Versetzen des Reitstockes oder direkt durch die CNC-Steuerung.

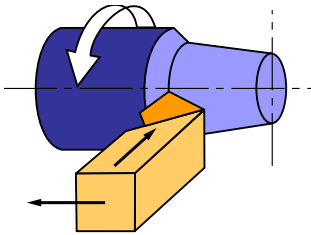


Bild (B024treZ) Kegeldrehen

Durch unterschiedliche Werkzeuge, unterschiedliche Drehzahlen und Vorschubgeschwindigkeiten können genaueste, rotationssymmetrische Teile mit hervorragender Oberfläche hergestellt werden. Vielfach werden auch Gewinde direkt auf der Drehmaschine hergestellt. Bei genügend grossen Durchmessern ist auch Innendrehen möglich. Dieses ist jedoch immer aufwendiger als Aussendrehen.

Im Vergleich zu anderen Verfahren z. B. Fliesspressen sind die Fasern unterbrochen, ergeben infolge Kerbwirkung tiefere Festigkeitswerte und der Materialeinsatz ist bei spanenden Verfahren immer grösser als bei Umform-Prozessen.

vorgelagerte Verfahren	verwandte Verfahren	nachgelagerte Verfahren
Gleitziehen	Fräsen	Härten
Walzen	Bohren	Schleifen
Strangpressen		

Tabelle (T007treZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

4.1.1. Spannvorrichtungen

Für den Gestalter der Bauteile ist es wesentlich, sich über das mögliche Spannen der Teile vertiefte Gedanken zu machen. Hier sind die wichtigsten Spannvorrichtungen behandelt:

Backenfutter: Die Teile können von Innen- (Innenbackenfutter) oder Aussen (Aussenspannfutter) eingespannt werden.

Geeignet für eher kürzere Bauteile. Längere Teile werden zum Teil mit einer Spitze gegengelagert. Beim Umspannen kann kein Rundlauf garantiert werden.



Bild (B033treZ) Dreibackenspannfutter (Microcentric)

Spannen zwischen Spitzen: Die Teile werden beidseitig in Zentrierspitzen gelagert. Das Drehmoment erfolgt durch Mitnehmer (nicht dargestellt), welche auf das Drehteil geklemmt sind.

Spitzenlagerung eignet sich für längere Teile und Teile, welche nach Umspannen weiterhin einen Rundlauf garantieren müssen.

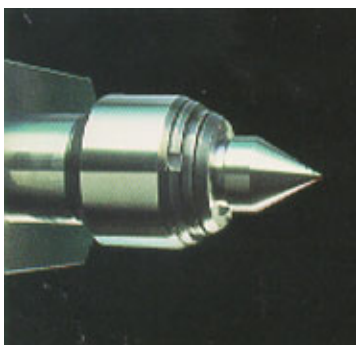


Bild (B034treZ) Zentrierspitze

4.2. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Einsatzgebiete: Wellen für Maschinen, Schienen, Strassen- und Luftfahrzeuge, Walzen für Draht- und Profilherstellung, Rollen und Räder für Schienensysteme, Finger- und Armringe, für die Medizin Schrauben und Hüftgelenke, Düsen für Bremssysteme, Verbindungstechnik sowie Gleit- und Wälzlager.



Bild (B035treZ) Medizintechnik (Tornos Bechler)



Bild (B036treZ) Kugellager (Tornos Bechler)



Bild (B037treZ) Gasdüsen (Tornos Bechler)



Bild (B039treZ) Drehteil mit Aussengewinde (IAV Drehteile)



Bild (B038treZ) Bremssysteme (Tornos Bechler)

4.3. Wendeschneidplatten-Technik

Wurde früher mit HSS (Hochleistungs-Schnellarbeitsstahl) gedreht, gefräst und gebohrt, wurden diese Werkzeuge durch HM (Hartmetall) Wendepplatten und einen entsprechenden Halter verdrängt. HM-Platten bestehen aus Karbiden von Wolfram, Titan, Tantal oder Niob, gebunden mit Kobalt. Um die Verschleissfestigkeit zu erhöhen, werden die Platten Vakuum-Beschichtet.

Die Vorteile liegen auf der Hand: Schnittwerkzeuge weisen fast nur an den Schnittflächen Abnutzungserscheinungen auf. HSS-Werkzeuge müssen in diesem Falle zeitintensiv nachgeschliffen werden – HM Platten werden einfach gedreht. Durch ihrer extreme Härte und die zusätzliche Hartstoffschicht z. B. aus TiN sind HM-Platten viel belastbarer. Somit können mit HM auch schwer zerspanbare Werkstoffe bearbeitet werden.



Bild (B026treZ) HM-Platten

Die höhere Belastbarkeit kommt auch dem Trend zu HSM (High Speed Machining) entgegen: Es wird mit immer stärkeren Maschinen, breiteren Schneideflächen oder höheren Drehzahlen gearbeitet, um die Zerspanungsraten drastisch zu erhöhen.



Bild (B027treZ) HSM in Aktion

4.4. Konstruktionsrichtlinien

Gestaltungsregeln für Teile mit Dreh-Bearbeitung:

Regel	vermeiden	bevorzugen
Beachten des erforderlichen Werkzeugauslaufs		
Anstreben einfacher Formmeißel		
Vermeiden von Nuten und engen Toleranzen bei Innenbearbeitung		
Vorsehen ausreichender Spannungsmöglichkeiten		
Vermeiden großer Zerspanarbeit, z. B. durch hohe Wellenbünde, besser aufgesetzte Buchsen verwenden		
Anpassen der Bearbeitungslängen und -güten an die Funktion		

Tabelle (T008treZ) Gestaltungsregeln für Teile mit Drehbearbeitung

Nuten zum Abdichten der Welle-Nabe lassen sich im Wellenteil einfacher durch Drehbearbeitung erstellen als im Nabenteil:

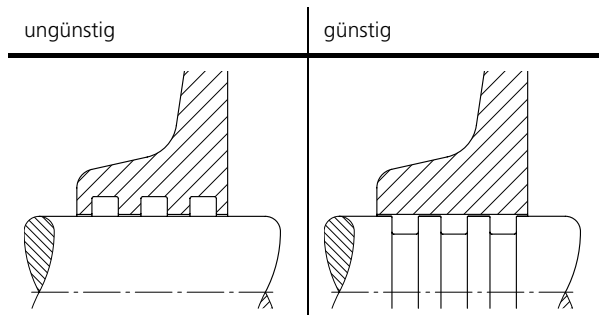


Tabelle (T009treZ) Bearbeitungsgerechtes Gestalten beim Drehen

Weitere wichtige Punkte beim drehgerechten Gestalten sind:

- Vorsehen ausreichender Spannmöglichkeiten.
- Werkstücke mit Drehbearbeitung müssen in den meisten Fällen umgespannt werden zur Fertigbearbeitung. Diesem Umstand muss Rechnung getragen werden durch Vorsehen ausreichend dimensionierter Spannbunde.
- Niemals eine Welle über die gesamte Länge mit hoher Oberflächenqualität ausführen, nur weil an den beiden Enden diese Qualität für Lagersitze gefordert wird. Besser ist ein Absetzen der Welle im Durchmesser und in der Oberflächengüte, die auf jeden Fall dem jeweiligen Verwendungszweck angepasst sein muss.
- Lange Sitze (Passungen) sollten unterbrochen ausgebildet werden, weil dann nur an den eigentlichen Fügeflächen geschliffen, bzw. geschliffen werden muss.
- Zylinder- oder Planflächen, die miteinander rundlaufen müssen, sollten möglichst in derselben Aufspannung bearbeitbar sein.

4.5. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Mikron	Drehbänke und Bearbeitungszentren
Tornos Bechler	Drehbänke und Bearbeitungszentren
Index (Traub)	Drehbänke und Bearbeitungszentren
Boehringler	Drehbänke und Bearbeitungszentren
Emco	Drehbänke und Bearbeitungszentren
Sandvik	Drehwendeplatten
Klenk	Bohrer, Fräser, Reibahlen, Drehstähle
IAV Drehteile	Fertigung von Drehteilen
Romai GmbH	Angetriebene Werkzeuge, Spindeln

Tabelle (T010treZ) Firmen Drehen

Organisation:	Beschreibung:
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T011treZ) Organisationen Drehen

5. Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden – Bohren, Senken, Reiben, DIN 8589 Teil 2

Bohren, Senken und Reiben sind in der Norm wegen der gleichen Kinematik beim Spanvorgang zusammengefasst. Es sind relativ alte Verfahren, die nach verschiedenen Kriterien eingeordnet werden können (Bohren ins Volle, mit symmetrisch oder asymmetrisch angeordneten Schneiden, Art der Späneabfuhr).

Durch die weite Verbreitung und den hohen Standardisierungs- und Automatisierungsgrad sind die hier beschriebenen Verfahren preisgünstig in der Anwendung und für Einzelstücke bis Grossserien wirtschaftlich.

5.1. Bohr-, Dreh- und Fräsmaschinen

Die Maschinen fürs Bohren, Fräsen und Drehen haben sich in letzter Zeit stark angenähert – daher sollen sie hier gemeinsam behandelt werden. Anstelle der handbetriebenen Drehbänke, Bohr- und Fräsmaschinen verrichten zunehmend computergesteuerte CNC-Bearbeitungszentren (CNC bedeutet Computer Numerical Control) ihren Dienst. Lediglich in der Einzelteillfertigung verlässt man sich nach wie vor auf handgesteuerte Maschinen mit digitaler Anzeige. Einige Maschinen werden im Folgenden behandelt:

Angetriebene Werkzeuge: Durch den Einsatz von angetriebenen Werkzeugen können Fräs- und Bohrvorgänge ohne Umspannung in der Drehmaschine vorgenommen werden. Auch aussermittige Bohrungen, Löcher in radialer Richtung, Verzahnungen und Gewindefräsen sind möglich.

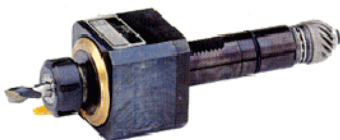


Bild (B043treZ) Angetriebenes Werkzeug (Romai)

Bohrer: Mit HM können extreme Durchmesser direkt ins Volle gebohrt werden. Um zu kühlen und die Späne abzuführen, sind in den Haltern

Kühlflüssigkeitsleitungen eingebracht. Unter hohem Druck wird die Flüssigkeit an die Stirnseite des Bohrers gepumpt.



Bild (B028treZ) Bohrer (Sandvik)

Stirnfräser: Hauptsächlich für plane Flächen

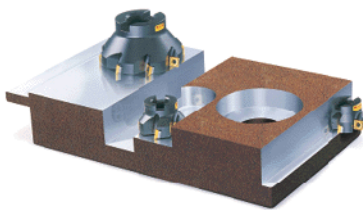


Bild (B029treZ) Stirnfräser (Sandvik)

Fingerfräser: Für Taschen, Nuten und Freiformflächen geeignet.

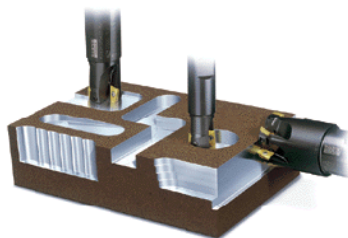


Bild (B030treZ) Fingerfräser (Sandvik)

Nutfräser: Nuten in allen erdenklichen Profilen, Breiten und Tiefen.

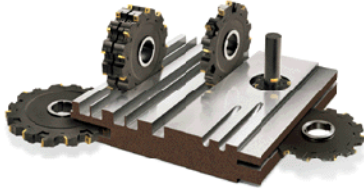


Bild (B031treZ) Nutfräser (Sandvik)

Automatischer Werkzeugwechsel: Das Anordnen von mehreren Werkzeugen auf einem runden Werkzeughalter (Rotor) macht ein manuelles Wechseln der Werkzeuge überflüssig – bei Bedarf dreht die CNC-Steuerung den Rotor zum geforderten Werkzeug. Diese Erleichterungen entbinden den Entwickler nicht davon, seine Teile so auszulegen, dass möglichst wenige Werkzeugwechsel erforderlich sind.

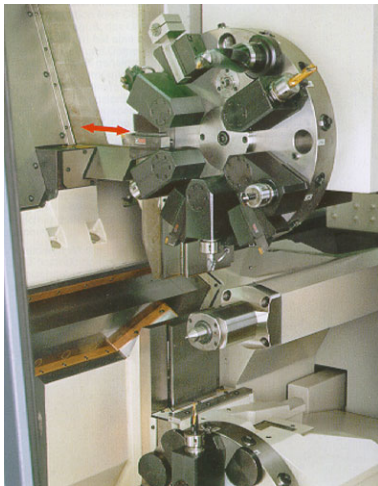


Bild (B044treZ) Automatischer Werkzeugwechsel (Boehringer)

Freiformfräsen: Gerade in der Werkzeugherstellung müssen oft komplizierte Freiformflächen gefertigt werden. CNC-Fräsmaschinen ermöglichen das Fräsen von komplexesten Freiformflächen.



Bild (B045treZ) Freiformfräse (Mikron)

Mehrere Werkzeugträger: Es klingt einleuchtend: Wenn zwei Werkzeuge ein Werkstück bearbeiten, kann die Zykluszeit im Idealfall halbiert werden. Es gibt verschiedene Anordnungen der Werkzeugträger, damit sich Letztere möglichst nicht selbst behindern.

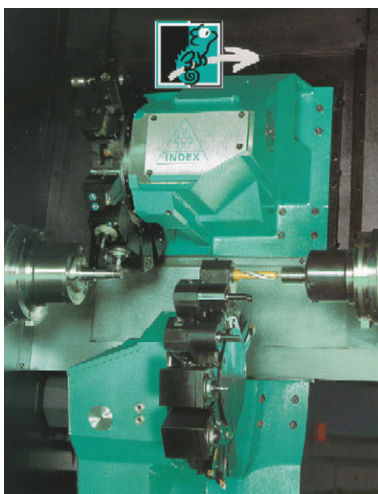


Bild (B046treZ) Mehrere Werkzeugträger (Boehringer)

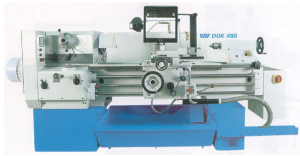


Bild (B047treZ) Konventionelle Drehbank (Boehring)



Bild (B049treZ) Universal-(5Achsen)-Fräsmaschine (Mikron)

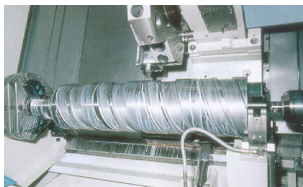


Bild (B048treZ) Schrägebett-CNC-Drehbank im Einsatz (Boehring)



Bild (B050treZ) CNC-Drehautomat (Mikron)



Bild (B051treZ) Transfer-Bearbeitungszentrum, Das Bauteil wird von Station zu Station gedreht und die verschiedenen Bearbeitungsoperationen parallel durchgeführt (Hug)

5.2. Wichtige Bohr- Senk- und Reibmaschinen

Rundbohren: Rundbohren erzeugt eine kreiszylindrische Innenfläche koaxial zur Schnittbewegung

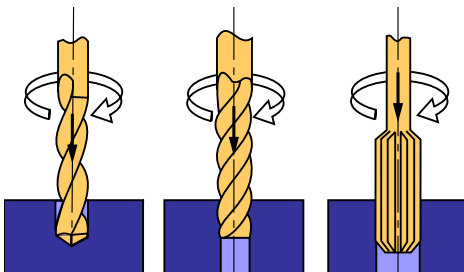


Bild (B040treZ) Reiben, Bohren ins Volle, Aufbohren

Gewindebohren: Schneiden eines Innengewindes

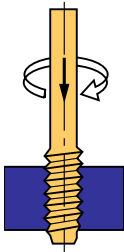


Bild (B041treZ) Gewindebohren

Profilbohren: Erzeugung kegelförmiger Löcher, Schraubenkopfsenkungen, Zentrierungen

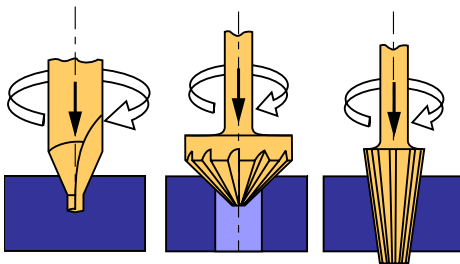


Bild (B042treZ) Kegelsenker, Zentrierbohrer, Kegelreibahle

verwandte Verfahren	nachgelagerte Verfahren
Fräsen	Honen
	Läppen

Tabelle (T012treZ) Verwandte und nachgelagerte Verfahren

5.3. Konstruktionsrichtlinien Bohren, Senken und Reiben

Für das bearbeitungsgerechte Konstruieren von Werkstücken, die später eine Bohrbearbeitung erfahren, muss der Konstrukteur die folgenden Punkte berücksichtigen:

- Bohrverfahren (Einbohren, Aufbohren, Senken, Reiben, Tiefbohren, Kernbohren etc.)
- Bohrmaschinenarten (Säulen-, Ständer-, Reihen-, Radial-, Koordinaten-, Lehren-, Mehrspindel-, Gewindebohrmaschine usw.)
- Bohrwerkzeuge (Bohrer, Stirnsenker, Aufstecksenker, Rückwärtssenker, Bohrstangen, Reibahlen, Gewindebohrer etc.)

Allgemeine Regeln sind:

- Soweit möglich, sollten die Bohrungen auf möglichst wenige Seiten des Werkstücks konzentriert werden.
- Außerdem sollte die Anzahl der Schraubengrößen und -arten reduziert werden und damit die Bohrungsdurchmesser an einem Bauteil vereinheitlicht werden.
- Sonderwerkzeuge, wie zum Beispiel Stufenbohrer und Profilsenker sollten für Einzel- und Kleinserienfertigung vermieden werden. Derartige werkstückgebundene Sonderwerkzeuge lassen sich nur in Großserienproduktion wirtschaftlich einsetzen.
- Bei Gussteilen größere Bohrungen vorgießen. Dadurch geringerer Zerspanungsaufwand.


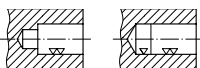
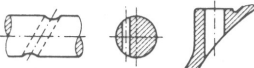
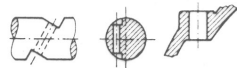
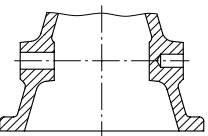
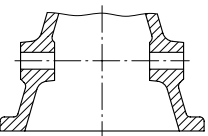
Regel	ungünstig	günstig
Zulassen von Sacklöchern möglichst nur mit Bohrspitze.		
Vorsehen von Ansatz- und Auslauföchern bei Schräglöchern.		
Anstreben durchgehender Bohrungen, Vermeiden von Sacklöchern.		

Tabelle (T013treZ) Gestaltungsregeln für Teile mit Bohrbearbeitung

Zulassen von Sacklöchern möglichst nur mit Bohrspitze. Ein Sackloch mit ebener Grundfläche ist am teuersten (Tabelle T014treZ). In vielen Fällen ist zu überlegen, inwieweit der Kegel des Wendelbohrers ste-

hen bleiben kann. Das Aussenken der Bohrung mit übrigbleibenden Restkegel des Wendelbohrers ist billiger. Am billigsten sind Bohrlöcher (Sacklöcher), die in einem Arbeitsgang mit dem Wendelbohrer erstellt werden können. Erreichbare Qualitäten sind H11 bis H12.

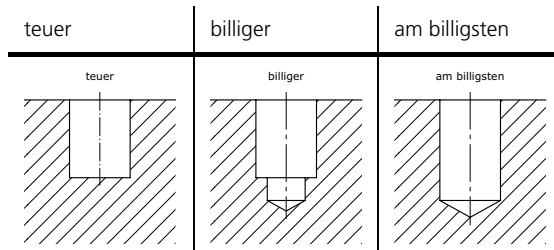


Tabelle (T014treZ) Kostengünstig gestalten

Vorsehen von Ansatz- und Auslauflächen bei Schräglöchern. Grundsätzlich gilt: Die Fläche so gestalten, dass die Bohrerachse senkrecht auf dieser steht. Andernfalls, das heißt beim Anbohren schräg zur Werkstückfläche, wird der Bohrer verlaufen. Diesem Umstand ist schon bei der Herstellung des Bauteiles Rechnung zu tragen (zum Beispiel bei Gusskonstruktionen). Also entweder entsprechende Fläche angeben oder durch Ansenken einer Fläche dafür sorgen, dass die Bohrerachse senkrecht zur Werkstückfläche steht.

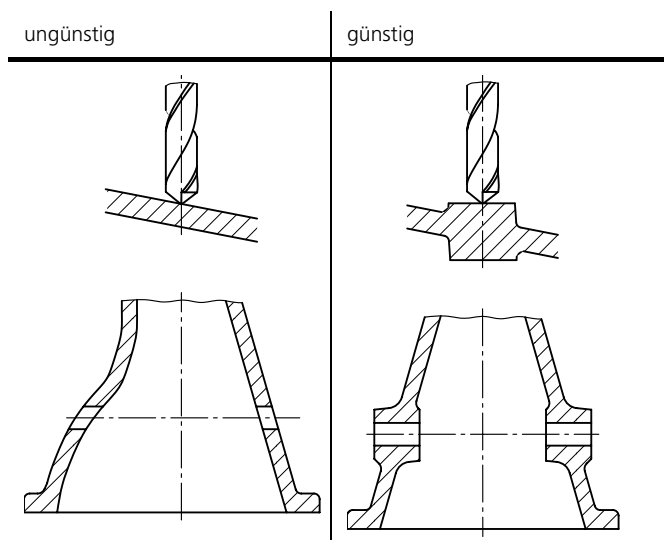


Tabelle (T015treZ) Bearbeitungsgerechtes Konstruieren

Das Vorsehen der Ansatzflächen gilt übrigens nicht nur für den Eintritt des Bohrers in das Werkstück, sondern auch für den Austritt. Beim Austreten des Bohrers aus einer schrägliegenden Fläche kommt es zu unterschiedlichen Schnittbedingungen und damit zu einer erhöhten Gefahr des Werkzeugbruches. Außerdem muss man stets einen größeren Raum für den Werkzeugauslauf vorsehen.

Anstreben durchgehender Bohrungen, vermeiden von Sacklöchern! Beim Bearbeiten von Bohrungen auf Passmaß kommen Reibahlen oder Bohrstangen zum Einsatz. Reibahlen arbeiten schneller als Bohrstangen, erfordern wegen des Anschnitts jedoch einen Werkzeugauslauf. Aus diesem Grunde sind durchgehende Bohrungen als bearbeitungsgerechtere Lösungen vorzuziehen.

In einer Bohrung ist ein Absatz immer die teure Lösung. Die Lösung mit der Nut für einen Sicherungsring ist hier kostengünstiger, trotz der zusätzlichen Bearbeitungsaufwendungen für das Einstecken der Nut.

5.4. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Brütsch Rüegger	Vertrieb von allen erdenklichen Werkzeugen
Nagel	Honen, Bandschleifen, Tieflochbohren
Sandvik	Bohrer

Tabelle (T016treZ) Firmen Bohren, Senken und Reiben

Organisation:	Beschreibung:
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T017treZ) Organisationen Bohren, Senken und Reiben

6. Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden – Fräsen, DIN 8589 Teil 3

Mit Fräsverfahren lassen sich fast beliebige Teile mit ebenen oder unebenen (Freiformflächen) Flächen herstellen. Fräsen bewährt sich für viele Werkstoffe, für Kleinst- bis Grossteile sowie für Einzelteile und Grossserien.

6.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele beim Fräsen

Einsatzgebiet von Fräsen sind: Nachbearbeitung von Gussteilen, Werkzeugherstellung, Nachbearbeitung von Schmiede- und Fließpressteilen und Herstellung von Blankstahl (z. B. aus Strangpressprofilen).

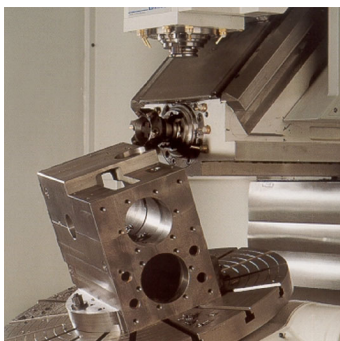


Bild (B061treZ) Fräsbearbeitung, Aufspannung



Bild (B060treZ) Fräsbearbeitung, Kühlmittel (Mikron)

6.2. Eine Auswahl wichtiger Fräsverfahren

Stirn-Planfräsen: Es wird mit der Stirnseite des Fräasers gearbeitet. Grosser Vorschub möglich.

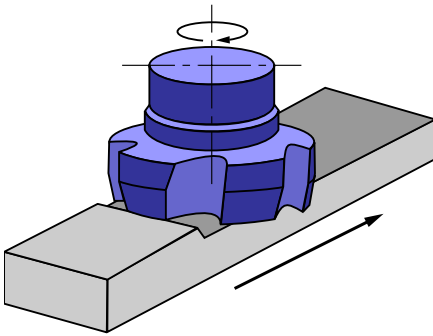


Bild (B052treZ) Stirn-Planfräsen

Umfangs-Planfräsen: Die am Umfang liegenden Schneiden erzeugen die Werkstückoberfläche. Schönere Oberflächen.

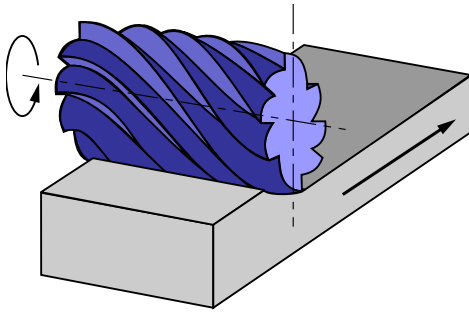


Bild (B053treZ) Umfangs-Planfräsen

Längs-Profilfräsen: Wie Stirnfräsen, aber mit speziellem Profil zur Erzeugung von Nuten.

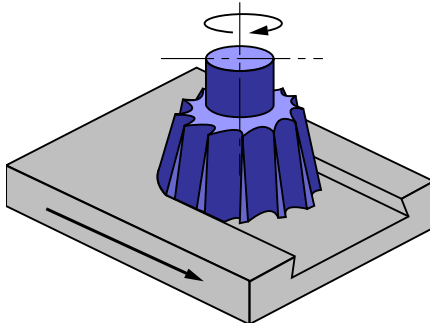


Bild (B054treZ) Längs-Profilfräsen

Formfräsen: Ein Fingerfräser fährt in kurzen Abständen über die Werkstücks Oberfläche. Freiformflächen möglich, teuer.

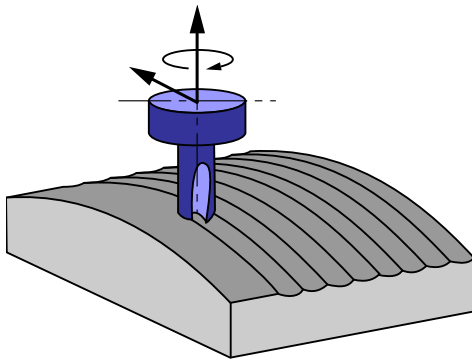


Bild (B055treZ) Formfräsen

Wälzfräsen: Sowohl Werkstück als auch Werkzeug drehen sich. So erstellt man auf einer Drehbank eine Verzahnung.

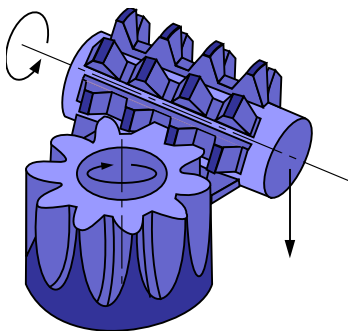


Bild (B056treZ) Wälzfräsen

Modernste Fräswerkzeuge mit verschleissarmen Beschichtungen ergeben grosse Abtragleistungen bei guten Toleranzen und Oberflächen-güte.

Fräsoperationen können mittels CAM-Software direkt am CAx-Arbeitsplatz durchgeführt, getestet und optimiert werden. Die Daten werden mit der CNC-gesteuerten Maschine direkt übertragen und der Fräsvorgang sowie der notwendige Werkzeugwechsel erfolgen vollautomatisch bis zum fertigen Bauteil.

Moderne Hochgeschwindigkeits-Fräsvermaschinen erreichen Drehzahlen bis zu 75'000/min. Die Vorteile von Hochgeschwindigkeitsfräsen sind vielfältig. Man erreicht 5–10 mal grössere Vorschübe und damit 30–40% grössere Abtragleistungen. Erstaunlicherweise entwickelt sich auch weniger Wärme (diese fliesst in den Span und wird weg befördert). Auch die Bearbeitungskräfte sind kleiner und die erreichten Oberflächen feiner.

Der Entwickler muss auch bei diesem Verfahren die Art der Einspannung auf der Werkzeugmaschine im Voraus bedenken.

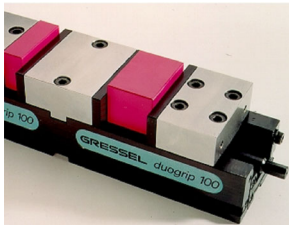


Bild (B057treZ) Schraubstock (Gresel)



Bild (B058treZ) Horizontal-Fräsen (Mikron)



Bild (B059treZ) Fingerfräser im Einsatz an einer Freiformfläche

6.3. Konstruktionsrichtlinien Fräsen

Für das bearbeitungsgerechte Gestalten von Frästeilen gelten folgende Grundsätze:

- Werkstücke müssen einfach, fest und sicher gespannt werden können, da beim Fräsen hohe Zerspankräfte auftreten.
- Anschnitt und Überlauf des Werkzeugs müssen gewährleistet sein.
- Einsatz von großen, stabilen und leistungsfähigen Werkzeugen anstreben (Messerkopf statt Walzenstirnfräser, Scheibenfräser statt Fingerfräser).
- Möglichst Satzfräser einsetzen.
- Soweit möglich mehrere Werkstücke gemeinsam oder hintereinander gespannt fräsen.
- Die zu bearbeitenden Flächen auf das unbedingt Notwendige beschränken.
- Die zu bearbeitenden Flächen sollen möglichst rechtwinklig zueinander liegen.
- Möglichst wenige Werkzeugwechsel anstreben.
- Beschränkung auf Standardwerkzeuge.

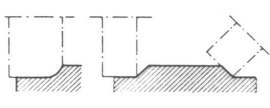
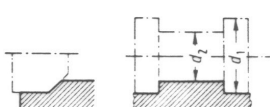
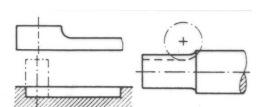
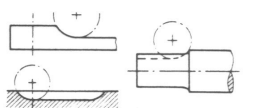
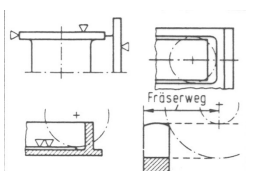
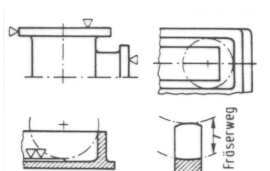
Regel	ungünstig	günstig
Anstreben gerader Fräsflächen, Formfräser teuer; Abmessungen so wählen, dass Satzfräser einsetzbar.		
Vorsehen auslaufender Nuten bei Scheibenfräsern; Scheibenfräsen billiger als Fingerfräsen.		
Anpassen des Werkzeugauslaufs an den Fräserdurchmesser; Vermeiden von langen Fräserwegen durch Zulassen von gewölbten Bearbeitungsflächen (z. B. Schlitzten).		

Tabelle (T018treZ) Gestaltungsregeln für die Fräsbearbeitung

Regel	ungünstig	günstig
Anordnen von Flächen in gleicher Höhe und parallel zur Aufspannung. Unterschiedliche Bearbeitungshöhe erfordert mehrfaches Zustellen des Werkzeugs, dadurch entsteht Zeitverlust. Auf jeden Fall gleiche Bearbeitungshöhe anstreben oder auf Fräsbearbeitung ganz verzichten und Einsetzen von fertig bearbeiteten Buchsen.		

Tabelle (T018treZ) Gestaltungsregeln für die Fräsbearbeitung

6.4. Firmen, Links und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Mikron	Werkzeugmaschinen
Boehringler	Werkzeugmaschinen
Emco	Drehbänke und Fräsmaschinen
Sandvik	HM-Wendeplatten
Klenk	Bohrer, Fräser, Reibahlen, Drehstähle
Siemens	Sinumerik CNC-Steuerungen

Tabelle (T019treZ) Firmen Fräsen

Organisationen:	Beschreibung:
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabell (T020treZ) Organisationen Fräsen

7. Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden – Hobeln, Stossen, DIN 8589 Teil 4

Verwandt mit dem Drehen, jedoch mit linearer Zerspanbewegung, dient das Hobeln bzw. das Stossen der Erzeugung grösserer, ebener Bearbeitungsflächen hoher Genauigkeit und Oberflächengüte.

Hobeln und Stossen sind in der Norm zusammengefasst, da beiden Verfahren die gleiche Kinematik zugrunde liegt: Beim Hobeln bewegt sich das Werkzeug über das Werkstück, während dieses sich beim Stossen unter dem Werkzeug hindurch bewegt. Normalerweise werden kürzere Werkstücke gestossen, während bis zu 5 m lange Werkstücke gehobelt werden.

Achtung: Das aus der Holzverarbeitung bekannte Hobeln mit drehendem Messer ist physikalisch gesehen kein Hobeln, sondern Umfangs-Planfräsen!

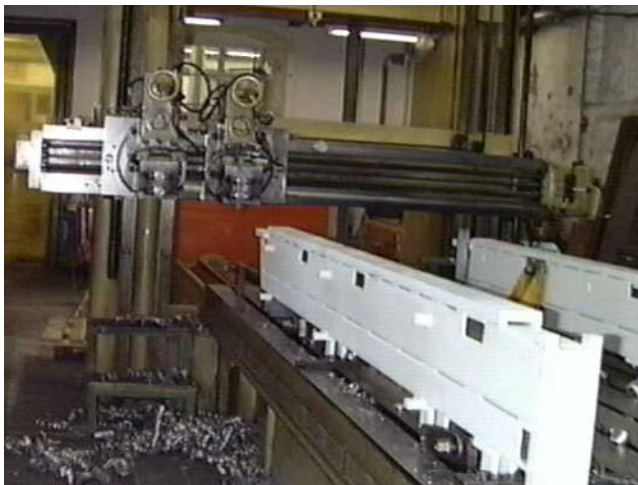


Bild (B062treZ) Hobelmaschine beim Bearbeiten einer geschweissten Führungsbahn mit einer Länge von 2000 mm.

Ein wichtiges Anwendungsgebiet des Hobelns ist die Herstellung grösserer Zahnräder, welche im Wälzhobelverfahren bearbeitet werden. Für Schrägverzahnungen wird die Hobelachse gegenüber der Zahnradachse geneigt.

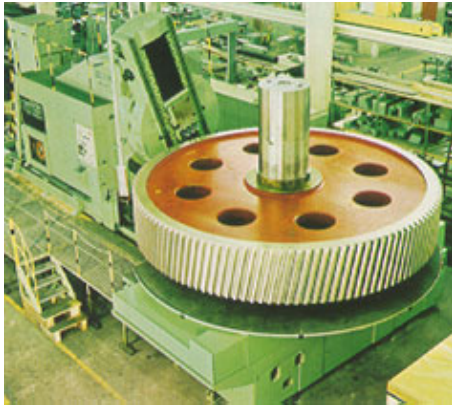


Bild (B063treZ) Grosses Zahnrad (Maag)

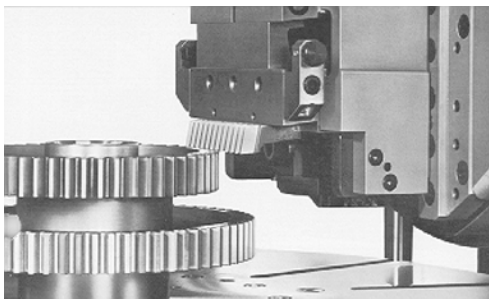


Bild (B064treZ) Kleinere Zahnräder, Hobelkamm gut sichtbar

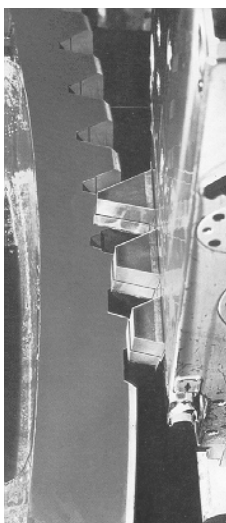


Bild (B065treZ) Schruppen mit Stufenhobelwerkzeug



Bild (B066treZ) Wälzhobelmaschine (Maag)

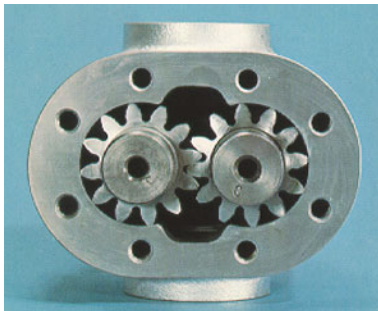


Bild (B067treZ) Zahnradpumpe (Maag)

vorgelagerte Verfahren	verwandte Verfahren	nachgelagerte Verfahren
Drehen	Drehen	Schleifen
	Fräsen	

Tabelle (T021treZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

7.1. Firmen, Links und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
GSM Spares and Maintenance	Reparatur, unterhalt und Verkauf von MAAG-Wälzhobelmaschinen
Pfauter	Wälzhobelmaschinen

Tabelle (T022treZ) Firmen Hoblen

Organisation:	Beschreibung:
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T023treZ) Organisationen Hobeln

8. Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden – Räumen, DIN 8589 Teil 5

Räumen ist ein spanendes Verfahren mit einem mehrzahnigen Werkzeug, dessen Schneidzähne hintereinander liegen. Die Scheidezähne sind so gestaffelt, dass die letzten Zähne das gewünschte Profil aufweisen. Nach einem Durchlauf ist der Arbeitsvorgang beendet und die Werkstückoberfläche ist fertig bearbeitet.

Das Verfahren eignet sich für Seriefertigung mit hoher Toleranz und Oberflächenanforderung.

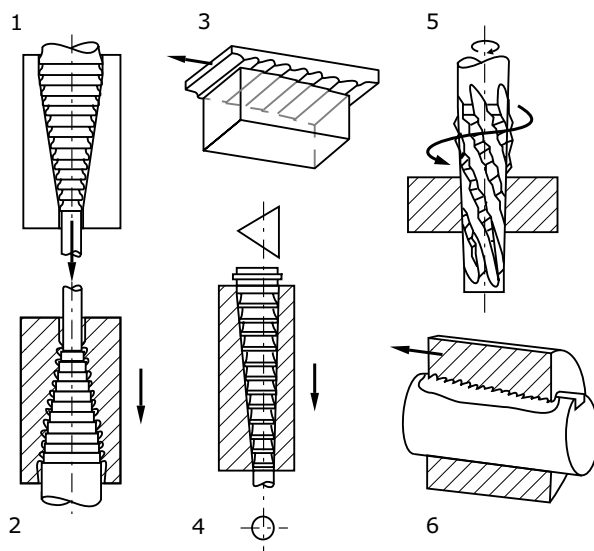


Bild (B069treZ) 1: Innenrundräumen; 2: Aussenrundräumen; 3: Aussenplanräumen; 4: Innen-Profilräumen; 5: Innen-Schraubräumen; 6: Aussen-Nuten-Räumen; A: Werkstück; B: Werkzeug; C: Ausgangsquerschnitt; D: Endquerschnitt

vorgelagerte Verfahren	verwandte Verfahren
Bohren	Feilen

Tabelle (T024treZ) Vorgelagerte und verwandte Verfahren

8.1. Firmen und Organisationen zum Räumen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Brütsch Rüegger	Vertrieb aller Arten von Werkzeugen

Tabelle (T025treZ) Firmen Räumen

Organisation:	Beschreibung:
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T026treZ) Organisationen Räumen

9. Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden – Schleifen (mit rotierendem Werkzeug), DIN8589 Teil 11

Schleifen, engl. Grinding, ist ein spanendes Fertigungsverfahren mit vielschneidigen Werkzeugen und geometrisch unbestimmten Schneiden. Charakteristisch für das Schleifen ist die hohe Geschwindigkeit der Schleifscheibe, welche meist aus eingebetteten Hartstoffkörnern (Korund, Silizium-Karbide, Bornitride) besteht.

Unter den Bearbeitungskräften splittet das Kornmaterial oder es werden ganze Körner und Korngruppen aus der Bindung herausgerissen. Dadurch entstehen zwar neue Schneidkanten, aber bei Profilschleifscheiben verändert sich auch das Profil: die Schleifscheibe muss deshalb wiederholt abgerichtet werden.

Schleifen ist meistens ein Folgeverfahren (nachfolgend auf z. B. Fräsen, Drehen und Wärmebehandlung, z. B. Einsatzhärten) zum Erzielen hoher Mass- und Formgenauigkeit (IT5–6) und kleiner Rauheit (0,2–1,6 µm) und/oder zum Bearbeiten von harten Werkstoffen.



Bild (B070treZ) Geschliffene Gewindelehrdorne (Studer)

9.1. Schleifverfahren

Die wichtigsten Schleifverfahren sind:

- das Planschleifen und
- das Rundschleifen.

9.1.1. Verfahren: Planschleifen

Erzeugung flacher Oberflächen mittels drehender Schleifscheibe und in 2 Achsen hin- und her bewegendem Werkstück.

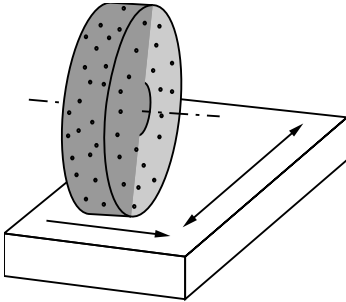


Bild (B071treZ) Planschleifen (Dubbel)

9.1.2. Verfahren: Rundschleifen

Hier drehen sich Schleifscheibe und Werkstück, zusätzlich beschreibt das Werkstück eine Hin- und Herbewegung.

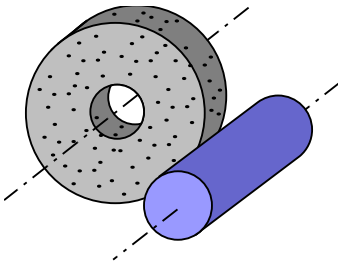


Bild (B072treZ) Rundschleifen (Dubbel)

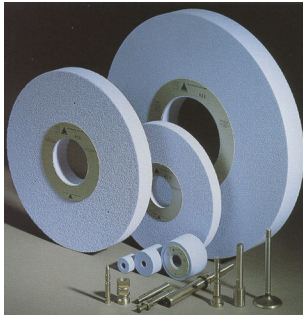


Bild (B073treZ) Schleifscheiben (Winterthur Schleiftechnik)

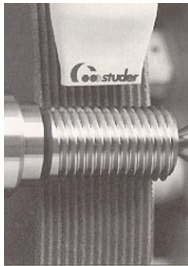


Bild (B074treZ) CNC-Profileschleifen (Studer)



Bild (B075treZ) Schleifen von Saphir-Uhrgläsern (Motion 12/98)

vorgelagerte Verfahren	verwandte Verfahren	nachgelagerte Verfahren
Fräsen	Honen	Montieren
Drehen	Schleifen	
Wärmebehandeln		

Tabelle (T027treZ) vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

9.2. Schleifmaschinen

Das Schleifen erfolgt z. B. auf Flach- bzw. auf CNC gesteuerten Profilschleifmaschinen



Bild (B076treZ) Flachsleifmaschine (Anton Paar)

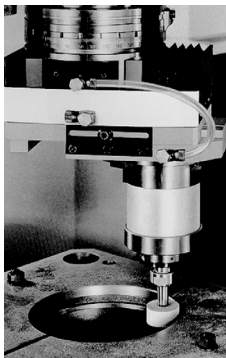


Bild (B077treZ) Koordinatenschleifmaschine



Bild (B078treZ) CNC-Schleifzentrum (G+H)

oder z.B. Rundschleifmaschinen zwischen Spitzen.

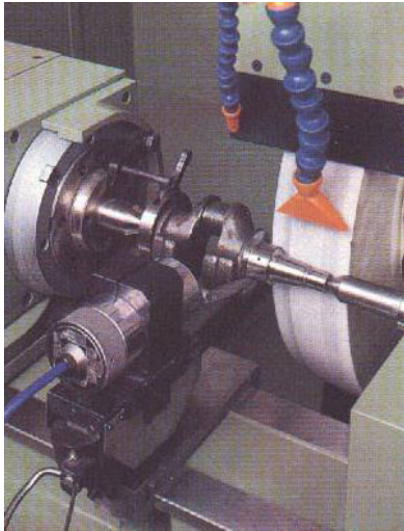


Bild (B079treZ) Rundscheifen zwischen Spitzen in der Praxis (G+H)

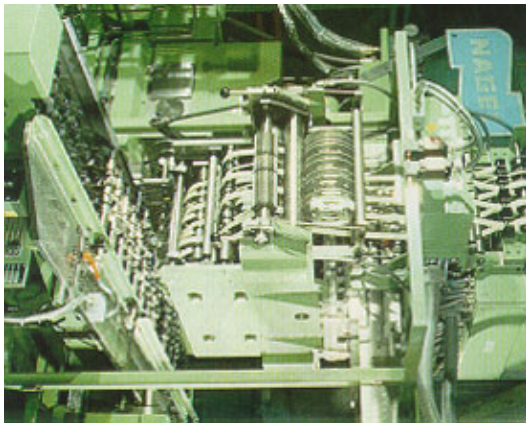


Bild (B080treZ) ... oder Bandfinish von Nocken- und Kurbelwellen in nur 14s (Nagel)

9.3. Konstruktionsrichtlinien

Grundsätzlich zunächst die Vorüberlegung treffen, inwieweit die Funktion eines Bauteils ein Feinbearbeitungsverfahren wie das Schleifen verlangt. Eine ganze Reihe von Füge-, Gleit- und Passflächen lässt sich auch durch Schlichtbearbeitung mit Trennverfahren mit geometrisch definierter Schneide herstellen. Bei der Konstruktion von Einzelteilen und Werkstücken für kleine Serien gelten grundsätzlich folgende Gesichtspunkte:

- Arbeiten mit unprofiliertes Schleifscheibe anstreben.
- Bei Gestaltung der Werkstückformelemente die Maschinenkinematik berücksichtigen (zum Beispiel das Schleifen langer, schlanker Kegel durch Ausschwenken des Obertisches unter Beachtung des Grenzwinkels der Maschine oder kurze steile Kegel bei fliegender Einspannung durch Verstellen des Werkstückspindelstocks).
- Für freien Auslauf der Schleifscheibe sorgen (Auslauf, Einstich).
- Zu schleifende Radien möglichst groß, einheitlich und ohne Abmaße wählen (Schleifscheiben-Kantenverschleiß).
- Dafür sorgen, dass nicht mehrfacher Wechsel der Schleifscheibe erforderlich ist (zum Beispiel für unterschiedlich breite Schleifstellen).
- Länge / Durchmesser-Verhältnis beim Innenrundsleifen muss mit den vorhandenen Schleifspindeln ausgeführt werden können.

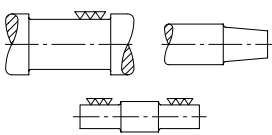
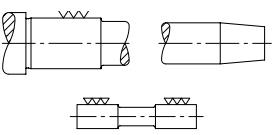
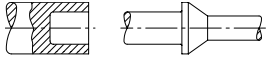
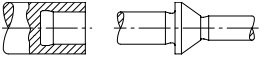
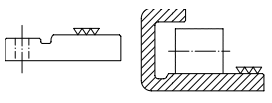
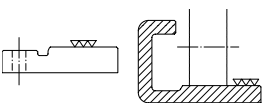
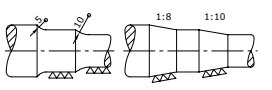
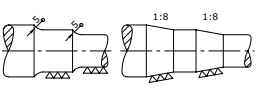
Regel	ungünstig	günstig
Vermeiden von Bundbegrenzungen.		
Vorsehen von Schleifscheibenauslauf		
Anstreben unbehinderten Schleifens durch zweckmäßige Anordnung der Bearbeitungsflächen.		
Bevorzugen gleicher Ausrundungsradien (wenn kein Auslauf möglich) und Neigungen an einem Werkstück.		

Tabelle (T028treZ) Gestaltungsregeln für die Schleifbearbeitung

Anstreben eines unbehinderten Schleifens durch eine zweckmäßige Anordnung der Bearbeitungsflächen. Dabei ist durch konstruktive Maßnahmen dafür zu sorgen, dass Freiraum für leistungsfähige Schleifscheiben gegeben ist.

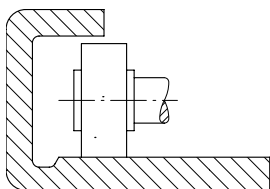


Bild (B180treZ) Anstreben von unbehindertem Schleifen 1

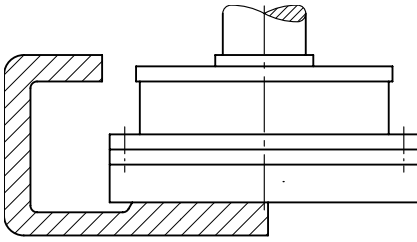


Bild (B181treZ) Anstreben von unbehindertem Schleifen 2

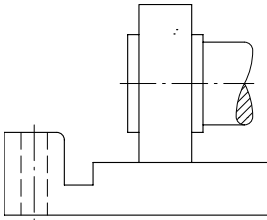


Bild (B182treZ) Anstreben von unbehindertem Schleifen 3

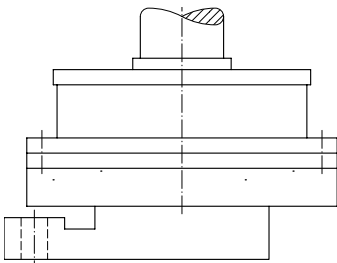


Bild (B183treZ) Freiraum für leistungsfähige Schleifscheiben

Speziell beim Flachsleifen ist dafür Sorge zu tragen, dass die Schleifflächen möglichst auf gleicher Höhe liegen. Damit ist der Einsatz von breiten und leistungsfähigen Schleifscheiben oder des wirtschaftlichen Stirnschleifverfahrens möglich. Unbedingt seitlichen Auslauf für die Schleifscheibe vorsehen.

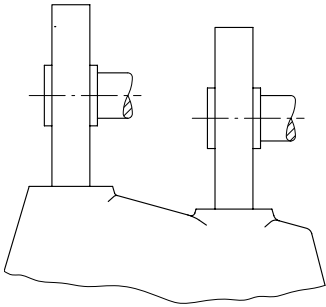


Bild (B184treZ) Anstreben gleicher Höhen der Schleifflächen

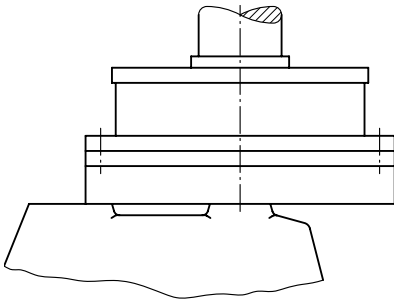


Bild (B185treZ) Anstreben gleicher Höhen der Schleifflächen

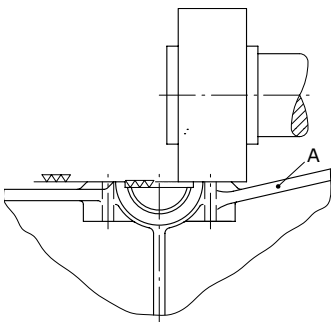


Bild (B186treZ) Anstreben gleicher Höhen der Schleifflächen

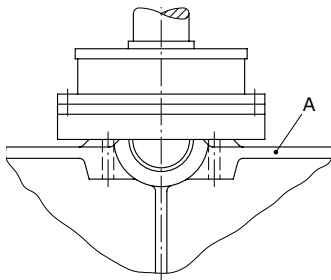


Bild (B187treZ) Anstreben gleicher Höhen der Schleifflächen und seitlichen Auslauf vorsehen

Speziell für das Flachsleifen gelten noch folgende Gesichtspunkte:
genügend große, ebene Auflagefläche für den Einsatz von Magnet-
spannzeugen schaffen, Teile möglichst so konstruieren, dass mehrere
Werkstücke hintereinander gespannt und bearbeitet werden können.

9.4. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Geibel und Hotz Schleiftechnik (G+H)	Schleifmaschinen
Mühlmeier GmbH	Mahlkörper
Nagel	Banschleifen Superfinish Honen
WST Winterthur Schleiftechnik AG	Schleifscheiben
Studer AG	Schleifmaschinen
Maag (GSM Spares and Maintenance)	Zahnradhobel-, Schleif- und Mess- maschinen

Tabelle (T029treZ) Firmen Schleifen

Organisation:	Beschreibung:
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
www.metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T030treZ) Organisationen Schleifen

10. Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden – Honen, DIN 8589 Teil 14

Honen, eng. Honing, ist wie Läppen ein Feinstbearbeitungsverfahren, d.h. es werden damit höchste Formgenauigkeiten ($< IT 5$) und feinste Oberflächen ($0,1 - 0,8 \mu\text{m}$) erzielt. Allerdings ist die Schnittbewegung nicht chaotisch, sondern besteht aus genau 2 Komponenten, wobei mindestens eine hin- und hergehend ist. Definitionsgemäss entstehen beim Honen sich in einem bestimmten Winkel überkreuzende Spuren.

10.1. Honverfahren

Wichtige Honverfahren sind:

- Rundhonen
- Planhonen (Flachhonen)

10.1.1. Verfahren: Rundhonen

Bohrungen werden mit einem drehenden Honwerkzeug durch auf und ab Bewegungen der Spindel gehont.



Bild (B081treZ) Rundhonen (Nagel)

10.1.2. Verfahren: Planhonen (Flachhonen)

Sehr ähnlich dem Läppen, nur mit definierter Schleifrichtung werden ebene Flächen erzeugt.

Innen-/Aussendurchmesser als auch flache Bauteile können durch Honen feinstbearbeitet werden. Typische Beispiele für die Anwendung von Honen ist die Bohrung von Zylindern der Verbrennungsmotoren oder das Feinstbearbeiten der Bohrungen von Ventilblöcken. Das Honwerkzeug wird durch eine oszillierende Bewegung in, um und auf dem Bauteil bewegt. Rauheitswerte von $0.1\text{--}0.2\ \mu\text{m}$ sind erreichbar. In den Kerben setzt sich gerne Öl fest, was zu einem Schmiereffekt führt. Daher eignet sich das Honen so gut für Zylinder von Verbrennungsmotoren.



Bild (B082treZ) Schliffbild einer gehonten Oberfläche

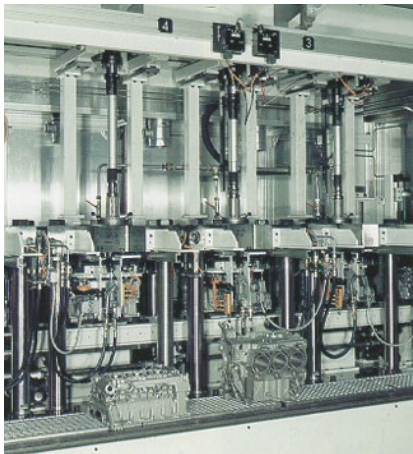


Bild (B083treZ) Transfer-Honmaschine für Zylindermotoren (Nagel)

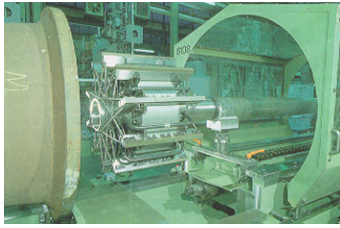


Bild (B084treZ) Honen grosser Durchmesser (Nagel)



Bild (B085treZ) Honwerkzeuge (Nagel)



Bild (B086treZ) Pleuelstangen, Zylinder von Motoren, Hydraulik und ABS sind typische Anwendungsgebiete des Honens (Nagel)

10.2. Firmen und Organisationen zum Honen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Nagel	Honen, Langbohren, Bandfinish
Abrading Methods	Bietet diverse Finishingverfahren an, USA
Stähli	Läpptschnik, Läppmaschinen, Flachhonen

Tabelle (T031treZ) Firmen Honen

Organisation:	Beschreibung:
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
www.metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T032treZ) Organisationen Honen

11. Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden – Läppen, DIN 8589 Teil 15

Das Läppen ist ein spanabhebendes Feinstbearbeitungs-Verfahren zur Erzeugung hochpräziser Oberflächen ($0,05 - 0,2 \mu$). Das Läppgemisch, eine Paste oder Flüssigkeit mit gelöstem Korn, wird auf eine äusserst plane Läppscheibe gegeben und das zu läppende Werkstück so über die Scheibe geführt, dass die Körner eine möglichst unregelmässige Schneidbahn vollführen. Insofern unterscheidet sich das Läppen vom Honen und Schleifen, wo immer eine eindeutig feststellbare Schleifrichtung festzustellen ist. Läppen ist sowohl für ebene Flächen als auch für Freiformflächen einsetzbar. Es wird vielfach dort eingesetzt, wo zwei Teile enge Fügepassungen eingehen müssen (z. B. für Hydraulikteile, Dichtungen). Auch CD-Werkzeuge und phototechnische Teile werden geläppt, wie das [Video](#) (Film: Stähli Läpp-Technik) zeigt.

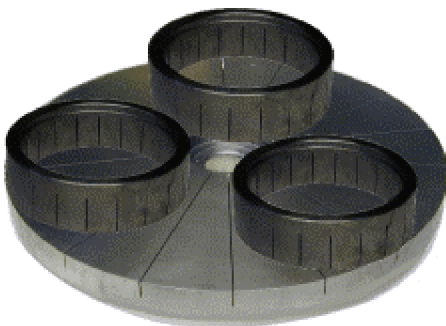


Bild (B087treZ) Rotierende Läppscheibe mit ebenfalls rotierenden Käfigen für die Werkstücke (Amsler)

11.1. Wichtige Läppverfahren

Planläppen: Einseitig plane Werkstücke werden mit einer Scheibe geläppt. Hochparallele Flächen werden zwischen zwei Scheiben unter Druck geläppt.

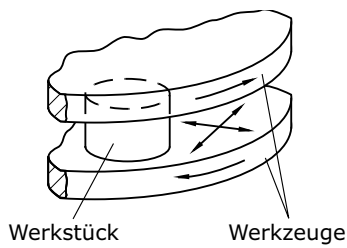


Bild (B088treZ) Planläppen

Seiten-Aussen-Rundläppen: Zylindrische Teile werden zwischen zwei Scheiben in einem Käfig rund geläppt.

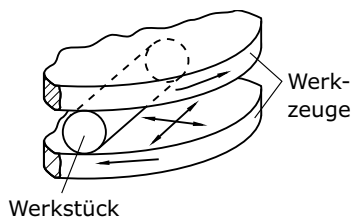


Bild (B089treZ) Seiten-Aussen-Rundläppen

vorgelagerte Verfahren	verwandte Verfahren	nachgelagerte Verfahren
	Honen	Keine – Läppen ist ein Finishing-Verfahren
	Schleifen	

Tabelle (T033treZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

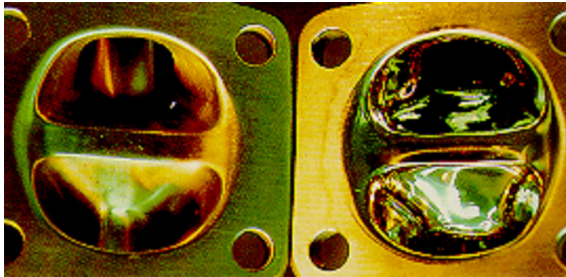


Bild (B090treZ) Vergleich zwischen einer vorbereiteten und einer geläppten Freiformfläche

11.2.Firmen, Links und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Stähli	Läpptschnik, Läppmaschinen
Amsler	Läppmaschinen
Abrading Methods	Bietet diverse Finishingverfahren an, USA
Kemet	Läppmaschinen, Diamantpulver, UK

Tabelle (T034treZ) Firmen Läppen

Organisation:	Beschreibung:
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
www.metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T035treZ) Organisationen Läppen

12. Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden – Strahlspanen, DIN 8200

Die hier beschriebenen Verfahren sind relativ neue Verfahren, die noch ein grosses Entwicklungspotential bergen. Insbesondere die Möglichkeit, direkt vom CAD in die Fertigung zu gehen, machen die Verfahren interessant. Aber auch Präzision und Rapid-Prototyping-Fähigkeit sprechen fürs Strahlspanen. Da grundsätzlich alle Materialien geschnitten werden können, entfällt hier eine Beschreibung der Werkstoffe.

12.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Einsatzgebiet Wasserstrahl: Munitionsrecycling, Nahrungsmittel, Granit, Marmor, Hygieneprodukte und Innenverkleidungen von Fahrzeugen.

Einsatzgebiet Laser: Präzisionsteile aller Art.



Bild (B096treZ) Wasserstrahlgeschnittener Schriftzug (Laslo)



Bild (B097treZ) Wasserstrahlgeschnittenes künstliches Hüftgelenk (Laslo)

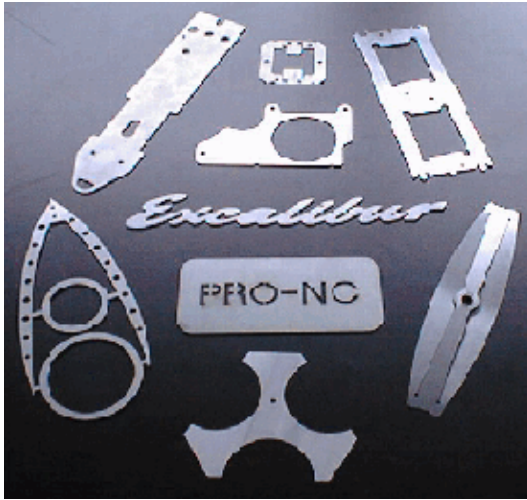


Bild (B098treZ) Laserschnitt-Anwendungen (Lmb GmbH)



Bild (B099treZ) Lebensmittel eignen sich gut für's Wasserstrahl-Schneiden (Ingersoll-Rand)

12.2. Verfahren

Die wichtigsten Verfahren sind:

- Wasserstrahl- und
- Laserscheiden.

12.2.1. Verfahren: Wasserstrahlschneiden

Ein Wasserstrahl mit oder ohne Zusatz schneidet grundsätzlich jedes Material ohne jede thermische Belastung.



Bild (B091treZ) Wasserstrahlschneiden (Ingersoll-Rand)

Wasserstrahlschneiden ist ein Trennverfahren, wo hochverdichtetes Wasser mit ca. 4000 bar auf einen nahezu beliebigen Werkstoff trifft. Bei sehr harten Werkstoffen wie Metallen und Stein wird dem Wasser ein Abrasivmittel beigemischt, um den Schneidvorgang zu beschleunigen. Weichere Materialien wie Lebensmittel, Leder und Schaumstoff werden mit purem Wasser geschnitten. Da der Wasserstrahl genau senkrecht auf das Werkstück trifft, ist keine Einspannung nötig. So können auch sehr weiche Materialien wie Schaumstoff wasserstrahlgeschnitten werden. Es existiert auch ein Wasserstrahlverfahren mit kleineren Drücken (bis 1000 bar), welches viel einfacher und günstiger, dafür nicht so sauber schneidet.

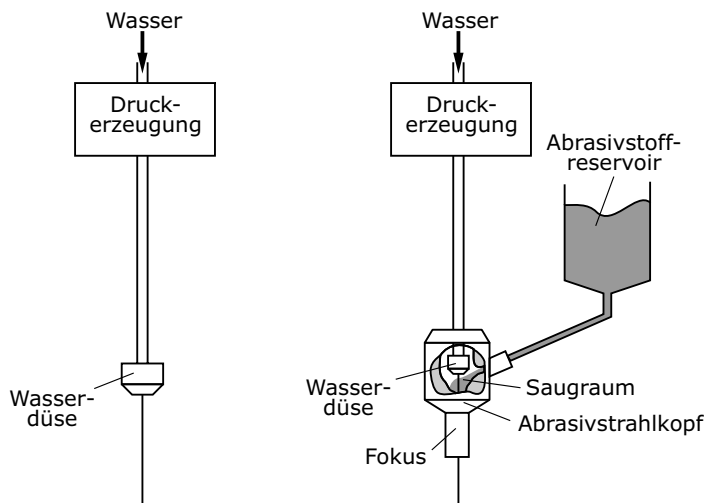


Bild (B093treZ) Schema Wasserstrahlschneiden

Die Düsen bestehen aus Edelstein, da sie extremen Belastungen ausgesetzt sind. Schliesslich tritt das Wasser mit mehrfacher Schallgeschwindigkeit aus der Düse, welche nur wenige 1 / 10 mm Durchmesser aufweist. Es versteht sich von selbst, dass das eingesetzte Wasser sehr sauber sein muss, um die Anlage nicht zu beschädigen und einen sauberen Schnitt zu ermöglichen.



Bild (B094treZ) Düsen (Ingersoll-Rand)

12.2.2. Verfahren: Laserschneiden

Ein dünner Laserstrahl schneidet eine Vielzahl von Materialien durch lokale Erwärmung.

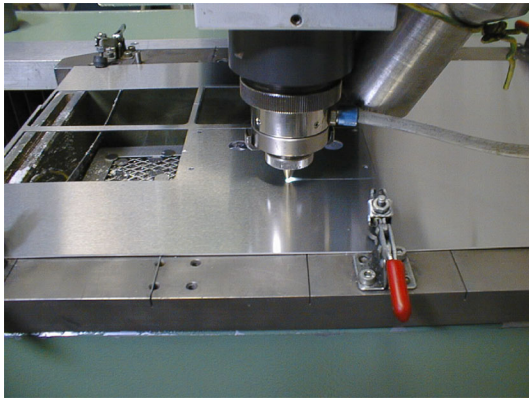


Bild (B092treZ) Laserschneiden (Lmb GmbH)

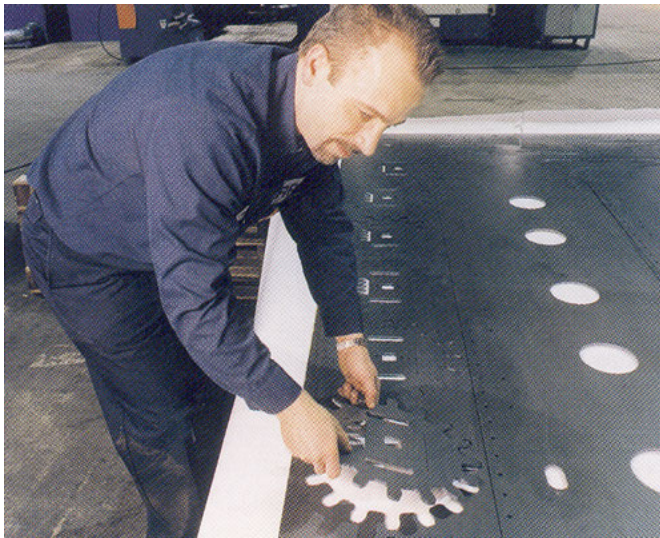


Bild (B198treZ) Entnahme der fertigen Teile

Beim Lasertrennen wird Lichtenergie in einem optischen Resonator erzeugt (Lichtverstärkung durch induzierte Emission von Strahlung) und durch Absorption in Form von Wärme an den Werkstoff abgegeben.

Am häufigsten verwendet wird der CO₂-Laser. Dieser Laser wird zu 90% bei Materialbearbeitungs-Prozessen eingesetzt, bedingt durch seine hohen Leistungen (heute industrietauglich bis 10 kW). Zunehmende Bedeutung gewinnt der YAG Festkörperlaser, dessen Strahlung wegen seiner kleineren Wellenlänge von den meisten Metallen besser absorbiert wird. Abhängig von der Laserleistung können Metalle bis zu einer Dicke von 20 mm (für dünnere Bleche) mit einer Geschwindigkeit von bis zu 10 m/min geschnitten werden. Die Schneidgeschwindigkeit und maximale Dicke nimmt bei Stahlblechen mit zunehmendem Gehalt an Legierungsbestandteilen ab. NE-Metalle werden bei Al bis rund 6 mm, Cu bis rund 2.5 mm und Nichtmetalle bis 30 mm geschnitten.

Der in die Tiefe des Materials fokussiert gerichtete, thermische Abtragvorgang bewirkt bei einer Vorschubbewegung eine enge Schnittfuge 0.1–0.3 mm im Material. Die Trennfugen erhalten immer eine Wärmebeeinflussung und, falls nicht inerte Schutzgase eingesetzt werden, auch eine Oxydation.

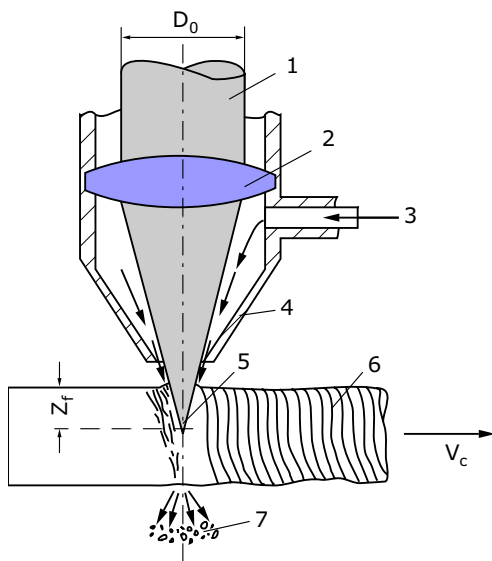


Bild (B095treZ) Prinzip des Lasertrennens

- 1: Laserstrahl (Wellenlänge, Leistung, Mode, Pulsdauer);
- 2: Fokussierlinse (Brennweite); 3: Schneidgas;
- 4: Schneiddüse; 5: Fokussierpunkt (Durchmesser);
- 6: Werkstück; 7: ausgetriebenes Material

Die zur Erzeugung einer kontinuierlichen Schnittfuge erforderliche Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück wird in der Praxis auf unterschiedliche Arten erzeugt. Zum Lasertrennen kleiner, einfach zu handhabender Bauteile werden diese vorzugsweise unter dem ortsfesten Laserstrahl beispielsweise mit Hilfe eines X/Y-Koordinatentisches bewegt. Zur Laserbearbeitung grösserer Werkstücke wird der Schneidkopf über dem ruhenden Werkstück bewegt („fliegende Optik“). Bei YAG-Laser kann der Lichtstrahl in Glasfasern geleitet werden. Der Bearbeitungsprozess wird von einer Vielzahl unterschiedlicher Prozessparameter beeinflusst. Die maximal erreichbare Schneidgeschwindigkeit ist von der Laserleistung und der Materialstärke sowie dem Material abhängig.

Vorteile	Nachteil
Flexibilität	ungleichmässig schöne Schnittkante
Für grössere Dicken geeignet	Wärmebeeinflussung
Schnitt kann überall angesetzt werden	Wärmestau in Konturspitzen
	langsam

Tabelle (T036treZ) Vorteile, Nachteile Laserschneiden

vorgelagerte Verfahren	verwandte Verfahren	nachgelagerte Verfahren
Walzen		Biegen

Tabelle (T037treZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

12.3.Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Laser-Materialbearbeitungs GmbH	LASER-Schneiden
Prokutec AG	Wasserstrahlschneiden
Sigla	Wasserstrahlschneiden CH
Laslo GmbH	Wasserstrahlschneiden
Ingersoll-Rand	Wasserstrahl-Maschinen
Aquacut	Wasserstrahlschneiden
Aqua Stenger	Wasserstrahlschneiden/Reinigen
CutTec	Wasserstrahlschneiden CH
Trumpf	Stanzen und Schneiden mit LASER
Water Jet Sweden	Wasserstrahl-Maschinen
Lasag	LASER-Schneiden/Schweissen
Bystronic	Laser- und Wasserstrahlschneiden

Tabelle (T038treZ) Firmen Strahlspanen

Organisation:	Beschreibung:
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
www.metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband
Waterjet Technology Association	Amerikanischer Verband

Tabelle (T039treZ) Organisationen Strahlspanen

13. Abtragen – Thermisches Abtragen, DIN 8590

Beim Abtragen werden einem festen Körper durch Wärmeprozesse Stoffteilchen abgetrennt und diese auf mechanischem Weg entfernt.

13.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Erodieren wird hauptsächlich für Werkzeuge verwendet.

Plasmaschneiden bietet sich dort an, wo nicht autogen geschritten werden kann: Hitzebeständige und nichtrostende Bleche, dünne Bleche bis 10 mm.

Schmelzschnitten mit Heizelement ist ein wenig kapitalintensives Verfahren zum Schneiden von Schaumstoff.

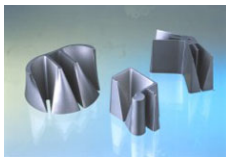


Bild (B105treZ) Drahterodierteile (Agie)



Bild (B106treZ) Drahterodierteile (Agie)



Bild (B107treZ) Drahterodierteil (Agie)

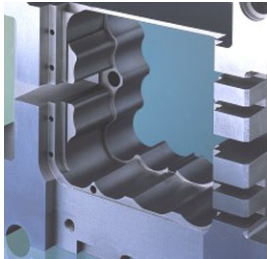


Bild (B108treZ) Drahterodiertteil (Agie)



Bild (B109treZ) Autogen geschnittene Teile (Techno Stahl)



Bild (B193treZ) Senkerodiertteile

13.2. Verfahren

Zum Thermischen Abtragen gehören eine Menge Verfahren, die unterschiedlicher nicht eingesetzt werden könnten, nämlich:

- das Schmelzschnitten mit Heizelement,
- das Plasmaschmelzschnitten,
- das funkenerosive Abtragen (Erodieren),
- das Senkerodieren und
- das Drahterodieren.

13.2.1. Verfahren: Schmelzschnitten mit Heizelement

Ein Heizdraht erwärmt das vor ihm liegende Material. Kunststoffschäume werden so geschnitten.

13.2.2. Verfahren: Plasmaschmelzschnitten

Dieses Verfahren eignet sich zum Schneiden von legierten Stählen (hochlegierte Stähle bis max. 70 mm) und NE-Metallen (Al max. 100 mm, Cu max. 20 mm). Ein Plasmastrahl tritt mit hoher Energiedichte und Temperaturen um 25'000 K aus der Düse.

13.2.3. Verfahren: Funkenerosives Abtragen (Erodieren)

Elektrisch erzeugte Funken tragen kleinste Partikel ab.

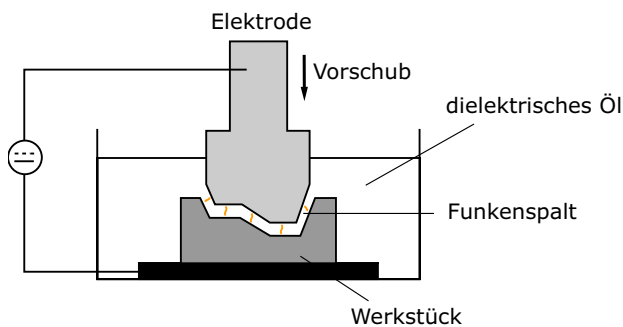


Bild (B101treZ) Schema Erodieren

Das Abtragprinzip der Funkenerosion (EDM bedeutet **E**lectrical **D**ischarge **M**achining) beruht auf der erodierenden Wirkung elektrischer Gasentladungen. Dabei wird jedesmal ein mikroskopisch kleines Stoffvolumen abgetragen. Eine makroskopische Formgebung erfolgt durch wiederholte Funkenentladungen hoher Frequenz zwischen zwei

Elektroden. Das Werkzeug bildet dabei die eine, das Werkstück die andere Elektrode.

Die beiden Elektroden sind durch ein Dielektrikum, das aus einem Kohlenwasserstoff oder aus deionisiertem Wasser besteht, nicht leitend getrennt. Nach Anlegen einer Spannung zwischen den Elektroden wird die Durchschlagsfestigkeit des Dielektrikums örtlich überschritten, so dass ein Funkendurchschlag eintritt, der durch Verdampfung an den Werkstückoberflächen kleine Krater erzeugt. Die Überlagerung dieser Krater ergibt die typische Struktur funkenerosiv bearbeiteter Flächen. Zum Erzeugen räumlicher Formen wird meist das funkenerosive Senken, für Durchbrüche überwiegend das funkenerosive Schneiden (mittels eines Messingdrahtes) angewendet.



Bild (B102treZ) Drahterodiermaschine (Agie)

13.2.4. Verfahren: Senkerodieren

Hier spielen vor allem *CNC-Senkerodierprozesse* eine Rolle, wobei ein Standard-Werkzeug maschinengesteuert die Bahnkurve auf dem Bauteil abfährt und auf dem Verfahrensweg kontinuierlich Material abträgt (langsamer Prozess). Sodann gibt es Senkerodiermaschinen, bei denen das Werkzeug die Negativform des herzustellenden Bauteiles aufweist. Durch kontinuierliches Absenken des Werkzeuges wird direkt das Bauteil geformt. Mittels dreidimensional geformter Elektroden werden die erwünschten Teilegestaltungen erzielt. Die Abtragrate beträgt zwischen $1 \text{ mm}^3/\text{min}$ beim Feinschlichten und $15 \text{ mm}^3/\text{min}$ beim Schruppen.

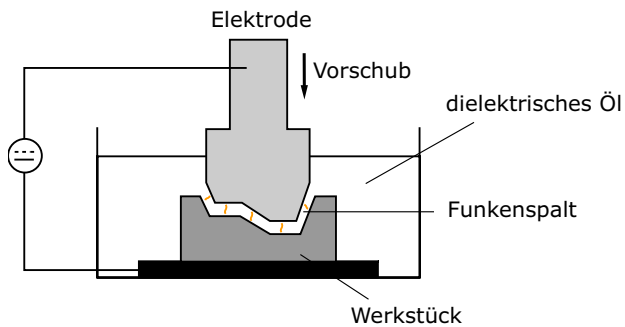


Bild (B101treZ) Funktionsprinzip einer Senkerodiermaschine mit Werkzeugelektrode, welche das Negativ des Werkstückes darstellt

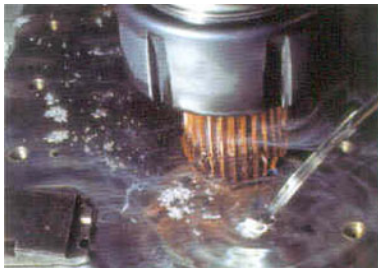


Bild (B103treZ) Nahaufnahme der Elektrode und des Elektrolyten (Pollmann)

Der Bearbeitungsprozess muss so gesteuert werden, dass der Abtrag am Werkstück möglichst hoch und an der Werkzeugelektrode möglichst gering ist. Die Funkenerosion ist heute bei vielen Bearbeitungsaufgaben im Werkzeugbau von zentraler Bedeutung. So werden Werkzeuge für das Gesenkschmieden, Druck- und Spritzgiessen etc. vielfach durch dieses Verfahren hergestellt. Ein [Video](#) (Film: +GF+) zeigt unter anderem die Herstellung einer Spritzgiessform für eine 230V-Steckdose

In den vergangenen Jahren hat sich das Anwendungsspektrum der Funkenerosion durch die Entwicklung neuer hochharter und hochabrasiver, nichtmetallischer, jedoch leitender Werkstoffe erheblich erweitert.

13.2.5. Verfahren: Drahterodieren

Das Werkzeug bildet hier ein Draht, welcher CNC-gesteuert Konturen im Bauteil abfährt. Mit diesem Verfahren werden z. B. Werkzeuge für das Strangpressen hergestellt.

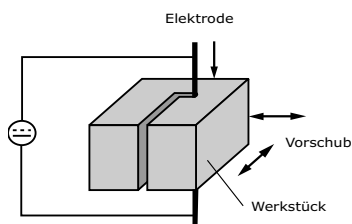


Bild (B104treZ) Prinzip des Drahterodierens

Das funkenerosive Abtragen eignet sich prinzipiell für alle leitenden Materialien, wird jedoch vor allem für hochlegierte bzw. gehärtete Stähle bzw. für Hartmetalle eingesetzt. Es resultiert eine gleichmässige Oberfläche und einbaufertige Teile. Nachteilig ist die geringe Abtragleistung, die Massabweichungen durch Elektrodenverschleiss und die geringe Gefügeveränderung an der Oberfläche.

13.3.Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Techno Stahl	Blechschnitten, u.A. mittels Plasma
Aldrovandi	Drahterosion, Senkerodieren, Werkzeugbau
Eroform	Drahterosion, Senkerodieren, Werkzeugbau
Agie Charmilles	Draht- und Senkerodiermaschinen

Tabelle (T040treZ) Firmen Thermisches Abtragen

Organisation:	Beschreibung:
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
www.metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband
Eisen-, Blech- und Metallverarbeitende Industrie	Wirtschaftsverband

Tabelle (T041treZ) Organisationen Thermisches Abtragen

14. Abtragen – Chemisches Abtragen, DIN 8590

Beim Chemischen Abtragen werden Stoffteilchen durch chemische Reaktion mit dem Wirkmedium umgesetzt. Die umgesetzten Stoffteilchen sind entweder flüchtig oder lassen sich leicht entfernen. Mindestens das Werkstück oder das Wirkmedium sind nichtleitend.

Zum Chemischen Abtragen gehört das *Thermisch-chemisches Entgraten*. In diese Untergruppe ist TEM (Thermische-Entgrat-Methode) einzuordnen. Bei diesem Verfahren wird die Reaktionswärme (2 500–3 500°C während 20 μ s) einer Knallgasexplosion zum Entgraten von Werkstücken verwendet. Werkstücke aus Metall oder auch Gummi, Kunststoff o.ä. werden als Schüttgut in einen Entgratbehälter eingefüllt. Das Gas dringt in alle Hohlräume ein, so dass es mit Sicherheit alle Grate an und in den Werkstücken erreicht.

14.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Potenzielle Einsatzgebiete für TEM: Spanabhebend bearbeitete Teile, Hydrauliksysteme



Bild (B112treZ) Teilebeispiele (Moser Entgratung)



Bild (B113treZ) spanend bearbeitetes Bauteil vor und nach der Behandlung mit TEM (Moser Entgratung)



Bild (B111treZ) TEM-behandelte Werkstücke weisen einen Niederschlag auf, welcher von den verdampften Gräten herrührt (Moser Entgratung)

14.2.Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Moser Entgratung	Thermisches Entgraten
Bosch	TEM-Maschinen

Tabelle (T042treZ) Firmen Chemisches Abtragen

Organisation:	Beschreibung:
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
www.metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband
Eisen-, Blech- und Metallverarbeitende Industrie	Wirtschaftsverband

Tabelle (T043treZ) Organisationen Chemisches Abtragen

15. Abtragen – Elektrochemisches Abtragen, DIN 8590

Zum Elektrochemischen Abtragen gehört: Elektrochemisches Formabtragen (Elysieren). Elysieren ist das elektrochemische Abtragen metallischer Werkstoffe. Das Werkstück wirkt dabei als Anode und das Werkzeug als Kathode an eine externe Spannung geschaltet. Dazwischen befindet sich das elektrolytische Wirkmedium z. B. Kochsalzlösung. Das System Werkstück-Elektrolyt-Werkzeug bildet eine elektrolytische Zelle, in der die Anode, d. h. das Werkstückmaterial, aufgrund von Ladungsaustauschvorgängen in Lösung geht. An der Kathode kommt es lediglich zu einer Entladung der Kationen; es entsteht Wasserstoff. Somit verändert sich die Form des Werkzeuges nicht. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt rund 30 mm/min.

16. Zusammenfassung

Trennverfahren lassen sich aufteilen in:

- Scherschneiden,
- Messerschneiden,
- Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden,
- Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden und
- Abtragen.

Beim *Scherschneiden* bewegen sich zwei Schneiden aneinander vorbei und zerteilen so das Werkstück ohne Material abzutragen. Beim *Messerschneiden* wird das Werkstück von einer einzigen Schneide zerteilt.

Zum *Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden* gehört:

- Drehen,
- Bohren, Senken, Reiben,
- Fräsen,
- Hobeln, Stossen und
- Räumen

Das Werkzeug hat eine genaue, definierten Geometrie. *Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden* umfasst:

- Schleifen
- Honen
- Läppen
- Wasserstrahl- und Laserschneiden

Das Werkzeug hat während des Bearbeitens eine geometrisch nicht genau definierte oder sich sogar ändernde Geometrie. *Abtrageverfahren* basieren auf thermischen, chemischen oder elektro-chemischen Prozessen. *Thermisch abgetragen* wird, indem vom Werkstück durch (Funken-) Erosion, Schmelzen oder Verdampfen Stoffteilchen abgetrennt werden. *Chemisches Abtragen* geschieht durch eine Reaktion von Stoffteilchen des Werkstückes mit einem Wirkmedium. *Elektro-chemisches Formabtragen* (Elysieren) liegen Ladungsaustauschvorgänge zugrunde, die eine Auflösung des Werkstückmaterials bewirken. Das Werkstück wird als Anode, das Werkzeug als Kathode in einem elektrolytischen Wirkmedium an eine externe Spannung geschaltet.

Verständnisfrage 1

Erklären Sie den Unterschied zwischen Stanzen und Feinschneiden!

Verständnisfrage 2

Listen Sie einige Konstruktionsrichtlinien des Stanzens auf!

Verständnisfrage 3

Was bezeichnet man als Spitzenweite und Spitzenhöhe von Drehmaschinen?

Verständnisfrage 4

Listen Sie Konstruktionsrichtlinien für das Drehen auf!

Verständnisfrage 5

Was ist eine Reibahle?

Verständnisfrage 6

Listen Sie verschiedene Spannmöglichkeiten beim Fräsen auf!

Verständnisfrage 7

Listen Sie Konstruktionsrichtlinien für das Fräsen auf!

Verständnisfrage 8

Was ist der Unterschied zwischen Hobeln und Stossen?

Verständnisfrage 9

Was ist der grundlegende technologische Unterschied zwischen Fräsen und Schleifen?

Verständnisfrage 10

Erklären Sie das Honen!

Verständnisfrage 11

Für welche Anwendungen wird das Wasserstrahlschneiden eingesetzt, wo sehen sie Vorteile zum Laserschneiden?

Verständnisfrage 12

Erklären Sie das Senkerodieren; wo wird es eingesetzt?

Antwort 1

Beim Feinschneiden wird die Platine zusätzlich durch einen Sickenring gehalten und ein Gegenstempel verhindert das Durchbiegen. Die Schnittfläche und die Toleranzen sind qualitativ höherwertig.

Antwort 2

Siehe Kapitel 2.1.6 „[Allgemeine Konstruktionsrichtlinien Trennen](#)“

Antwort 3

Mass für die maximale Länge und den maximalen Durchmesser des Drehteils

Antwort 4

Siehe Kapitel 3.1.5 „[Konstruktionsrichtlinien Drehen](#)“

Antwort 5

Eine Reibahle wird in der Regel anschliessend an das Bohren eingesetzt und dient zur Verbesserung der Toleranz und Oberflächenqualität.

Antwort 6

- Spannfutter
- Spannvorrichtungen
- Magnetplatten

Antwort 7

Siehe Kapitel 3.3.1 „[Konstruktionsrichtlinien Fräsen](#)“

Antwort 8

- beim Hobeln bewegt sich das Werkstück
- beim Stossen bewegt sich das Werkzeug

Antwort 9

Beim Fräsen bearbeitet eine bestimmte, beim Schleifen eine unbestimmte Schneide das Werkstück.

Antwort 10

- Das Honwerkzeug macht oszillierende Bewegungen, meist in zwei Richtungen und erzeugt durch feinstes Abtragen eine Oberflächen- und Toleranzqualität höchster Güte.
- Es wird Rundhonen und Planhonen unterschieden.

Antwort 11

- zum Trennen von z. B. Blechen oder Steinplatten
- schneiden von Leder
- trennen von gefrorenen Lebensmitteln
- heute werden auch chirurgische Anwendungen geprüft
- Vorteil zum Laserschneiden zum Beispiel: keine Wärmeeinwirkung

Antwort 12

- Elektrode, welche das Werkzeug darstellt, fährt in dielektrischem Bad gegen das Werkstück. Entladungen tragen das Material ab.
- Einsatzgebiet z. B. Herstellung von Druckgusswerkzeugen

Publikationsverzeichnis – Literatur

- [1] Awiszus, Birgit; Bast, Jürgen und Dürr, Holger (2004): Grundlagen der Fertigungstechnik; Fachbuchverlag, Leipzig
- [2] Beitz, Wolfgang und Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.) (2001): Doppel - Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [3] Fischer, Ulrich (2002): Tabellenbuch Metall; Europa Lehrmittel, Hahn
- [4] Hintzen, Hans; Laufenberg, Hans und Matek, Wilhelm (1998): Konstruieren und Berechnen; Vieweg-Verlag, Wiesbaden
- [5] Hintzen, Hans; Laufenberg, Hans und Kurz, Ulrich (2002): Konstruieren, Gestalten, Entwerfen; Vieweg-Verlag, Wiesbaden
- [6] Koether, Reinhard und Rau, Wolfgang (2004): Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure; Fachbuchverlag, Leipzig
- [7] Pahl, Gerhard und Beitz, Wolfgang (2004): Konstruktionslehre; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg

Publikationsverzeichnis – Weblinks

Firmen:

- Feintool: <http://www.feintool.ch>
- Schuler Pressen: <http://www.schuler.de>
- Osterwalder: <http://www.osterwalder.com>
- Amada: <http://www.amada.de>
- Pullmax: <http://www.pullmax.at>
- Mikron: <http://www.mikron.ch>
- Tornos Bechler: <http://www.tornos.ch>
- Index (Traub): <http://www.index-werke.de>
- Boehringler: <http://www.boehringler-werkzeugmaschinen.de>
- Emco: <http://www.emco.co.at>
- Sandvik: <http://www.sandvik.com>
- Klenk: <http://www.klenk-tools.de>
- IAV Drehteile: <http://www.iav-drehteile.de>
- Romai GmbH: <http://www.romai.de>
- Brütsch Rüegger: <http://www.b-r.ch>
- Nagel: <http://www.nagel.com>
- Siemens: <http://www.siemens.ch>
- GSM Spares and Maintenance: <http://www.gsm-brunold.ch>
- Pfauter: <http://www.pfauter.de>
- Geibel und Hotz Schleiftechnik (G+H):
<http://www.gh-grinding.com>
- Mühlmeier GmbH: <http://www.muehlmeier.de/grinding>
- Nagel: <http://www.nagel.com>
- WST Winterthur Schleiftechnik AG:
<http://www.rappold-winterthur.com>
- Studer AG: <http://www.studerag.ch>
- Maag (GSM Spares and Maintenance):
<http://www.gsm-brunold.ch>
- Abrading Methods: <http://www.lapping.com>
- Stähli: <http://www.stahli.com>
- Amsler: <http://www.laepf-finish.ch>
- Kemet: <http://www.kemet.co.uk>
- Laser-Materialbearbeitungs GmbH:
<http://www.lmb-gmbh.com>
- Prokotec AG: <http://www.prokotec.de>
- Sigla: <http://www.wasserstrahlschneiden.ch>
- Laslo GmbH: <http://laslo.com>
- Ingersoll-Rand: <http://www.ingersoll-rand.de>
- Aquacut: <http://www.aquacut.de>
- Aqua Stenger: <http://aquastenger.com>

- CutTec: <http://www.cuttec.ch>
- Trumpf: <http://www.trumpf.com>
- Water Jet Sweden: <http://www.waterjet.se>
- Lasag: <http://www.lasag.com>
- Bystronic: <http://www.bystronic.ch>
- Techno Stahl: <http://www.techno-stahl.at>
- Aldrovandi: <http://www.aldrovandi.ch>
- Eroform: <http://www.eroform.de>
- Agie Charmilles: <http://www.agie.com>
- Moser Entgratung: <http://www.moser-entgratung.ch>
- Bosch: <http://www.bosch.de>

Organisationen:

- Swissem: <http://www.swissem.ch>
- Metallbauer.ch: <http://www.metallbauer.ch>
- Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus:
<http://www.vdma.org>
- Waterjet Technology Association: <http://www.wjta.org>
- Eisen-, Blech- und Metallverarbeitende Industrie:
<http://www.ebm.de>

Fertigungsverfahren 4 – Fügen

Autor: Prof. Dr. Markus Meier

1. Überblick

Motivation

Wie sind zwei Schalenhälften einer Raumstation verbunden (gefügt)?
Wie sind hochbelastete Bauteile am Rumpf eines Rennsegelschiffs befestigt?

In beiden Fällen und generell überall dort, wo mittelbar Bauteile verbunden werden, spricht man von Fügen. Im ersten Fall der Raumkapsel ist es ein Fügen durch Nieten im zweiten Fall des Bootes ein Kleben.



Bild (B162fueZ) Verbindungsstelle einer Raumstation der ESA



Bild (B163fueZ) Rennsegelschiff Alinghi

Lernziele

Die Studierenden sollen einzelne Verfahren des Fügens kennenlernen und einordnen können. Auch sollen dazugehörige Konstruktionsrichtlinien verstanden werden. Für ein konkretes Produkt sollen die Fügeverfahren und Fügeschritte analysiert werden können.

Einleitung

Produkte bestehen meist aus mehreren Bauteilen, welche miteinander verbunden sind. Dabei kann es sich um eine lösbare (z. B. Verschraubung), bedingt lösbar (z. B. Nieten) oder unlösbare Verbindung (z. B. Schweißen) handeln.

In dieser Sektion sollen einige wenige Verfahren herausgegriffen und erklärt sowie die zugehörigen Konstruktionsrichtlinien vorgestellt werden.

2. Montage

Montage ist der Zusammenbau mit allen notwendigen Hilfsarbeiten während und nach der Werkstückfertigung. Die Teiloperationen der Montage sind das Speichern, Positionieren, Fügen, Einstellen, Sichern, Kontrollieren, etc. Bei jedem Montageprozess treten je nach Stückzahl (Einzelmontage, Serienmontage) oder Automatisierungsgrad die hier genannten Montageoperationen in unterschiedlicher Vollständigkeit, Reihenfolge und Häufigkeit auf. Die Operationen Speichern, Erkennen, Ergreifen und Positionieren haben eine ganz besondere Bedeutung bei der automatisierten Montage, zum Beispiel in der Massenfertigung. Die Operationen Bewegen, Positionieren und Einfügen stehen im Vordergrund bei der Montage im Maschinenbau (Einzelfertigung oder Fertigung kleiner Stückzahlen).

Das Gebiet der Montage ist breit gefächert. Je nach Produkt und Produktgrösse sowie nach Stückzahl deckt die Montage den Bereich ab von der Einzelmontage im Werk oder auf der Baustelle bis zur Montage am Fließband und schliesslich bis hin zur vollautomatisierten Montage mit Hilfe von Industrierobotern. Dementsprechend unterschiedlich sind auch die Schwerpunkte innerhalb der Montageoperationen, die durch konstruktive Massnahmen beeinflusst werden müssen. Bei der automatisierten Montage konzentrieren sich die konstruktiven Massnahmen auf die Verbesserung und Erleichterung der Operationen Speichern, Erkennen, Ergreifen und Positionieren. Bei der nicht automatisierten Montage im Einzelmaschinenbau stehen die Montageoperationen Bewegen, Positionieren und Einfügen im Vordergrund, wenn es um konstruktive Massnahmen zur Montageverbesserung geht. Zu berücksichtigen ist ferner, ob die Montage von Fachkräften oder nur von angelerntem Hilfspersonal durchgeführt wird. Mit Hilfe von Bewertungsverfahren kann die Montage eines Produktes analysiert und die Montagegerechtigkeit qualitativ oder quantitativ überprüft werden. Aus dem Vergleich verschiedener Entwürfe oder ähnlicher Produkte lassen sich Schwachstellen aufzeigen und eine konstruktive Überarbeitung unterstützen. Als quantitative Bewertungsverfahren sind das „Design for Assembly“ und das AEM-Verfahren besonders bekannt.

2.1. Konstruktionsrichtlinien Montage

Allgemeine Richtlinien zum montagegerechten Konstruieren sind:

- *Vereinheitlichung von Montageoperationen / Fügestellen* kann durch Verwendung gleicher Fügeverfahren oder gleicher Fügehilfsteile, wie zum Beispiel Schrauben mit gleichen Abmessungen, erreicht werden. Dies bedingt möglichst viele gleiche Teile und gleiche Werkzeuge. Daraus resultiert direkt eine erhebliche Kostenersparnis.
- *Vereinfachung von Montageoperationen / Fügestellen* sind durch den Einsatz genormter Werkzeuge und einfacher Montagebauteile zu realisieren.
- *Parallelmontage*: Durch geeignete Baugruppengliederung kann parallel montiert werden, dadurch verkürzen sich die Durchlaufzeiten (zum Beispiel Kfz-Montage).
- *Reduzierung der Anzahl von Montageoperationen*: Die Zahl der Einzelteile reduzieren. Zum Beispiel viele Deckelschrauben soweit möglich durch wenige grössere und festere ersetzen.
- *Integralbauweise*: Vormontierte Baugruppen verwenden (Zukaufteile)
- *Zusammenfassen von Montageteilen* durch Integralbauweise. Vormontierte Baugruppen verwenden (Zukaufteile).
- *Zusammenfassung von Montageoperationen*: durch geeignete Maschinen
- Ermöglichen und Vereinfachen des automatischen Speicherns und Handhabens.

Die folgenden Gestaltungsregeln umfassen die Verbesserung der einzelnen Montageoperationen:

- Werkstücke durch ausreichende Auflageflächen stapelfähig machen und durch wichtige Konturen eindeutig in der Lage orientierfähig machen.
- Verwechslung ähnlicher Teile vermeiden.
- Teile dürfen sich beim Speichern nicht verhaken.
- kurze Montagewege anstreben.
- transportgerechte Gestaltung.
- Anstreben von Symmetrie oder Vorzugslage kennzeichnen.
- Bei oft zu lösenden Fügestellen leicht lösbare Verbindungen wählen.
- Auf gute Zugänglichkeit beim Fügen achten und Einführungs-erleichterungen vorsehen (zum Beispiel Fasen).
- Zentrieransätze und Anschläge erleichtern das Montieren und Justieren.

- Montageerleichterungen durch zweckmässigen Massunterschied.
- Montageerleichterungen durch unterbrochene Sitze und Wellenabsätze.

Regel:	ungünstig	günstig
Speichern: <ul style="list-style-type: none"> • stapelfähig, orientierfähig 		
Werkstück handhaben: <ul style="list-style-type: none"> • Erkennen durch Konturform bzw. Abmessungen 		
Werkstück handhaben: <ul style="list-style-type: none"> • Ergreifen: kein Ineinanderschachteln, • Vorsehen von Absätzen, Bohrungen 		
Werkstück handhaben: <ul style="list-style-type: none"> • Bewegen: Rutsch- oder Rollmöglichkeit, Manipuliermöglichkeit 		
Positionieren: <ul style="list-style-type: none"> • Symmetrie bei keiner Vorzugslage; • Kennzeichnen einer Vorzugslage; • selbsttätiges Ausrichten; • Einstellmöglichkeit 		

Tabelle (T001fueZ) Gestaltungsrichtlinien zur Verbesserung der Montageoperation

Regel:	ungünstig	günstig
<p>Fügen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • bei wiederholter Montage; • einfach, wenn Funktion es gestattet; • gleichzeitiges Fügen und Positionieren; • Toleranzausgleich, z.B. durch Ausgleichsstücke 		
<p>Fügen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • gute Zugänglichkeit; • Einführungs-erleichterung; • Vermeiden gleichzeitiger Fügeoperationen 		
<p>Sichern:</p> <ul style="list-style-type: none"> • einfach, möglichst ohne Zusatzelemente 		

Tabelle (T001fueZ) Gestaltungsrichtlinien zur Verbesserung der Montageoperation

Für *das Speichern* der Werkstücke ist es wichtig, diese durch ausreichende Auflageflächen stapeln zu können und durch wichtige Konturen eindeutig in der Lage orientierfähig zu machen.

Bei der *Handhabung* des Werkstücks sind das *Erkennen*, das *Ergreifen* und das *Bewegen* der Teile zu unterscheiden. Das eindeutige Erkennen eines Bauteiles ist wichtig, um ein Verwecheln ähnlicher Teile zu vermeiden. Dies wird möglich durch Änderungen an der Konturform, den Abmessungen oder der Werkstückoberfläche. Das Ergreifen ist besonders wichtig für automatische Montageverfahren. Es soll durch geeignete konstruktive Gestaltung erreicht werden, dass sich die Teile beim Speichern nicht verhaken, nicht ineinander schachteln und sich sicher und eindeutig ergreifen lassen. Das Bewegungsoperationen werden stark beeinflusst von der Werkstückgröße und der Fertigungsart. Grundsätzlich sind kurze Wege anzustreben. Immer

sind ergonomischer Erkenntnisse sowie erforderliche Sicherheitsaspekte und einfache Handhabung der Werkstücke zu gewährleisten. Die Gestalt des Werkstücks soll transportgerecht sein.

Für das Positionieren muss man die Symmetrie des Teils anstreben, wenn keine Vorzugslage gefordert wird. Vorzugslagen sind dann eindeutig bereits in der Konstruktion zu kennzeichnen. Diese Vorzugslagen begünstigen dann bei der Fertigung ein selbsttätiges Ausrichten der Füge Teile.

Wählen Sie immer zweckmässige Fügeverfahren und geeignete Verbindungselemente aus!

- Bei oft zu lösenden Fügstellen sind leicht lösbare Verbindungen zu wählen.
- Selten oder niemals mehr zu lösende Fügstellen können durch aufwendig lösbare Verbindungen realisiert werden.
- Ein gleichzeitiges Verbinden und Positionieren der Fügepartner anstreben.
- Der Toleranzausgleich durch federnde Zwischenelemente oder Ausgleichstücke hilft dabei, mit wirtschaftlich vertretbaren Toleranzen zu arbeiten.
- Geringen Werkzeugeinsatz anstreben.

Beim Einfügen, das heisst dem Hin- oder Einführen eines Teils zu den Fügeflächen,

- ist auf gute Zugänglichkeit zu achten,
- sind einfache und kurze Bewegungen an den Fügeflächen anzustreben.,
- Einföhrungserleichterungen müssen vorgesehen werden (Fasen),
- sind gleichzeitige Fügeoperationen zu vermeiden und
- sollten Doppelpassungen vermieden werden.

Einstellen:

- Feinfühliges, reproduzierbares Einstellen ermöglichen, das Ergebnis mess- und kontrollierbar machen.
- Rückwirkung auf andere Einstelloperationen vermeiden.

Sichern:

- Möglichst selbstsichernde Verbindungen wählen.
- Zusatzsicherungen vorsehen, die ohne grossen Aufwand montierbar sind.

Kontrollieren:

- Eine einfache Kontrolle (Messen) ermöglichen.
- Kontrollen und die damit verbundenen weiteren Einstellarbeiten müssen ohne Demontage bereits montierter Teile möglich sein.

Zentrieransätze und Anschläge erleichtern das Montieren und Justieren:

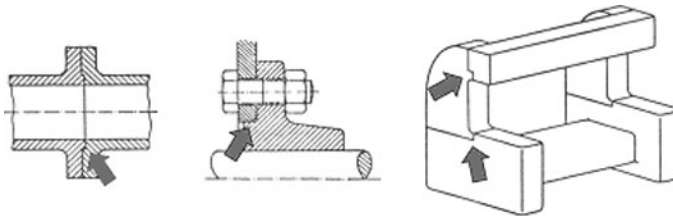
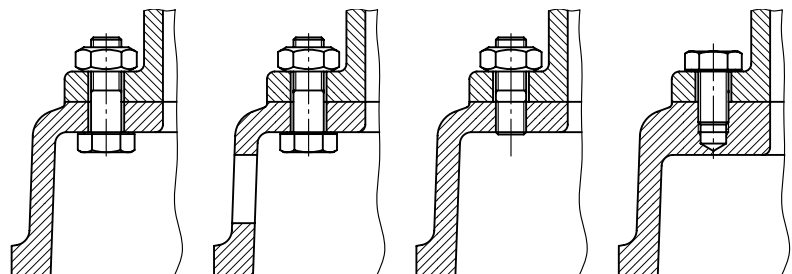


Bild (B045fueZ) Zentrieransätze

Fasen an Bohrungen und Rotationsteilen erleichtern das Zusammenfügen. Die Fase übernimmt hierbei das Feinpositionieren.

Generell muss immer die „Möglichkeit zur Montage“ geschaffen werden. Das heisst, es ist für einen ausreichenden Zugang für die zu montierenden Teile (zum Beispiel Schrauben) und für ausreichend Platz für die Montagewerkzeuge am Montageort zu sorgen.



schlecht zu montieren

Montage möglich

einfachste Montage

Bild (B158fueZ) Zugänglichkeit für Montagewerkzeuge schaffen

Eine weitere Montageerleichterung ergibt sich durch einen zweckmässigen Massunterschied zwischen verschiedenen Fügeflächenpaaren (siehe Bild B050fueZ):

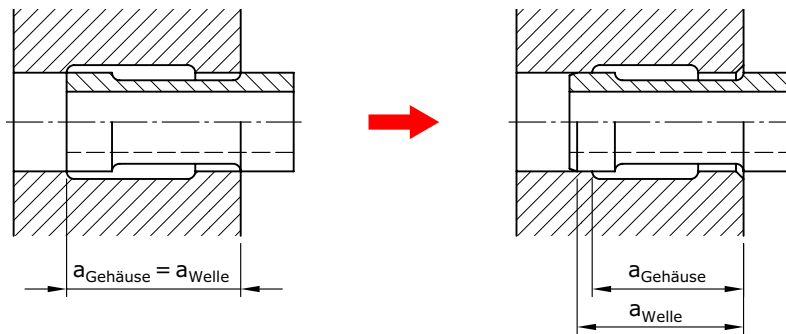


Bild (B050fueZ) Montageerleichterung durch zweckmässigen Massunterschied

Besonders bei Wellen ergibt sich eine weitere Möglichkeit, bei der Montage von Lagern potentielle Probleme zu beheben. Hier besteht die Gefahr der Beschädigung der Passflächen, wenn ein Lager über eine weitere Strecke über eine bearbeitete Fläche geschoben werden muss. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, ausschliesslich die Lager-sitze als Passflächen auszuführen. Die dazwischen liegenden Flächen müssen nicht bearbeitet werden und können zur Montageerleichterung abgesetzt werden. Grundsätzlich sollten Wellenabsätze zusätzlich abgestuft gewählt werden, um ein problemloses „Aufreihen“ der verschiedenen Elemente (Lager, Buchsen usw.) sicherzustellen.

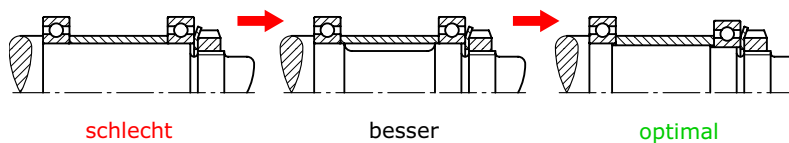


Bild (B051fueZ) Montageerleichterung durch unterbrochene Sitze und Wellenabsätze

Bei der Montage unbedingt auch die Demontagemöglichkeit berücksichtigen. Vorsehen von Abdrückgewinden sowie Raum für Abziehwerkzeuge (für Lager) vorsehen.

Berücksichtigung des Automatisierungsgrades

Das Gebiet der Montage ist breit gefächert. Je nach Produkt und Produktgrösse sowie nach Stückzahl deckt die Montage den Bereich ab von der Einzelmontage im Werk oder auf der Baustelle bis zur Montage am Fließband und schliesslich bis hin zur vollautomatisierten Montage mit Hilfe von Industrierobotern. Dementsprechend unterschiedlich sind auch die Schwerpunkte innerhalb der Montageoperationen, die durch konstruktive Massnahmen beeinflusst werden müssen.

Bei *automatischer Montage* konzentrieren sich die konstruktiven Massnahmen auf die Verbesserung und Erleichterung der Operationen Speichern, Erkennen, Ergreifen und Positionieren. Zu beachten sind hier die erheblich höheren Anforderungen an die Bauteiltoleranzen, da Montagegeräte (noch) nicht so flexibel auf eventuelle Schwankungen in Massen reagieren oder gar wie der Mensch passende Paare zusammensuchen können (auswählende Montage).

Bei der *nicht automatisierten Montage* im Einzelmaschinenbau stehen die Montageoperationen Bewegen, Positionieren und Einfügen im Vordergrund, wenn es um konstruktive Massnahmen zur Montageverbesserung geht.

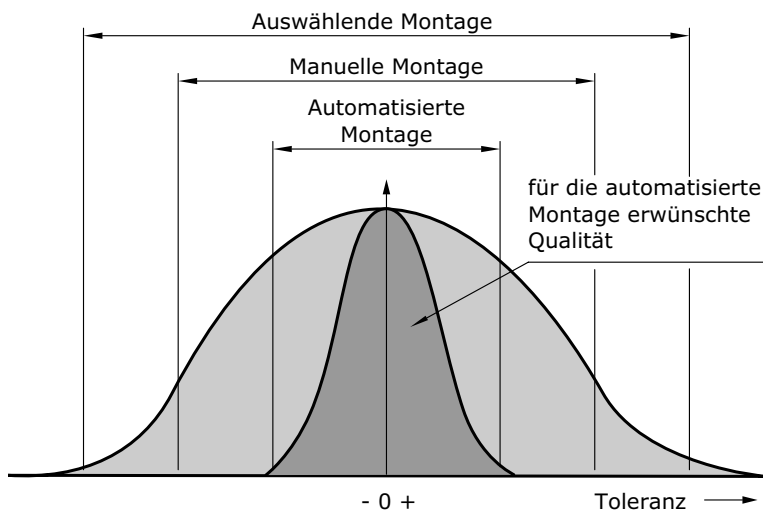


Bild (B052fueZ) Toleranzbereiche für verschiedene Montagearten

Zu berücksichtigen ist ferner, ob die Montage von Fachkräften oder nur angeleitetem Hilfspersonal durchgeführt wird.

3. Fügen durch Urformen – Einbetten, DIN 8593 Teil 4

Einbetten ist ein Verfahren, welches immer in Kombination mit anderen Verfahren eingesetzt wird. Charakteristischerweise sind dies Urformverfahren. In diesem Kapitel soll vor allem auf die im Maschinenbau benötigten Einsatzgebiete kurz eingegangen werden.

3.1. Verfahren: Insert- / Outserttechnik

Ein Metallteil wird mit einem Spritzgussteil kombiniert.



Bild (B001fueZ) Outsert: Einrastklinke eines Sicherheitsgurtes mit angespritztem Kunststoffteil (Tielke)

Das Spritzgiessen eignet sich auch vorzüglich zur Herstellung von Verbundteilen (Integralbauweisen), indem z. B. Metallteile (Inserts) wie Wellen, Gewinde, Lagerstellen, Kontaktteile eingelegt (z. B. mit Robotern) und umspritzt werden. Dies wird als „Insert-Technik“ bezeichnet im Gegensatz zur „Outsert-Technik“, wo Kunststoffteile an eine Metallplatte angespritzt werden, wie dies z. B. in Kassettenabspielgeräten wiedergefunden wird. Ganze Verbundkonstruktionen mit ebenbürtigen Partnern, Metall und Kunststoff, werden häufig als „Hybridtechnik“ bezeichnet. Beispiele dazu sind neue Türkonzepte für Autos mit Stahlblechaussenhaut und geripptem Kunststoff-Innenteil, bei welchem schon alle weiteren Befestigungspunkte integriert sind.



Bild (B002fueZ) Hybridtechnik im Automobilbau (Türbau mit Stahlblechaussenhaut und geripptem Kunststoffinnenteil)



Bild (B003fueZ) Angespritzte Kunststoffteile im Videorecorder (Pollmann)

Dem Aspekt der Wiedertrennbarkeit der Materialien muss hier, z. B. durch geschnappte Verbindungspunkte, besonderes Augenmerk gegeben werden.

Einige Anwendungsgebiete: Küchengeräte, Staubsauger, Geräterahmen VHS-Recorder, Tastaturen, Heimwerkmaschinen (Bohrmaschinen, Winkelschleifer, Schraubenzieher), Chipkarten für Zutrittskontrollsysteme und bargeldlosen Zahlungsverkehr, Gehäuse für Scheibenwischermotor, siehe [Video](#) (Film: Pollmann).

3.2. Verfahren: Verbundgiessen

Metallische Teile (Gewinde-Einsätze) werden im Druckgussverfahren mit Metall umgossen. Die Verbindung erfolgt entweder durch Formschluss (Formgebung am Insert vorsehen) oder Kraftschluss (Schrumpfen).

kombinierbare Verfahren	Nachgelagerte Verfahren
Druckgiessen	Teile meist einbaufertig
Spritzgiessen	
Grundsätzlich alle Giessverfahren	

Tabelle (T002fueZ) Kombinierbare und nachgelagerte Verfahren

3.3. Firmen, Links und Organisationen

Firma	Produkte
Pollmann	Insert und Outsert, Automobilzulieferer
Philips APM	Outsert-Technik
Tielke Kunststoffverarbeitung Systemkomponenten	
Stettler Kunststoffverarbeitungs-GmbH	
Röhrig High Tech Plastics AG	Insert-Technik

Tabelle (T003fueZ) Firmen zum Fügen durch Urformen

Organisation	Beschreibung
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
www.metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband deutscher Maschinen- und Anlagebau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T004fueZ) Organisationen zum Fügen durch Urformen

4. Fügen durch Umformen – Nieten, DIN 8593 Teil 5

Mit Nietverbindungen (engl. *Riveted Joints*) lassen sich unlösbare Verbindungen durch Stauchen eines bolzenförmigen Niets herstellen. Die so erstellte Verbindung lässt sich nur durch Zerstörung des Niet lösen.

Während das Nieten zur Zeit vor dem Schweißen das dominierende Fügeverfahren war, wurde es in den letzten hundert Jahren fast vollständig durch das Schweißen und Kleben abgelöst. Eine Ausnahme bilden sicherheitsrelevante Bereiche des Flugzeugbaus, wo dem Nieten nach wie vor eine hohe Bedeutung beizumessen ist.



Bild (B004fueZ) Vollnieten (SMI)

Beim Nietvorgang wird durch eine plastische Verformung des Nietschaftes eine formschlüssige Verbindung bewirkt. Ein Kopfmacher (Döpper) schlägt auf den Niet, während ein Gegenhalter den Niet in Position hält. Meist liegt durch die Reibung der Verbundenen Teile in der Verbindungslinie zusätzlich Kraftschluss vor. Siehe [Animation](#) (Video: SMI)

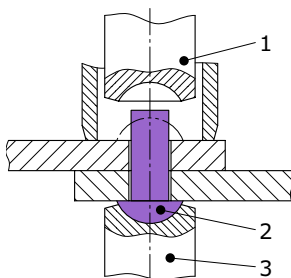


Bild (B005fueZ) 1 Döpper, 2 Nietkopf, 3 Gegenhalter

An schwer zugänglichen Stellen werden Blindnieten eingesetzt, welche nur von einer Seite zugänglich sein müssen.

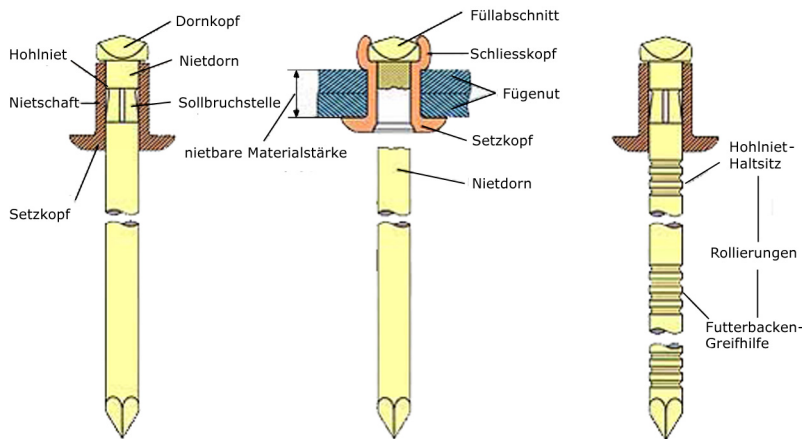


Bild (B164fueZ) Blindniet

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • keine Wärmebeeinflussung der Bauteile, wie z.B. Aufhärten oder Gefügewandlungen • kein thermisches Verziehen • auch bei schlechter Zugänglichkeit geeignet (Blindnieten) • Niet ist gut kontrollierbar • anwendbar, wo Schweißen nicht möglich ist: unterschiedliche Materialien, zu starke Blechdickenunterschiede, nicht schweisbare Werkstoffe • Verbindung ist durch Zerstörung der Niet lösbar 	<ul style="list-style-type: none"> • kostenintensiv • aufwändig • Bauteil wird durch Löcher geschwächt • stark ausgelenkte Kraftflüsse • schwere Konstruktionen (kein Stumpfstoß)

Tabelle (T005fueZ) Vor- und Nachteile des Nietens

vorgelagerte Verfahren	verwandte Verfahren	nachgelagerte Verfahren
Bohren	Clinchen (Durchsetzfügen)	
Stanzen		

Tabelle (T006fueZ) Vor- und nachgelagerte Verfahren des Nietens

4.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Heute v. A. Flugzeugindustrie, Elektronikgehäuse, Textilien



Bild (B006fueZ) Kunststoff-Spreiznieten



Bild (B007fueZ) Nieten ist ein beliebtes Verfahren in der Flugzeugindustrie (Airbus Industrie)

4.2. Firmen, Links und Organisationen

Firma	Produkte
SMI Luftfahrtverbindungselemente GmbH	Produzent von Nieten
Pfeil	Nietmaschinen

Tabelle (T007fueZ) Firmen zum Nieten

Organisation	Beschreibung
Swissmem	Verband der Maschinen und Metall-industrie
www.metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband deutscher Maschinen- und Anlagebau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T008fueZ) Organisationen zum Nieten

5. Fügen durch Schweissen, DIN 8593 Teil 6

Im Maschinenbau kommt der Schweissttechnik, engl. *Welding Technology*, eine wichtige Rolle zu. Beispielsweise sind viele Maschinenge-
stelle aus Halbzeugen wie Rohre, Profile, Platten zu gesamten
grösseren Schweisskonstruktionen gefügt. Andererseits existieren
auch im Mikroschweissbereich viele Anwendungen, wie Brillenge-
stelle, Elektrokontakte. Es gibt aber auch Schweissbeispiele mit ande-
ren Materialien wie Aluminium (Düsentrriebwerke) als auch Kunststoff
(Haushaltsgeräte). Einen Überblick über die Verbindungsformen und
die zeichnerische Darstellung ergibt der VSM-Normenauszug.

Es gibt Verfahren, welche sich besser für Einzelteile eignen (mit
Handgeführten Geräten) und solche, die auch für Massenproduktio-
nen optimal sind (mit Schweissrobotern, Schweissautomaten).
Schweisskonstruktionen stehen häufig in Konkurrenz mit Giess- oder
Schmiedekonstruktionen.



Bild (B008fueZ) Kunststoffschweissmaschinen für Rohre: ein Heizelement erwärmt die
zu fügenden Teile (Widos)



Bild (B009fueZ) Kunststoffschweissmaschinen für Rohre: ein Heizelement erwärmt die zu fügenden Teile (Widos)



Bild (B010fueZ) Schweißen von Hand ist eine Kunst und erfordert viel Training (EGGA)

Unter Schweißen versteht man ein Verbindung von Werkstücken im flüssigen Zustand mit oder ohne Zusatzstoff.

Schweissverfahren können nach ihrem physikalischen Ablauf in *Pressschweißen* und *Schmelzschweißen* eingeteilt werden. Letzteres hat beim allgemeinen Maschinenbau besondere Bedeutung. Das Pressschweißen steht bei der Verarbeitung dünner Bleche und beim Reibschweißen im Vordergrund.

Schweissverfahren sind nach DIN 1910 in Schweißverfahren für Metalle, Schweißverfahren für Kunststoffe, Schutzgasschweißen und

Widerstandsschweissen gegliedert. Eine Feinunterteilung erfolgt nach Krafteinfluss und Art der Wärmeerzeugung.

5.1. Eigenschaften – Schrumpfwirkung der Schweissnähte

Spannungen und Schrumpfungen sind beim Schweissen infolge der raschen Erwärmung und Abkühlung nicht vermeidbar. Sie kann man jedoch durch geeignete Massnahmen in vertretbaren Grenzen halten.

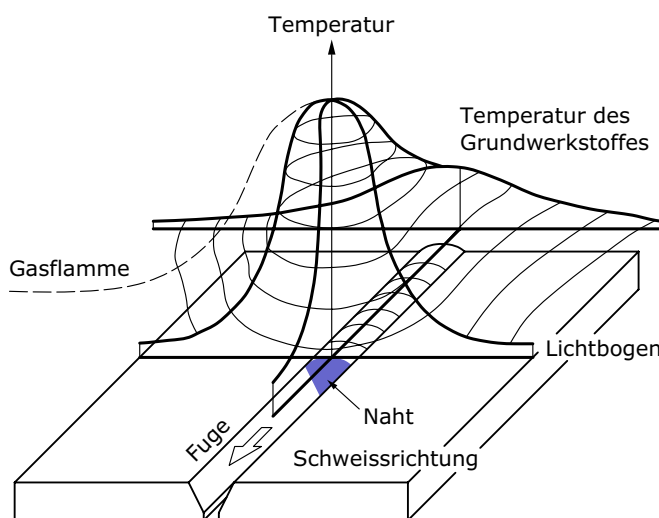


Bild (B053fueZ) Temperaturfeld im Schweißbereich

Das Temperaturfeld beim Schweissen zeigt, dass an der Schweissstelle der Werkstoff durch eine punkt- oder linienförmige Wärmequelle aufgeschmolzen wird. Die Schweisszone erreicht hierbei Temperaturen über 1600°C. In der benachbarten Wärmeeinflusszone klingt die Temperatur exponentiell zum Grundwerkstoff hin ab. Charakteristisch für thermisch beeinflussten Bereich der Schweissnaht sind:

- hohe Aufheizgeschwindigkeit,
- kürzere Verweildauer bei höheren Maximaltemperaturen als sie einer technischen Wärmebehandlung entsprechen und
- hohe Abkühlgeschwindigkeit.

Metall dehnt sich beim Erwärmen nach allen Seiten gleichmässig aus. Je grösser der Wärmeausdehnungskoeffizient, desto grösser ist die Ausdehnung. Bei nachfolgender Abkühlung schrumpft das Metallstück wieder zusammen. Bei einfachen Bauteilen wird nach der

Abkühlung der Ausgangszustand wieder erreicht, wenn das Werkstück nach allen Seiten frei beweglich gelagert und die Erwärmung über das gesamte Bauteil gleichmässig war. Dann liegt keine Schrumpfung gegenüber dem Ausgangszustand vor. Ein Metallstück, das nur örtlich erwärmt wird, verhält sich grundsätzlich anders. Örtliche Erwärmung erzeugt innere Spannungen, da die erhitzte Stelle sich ausdehnt, während die kalt gebliebenen Umgebungsbereiche dies mehr oder weniger verhindern. Kühlt eine solche Erwärmungsstelle aus, so folgt naturgemäss ein Schrumpfen, das zu einer beträchtlichen Verformung führen kann, stets bleibt jedoch eine innere Spannung zurück. Genau dieser Mechanismus vollzieht sich bei einer Schweißnaht.

Durch das Schweißen entstehen Schrumpfungen in 3 Richtungen:

- Querschrumpfungen,
- Längsschrumpfungen und
- Winkelschrumpfungen.

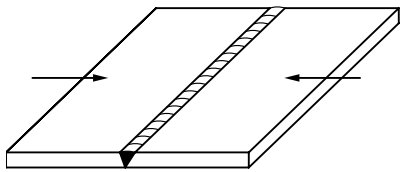


Bild (B054fueZ) Querschrumpfung

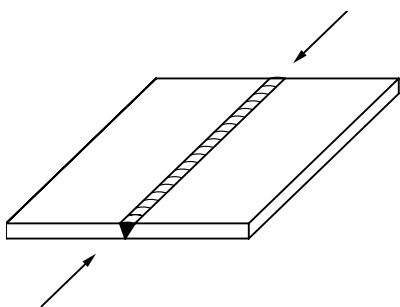


Bild (B055fueZ) Längsschrumpfung

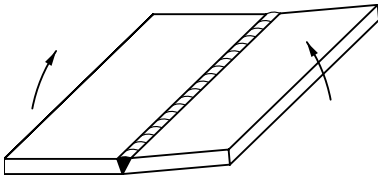


Bild (B056fueZ) Winkelschrumpfung

Querschrumpfung ist die Folge der Erwärmung der Nahtflanken. Beide zu fügenden Bauelemente dehnen sich aus. Zur Nahtmitte hin existiert kein Widerstand, dadurch kommt es zu einer Verengung der Schweissfuge. Die Abkühlung nach Beendigung der Schweissung führt zu Schrumpfungen. Die Fuge kann jedoch nicht wieder aufgeweitet werden, somit ist das gesamte Bauteil quer zur Naht kürzer. Die Querschrumpfung ist unter anderem abhängig vom Verhältnis des Nahtquerschnittes zur Blechdicke.

Längsschrumpfung liegt über die Länge der Naht erstreckt. Eine Kürzung der Nahtlänge erfolgt nur an den Nahtenden. Die Längsschrumpfung ist hauptsächlich abhängig vom Verhältnis des Gesamtquerschnittes des Werkstückes zum Schweissgutquerschnitt.

Winkelschrumpfung als Folge der Querschrumpfung insbesondere bei mehrlagigen, unsymmetrischen Schweissnahtformen.

Spannungen in Schweissnähten:

Beachten Sie den Zusammenhang zwischen Spannungen und Schrumpfungen! Bei grossen Schrumpfmassen liegen kleine Schweisseigenspannungen vor. Bei grossen Eigenspannungen keine Schrumpfmasse.

In der Stumpfnah kommt es zu einem komplizierten Spannungsverlauf. Spannungen in 2 Richtungen:

- Längsspannungen
- Querspannungen

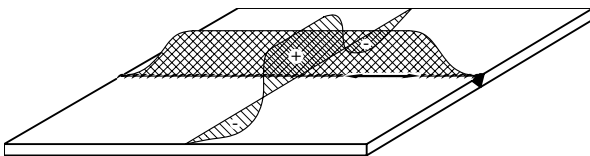


Bild (B057fueZ) Längsspannungen bei dünnen Blechen

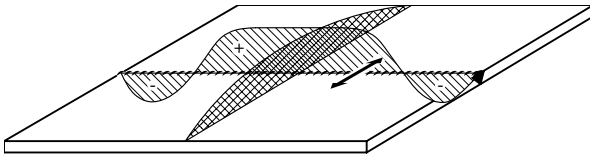


Bild (B058fueZ) Querspannungen bei dünnen Blechen

5.2. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Einsatzgebiete:

- Hochbau: Träger, Geländer, Rohre
- Sanitärtechnik: Abwasserrohre
- Automobilindustrie
- Luftfahrt- und Raumfahrtindustrie
- Petrochemie: Rohrsysteme
- Maschinenbau: Pressenständer, allgemeine Anwendung
- Halbzeug: geschlossene Profile
- Schiffsbau
- Gleisbau, Schienenfahrzeuge



Bild (B018fueZ) geschweisste Stähle können durch Feuerverzinken langfristig vor Korrosion geschützt werden (Verzinkerei Stooss AG)

5.3. Verfahren

zu den geläufigsten Schweissverfahren zählen:

- das Pressschweissen,
- das Rollnahtschweissen,
- das Schmelzschweissen,
- das Gasschmelzschweissen (Autogenschweissen) und
- das Lichtbogenschweissen.

5.3.1. Verfahren: Pressschweissen

Das Pressschweissen geschieht unter Anwendung von Kraft mit oder ohne Schweisszusatz. Das Schweissen wird durch örtliches Erwärmen (u. U. Schmelzen) der Bauteile erleichtert. Der Werkstoff wird bis dicht an die Erweichungstemperatur (Solidustemperatur) gebracht und wird dann durch Zusammenpressen verbunden. Man unterscheidet folgende Verfahren:

- Punktschweissen
- Rollnahtschweissen

Zwischen zwei Elektroden fliesst ein Strom durch die zu fügenden Werkstücke. Der Übergangswiderstand bringt das Metall in der Kontaktstelle zum Schmelzen.

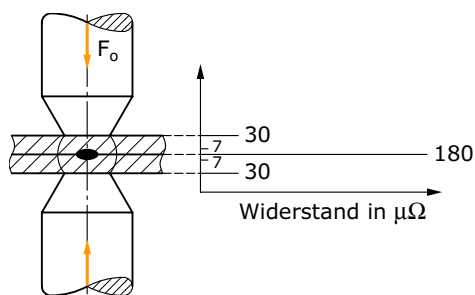


Bild (B011fueZ) Prinzip des Punktschweissens; Übergangswiderstände

$$W = I^2 \cdot R_{SP} \cdot t \quad (1)$$

Anwendungen kennen wir z. B. aus dem Automobilbau oder der Herstellung von Armierungsgittern sowie bei der Herstellung von Waschmaschinengehäusen und Backöfen.

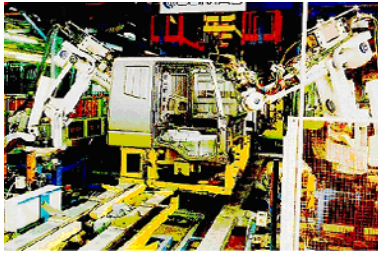


Bild (B012fueZ) Schweißroboter für den Karosseriebau



Bild (B013fueZ) Punktschweissanlage für Armierungseisen (Schlatter AG)

Man unterscheidet ein- und mehrreihige Anordnungen von Schweißpunkten in der Ebene und ein- bzw. zweiseitige Anordnung gemäss der Anzahl der Scherflächen.

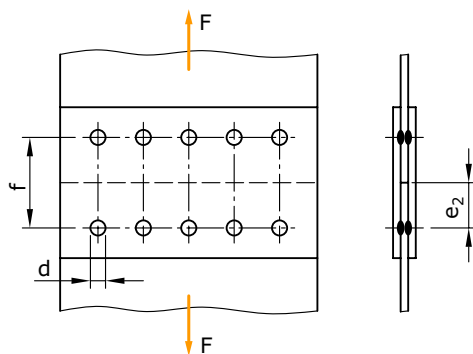


Bild (B014fueZ) Zweireihige, zweiseitige Anordnung

5.3.2. Verfahren: Rollnahtschweissen

Eine spezielle Ausprägung der dargestellten Punktschweissung ist das Rollnahtschweissen. Durch zwei runde Elektroden wird während der Drehung der Strom gepulst und eine Anreihung von vielen Punkten ermöglicht. Sogar dichte Nähte können so realisiert werden (bei Dosen, Fässer, Kraftstofftanks, Radiatoren usw.).

Das Punkt- und das Rollnahtschweissen werden zum Elektrowiderstandsschweissen gezählt. Weitere Verfahren sind das Lichtbogenwiderstandsschweissen, Gaspressschweissen, Reibschweissen, Ultraschallschweissen und das Kaltpressschweissen.

Das Schmieden, das älteste Verfahren zur stoffschlüssigen Verbindung, gehört auch zu dieser Gruppe.

5.3.3. Verfahren: Schmelzschweissen

Unter Schmelzschweissen versteht man das Schweissen bei örtlich begrenztem Schmelzfluss. Im Gegensatz zum Pressschweissen wird hier keine Kraft zur Herstellung der Verbindung eingesetzt.

Die zu verbindenden Werkstoffe und der in der Regel erforderliche Verbindungswerkstoff werden durch eng begrenzte Wärmezufuhr zum Schmelzen und Zusammenfliessen gebracht. Durch die Bewegung der Wärmequelle und die gleichzeitige Zuführung des Zusatzwerkstoffes entsteht die Schweissnaht. Die eigentliche Verbindung ergibt sich dann wenn der zusammengeflossene Werkstoff wieder erstarrt.

Verschiedene Schmelzschweissverfahren sind:

- Gasschmelzschweissen
- Lichtbogenschweissen

5.3.4. Verfahren: Gasschmelzschweissen (Autogenschweissen)

Hier entsteht der Schmelzfluss durch unmittelbares Einwirken einer Brenngas/Sauerstoff- oder Brenngas/Luft-Flamme. Die Wärme und der Schweisszusatzstoff werden im allgemeinen getrennt zugeführt. Wegen seiner überragenden Vorzüge in der Flammenleistung und Zündgeschwindigkeit wird als Brenngas hauptsächlich Acetylen verwendet.

Vorteile dieses Verfahrens sind die hohe Mobilität und die kontrollierte Wärmeeinbringung. Zudem ist es kostengünstig. Die Tatsache dass das Gasschmelzschweissen langsam und nicht automatisierbar ist, führt zu einem entscheidenden Nachteil.

5.3.5. Verfahren: Lichtbogenschweissen

Das *Lichtbogenhandschweissen* ist wegen der einfachen Handhabung und Gerätetechnik das am häufigsten angewandte Schweissverfahren. Hier brennt ein elektrischer Lichtbogen zwischen der vom Schweisser geführten Elektrode und dem Werkstück. Durch Aufsetzen der Elektrode und anschliessendes Anheben wird der Lichtbogen gezündet (Kurzschlusszündung). Zwischen dem abgeschmolzenen Elektrodenwerkstoff und dem angeschmolzenen Grundwerkstoff entsteht die Schweissverbindung. Der Lichtbogen brennt in einer lokalen Schutzgasatmosphäre, die durch Verdampfung der Elektrodenumhüllung entsteht. Über die Wahl des Umhüllungstyps kann darüber hinaus Einfluss auf die Eigenschaften der Verbindung genommen werden.

Beim *Unterpulverschweissen* wird eine endlose Elektrode unter einer Pulverschüttung, die die selben Aufgaben hat, wie die Umhüllung einer Elektrode für das Lichtbogenhandschweissen, abgeschmolzen. Das Schweisspulver schmilzt durch die Wärme des Lichtbogens und bildet eine gasgefüllte Kaverne, die die Schweissstelle schützt.

Wo hohe Temperaturen in Verbindung mit Luft auf die Stähle einwirken, verbrennt in erster Linie der Legierungsbestandteil Kohlenstoff zu CO oder CO₂. Dieses sogenannte "Entkohlen" verändert das Gefüge und damit die Festigkeit. Um dies zu Verhindern, wurden verschiedene *Schutzgasschweissverfahren* entwickelt, die den Luft-Sauerstoff-Zutritt verhindern sollen. Hier werden die Elektrode, das Schmelzbad und der brennende Lichtbogen gegen den Einfluss der umgebenden Atmosphäre durch ein dem Schweissprozess zugeführtes inertes oder aktives Schutzgas abgeschirmt. Folgende Verfahren werden nach Art des Brenners, der Elektrode und des Schutzgases unterschieden:

- das Wolfram-Inertgasschweissen (WIG) und das
- Metall-Schutzgas-Schweissen (MSG); diese werden unterteilt in Metall-Inertgas-Schweiss-Verfahren (MIG) und Metall-Aktivgas-Schweiss-Verfahren (MAG).

5.4. Konstruktionsrichtlinien

Allgemeine Richtlinien Schweißen

Als Merksatz gilt: *Die beste Schweißkonstruktion ist die, an der am wenigsten geschweisst ist.*

Schweißen ist ein kosten- und zeitintensiver Arbeitsvorgang. Deshalb müssen durch zweckmäßige Wahl von Halbzeugen und Profilen Schweißnähte eingespart werden. Ebenso können Verbundkonstruktionen mit Schmiede- und Stahlguss-Anschweißteilen sowie der Einsatz bestimmter Umformverfahren (zum Beispiel Schwenkbiegen, Abkanten, Biegen von Profilen, Aufweiten oder Einziehen von Rohrenden etc.) Zeit und Kosten sparen.

Schweißgerecht konstruieren heißt, möglichst wenig Einzelteile mit wenigen Schweißnähten zu der gewünschten Konstruktion zu verbinden. Dabei ist besonders auf die Anordnung und festigkeitsmäßige Ausnutzung der Schweißnähte achten, unter genauer Verfolgung des Kraftverlaufs. Bei dynamischen Beanspruchungen ist der Kerbeinfluss zu berücksichtigen.

Bereits in der Konstruktionsphase ist die Berücksichtigung der speziellen Gegebenheiten des Verbindungsverfahrens Schweißen wichtig. Hierbei ist besonders die Problematik der punktuellen und zeitlich sich schnell ändernden Erwärmung der Bauteile zu berücksichtigen. Folge hiervon sind Schrumpfungen, Eigenspannungen, Risse, Beulen, Verzug und partielle Aufhärtungen.

5.4.1. Haupt-Grundsätze für schweißfertigungsgerechte Konstruktionen

Wärmeeinbringung so klein wie möglich halten

So wenig Schweißnähte wie möglich anordnen. Verwendung von Walzprofilen oder von gebogenen oder abgekanteten Flächen.

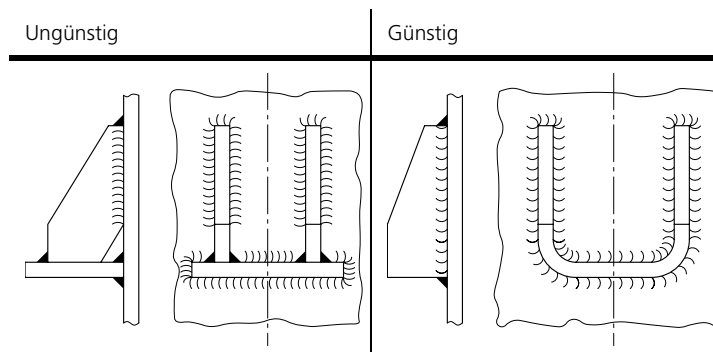


Tabelle (T002umfZ) Einsparen von Schweißnähten durch ein Biegeteil

Durch Plattenbauweise sind möglichst wenige Schweiß-Einzelteile anzustreben. Wenn möglich sind Verbundkonstruktionen anzustreben.

Fugen- bzw. Nahtquerschnitte so gering wie möglich halten. Große Nahtdicken erhöhen die Herstellungskosten (längere Schweißzeiten, mehr Zusatzwerkstoff). Die Festigkeit steigt nur linear mit der Nahtdicke an, das Nahtvolumen jedoch quadratisch. Nahtlängen auf das rechnerisch Notwendige begrenzen, falls Dichtheit nicht gefordert wird ggf. gebrochene Naht wählen.

Schweißnahtanhäufungen und -kreuzungen vermeiden.

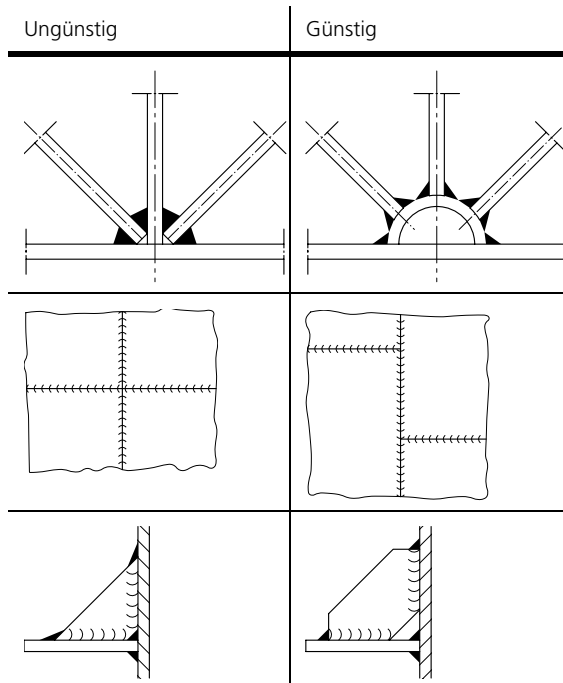


Tabelle (T003umfZ) Schweißanhäufungen und -kreuzungen vermeiden

Bei Nahtanhäufungen erhöhte Wärmeeinbringung und mehrachsige Spannungszustände. Dadurch Gefahr von Rissbildung.

Gute Zugänglichkeit zu den Schweißnähten gewährleisten

Die einzelnen Schweißverfahren erfordern Platz für Hilfsmittel (zum Beispiel Abdeckschiene für Unterschienschweißen) oder für Spannungsmöglichkeiten (Widerstandsschweißen, Punktschweißen, Rollschweißen)

Nur gut zugängliche Schweißnähte lassen sich auch in einwandfreier Qualität schweißen.

Toleranzen so groß wie möglich zulassen

Gestaltung so vornehmen, dass freies Schrumpfen während des Schweißens so lange wie möglich erhalten bleibt.

Schweißgüte niedrig halten

Besondere Schweißgüte nur dann fordern, wo sie mit Rücksicht auf die auftretenden Beanspruchungen unumgänglich ist. Schweißgüte immer nur so gut wie nötig, nicht so gut wie möglich.

5.4.2. Beispiele schweissfertigungsgerechter Konstruktionen

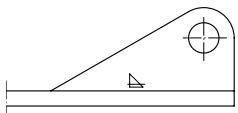
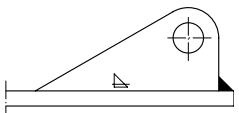
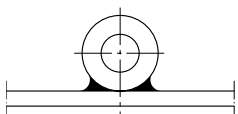
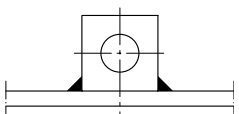
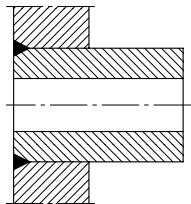
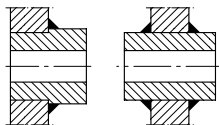
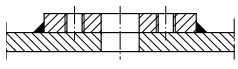
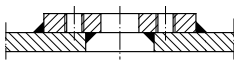
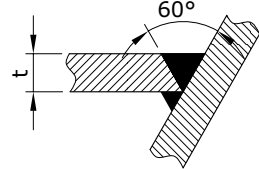
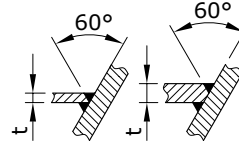
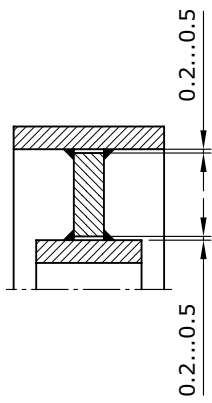
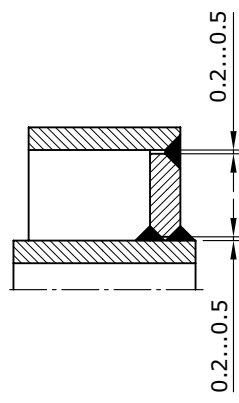
Regel	Ungünstig	Günstig
Abflachungen und Überstände vorsehen. Überstand muss mindestens 2 mal so groß wie Nahtdicke sein, andernfalls Abbrennen der Kanten gegeben.		
Rundstäbe an gerade Flächen anzuschweißen ist unzweckmäßig, da Öffnungswinkel zu klein. Entweder andere Form wählen oder Rundstab einseitig abflachen.		
Naben sollen in Abhängigkeit Ihrer Funktion eingeschweißt werden.		
Dichtnähte nach innen legen.		
Bei Schräganschlüssen scharfkantige Abschragung unzweckmäßig. Empfehlenswert ist kleine Nase, speziell bei dünnen und mittleren Blechdicken < 16 mm. Bei dickeren Blechen außermittiger Anschluss.		
Beim Verschweißen von Ringen, Lagern, Scheiben etc. sollte mindestens eine Luftspalt von 0,5 mm vorgesehen werden. Maximal 2 mm Luftspaltdicke realisierbar. Bei derartigen Konstruktionen Schweißfolge beachten, um Eigenspannungen und Warmrisse zu vermeiden.		

Tabelle (T004umfZ) Schweißfertigungsgerechtes Konstruieren

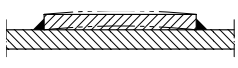
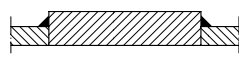

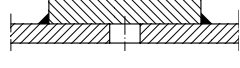
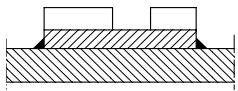
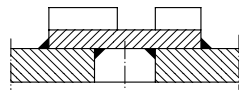
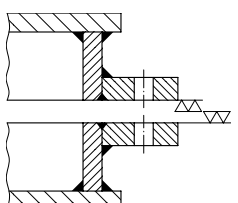
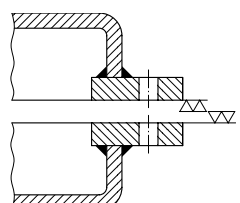
Regel	Ungünstig	Günstig
Dünne Platte wölbt sich beim Aufschweißen. Deshalb Einschweißen einer dickeren Platte vielfach günstiger.		
Beim Aufschweißen von Bearbeitungsflächen oder Verstärkungen sind Entlüftungsbohrungen vorzusehen. Andernfalls wird beim nachträglichen Spannungsarmglühen die Luft in dem abgeschlossenen Luftraum erwärmt und es kommt zu Verwerfungen und Ausbeulungen.		
Bei größeren Bearbeitungsflächen neben den Entlüftungsbohrungen auch Lochschweißungen vorsehen, um ein Abheben der Flächen zu verhindern.		
Schweißnähte nicht in Passflächen legen und nicht bearbeiten. Andernfalls Schwächung des Schweißnahtquerschnitts.		

Tabelle (T004umfZ) Schweißfertigungsgerechtes Konstruieren

Durch geeignete Vorbearbeitung lassen sich der Zusammenbau und das Schweißen der Schweißkonstruktionen vereinfachen. Das Anarbeiten von Vorzentrierungen durch mechanische Bearbeitung ist jedoch teuer. Deshalb muss man überprüfen, ob nicht eine einfache Schweißvorrichtung die Vorbearbeitung ersetzen kann. Oft sind derartige Vorrichtungen bereits bei geringer Stückzahl kostengünstiger. Für komplizierte Schweißkonstruktionen einen Schweißfolgeplan mit den einzelnen Schweißpositionen in Zusammenarbeit mit Arbeitsvorbereitung erstellen.

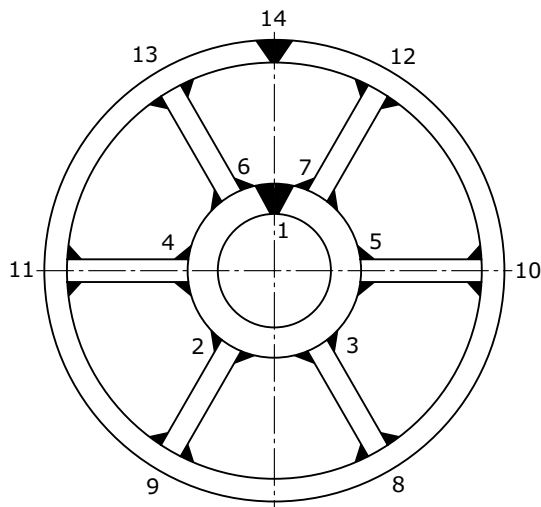


Bild (B081fueZ) Schweißfolgeplan eines Treibrades

5.4.3. Pressverbindungsschweißen

Bei der Gestaltung von Punktschweißverbindungen sind folgende Punkte zu beachten:

- Genügend Freiraum für Elektrode und Schweißzange vorsehen. Auf Schub beanspruchte Schweißpunkte sind wesentlich höher belastbar als zugbeanspruchte Punkte.
- Bei schlechter Zugänglichkeit der Schweißpunkte werden Spezialelektroden erforderlich. Selbst dann erzielt man keine vollwertige Verbindung.
- Statt vieler kleiner Punkte sind wenige größere Punkte vorzuziehen.

5.4.4. Schweisseignung

Schon innerhalb des Kapitels „Konstruktionswerkstoffe“ wurde verschiedentlich auf die Thematik der Schweissbarkeit der Werkstoffe hingewiesen.

Im Überblick lässt sich die folgende Richtlinie geben:

Stahl		
Kohlenstoffarme Stähle mit C < 0.22 %		gut schweisbar
Unlegierte Stähle mit C > 0.22 %		bedingt schweisbar Aushärtung, vorwärmen
Niedriglegierte Stähle		gut schweisbar
(CE-Äquivalent berechnen: CE % = % C + % Mn/6 + % (Cu + Ni) / 15 + % (Cr + Mo + V) / 5)	CE < 0.45 % CE 0.45 % ... 0.6 %	bedingt schweisbar (vorwärmen)

Tabelle (T011fueZ) Schweisseignung von Stahl

Aluminium		
nicht aushärtbare Legierungen gehen auf Zu- stand weich zurück		
aushärtbare Legierungen können durch erneute Wärmebehandlung Festigkeit wieder erlangen		unter Schutzgas meist gut schweisbar, jedoch mit Festig- keitsverlust

Tabelle (T012fueZ) Schweisseignung von Aluminium



Bild (B017fueZ) Al-Rahmen des Audi A8

5.4.5. Schweissymbolik, zeichnerische Darstellung

In den technischen Zeichnungen werden die Schweißnähte nur ausnahmsweise ausführlich, meistens lediglich symbolisch, gezeichnet. Symbole der Nahtformen finden sich unter Stoss- und Nahtarten.

Die vollständige Beschreibung erfolgt mit einem Pfeil und einer Textlinie (siehe Bild B015fueZ).

Vertiefte Angaben finden sich in den Normen DIN 1912.

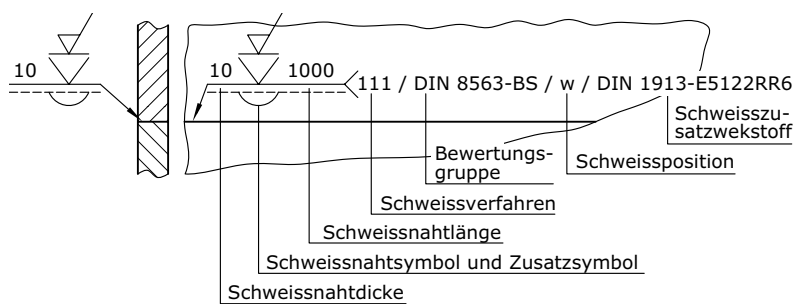


Bild (B015fueZ) Genormter Bezeichnungsaufbau einer Schweißnaht

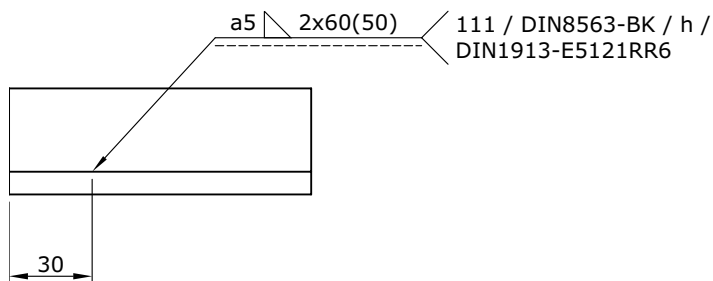


Bild (B016fueZ) Anwendungsbeispiel

5.5. Firmen, Links und Organisationen

Firma	Produkte
Exmü GmbH	Schweissgeräte für Elektromaschinenbau
WIDOS	Kunststoffschweissanlagen
Bielomatik	Kunststoffschweissanlagen
Schweisstechnik Morgenthaler	Schweissanlagen
E. Nussbaumer AG	Alu Schweißen
Linde Technische Gase GmbH	Anlagenbau, Technische Gase

Tabelle (T013fueZ) Firmen zum Schweißen

Organisation	Beschreibung
Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren	
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
www.metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T014fueZ) Organisationen zum Schweißen

6. Fügen durch Löten, DIN 8593 Teil 7

Unter Löten versteht man das flächige Verbinden erwärmter, im festen Zustand verbleibender Bauteile aus Metall oder keramischer Hartstoffe mittels eines tief schmelzenden, metallischen Zusatzwerkstoffes (Lot). Die Werkstücke müssen an der Lötstelle mindestens die Arbeitstemperatur erreicht haben.

Das flüssige Lot wird durch kapillare Kräfte in den Fügespalt gezogen. Der Lötspalt soll ausreichend eng (0,05 - 0,5 mm) und möglichst parallelwandig gestaltet werden. Die Bindekräfte sind Molekularkräfte zwischen Grundwerkstoff - Lot - Grundwerkstoff. Teilweise diffundieren die Werkstoffe in geringem Masse ineinander.

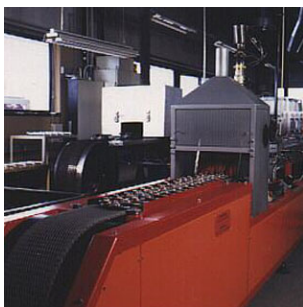


Bild (B019fueZ) Löten von Serieteilen (Burkhard)

Die Grundwerkstoffe müssen äusserst rein sein, dabei ist vor allem auf Fettfreiheit zu achten.

Das Flussmittel ist ein nichtmetallischer Stoff, der vorwiegend die Aufgabe hat, vorhandene Oxide von der Lötfläche zu beseitigen und ihre Neubildung zu verhindern.

Die eingebrachte Wärme ist gering und damit auch der Verzug und die Warmbeeinflussung der Grundwerkstoffe. Lot fliesst bevorzugt in Richtung eines engeren, heisseren Bereiches (kapillare Wirkung).

Legierung zwischen Lot
und Grundwerkstoff

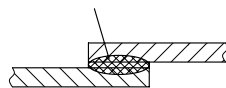


Bild (B020fueZ) Löten schematisch

Lötverfahren sind nach DIN 8505 genormt. Sie können nach Temperatur eingeordnet werden:

- Weichlöten (< 500 °C): Lote basieren meistens auf Zinn; Anwendung: moderate Belastung und tiefe Gebrauchstemperatur
- Hartlöten (> 500 °C): Messing-, Silber und Elektrolytkupferlote; Anwendung: grössere Belastung bzw. höhere Gebrauchstemperatur
- Hochtemperaturlöten (> 900 °C): flussmittelfreies Löten unter Luftabschluss (Vakuum, Schutzgas) mit Loten, deren Liquidustemperatur oberhalb 900 °C liegt.

oder nach Lötmethode:

- Kolbenlöten
- Flammlöten
- Tauchlöten
- Ofenlöten
- Induktionslöten
- Ultraschalllöten



Bild (B021fueZ) Halogen-Infrarot-Strahler zum Löten mit gebündeltem Lichtstrahl (Niemer GmbH)

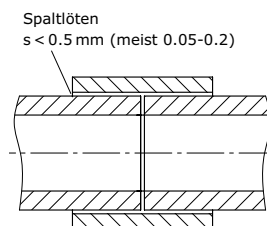


Bild (B022fueZ) Spaltlöten

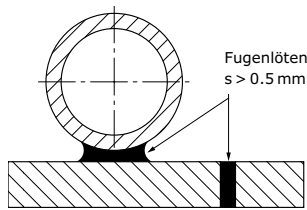


Bild (B023fueZ) Fugenlöten

Löten ist vorteilhaft für Verbindungen, die folgende Anforderungen erfüllen sollen:

- kleine elektrische Übertragungswiderstände
- bedingte Lösbarkeit
- definierte Wärmeleitfähigkeit
- dicht für Flüssigkeiten und Gase
- selbstständiges Lösen bei vorher festgelegten Temperaturen und Spannungen

Unter bestimmten Voraussetzungen sind auch Lötverbindungen von Glas mit Glas, Keramik mit Keramik und Kombinationen mit Nichtmetallen möglich.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • geringere Wärmebeeinflussung oder thermische Schädigung des Bauteils • Fügen von verschiedenartigen Metallen möglich • keine Querschnittsschwächung durch Löcher • auch unzugängliche Lötstellen möglich • gut elektrisch leitend • in der Regel gut automatisierbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Kriechen (vor allem beim Weichlöten) • Fügespalt muss sehr klein sein • Gleichmässige Temperatur notwendig • geringe statische und dynamische Festigkeit • lötgerechte Konstruktion oft aufwändig • Überlappung notwendig, deshalb erhöhtes Gewicht • besonders bei Aluminium besteht die Gefahr elektrochemischer Zerstörung der Lötstelle

Tabelle (T015fueZ) Vor- und Nachteile des Lötens

vorgelagerte Verfahren	verwandte Verfahren	nachgelagerte Verfahren
Reinigen	Schweissen	Reinigen

Tabelle (T016fueZ) Vor- und nachgelagerte Verfahren

6.1. Konstruktionsrichtlinien Löten

Stumpfstösse sind wegen ihrer zu kleinen Lotfläche ungeeignet.

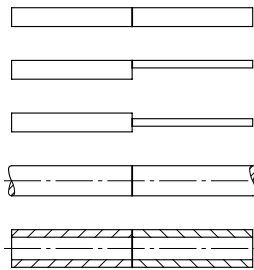


Bild (B082fueZ) Stumpfstoss

T-Stösse müssen mit ausreichend grossen Berührungsflächen gestaltet werden.

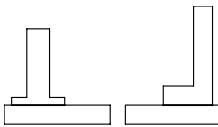


Bild (B083fueZ) T-Stoss

Bei Stufenstössen ist im speziellen darauf zu achten, dass der ganze Spalt mit Lot ausgefüllt werden kann.

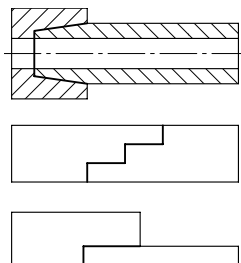


Bild (B084fueZ) Stufenstoss

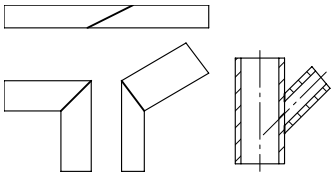


Bild (B085fueZ) Schrägstoss

Um möglichst grosse Lotflächen zu erhalten, sollte man Überlappungsverbindungen bevorzugen. Dies gilt besonders für Weichlötungen.

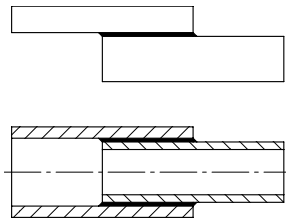


Bild (B086fueZ) Überlappstoss

Lötverbindungen müssen möglichst auf Schub beansprucht werden. Es ist andernfalls eine Entlastung der Lötverbindung vorzusehen.

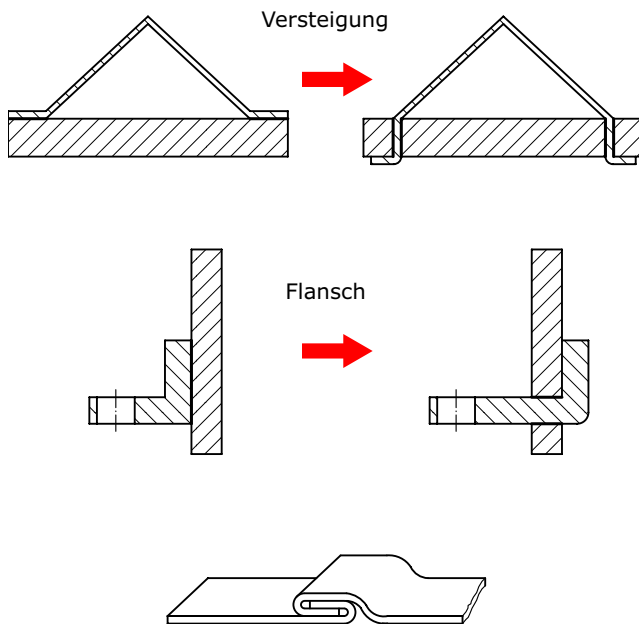


Bild (B159fueZ) Entlastung von Lötverbindungen

Zur Sicherung gegen Verschieben der zu verbindenden Bauteile kann man diese durch Falzen, Sicken oder Bördeln fixieren (siehe Bild oben).

Beim Hartlöten muss Lot durch Kapillarwirkung in den zwischen den zu verbindenden Teilen vorhandenen Spalt fließen können. Die Lötungen sind so gestalten, dass das Lot gut fließen kann. Erweiterungen im Lötspalt vermindern die Kapillarwirkung. Verengungen beeinträchtigen den Durchfluss des Flussmittels.

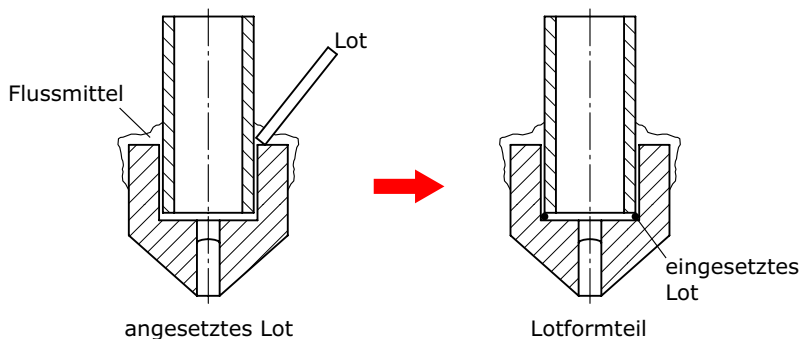


Bild (B160fueZ) Lötten mit Formteilen

Besonders vorteilhaft ist die Verwendung von Lotformteilen, die zwischen die zu verlötenden Teile eingelegt werden. Beim Einsatz eines von aussen angesetzten Lotes fließt das Lot von aussen nach innen, die Fertigungskontrolle wird schwierig. Bei Verwendung eines Lotformteiles fließt das Lot von innen nach aussen, dadurch wird die Fertigungskontrolle leichter.

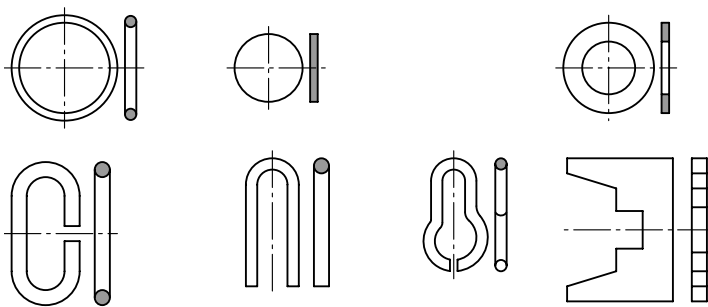


Bild (B157fueZ) Beispielhafte Formen von Lotformteilen

Durch Verwendung von Lotformteilen (Einlegeteilen) hat folgende Vorteile:

- die genaue Dosierung der Lotmenge,
- die indirekte Erwärmung des Lotes, dadurch kein Überhitzen und keine Kugelbildung des Lotes und
- die Möglichkeit der einfachen Endkontrolle.

Durch richtige konstruktive Gestaltung wird der Einschluss von Flussmitteln vermieden. Bei angesetztem Lot kann das Flussmittel nicht entweichen, wohl aber, wenn spezielle Abflussöffnungen für das Flussmittel vorgesehen sind. In diesem Fall wird das Flussmittel (Fl) vom Lot weggeschoben. Die gleiche Wirkung wird erzielt durch das Einlegen von Lotblechen. (F im Teil des Bildes B161fueZ entspricht der Druckkraft).

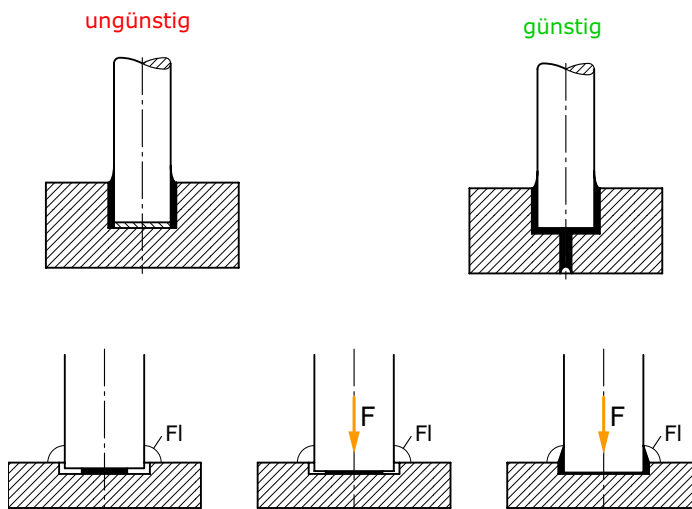


Bild (B161fueZ) Vermeiden von Flussmitteleinschlüssen beim Löten

Um eine einwandfreie Benetzung mit Lot zu erreichen, sollten Bauteiloberflächen bei Verwendung von Kupferloten eine Rauhtiefe von 10 bis 16 μm und bei Silberloten von circa 25 μm betragen. Bei höheren Rauhtiefen entstehen Festigkeitseinbussen dadurch, dass der Lötfluss erschwert wird.

6.1.1. Löten von Blechen

Stumpfstöße sind wegen der zu kleinen Lotfläche ungeeignet.

Am besten sind Überlappungs- und Laschenstöße. Durch Zuschärfung der Bauteile oder Laschen an der Lötstelle wird der Kraftfluss sanfter umgelenkt. Es ist eine Überlappungslänge vom circa 3 bis 4-fachen der Blechdicke anzustreben.

6.1.2. Löten von Rundstäben

Ein Stirnflächiges Anlöten von Stabenden ist nicht empfehlenswert. Besser ist auf jeden Fall das Einsetzen des Rundstabes oder Bolzens in eine Aufnahmebohrung. Hierdurch ist gleichzeitig eine Lagesicherung gegeben.

Zwischen Bolzen und Aufnahmebohrung sollte eine enge Spielpassung oder Übergangspassung gewählt werden, um einen einwandfreien Lotfluss zu erhalten. Durch entsprechende Gestaltung der Nabe erreicht man eine Verbesserung des Kraftflusses. Aus einer doppelten Lagerung erfolgt eine bessere Abstützung und steifere Konstruktion.

6.1.3. Löten von Rohren

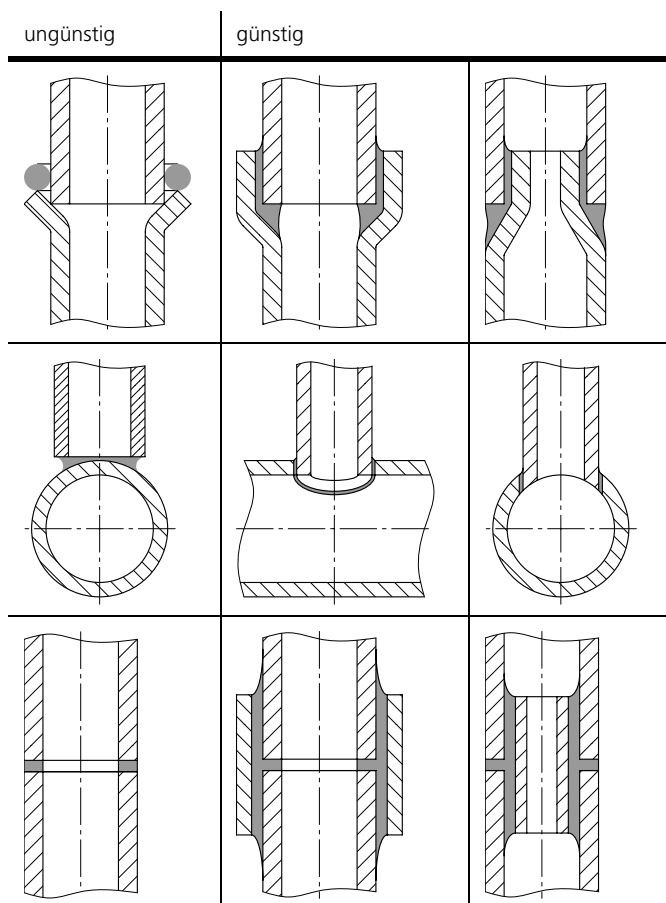


Tabelle (T017fueZ) Löten von Rohren

Stumpfstöße sind möglichst zu vermeiden. Wenn sie trotzdem unumgänglich erscheinen, ist unbedingt eine Hartlötung vorzusehen. Durch

kegelige Ausbildung der Rohrenden kann eine bedingte Vergrößerung der Lötfläche erreicht werden (kegeliger Stumpfstoss). Eine wesentliche Vergrößerung der Lötfläche kommt jedoch durch einen Muffenstoss oder Überlappungsstoss zusammen.

6.1.4. Löten von Behältern

Wie bei den anderen Lötverbindungen sind auch hier Stumpfstöße zu vermeiden. Durch entsprechende konstruktive Massnahmen muss analog zu allen anderen Verbindungsstellen eine Vergrößerung der Lötfläche und gleichzeitig eine Verbesserung des Lotflusses erreicht werden.

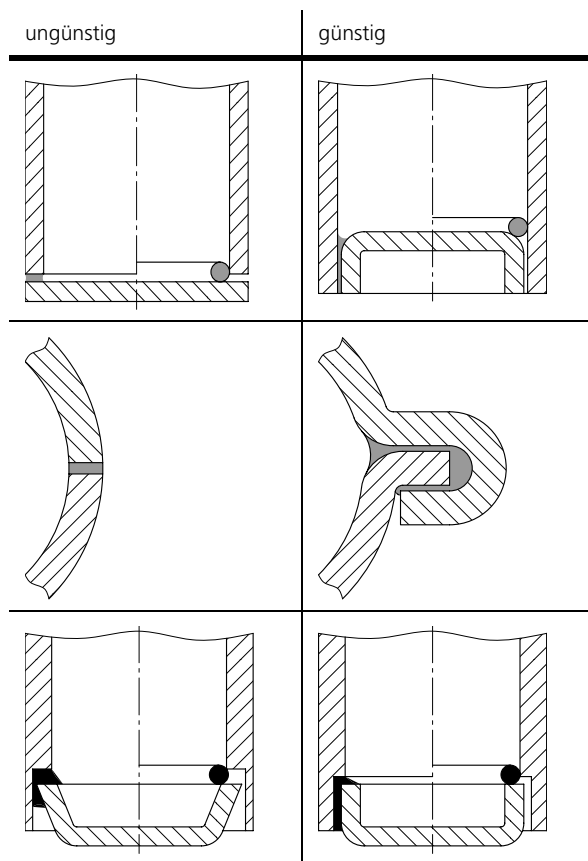


Tabelle (T018fueZ) Löten von Behältern

Zweckmässige Gestaltung des Behälterbodens durch Umbördeln, Umbiegen etc.

Beim Löten von Blechmänteln durch Überlappen und Umbördeln entsteht einerseits eine Vergrößerung der Lötfläche und gegebenenfalls auch eine zusätzliche Entlastung der Lötverbindung.

Beim Löten von Flanschen durch zweckmässige Gestaltung und Positionierung der Flansche dafür sorgen, dass grosse Lötflächen gegeben sind und einwandfreier Lötfluss möglich ist.

6.2. Firmen, Links und Organisationen

Firma	Produkte
Löttechnik Burkhard	Löten
Drösser	Stahlhandel
Automatisierungstechnik Niemeier GmbH	Löten mit Licht

Tabelle (T019fueZ) Firmen zum Löten

Organisation	Beschreibung
Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren	Verband
Stahl Online	Stahl-Homepage verschiedener Verbände
Profzone.ch	Übersicht über die verschiedenen Stähle
Edelstahl Rostfrei	Informationsstelle
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
www.metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband deutscher Maschinen- und Anlagebau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T020fueZ) Organisationen zum Löten

7. Kleben, DIN 8593 Teil 8

Die Klebtechnik wird alternativ zu anderen Fügverfahren eingesetzt oder dort, wo andere Verfahren nicht anwendbar sind. Dies trifft beispielsweise bei Duroplasten zu oder bei stark unterschiedlichen Werkstoff-Fügungen, z.B. von Metallen mit Nichtmetallen, wenn die zu verbindenden Werkstoffe durch die Schweißung nachteilige Veränderungen ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften erfahren (z.B. ausgehärtetes Aluminium). Vor allem dünne Werkstücke, die sich nur unter grossem Aufwand oder gar nicht nieten oder schweißen lassen, können durch Kleben miteinander verbunden werden.



Bild (B024fueZ) Verklebtes Teakholz-Deck (Sika)



Bild (B025fueZ) Geklebte Scheiben und Verkleidungen bei Fahrzeugen (Sika)

Man unterscheidet dabei:

- Ein-, Zwei-, Mehrkomponentenkleber und
- Warm und Kaltkleber.

Die Bindefähigkeit wird bei Klebstoffen auf Kunstharzbasis zur Hauptsache auf die Adhäsion zwischen Kleber und Grundmaterial zurückgeführt. Die mechanische Haftung infolge mechanischer Verankerung verstärkt die Verbindung. Die Klebetechnik hat innerhalb der vergangenen Jahre enorm an Bedeutung zugenommen. Folgendes [Video](#) zeigt, wie verbreitet Kleben im Schienenfahrzeugbau heute ist. (Film: Sika Industries)

Verminderte Baugewichte, glatte Oberflächen, geringere Fertigungskosten und -zeiten sowie erhöhte statische und dynamische Festigkeiten sind die wichtigsten Merkmale. Im Gegensatz zum Schweißen oder Nieten wird eine gleichmässige Spannungsverteilung (verbesserter Kraftfluss) erzielt. Kleben gestattet auf einfache Weise Verbundkonstruktionen zwischen metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen. Es treten keine unzulässig hohen Formänderungen durch Erwärmen wie beim Schweißen auf. Auch das Werkstoffgefüge wird nicht verändert. Klebeverbindungen sind dicht gegen Flüssigkeiten und Gase. In den Klebfugen verschiedenartiger Metalle ist keine elektrochemische Korrosion zu erwarten. Zu beachten ist, dass Klebeverbindungen für hohe Temperaturen ungeeignet sind. Bei Klebeverbindungen treten Festigkeitseinbussen durch Alterung auf. Die Art der Umwelteinflüsse auf die Klebereigenschaften spielt dabei auch eine Rolle.

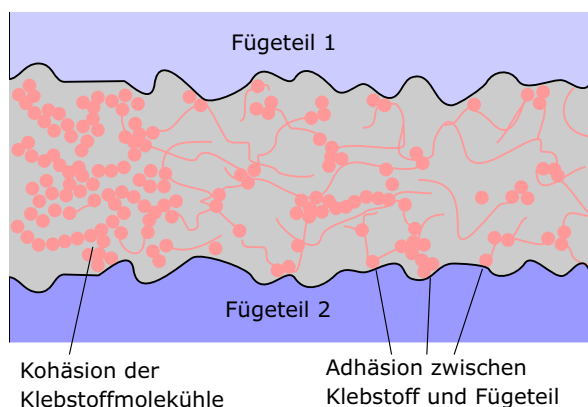


Bild (B026fueZ) Klebstoff-Adhäsion zwischen den Fügeteilen

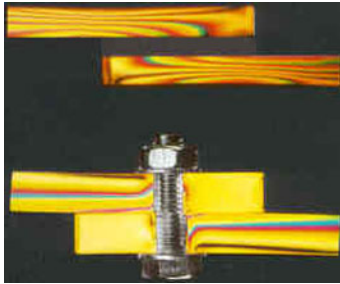


Bild (B027fueZ) Vergleich des Kraftflusses zwischen einem geklebten und einem gefügten Bauteil (Sika)

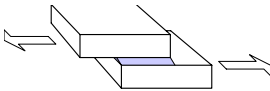


Bild (B134fueZ) Beispiel Klebeverbindung: bietet grosse Klebefläche, Zugscherkräfte gut geeignet

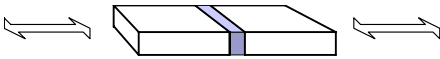


Bild (B135fueZ) Beispiel Klebeverbindung: gut auf Zug oder Druck belastbar, Klebefläche begrenzt

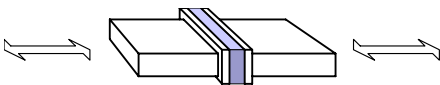


Bild (B136fueZ) Beispiel Klebeverbindung: für die Erhöhung der Kraftübertragung werden die Fügeflächen vergrössert

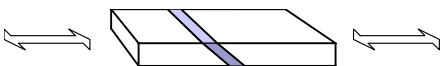


Bild (B137fueZ) Beispiel Klebeverbindung: eine weitere Möglichkeit ist das Schiften; die schrägen Klebeflächen vergrössern die aktive Fläche, allerdings für elastische Klebungen nicht gut geeignet

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • geringe Kosten • keine Wärmebeeinflussung • hohe dynamische Festigkeit • gute Schwingungsdämpfung • Gewichtsersparnis • keine Kontaktkorrosion • gleichmässiger Kraftfluss • Kleben von unterschiedlichen Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> • chemische Beständigkeit • Alterung • begrenzte thermische Beständigkeit • Zeiteinfluss auf den Verfahrensablauf • Oberflächenvorbehandlung notwendig

Tabelle (T021fueZ) Vor- und Nachteile des Klebens

vorgelagerte Verfahren	vergleichbare Verfahren	nachgelagerte Verfahren
Reinigen	Nieten	keine Nachbearbeitung nötig
	Löten	
	Schweissen	

Tabelle (T022fueZ) Vor- und nachgelagerte Verfahren des Schweissens

7.1. Konstruktionsrichtlinien Kleben

Voraussetzungen für den Einsatz von Klebeverbindungen

Entscheidung für das Fügeverfahren Kleben bedingt die Einhaltung folgender Voraussetzungen:

- Beurteilung der zu erwartenden mechanischen und chemischen Belastungen,
- richtige Dimensionierung und Konstruktion der Fügeteile,
- richtige Beurteilung der Werkstoffe und ihrer Oberflächenbeschaffenheit,
- geeigneter Fertigungsablauf und hinreichende Qualifikation des Personals,
- richtige Auswahl des Klebstofftyps und
- geeignete Verarbeitungsgeräte.

Allgemeine konstruktive Richtlinien

Erfolgreicher Einsatz von Klebeverbindungen erfordert eine durchdachte Verfahrenstechnik und qualifizierte Mitarbeiter in der Fertigung. Entscheidend ist jedoch auch, dass bereits klebgerecht

konstruiert wird. Hierbei gelten im wesentlichen die folgenden Gestaltungsregeln:

- Überlappungsverbindungen bevorzugen, da hierbei günstigste Ausnutzung der Bindefestigkeit.
- Möglichst grosse Klebflächen anstreben.
- Schälbeanspruchungen vermeiden.
- Durch geeignete Positionierung Verschiebung der zu klebenden Teile während des Klebevorgangs vermeiden.

Die Auswahl des geeigneten Klebstoffes erfolgt nach folgenden Gesichtspunkten:

- zu klebender Werkstoff (Metall/Metall, Kunststoff/Kunststoff, Verbundkonstruktionen)
- Festigkeitsanforderungen (Belastungsart und Belastungsrichtung)
- Spaltfläche
- äussere Einflüsse (Temperatur, Feuchtigkeit, Korrosion etc.)
- vorhandene Betriebseinrichtungen bzw. qualifiziertes Personal

Bei Auswahl des Klebstoffes unbedingt Herstellerangaben genau beachten.

Bei der Konstruktion der Bauteile ist auch die erforderliche Vorbehandlung der zu klebenden Teile mit zu berücksichtigen. Wie bekannt, muss der Kleber direkt auf dem jeweiligen Werkstoff haften, nicht auf einer Zwischenschicht von Zunder, Oxyden, Rostschutzmitteln, Trennmitteln, Öl oder Schutzanstrichen. Diese Verunreinigungen müssen durch Abwaschen mit geeignetem Lösungsmittel sowie durch Abschleifen bzw. Aufrauen entfernt werden. Die erforderlichen Vorbehandlungen sind bei der Formgebung der betreffenden Teile unbedingt zu berücksichtigen. Ist ein Teil einer Klebverbindung so unzugänglich, dass wesentliche Teile der Klebfläche keiner einwandfreien Vorbehandlung unterzogen werden können, ist die Wirksamkeit der Klebverbindung in hohem Masse gefährdet.

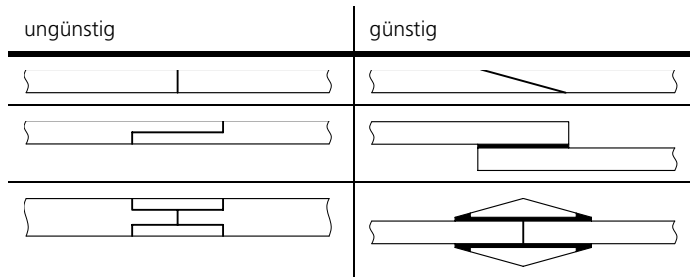


Tabelle (T023fueZ) Gestalten von Klebeverbindungen

Gestaltung der Klebeverbindungen nach dem Grundsatz:

- keine Schwächung des Werkstoffquerschnittes
- grosse Verbindungsflächen vorsehen
- möglichst symmetrische Krafteinleitung anstreben
- auf Biegesteifigkeit achten

Stumpfstöße vermeiden, geschäftete Verbindung sind besser, da eine grössere Klebefläche vorliegt. Dadurch sind sie allerdings auch teurer. Generell sollten abgesetzte Überlappungen vermieden werden. Durch Abschrägen der Laschen liegt eine günstigere Spannungsverteilung vor.

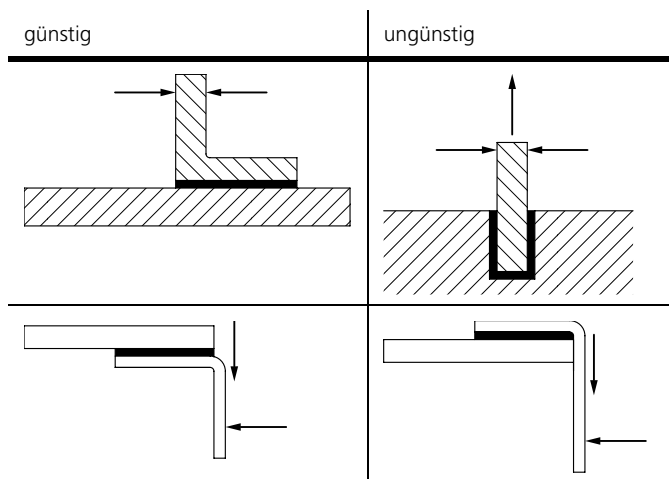


Tabelle (T024fueZ) Gestalten von geklebten Winkelverbindungen

Bei der Gestaltung von geklebten Winkelverbindungen durch geeignete Versteifung bzw. geeignete Wahl der Belastungsrichtung auf

möglichst gleichmässige Spannungsverteilung hinwirken und Schälbeanspruchungen vermeiden.

Beim Kleben von Eckverbindungen durch Umbördeln der zu verbindenden Bleche möglichst grosse Klebfläche anstreben und gegebenenfalls einen Teil der Kraftaufnahme durch einen Formschluss gewährleisten. Durch Hinterlegen von Blechen ist eine Laschenausführung möglich. Eine Elegante Lösungsmöglichkeit besteht durch die Verwendung gegossener oder gezogener Eckprofile, die als Halbzeuge verfügbar sind. Der Vorteil der Klebverbindung in diesem Fall ist, dass der Klebstoff auch die Abdichtung des Fügspalts übernimmt.

Rohr- oder Vietkantsteckverbindungen sind in der Klebtechnik besonders günstig. Durch Verwendung äusserer oder innerer Muffen bzw. unterschiedlicher Rohrdurchmesser oder durch Schäftung lassen sich die erforderlichen grossen Klebeflächen schaffen. Durch Abschrägen der Rohrenden ist eine günstigere Spannungsverteilung erreichbar.

7.1.1. Geländer aus Aluminiumrohr

Geländer aus Aluminiumrohren sollen nicht nur fest sein, sondern auch gut aussehen. Frühere Ausführung waren geschweisst. Das Schweißen sowie die anschliessende Nachbearbeitung durch Schleifen und Polieren erfolgte vor Ort. Eine bessere Lösung ist die geklebte Ausführung, bei der an den Verbindungsstellen innenliegende federnde Aluminiummanschetten benutzt werden. Dadurch entsteht einerseits eine einwandfreie Klebverbindung und andererseits ein gefälliges Aussehen. Hinzu kommt eine erhebliche Zeit- und Kostenersparnis, da keine weitere Nachbehandlung erforderlich ist.

7.1.2. Rohrkrümmer eines Wärmetauschers

In Klimaregelgeräten werden zu Kühlzwecken Wärmetauscher in der Ausführung als Lamellenradiator verwendet. Dabei wird eine grosse Anzahl von Plattenlamellen aus Aluminium auf Aluminiumrohre geklemmt. Die Enden dieser Rohre sind immer durch Krümmer miteinander verbunden. Die frühere Ausführung bestand aus einer Schweiss- oder Lötverbindung, die jedoch Probleme mit häufigen Leckagen hatte. Die Verbindung durch Kleben ist schneller, kostengünstiger und im Endeffekt betriebsicherer. Verwendet wurde ein warmhärtender Epoxydharzklebstoff. Wird die Konstruktion zum Aushärten kurzzeitig aufgeheizt, so wird der Kleber dünnflüssig und füllt dank der Kapillarwirkung den Klebspalt vollständig aus, so dass damit Leckagen eliminiert sind.

7.1.3. Feuerlöscher aus Aluminium

Druckflaschen für Feuerlöscher in geklebter Ausführung mit zwei ineinandergesteckten Einzelteilen. Beide Teile aus Reinaluminium im Fließpressverfahren gefertigt. Teile werden mit Klebstoff ineinandergeschoben.

7.1.4. Behälter für Insektizide

Behälter gefertigt aus einer Aluminiumlegierung. Endkappen aufgeklebt. Ausführung der Kappen gewährleistet genügend grosse Klebfläche und Beanspruchung der Klebverbindung auf Schub. Klebstoff wird warm ausgehärtet. Belastung des Behälters mit Drücken bis zu 60 bar möglich.

7.1.5. Geklebte Behälter

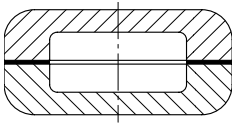


Bild (B138fueZ) ohne Entlüftungsbohrungen

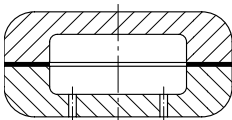


Bild (B139fueZ) mit Entlüftungsbohrungen

Entlüftungsbohrungen bei geklebten Hohlkörpern: Beim Kleben von Hohlkörpern darauf achten, dass die beim Aushärten des Klebstoffes entstehenden Gase aus dem Hohlraum des Körpers entweichen können. Deshalb zweckmässige Entlüftungsbohrungen vorsehen:

7.1.6. Geklebte Welle/Nabe-Verbindung

Beim Kleben von Welle/Nabe-Verbindungen vorwiegend Verwendung von anaerob härtenden Klebstoffen. Dies sind Einkomponentenkleber, die aushärten, sobald sie nicht mehr mit Sauerstoff versorgt werden. Dies ist der Fall, wenn die Nabe auf die vorgesehene Stelle an der

Welle geschoben wird und kein Sauerstoff mehr an die metallische Fügefläche gelangen kann. Gegebenenfalls durch Vorsehen einer Rille in der Welle dafür sorgen, dass auch nach dem Aufschieben der Nabe noch genügend Klebstoff vorhanden ist.

7.1.7. Kompressorkurbelgehäuse

Durch Einsatz von Klebverbindungen sind Fertigungsvereinfachungen möglich. Das Kurbelgehäuse wurde in der alten Ausführung in relativ aufwendiger Gusstechnik als Kokillenguss hergestellt. Durch die Aufteilung des Gehäuses in Gehäuseoberteil und -boden ist eine einfachere Gusskonstruktion als Druckguss möglich. Der separat erstellte Boden wird nachträglich eingeklebt und erfüllt die gleiche Funktion wie der vorher integriert gegossene Deckel.

7.1.8. Verstärkungen und Versteifungen

In vielen Fällen können vorhandene Konstruktionen und Verbindungen durch geeignete Klebverbindungen verstärkt oder versteift werden. Ausserdem können die verschiedenen Klebverbindungen durch geeignete konstruktive Massnahmen in ihrer Belastbarkeit erhöht werden.

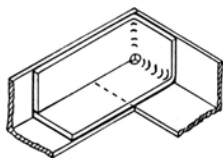


Bild (B119fueZ) Belastbarkeit 100%

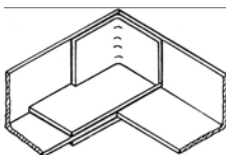


Bild (B120fueZ) Belastbarkeit 211%

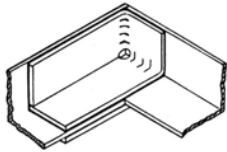


Bild (B121fueZ) Belastbarkeit 163%

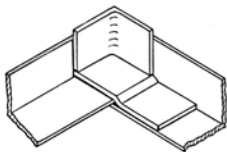


Bild (B122fueZ) Belastbarkeit 217%

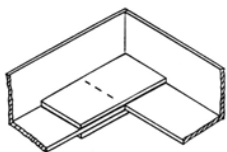


Bild (B123fueZ) Belastbarkeit 181%

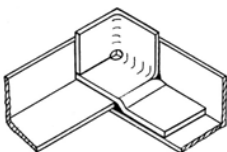


Bild (B124fueZ) Belastbarkeit 280%

In den obigen Bildern werden L-förmige Profile aus einer Aluminiumlegierung zu einer Eckverbindung zusammengeklebt. Durch geeignete konstruktive Massnahmen kann die Belastbarkeit dieser Klebverbindung in den angegebenen Belastungsrichtungen fast verdreifacht werden.

7.1.9. Blechverstärkungen

Bei formschlüssigen Verbindungen, zum Beispiel Steckbolzen in Blechplatte, kommt es normalerweise durch die örtliche Krafteinleitung zu erheblichen Spannungskonzentrationen. Diese sind vermeidbar durch das Aufkleben von Verstärkungsblechen (Bilder B148fueZ, B149fueZ). Die bislang am Lochrand auftretenden Spannungsspitzen werden weitestgehend abgebaut und es ergibt sich eine annähernd ausgeglichene Spannungsverteilung. Voraussetzung dafür ist eine Wahl der Blechstärke, jeweils proportional zur Spannungsverteilung des belasteten, aber nicht verstärkten Bleches.

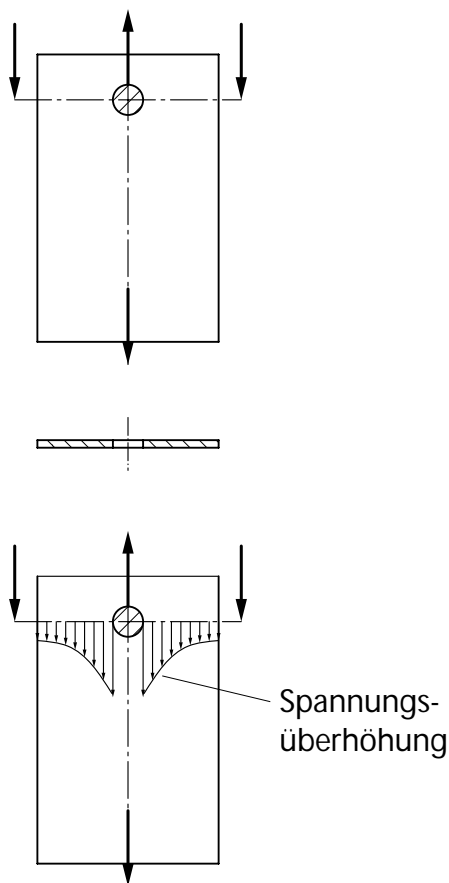


Bild (B148fueZ) Ohne Blechverstärkung

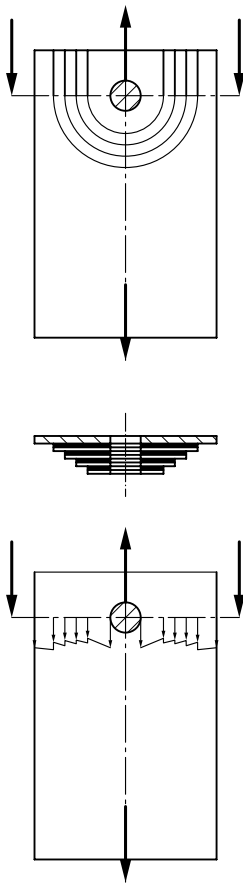


Bild (B149fueZ) Mit Blechverstärkung

Ebenso wichtig ist aber auch die Auswahl eines genügend steif werdenden Klebstoffes. Der Verstärkungseffekt durch die aufgeklebten Versteifungsbleche wird nämlich zunichte gemacht, wenn sich die übereinandergeschichteten und verklebten Bleche unter Belastung gegeneinander verschieben können aufgrund eines wenig schubfesten Klebstoffes.

7.1.10. Flugzeugtragflächenholm in geklebter Ausführung

Stegblech und Stegversteifungen werden mit Klebstoff Redux verklebt. Die Gurtplatten werden nach dem Kleben gebogen. Dies ist möglich aufgrund der hohen Dehnbarkeit dieses Klebstoffes. Stegversteifungen werden auf Unterseite des Stegblechs aufgeklebt.

7.1.11. Rahmenkonstruktion eines Flugzeug-Cockpit-Fensters

Der Rahmen besteht aus Deckblechen mit Verstärkungsblechen und pfannenförmigen Blechteilen. Die Klebung erfolgt im flachen Zustand. Nach dem Kleben wird Rahmen zwischen den Flanschen der pfannenförmigen Fensternute geknickt. Die Knickung ist unkritisch für die Klebverbindung, da Klebschichten einen niedrigen Elastizitätsmodul aufweisen.

7.1.12. Sandwichkonstruktionen

Hierbei werden zwei Decklagen geringer Stabilität mit einem Kern aus relativ leichtem Material durch Kleben verbunden.

Kern- und Klebverbindungen haben zweifache Funktion:

- Einhaltung eines konstanten Abstandes zwischen den beiden Decklagen und damit Verhindern des Ausbeulens. Andernfalls wäre Ausbeulen gegeben infolge der Druck- oder Schubspannungen, die sich ergeben als Folge der von aussen eingprägten Druck- oder Biegebelastungen am Deckblech.
- Schubspannungen aus den äusseren Schub- und Querkräften werden mittels der Klebverbindung von der Decklage in den Kern übertragen. Verbindungen von festen und steifen Decklagen mit sehr leichtem Kernmaterial ermöglichen Konstruktionen mit hoher Biegefestigkeit und gleichzeitig geringem Konstruktionsgewicht.

Der tragende Werkstoff wird ganz in die äusseren Zonen des Bauteiles verlagert, wo er für die Festigkeit und die Steifigkeit der Konstruktion am wirksamsten ist. Das Kernmaterial sollte gute Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit sowie ein geringes spezifisches Gewicht aufweisen (zum Beispiel Schaumstoffe, Balsaholz etc.) Typisch für Sandwichkonstruktionen sind die dünnen Bleche in der Aussenlage. Dünne Decklagen sind besonders anfällig für punktförmige, senkrecht einwirkende Belastungen, bei denen nicht nur die dünne Deckhaut, sondern auch der Kern eingedrückt werden kann.

Ein geeigneter Randabschluss ist für Sandwichkonstruktion wichtig, um eine einwandfreie Einleitung der Kräfte zu gewährleisten und ein Einreissen der Klebverbindung zwischen Kern und Deckblech zu unterbinden.

Es ist eine einwandfreie Klebverbindung zwischen den Flanschen des Randprofils und dem Deckblech sowie zwischen Profilsteg und Kern erforderlich. Das führt zu engen Toleranzen zwischen Kernhöhe und Abstand der Randprofilflansche. Überall dort, wo örtlich konzent-

riert Normalkräfte in den Kern der Konstruktion eingeleitet werden müssen, sind spezielle Einsetzelemente erforderlich.

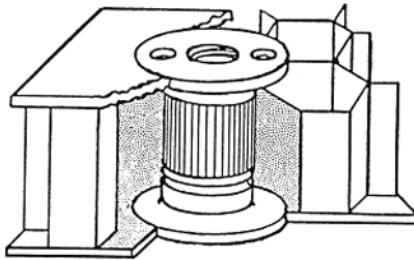


Bild (B126fueZ) Insert in einer Sandwichkonstruktion

Diese sogenannten Inserts aus Werkstoffen höherer Dichte und Festigkeit sorgen dafür, dass die auftretenden Normalkräfte einwandfrei in die Konstruktion eingeleitet werden. Damit können örtlich höhere Zug- und Schubspannungen aufgenommen werden, denn die Inserts sorgen für eine gute Lastverteilung über die Deckbleche und ausserdem für eine bessere Verankerung der Deckbleche untereinander.

7.1.13. Montagekleben

Montagekleben (Fixieren) bedeutet, die Einzelteile einer Konstruktion in der gewünschten Position zueinander anzuordnen und anschliessend mit Klebstoff zu fixieren. Hierbei werden vorzugsweise fugenfüllende Klebstoffe verwendet, die die Zwischenräume zwischen den in Position gebrachten Teilen und den Stützwänden der Konstruktion ausfüllen.

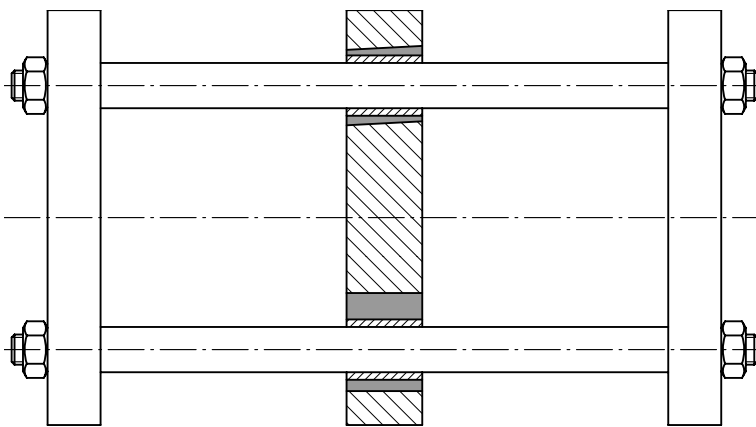


Bild (B127fueZ) Einkleben von Führungsbuchsen zum Ausgleich von Fertigungsungenauigkeiten

Als Beispiel ist hier der Aufspanntisch einer Werkzeugmaschine zu nennen. Die Fertigung genauer Aufspanntische für Werkzeugmaschinen ist infolge des hohen Genauigkeitsgrades sehr teuer. Eine Vereinfachung ist dadurch zu erreichen, dass man von einer grossen Anzahl kleiner rechteckiger Stahlplatten ausgeht, die einfacher genau zu bearbeiten sind. Die Einzelelemente werden einseitig geschliffen und mit ihrer geschliffenen Seite auf eine Richtplatte gelegt. Die Rückseite ist bereits entrostet und gereinigt. Anschliessend werden die Rückseiten der Einzelteile mit einem kalt aushärtenden Klebstoff bestrichen und schliesslich wird eine nur grob bearbeitete Stützkonstruktion aufgelegt. Nach dem Aushärten bilden die geschliffenen Flächen zusammen eine plane Tischfläche, die quasi das Spiegelbild der Richtplatte (in diesem Fall das „Masterpart“) ist.

7.1.14. Kleben als Ersatz für andere Verbindungsarten

Vielfach kann ein Klebverbindung andere Verbindungsarten ersetzen und dazu helfen Fertigungs- und Montagekosten einzusparen.

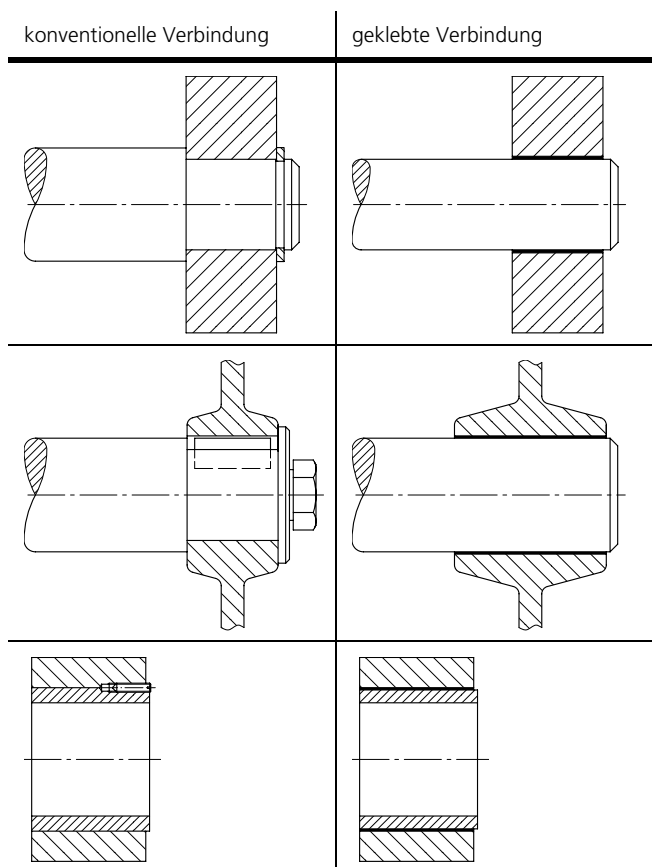


Tabelle (T025fueZ) Vereinfachung der Konstruktion durch Klebeverbindungen

Speziell bei Welle/Nabe-Verbindungen kann durch Verwendung einer Klebverbindung gegenüber den herkömmlichen Verbindungsarten eine beträchtliche Einsparung erzielt werden. Bei der Klebverbindung entfallen die zusätzlichen Axialsicherungen, die bei den herkömmlichen Verbindungsarten erforderlich sind und je nach Ausführung unterschiedliche Zusatzkosten verursachen. Bei Ersatz herkömmlicher Verbindungsarten durch Klebverbindungen müssen neben den reinen Festigkeitsbetrachtungen und Funktionsbetrachtungen unbedingt auch die Kosten berücksichtigt werden.

7.2. Firmen, Links und Organisationen

Firma	Produkte
Sika Chemie GmbH	Klebstoffe
Technologie-Centrum-Kleben GmbH	Klebetchnik
Bakelite AG	Harze

Tabelle (T026fueZ) Firmen zum Kleben

Organisation	Beschreibung
Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren	Verband
Kleben & Dichten	Zeitschrift
Kunststoffweb	Forum für die Kunststoffindustrie
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
www.metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Verband deutscher Maschinen- und Anlagebau	Wirtschaftsverband

Tabelle (T027fueZ) Organisationen zum Kleben

8. Zusammenfassung

Unter Fügen versteht man das mittelbare Verbinden von Bauteilen. Zu den Fügeverfahren gehören:

- das Montieren,
- die Insert-, Outserttechnik,
- das Verbundgiessen,
- das Nieten,
- das Schweißen,
- das Löten,
- das Kleben und
- das Verschrauben.

Dabei resultieren lösbare, bedingt lösbare und unlösbare Verbindungen.

Verständnisfrage 1

Nennen Sie je ein Beispiel einer lösbaren, bedingt lösbaren, unlösbaren Verbindung!

Verständnisfrage 2

Zählen Sie einzelne Richtlinien für montagegerechtes Konstruieren auf!

Verständnisfrage 3

Was versteht man unter einem Insert-Teil?

Verständnisfrage 4

Was versteht man unter einem Blindniet?

Verständnisfrage 5

Erklären Sie das Rollnaht-Schweißen!

Verständnisfrage 6

Nennen Sie einige Richtlinien des Schweißens!

Verständnisfrage 7

Was sind die Vorteile des Klebens? Was sind die Nachteile?

Antwort 1

- lösbar: verschraubt, eingeklinkt
- bedingt lösbar: genietet, z. T. gelötet
- unlösbar: Insert, geschweisst

Antwort 2

siehe Skript!

Antwort 3

Bauteil, meist metallisch, welches bei einem Giessprozess (meist Spritzgiessen) direkt miteingeformt wird.

Antwort 4

Ein Blindniet wird eingesetzt wenn die Nietstelle nur von einer Seite her zugänglich ist. Die Gegenkraft wird über einen Dorn mit einer Sollbruchstelle aufgebracht.

Antwort 5

siehe Skript!

Antwort 6

siehe Skript!

Antwort 7

siehe [Tabelle T021fueZ](#)

Publikationsverzeichnis – Literatur

- [1] Awiszus, Birgit; Bast, Jürgen und Dürr, Holger (2004): Grundlagen der Fertigungstechnik; Fachbuchverlag, Leipzig
- [2] Beitz, Wolfgang und Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.) (2001): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [3] Fischer, Ulrich (2002): Tabellenbuch Metall; Europa Lehrmittel, Hahn
- [4] Koether, Reinhard und Rau, Wolfgang (2004): Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure; Fachbuchverlag, Leipzig
- [5] Lotter, Bruno (1992): Wirtschaftliche Montage. Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik; VDI-Buch, Springer-Verlag, Berlin
- [6] Sautter, Rudolf (1997): Fertigungsverfahren; Vogel Fachbuch Kamprath Reihe, Würzburg

Publikationsverzeichnis – Weblinks

Firmen

- Pollmann, Insert und Outsert, Automobilzulieferer, <http://www.pollmann.co.at>
- Philips APM, Outsert-Technik, <http://www.outsert.philips.com>
- Tielke Kunststoffverarbeitung, <http://www.tielke.de>
- Stettler Kunststoffverarbeitungs-GmbH, <http://www.stettler.de>
- Röhrig High Tech Plastics AG, Insert Technik, <http://www.htp.at>
- SMI Luftfahrtverbindungselemente GmbH, Produzent von Nieten, <http://www.smi-gmbh.de>
- Pfeil, Nietmaschinen, <http://www.pfeil.de>
- Exmü, Schweissgeräte für Elektromaschinenbau, <http://www.exmue.de>
- WIDOS, Kunststoffschweissanlagen, <http://www.widos.de>
- Bielomatik, Kunststoffschweissanlagen, <http://www.bielomatik.de>
- Schweissttechnik Morgenthaler, Schweissanlagen, <http://schweisstechnik-morgenthaler.de>
- E. Nussbaumer AG, Alu Schweißen, <http://www.aluschweisswerk.ch>
- Linde Technische Gase GmbH, Anlagenbau, Technische Gase, <http://www.linde.de>

- Löttechnik Burkhard, Löten, <http://www.loettechnik-burkhard.de>
- Drösser, Stahlhandel, <http://www.droesser.de>
- Automatisierungstechnik Niemeier GmbH, Löten mit Licht, <http://www.atn-berlin.de>
- Sika Chemie GmbH, Klebstoffe, <http://www.sika.de>
- Technologie-Centrum-Kleben GmbH, <http://www.tc-kleben.de>
- Bakelite AG, Harze, <http://www.bakelite.de>

Organisationen

- Swissmem, Verband der Maschinen- und Metallindustrie, <http://www.swissmem.ch>
- www.metallbauer.ch, Schweizer Branchenverzeichnis,
- Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus: <http://www.vdma.org>
- Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren, <http://www.schweissen.de>
- Stahl Online, Stahl-Homepage verschiedener Verbände, <http://www.stahl-online.de>
- Profzone.ch, Übersicht über die verschiedenen Stähle, <http://stahl.profzone.ch>
- Edelstahl Rostfrei, Informationsstelle, <http://www.edelstahl-rostfrei.de>
- Kleben und Dichten, Zeitschrift, <http://www.klebendichten.de>

Fertigungsverfahren 5 – Stoffeigenschaftsändern

Autor: Prof. Dr. M. Meier

1. Überblick

Motivation

Sie haben auf dem CAD ein Bauteil oder sogar eine Baugruppe fertig konstruiert. Für den kommenden Tag ist ein Projektreview geplant. Können Sie den Teilnehmern einen Prototypen präsentieren?

Mit modernen Rapid-Prototyping Verfahren wie beispielsweise SLS (Selective Laser Sintering) ist dies möglich. Sie schicken Ihr CAD-Datenmodell an einen SLS Spezialisten; er produziert das Teil über Nacht und schickt es Ihnen am kommenden Tag rechtzeitig zur Sitzung.

Lernziele

Die Studierenden sollen einige Stoffeigenschaftsänderungsverfahren aufzählen und erklären können.

Einleitung

Bei Verfahren, welche auf einer Stoffänderung basieren, werden die chemischen oder physikalischen Eigenschaften der Bauteile bei der Herstellung verändert. Die Stoffänderung kann durch die unterschiedlichsten Prinzipien wie Druck, Wärme oder Bestrahlung erfolgen. Es gibt daher auch eine Vielzahl von unterschiedlichen Einzelverfahren, von denen jedoch in dieser Sektion nur einige wenige aufgegriffen werden können. Besonderen Wert wird auf zwei Rapid-Prototyping-Verfahren gelegt.

2. Sintern, Brennen

Anders als beim Giessen bilden beim Sintern pulverförmige Werkstoffe den Ausgangsstoff.

Pulver aus Metallen, Metalllegierungen und Metallverbindungen können durch Verdichten und nachträglichem Sintern zu Halbzeugen oder Fertigteilen verarbeitet werden. Dieses Verfahren ist dann sinnvoll, wenn:

- Metalle mit hohem Schmelzpunkt verbunden werden müssen,
- spröde Werkstoffe mit zähen Matrizen verbunden werden (Hartmetalle),
- poröse Bauteile hergestellt werden,
- Legierungen mit Metallen hoher sowie solche mit tiefer Schmelztemperatur gefertigt werden müssen oder wenn
- Polymere per Laser gehärtet werden sollen.

2.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Sintern eignet sich besonders für:

- Kettenräder
- Zahnräder
- HM-Schneideplatten
- Druckluftschalldämpfer
- Filter
- Gleitlager mit Schmierwirkung



Bild (B007seaZ) Allied Sinterings



Bild (B008seaZ) Plansee

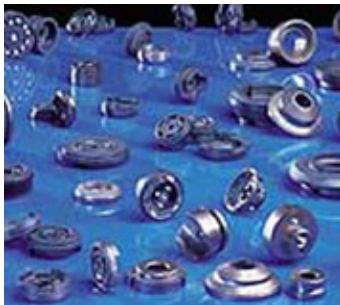


Bild (B009seaZ) Plansee

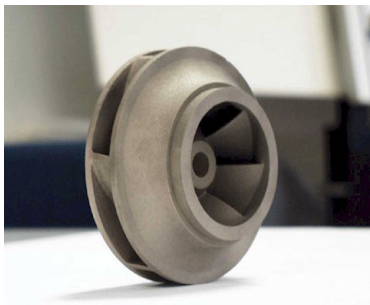


Bild (B010seaZ) SLS-Prototyp (Modelltechnik Rapid Prototyping GmbH)

2.2. Verfahren: Sintern

Pulver mit Korngrößen von 1 μm bis 0.5 mm werden meist mechanisch verdichtet. Dies kann bei Raumtemperatur oder in Heisspressen erfolgen. Anschliessend werden diese Rohlinge, Grünlinge genannt, gesintert, was unterhalb der Schmelztemperatur ($2/3$ von T_S) erfolgt (bei Mehrstoffsystemen ist der tiefstschmelzende Stoff massgebend).

Die Verbindung erfolgt durch Zusammenwachsen der Teilchen durch Diffusion. Durch Pressdruck, Sinterzeit, Sintertemperatur und Pulverkörnigkeit kann die gewünschte Porosität des Bauteiles bis hin zu nahezu porenfrei gezielt eingestellt werden. Nachträgliches Kalibrieren der Teile, z. B. durch Nachpressen, erhöht die Genauigkeit. Auch sind weitere Wärmebehandlungen analog zum Stahl möglich.

Die Werkzeuge für die Sintertechnik sind recht teuer und das Formfüllungsverhalten sowie die geometrische Begrenzungen der Bauteile hinsichtlich einer gleichmässigen Verdichtung des Pulvers recht eingeschränkt. Deshalb eignet sich das Sinterverfahren meist für hohe Stückzahlen und für Bauteile, im Gegensatz zum Giessen, mit relativ einfachen Bauformen.

Wenn die obigen Vorteile des Verfahrens zum Tragen kommen, wird es angewendet bei:

- Hartmetallen als Schneidwerkstoffe. Herstellung eines verbundmetallartigen Gefüges aus spröden Hartstoffen wie Wolfram-, Molybdän- und Tantalcarbiden sowie einem bei Sintertemperatur bereits teigigen Bindemetalls wie Kobalt.
- Verbundkörpern aus nicht oder schwer legierbaren Komponenten, z. B. Metallkohlen aus Kupfer und Graphit, mit der guten Leitfähigkeit des Kupfers und der ausgezeichneten Gleiteigenschaft des Graphits, Kontaktbaustoffe mit der hohen Härte des hochschmelzenden Wolframs und Molybdäns sowie der guten Leitfähigkeit von niedrigschmelzendem Kupfer und Silber.
- „Diamantmetallen“ durch gleichmässige Einsinterung feinkörniger Hartstoffe wie Diamantteilchen oder Korund in eine metallische, zähe Grundmasse.
- Filter und porösen (mit Öl getränkten, selbstschmierenden und zum Teil wartungsfreien) Lager mit gleichmässig verteilten sowie untereinander verbundenen Poren; Porengrösse und Porenvolumen sind in weiten Grenzen gezielt einstellbar.
- Legierungen aus einem Metall mit hoher Schmelztemperatur und einem Metall mit, bei dieser Temperatur, bereits überschrittener Siedetemperatur und hohem Dampfdruck (z. B. Eisen, Kobalt, Nickel einerseits und Zink, Cadmium, Blei usw. andererseits).

- sehr spröden Werkstoffen, die spanend schwierig oder unmöglich zu bearbeiten sind (z. B. Dauermagnete auf Eisen-Aluminium-Nickel-Kobalt-Kupferbasis oder hochlegierte spröde Stähle auf Eisen-Chrom-Aluminiumbasis)
- anderen Formgebungsverfahren, wenn zeit- und kostenintensive Nachbearbeitungen notwendig sind (z. B. bei Massenartikeln kleiner Teile aus Eisen- und Nichteisenmetallen)
- Forderung nach sehr hohem Reinheitsgrad und gleichbleibender Zusammensetzung, die beim Schmelzen und dem dabei notwendigen chargenweisen Betrieb nicht immer gewährleistet ist.

vorgelagerte Verfahren	vergleichbare Verfahren	nachgelagerte Verfahren
Mahlen	Schwerkraftgiessen	Wärmebehandlung
Pressformen	Stereolithographie	Tränken
Strangpressen		Galvanisieren
		Nachpressen (Gesenkformen)

Tabelle (T001seaZ) Vorgelagerte, vergleichbare und nachgelagerte Verfahren

2.3. Verfahren: Selektives Laser Sintern (SLS)

Das selektive Laser Sintern ist ein neues Verfahren, welches im Prototypenbau eingesetzt wird (Rapid Prototyping). Das Besondere an diesem Verfahren ist, dass in relativ kurzer Zeit vollautomatisch fast beliebige 3D-Modelle erstellt werden können. Das Verfahren ist aus dem Bedürfnis entstanden, schon in der Konstruktionsphase ein Anschauungsmodell von komplexen Bauteilen zu haben oder um Ästhetik-Studien zu überprüfen.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet ist das Rapid Tooling, wo in kurzer Zeit kostengünstige Werkzeuge für Kleinserien entstehen.



Bild (B001seaZ) Modelltechnik Rapid Prototyping GmbH

Beim SLS erwärmt ein Laser-Strahl dort, wo das Werkstück entstehen soll, ein mindestens teilweise thermoplastisches Pulver. Durch die Hitze bildet sich eine feste Schicht, welche ihrerseits wieder mit Pulver beaufschlagt wird. Der Laser erhitzt auch diese Schicht und verbindet sie mit der darunter liegenden. Nicht aufgeschmolzenes Material verbleibt pulverförmig stützend in der Form und wird erst am Ende der Bauteilherstellung entfernt.

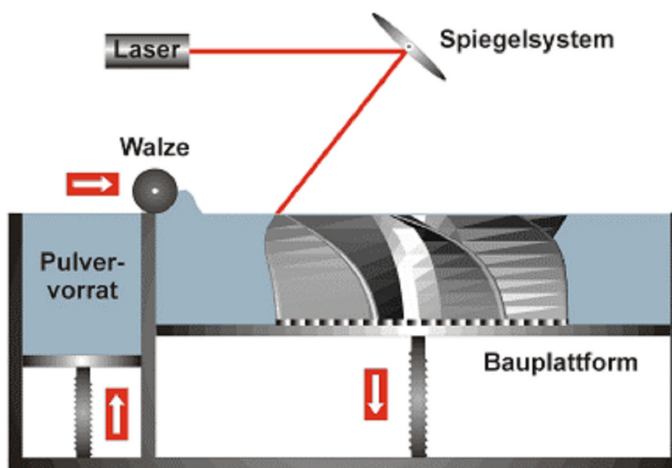


Bild (B019seaZ) Funktionsprinzip einer SLS-Maschine (DTM Corporation)



Bild (B003seaZ) Accelerated Technologies Inc.



Bild (B004seaZ) Modelltechnik Rapid Prototyping GmbH



Bild (B005seaZ) Modelltechnik Rapid Prototyping GmbH



Bild (B006seaZ) Speedparts

Als Pulvermaterial werden Thermoplaste wie PA eingesetzt, oder aber Metall- oder Sandpulver mit Kunststoffbinder. Es ist sogar möglich thermoplastische Elastomere einzusetzen, etwa in der Schuhindustrie.

SLS-Teile können auch als verlorene Gussmodelle eingesetzt werden (das SLS verbrennt beim Eingiessen des Metalls), oder direkt als Gussform (unter Verwendung von Sand mit Binder).

2.4. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Accelerated Technologies Inc.	Sintertechnologie
Osterwalder	Sinterpressen

Tabelle (T002seaZ) Firmen Sintern

Organisation	Beschreibung
European Powder Metallurgy Association	Europäische Vereinigung
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T003seaZ) Organisationen Sintern

3. Pulvermetallurgisches Spritzgiessen (Metal Injection Moulding, MIM)

Metal Injection Moulding ist eine Kombination von Spritzgiessen und anschliessendem Sintern. Der Prozess des Spritzgiessens ist dabei analog zum Verfahren mit thermo- und duroplastischen Kunststoffen. Anders als bei Kunststoffen folgen bei MIM jedoch nach der Formgebung noch weitere Behandlungsschritte.

Das pulvermetallurgische Spritzgiessen ist als Fertigungsverfahren für Grossserienprodukte anzusehen. Abhängig von Werkstoff und Geometrie des Bauteils erlangt das Verfahren wegen des hohen Werkzeugaufwands eine Wirtschaftlichkeit bei einem Jahresbedarf von mehr als 100 000 Teilen. In Ausnahmefällen können auch kleinere Stückzahlen wirtschaftlich gefertigt werden.

3.1. Verfahren, Überblick

Sehr feine Metallpulver werden mit thermoplastischen Bindern und Plastifizierern gemischt und in eine homogene Masse überführt. Der Volumenanteil des Metallpulvers beträgt zwischen 50% und 70%. Die so erhaltene Masse kann analog zu Kunststoff in ähnlichen Spritzgiessmaschinen verarbeitet werden.

Der beim Spritzgiessen erhaltene Formkörper besitzt, bedingt durch die Zugabe der Binder, ein um deren Anteil erhöhtes Volumen. In einem anschliessenden Austreibprozess werden durch thermische Zersetzung und Verdampfung, Bindemittel und Platifizierer beinahe vollständig aus dem Formkörper entfernt. Er wird dabei in einen porösen und daher empfindlichen, aber noch handhabbaren Körper überführt.

Die anschliessende Sinterung in einer Schutzgasatmosphäre überführt den Formkörper in ein rein metallisches Bauteil. Dabei tritt in der Masse eine homogene lineare Schwindung von 10–19% auf, je nach Anteil von Binder und Plastifizierer. Eine verbleibende Restporosität liegt in der Regel als geschlossene Porosität vor. Die fertigen Teile sind i. A. gas- und flüssigkeitsdicht.

Für besondere Anwendungsfälle ist es möglich, das Bauteil durch heissisostatisches Pressen auf 100%ige Dichte zu bringen.

Die gesinterten Teile sind nun direkt einbaufertig oder können durch weitere Veredelungsprozesse in ihren mechanischen, physikalischen, chemischen und geometrischen Eigenschaften noch optimiert werden. Die Werkstücke können dabei wie dichte Werkstoffe verar-

beitet werden. Insbesondere sind ihre Oberflächen beliebig behandelbar.

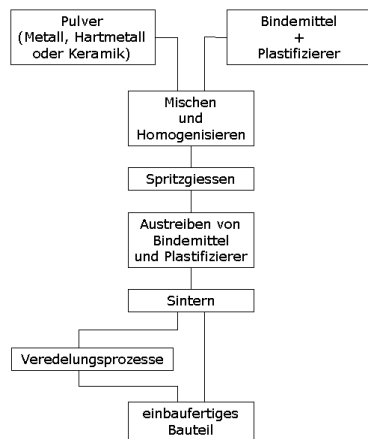


Bild (B020seaZ) Verfahrensschema

3.2. Einsatzgebiete und Teilebeispiele

MIM bietet dem Konstrukteur eine sehr grosse geometrische Gestaltungsfreiheit. Sehr komplexe Bauteile können mit engen Toleranzen gefertigt werden, was mit anderen Verfahren nicht. Da die Formgebung der pulverförmig vorliegenden Werkstoffe durch Spritzgiessen erfolgt, können sonst mechanisch nur schwer bearbeitbare Materialien problemlos verarbeitet werden.

Sodann eignet sich das Verfahren bei Verwendung von sehr teuren Werkstoffen, da durch Rückführung der Angussrückstände höchste Werkstoffausbeuten realisiert werden können.

Schliesslich ist es auch möglich, Multifunktionsbauteile in Integralbauweise zu realisieren und dadurch die später nötigen Fügeoperationen zu reduzieren.



Bild (B021seaZ) PKW Schlosskappe (Metallico)



Bild (B023seaZ) Zylinderschloss, Zylinderkörper, Aufbohrschutz (Metallico)



Bild (B022seaZ) Drucksensor Gehäuse und Deckel (Metallico)

Typische Einsatzgebiete

- Elektronische Geräte
- Feinmechanische Geräte
- Haushaltgeräte
- Hand- und Heimwerkzeuge
- Hygiene- und Medizintechnik
- Werkzeugtechnik
- Armaturenbau
- Automobilbau
- Regelungstechnik
- Luft- und Raumfahrt
- Sport- und Freizeitgeräte
- Schlösser und Beschläge
- Gehäuse für elektronische Bauelemente

3.3. Konstruktionsrichtlinien

Im Allgemeinen können die Richtlinien zur Gestaltung von Spritzgussteilen aus thermoplastischen Kunststoffen herangezogen werden. Es gelten ähnliche Regeln und Forderungen:

- Gleichmässige Wandstärken,
- wenn Wandstärkenunterschiede unvermeidbar; keine scharfen Übergänge,
- Radien nicht kleiner als 0.4 mm,
- geeignete Auflagefläche vorsehen um während des Austreibens und Sinterns eine Verzug zu vermeiden,
- grosse Überhänge vermeiden, evtl. eine Abstützung durch Stege vorsehen.

Bauteilmerkmale

- Bauteilgewicht 0–100 g
- Wandstärken 0.5–5 mm
- Oberflächenrauigkeit je nach Pulvermorphologie und Werkzeugaufwand R_z 6 μm – R_z 15 μm

3.4. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Schunk Group Metallico	Metal Injection Moulding

Tabelle (T002seaZ) Firmen MIM

4. Bestrahlen

Schwierig in die bestehenden Gruppierungen einzuordnen sind moderne Fertigungsverfahren, welche sich durch höchst interdisziplinäre Arbeit und Kombination von mehreren bekannten Verfahren auszeichnen.

Spritzgiesswerkzeuge für kleine Bauteile oder feine Strukturen, wie z. B. Tintenstrahldrucker-Düsenplatten, werden, angelehnt an die Halbleiterfertigungstechnologie, im LIGA-Verfahren (Lithographie, Galvanoforming, und Abformen) erzeugt.

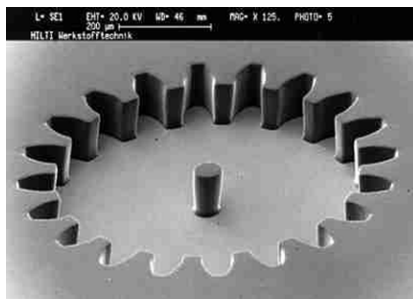


Bild (B011seaZ) im LIGA-Verfahren hergestelltes Mikro-Spritzgiesswerkzeug [NTB]

Mit intensiven, parallelen Röntgenstrahlen wird ein Resist-Material, z. B. PMMA, bestrahlt. Dort, wo später die Struktur hervorsteht, wird die Oberfläche mit einer Maske abgedeckt. Die bestrahlten Bereiche werden nun weggeätzt. Die Vertiefungen werden durch galvanisches Auftragen mit Metallen wie Nickel gefüllt. Jetzt kann das Resist-Material restlos entfernt werden. Die feine Metallstruktur ist erstellt. Diese Form dient nun als Spritzgusswerkzeug.

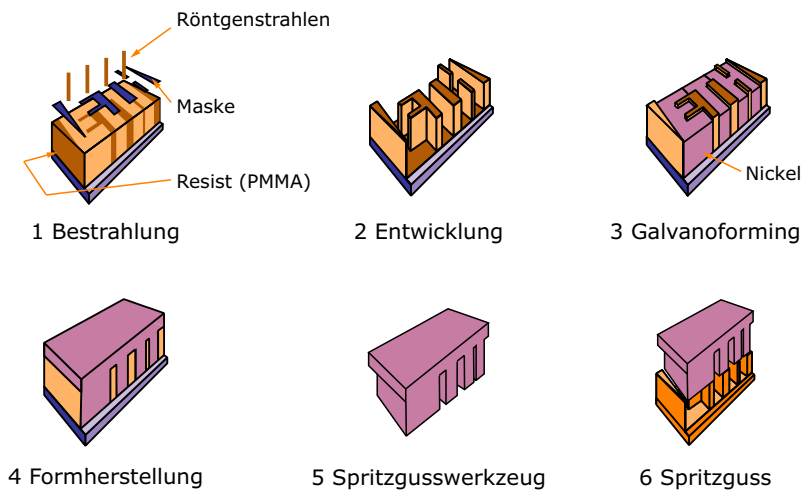


Bild (B012seaZ) Formherstellung mittels Röntgenstrahlen

Verfahrensschritte des LIGA-Verfahrens zur Herstellung einer Wabenstruktur. Die Wabenwände haben eine Stärke von $2\ \mu\text{m}$ und eine Höhe von $350\ \mu\text{m}$.

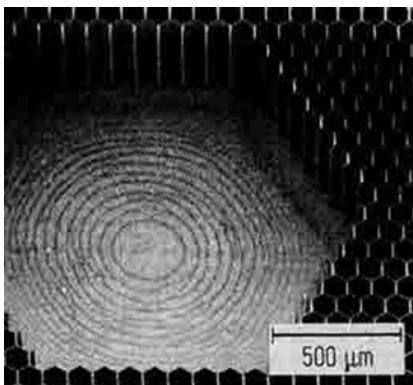


Bild (B013seaZ) Wabenstruktur

4.1. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Elmicron	LC-LIGA
STEAG microParts GmbH	LIGA Anwendungen

Tabelle (T004seaZ) Firmen LIGA-Verfahren

Organisation	Beschreibung
Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs	Eigenes LIGA-Verfahren
Forschungszentrum für Kerntechnik	Institut für Mikrostrukturtechnik, Erfinder des Verfahrens
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T005seaZ) Organisationen LIGA-Verfahren

5. Fotochemische Verfahren

An dieser Stelle soll ein neues Verfahren beschrieben werden, welches häufig im Zusammenhang mit Rapid Prototyping genannt wird: Stereolithographie (SLA).

Bei diesem Verfahren härtet ein UV-Laser-Strahl CNC-gesteuert ein Photopolymer-Harz aus. Die Daten werden vom 3D-CAD über eine genormte Schnittstelle auf die Maschine übertragen, womit weitere Arbeiten entfallen. Insofern gleicht Stereolithographie stark dem Selektiven Laser-Sintern.

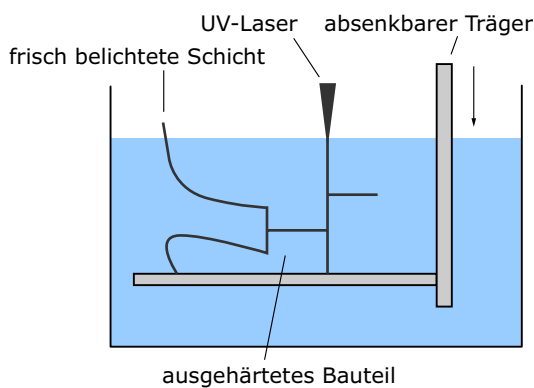


Bild (B014seaZ) Funktionsprinzip der Stereolithographie



Bild (B015seaZ) Stereolithographie-Maschine (3D Systems)

- Die 3D-CAD-Daten werden dem Prozess übermittelt (meist Export in STL-File), der das ganze Bauteil in einzelne Schnittebenen mit Höhenlinien von rund 0.1 mm umrechnet (ähnlich einem Computer-Tomographen).
- Eine Glasplatte wird, ähnlich einem Kopierer, als Schwarzweissmaske elektrostatisch mit dem errechneten Querschnitt eingefärbt.

- Anschliessend wird diese Glasplatte beaufschlagt (Abbild der ersten Schicht) und die erste Polymer-Lage mit dem durchgehenden Licht belichtet.
- Das Polymer härtet an den belichteten Stellen aus und bleibt bei den unbelichteten Stellen flüssig.
- Ein Sauggerät saugt das flüssige Polymer ab.
- Die nun leeren Zonen werden mit einem Wachs gefüllt und die ganze Lage überschliffen.
- Die nächste Lage mit Polymer wird aufgebracht und die Maske mit dem 2. Schritt eingefärbt und der Prozess n-mal wiederholt, bis alle Schnitte in der Höhe abgebildet sind.
- Am Ende wird der Wachs mit Wärme aus dem Modell herausgeschmolzen. Der ausgehärtete Polymer, ein Abbild des gewünschten Prototyp-Bauteils ist hergestellt.
- Dieses Anschauungs- und Testmodell lässt sich auch einfärben.

andere RP-Verfahren	nachgelagerte Verfahren
selektives Laser Sintern	einfärben
fused Deposition Modeling	
Strahlspanen (Laser/Wasser)	

Tabelle (T006seaZ) Andere und nachgelagerte Verfahren

5.1. Einsatzgebiet, Teilebeispiele

Ein [Video](#) von 3d Systems veranschaulicht das Verfahren und zeigt einige Teilebeispiele.



Bild (B016seaZ) Accelerated Technologies Inc.



Bild (B017seaZ) KPM Martin



Bild (B018seaZ) Modelltechnik Rapid Prototyping GmbH

5.2. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
3D Systems	Führender Hersteller von Stereolithographie-Maschinen
DTM Corp.	SLS-Maschinen
Lithopol AG	Rapid-Prototyping-Teile, CH
Munot Modulus AG	Rapid-Prototyping-Teile, CH
Speedpart	Rapid-Prototyping-Teile, D
ZAP Ludwig RPD GmbH	Rapid-Prototyping-Teile, D
Modelltechnik RP GmbH	Rapid-Prototyping-Teile, D
KPM Martin	Rapid-Prototyping-Teile, D

Tabelle (T007seaZ) Firmen Rapid Prototyping

Organisation	Beschreibung
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Soziale Arbeit St.Gallen	Institut für Reverse Engineering und Rapid Prototyping
stereolithographie.de	Branchenverzeichnis
Schweizerischer Technischer Verband	Ingenieur- und Architektenverband
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie

Tabelle (T008seaZ) Organisationen Rapid Prototyping

6. Zusammenfassung

Unter dem Titel Stoffeigenschaftsändern sind Verfahren zusammengefasst, bei denen das Bauteil unter chemischer oder physikalischer Einwirkung seine Eigenschaften ändert. Dazu gehören konventionelle Verfahren wie das Sintern, aber auch moderne Verfahren aus der Mikrotechnik wie das LIGA-Verfahren oder Verfahren des Rapid-Prototyping.

Verständnisfrage 1

Suchen Sie im Internet nach einem Hersteller von Sinterteilen und studieren Sie diese Seite!

Verständnisfrage 2

Suchen Sie im Internet einen Anbieter von Rapid-Prototyping-Teilen und studieren Sie diese Seite!

Antwort 1

individuell

Antwort 2

individuell

Publikationsverzeichnis – Literatur

- [1] Awiszus, Birgit; Bast, Jürgen und Dürr, Holger (2004): Grundlagen der Fertigungstechnik; Fachbuchverlag, Leipzig
- [2] Beitz, Wolfgang und Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.) (2001): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [3] Fischer, Ulrich (2002): Tabellenbuch Metall; Europa Lehrmittel, Hahn
- [4] Koether, Reinhard und Rau, Wolfgang (2004): Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure; Fachbuchverlag, Leipzig
- [5] Sautter, Rudolf (1997): Fertigungsverfahren; Vogel Fachbuch Kamprath Reihe, Würzburg

Publikationsverzeichnis – Weblinks

Firmen

- Accelerated Technologies Inc.: <http://www.acceltechinc.com>
- Osterwalder: <http://www.osterwalder.com>
- Elmicron: <http://www.elmicron.ch>
- STEAG microParts GmbH: <http://www.microparts.de>
- 3D Systems: <http://www.3dsystems.com>
- DTM Corp.: <http://www.dtm-corp.com>
- Lithopol AG: <http://www.lithopol.ch>
- Munot Modul: AG:
<http://www.cadfactory.ch/munot-modulus/index.htm>
- Speedpart: <http://www.speedpart.de>
- ZAP Ludwig RPD GmbH: <http://www.rpd-gmbh.de>
- Modelltechnik RP GmbH: <http://www.modelltechnik.de>
- KPM Martin: <http://www.kpm-martin.de>

Organisationen

- European Powder Metallurgy Association:
<http://www.epma.com>
- Swissmem: <http://www.swissmem.ch>
- Metallbauer.ch: <http://www.metallbauer.ch>
- Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus:
<http://www.vdma.org>

- Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs:
<http://www.ntb.ch>
- Forschungszentrum für Kerntechnik: <http://www.fzk.de/imt>
- Hochschule für Technik, Wirtschaft
und Soziale Arbeit St.Gallen: <http://www.fhsg.ch>
- stereolithographie.de: <http://www.stereolithographie.de>
- Schweizerischer Technischer Verband: <http://www.stv.ch>
- Schunk Group, Metallico: <http://www.metallico.de>

Fertigungsverfahren 6 – Beschichten

Autor: Prof. Dr. M. Meier

1. Überblick

Motivation

Betrachten Sie Ihre Sonnenbrillengläser, die ihre Augen vor schädlichen UV-Strahlen schützt, den Rucksack, dessen Material Wasser perlen abstösst, oder den Lenker Ihres Fahrrads, der (hoffentlich) keinen Rost aufweist. Bei allen genannten Produkten wurden Bauteile oder Materialien beschichtet, um gewisse Eigenschaften zu verändern oder zu verbessern.

Lernziele

- Die Studierenden kennen einzelne Beschichtungsverfahren und können diese beschreiben.
- Sie sind in der Lage über Literatur, Internet oder andere Quellen weitere Verfahren zu finden und ihr Einsatzpotential abzuschätzen.

Einleitung

Beschichten heisst, durch chemische oder physikalische Verfahren Oberflächen zu verändern oder ein Grundmaterial mit einer Schicht zu versehen. Dadurch werden Eigenschaften oder sogar Funktionen behandelter Bauteile gezielt verändert. Bekannte Beispiele für das Beschichten sind der Korrosionsschutz, die Verbesserung von Kontakteigenschaften, die Veränderung optischer Eigenschaften oder das Verbessern physikalischer Eigenschaften wie beispielsweise Härte oder Verschleisswiderstand (in der Werkzeugtechnik).

2. Beschichten aus dem flüssigen Zustand – Schmelztauchen

In erster Linie sei hier das Feuerverzinken zu erwähnen. Stahlkonstruktionen, welche über Jahre Witterungseinflüssen unterworfen sind, werden bevorzugt feuerverzinkt.

Beim Feuerverzinken wird das Werkstück in eine flüssige Zinkschmelze eingetaucht, wobei der Stahl mit dem Zink reagiert und an der Oberfläche eine Legierung bildet. Feuerverzinkte Oberflächen zeichnen sich durch ein elektrochemisches Schutzsystem aus, welches bei Kratzern in der Oberfläche die Ausbreitung von Rost verhindert. Der Schutz bleibt einige Jahrzehnte gewährleistet und kann noch gesteigert werden, wenn das Bauteil in einem weiteren Schritt lackiert wird.

Übliche Schichtdicken sind 70–85 μm , Kleinteile (Schrauben) werden zur Schichtdickenverminderung nach dem Verzinken geschleudert.

Nachteilig wirkt sich lediglich die beschränkte chemische Beständigkeit des Zinks aus.



Bild (B001besZ) Feuerverzinkte Oberfläche (Galva-swiss)



Bild (B002besZ) Wanne mit flüssigem Zink, Eintauchen von Bauteilen (Galvaswiss), siehe auch [Video](#) Feuerverzinken (Film: Beratung Feuerverzinken)

2.1. Einsatzgebiete und Teilebeispiele

Feuerverzinkungen werden für Verbindungselemente, Armaturen, Seilbahnen, Rohrleitungen und überall im Stahlbau eingesetzt.

Um einheitliche Verzinkungsstandards zu definieren, ist Verzinken genormt.

- DIN EN ISO 1461:
Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgebraute Zinküberzüge
- DIN EN ISO 1244:
Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme

Beide Normen enthalten allgemeine Bestimmungen über Korrosionsschutzverfahren.

vorgelagerte Verfahren	verwandte Verfahren	nachgelagerte Verfahren
Reinigen	Galvanisieren	Pulverbeschichten
		Lackieren
		Schweissen
		Schleudern

Tabelle (T001besZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren



Bild (B003besZ) Kleinteile werden als Schüttgut in einem Behälter verzinkt. (Verzinkerei Wollerau)



Bild (B004besZ) Feuerverzinkte Schrauben (EGGA)



Bild (B005besZ) Hochbaukonstruktion (Galvaswiss)

2.2. Konstruktionsrichtlinien Schmelztauchen

Die Gestaltungsrichtlinien beim Schmelztauchen können unter [5.2](#) nachgelesen werden. Sie sind weitgehend indentisch zu denjenigen beim Galvanisieren.

2.3. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma:	Produkte:
Galvaswiss	Verzinkungen
Verzinkerei Stooss	Verzinkungen
VK Kriessern	Verzinkungen

Tabelle (T002besZ) Firmen Schmelztauchen

Organisation:	Beschreibung:
Vereinigung Schweizerischer Verzinkereien	
International Zinc Association	
Europäische Vereinigung für allg. Verzinkung (EGGA)	
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T003besZ) Organisationen Schmelztauchen

3. Beschichten aus körnigem / pulverförmigem Zustand – Thermisches Spritzen, DIN 32 530

Das Plasmaspritzen hat an grosser Bedeutung gewonnen. Zwischen einer stabförmigen Wolframelektrode und einer wassergekühlten Kupferanode brennt in einer Gasatmosphäre (Stickstoff / Wasserstoff; Argon / Wasserstoff; Argon / Helium) ein Lichtbogen mit hoher Energiedichte. Durch Ionisation entsteht ein Plasma mit hoher Temperatur und hoher Leitfähigkeit.

Der pulverisierte Spritzwerkstoff wird mit Hilfe eines Fördergases in das Plasma eingeführt, geschmolzen, beschleunigt und mit hoher kinetischer Energie auf das zu beschichtende Werkstück gespritzt. Die porenarm erzeugte und festhaftende Schicht hat in Abhängigkeit vom Spritzwerkstoff eine Dichte von rund 98 %.

Eingesetzt wird dieses Verfahren zur Verschleissfestigkeitserhöhung und als Korrosionsschutz, aber auch für Reparaturen, da der Strahl von Hand geführt werden kann.



Bild (B006besZ) Anwendungsbeispiele (Inoceramic)



Bild (B007besZ) Anwendungsbeispiele (Inoceramic)



Bild (B008besZ) Anwendungsbeispiele (Inocermic)

vorgelagerte Verfahren	verwandte Verfahren	nachgelagerte Verfahren
	Vakuumbeschichten	

Tabelle (T004besZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

3.1. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Sulzer Metco	Spritzanlagen
Inocermic	Keramikprodukte

Tabelle (T005besZ) Firmen thermisches Spritzen

Organisation	Beschreibung
Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V.	Verband mit guter Homepage
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T006besZ) Organisationen thermisches Spritzen

4. Beschichten aus dem dampfförmigen Zustand – Vakuumbeschichten, DIN 28 400 Teil 4

Mit Beschichtungen lassen sich völlig neue Eigenschaften der Basiswerkstoffe addieren. Man spricht von einer eigentlichen Funktions-trennung. Die Schicht übernimmt z. B. die Kontaktfunktion wie Gleiteigenschaften, Korrosionsschutz, optische Darstellung und das Substrat übernimmt die geometrische Formgebung, die Bauteilfestigkeit, die Trägerfunktion etc.

Die hier beschriebenen Verfahren sind noch sehr jung und werden ständig weiterentwickelt. Es handelt sich um Verfahren zur Beschichtung von Oberflächen mit Hartstoffschichten.

4.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Einsatzgebiet PVD/CVD:

- Wendeschneidwerkzeuge, Bohrer, Fräser, Tiefzieh-, Urform- und Prägwerkzeuge
- Armaturen
- Zahnräder
- Schraubenkompressoren
- Wälzlager
- Entspiegelung von Gläsern
- Wärmeschutzgläser
- Schmuckwaren
- Reflexionsschicht auf CDs
- Halbleiterindustrie (Wafer)



Bild (B015besZ) Zahnrad (Balzers: www.balzers.com)



Bild (B016besZ) Wälzlagerrollen (Balzers: www.balzers.com)



Bild (B026treZ) Wendschneidplatten (Sandvik)

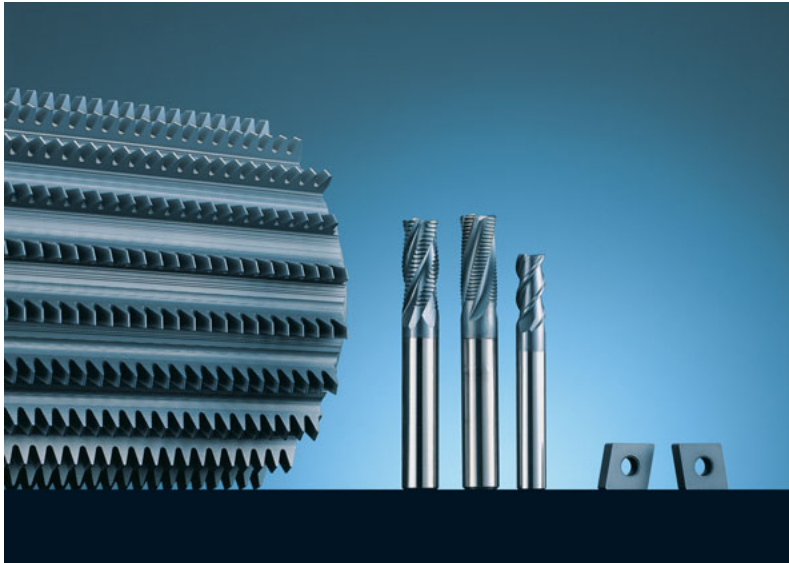


Bild (B018besZ) Stössel für Einspritzpumpen (Balzers: www.balzers.com)



Bild (B019besZ) Ästhetische Beschichtung (KWC Armaturen)



Bild (B020besZ) Kompressor-Schrauben (Balzers: www.balzers.com)



Bild (B021besZ) CrN-Schicht auf Werkzeug (ZOM Oberflächenbearbeitung)



Bild (B022besZ) Beschichtete Fräser (Plasmotec)



Bild (B023besZ) Beschichtete Leichtmetallfelge (PVT)



Bild (B024besZ) Axialpumpenstößel (Balzers: www.balzers.com)

4.2. Verfahren: PVD (Physical Vapor Deposition)

In einer Vakuumkammer verdampft der beschichtende Stoff in einem Plasma und kondensiert auf dem Substrat.



Bild (B009besZ) PVD-Anlage, Blick in eine Vakuumkammer (ZOM Oberflächenbearbeitungs-GmbH)

Das PVD-Verfahren ist die verbreitetste Methode, um Hartstoffschichten zu erzeugen. Es können aber auch Schichten für die Optik und viele andere Bereiche hergestellt werden.

Das Kernstück jeder PVD-Anlage ist eine Vakuumkammer, wo die zu beschichtenden Substrate eingebracht werden. Innerhalb der Kammer werden die Werkstücke an einem drehbaren Halter, Susceptor genannt, aufgehängt. Das Beschichten beginnt mit dem Erzeugen des Vakuums und der Überführung des Schichtwerkstoffes in den Plasmazustand. Da in der Kammer ein Vakuum herrscht, können sich die verdampften Schichtmoleküle gradlinig in der Kammer bewegen. Beim Auftreffen auf einen kalten Gegenstand, wie die zu beschichtenden Teile dies sind, kondensieren die Moleküle und bilden eine feste Schicht.



Bild (B011besZ) PVD-Anlage (PVT)

Durch Mehrere nacheinander aufgebraute Schichten können weitere unabhängige Eigenschaften erzielt werden wie tiefe Reibwerte in der äussersten Schicht, Diffusionssperrschicht darunter, Erhöhung der Haftung mit dem Substrat in der weiteren Schicht etc.



Bild (B012besZ) Der beladene Susceptor ... (PVT)



Bild (B013besZ) ... wird in die Vakuumkammer geschoben (PVT)

Vorteile	Nachteile
extreme Härte der Oberfläche	teuer
hohe Abriebfestigkeit	kein Nachschleifen von Werkzeugen mehr möglich
kleiner Reibungskoeffizient	kaum rezyklierbar
erhöhung der Standzeit von Werkzeugen bis 10x	thermische Beeinflussung der Werk- stücke
umweltfreundlicher als andere Beschich- tungsverfahren	hoher Investitionsaufwand
ästhetische Oberflächen	hoher Energieaufwand
spart Schmierstoff	
gute Schicht-Substrat Verbindung	

Tabelle (T007besZ) Vorteile, Nachteile PVD

4.3. Konstruktionsrichtlinien zum Beschichten aus dem dampfförmigen Zustand

Die Oberfläche eines Werkstücks, das durch die Formgebung seine Gestalt bekommen hat, muss durch geeignete technische Massnahmen in gebrauchsfähigen Zustand versetzt werden. Die Oberfläche muss funktional werden. Unter Funktionalität versteht man dabei, dass sie allen aus dem Gebrauch, dem Einsatz und der Verwendung entstehenden Ansprüchen genügen muss.

Der Vorgang des Oberflächenbeschichtens erfordert die Einhaltung bestimmter Konstruktionsregeln, ohne deren Einhaltung die Behandlung erschwert oder gar unmöglich gemacht wird. Bislang haben zu diesem Problem nur die einzelnen Fachverbände Stellung bezogen und teilweise Broschüren (zum Beispiel Galvanisiergerechtes Konstruieren) mit auf ihre Produktionen zugeschnittenen Regeln herausgegeben. Vergleicht man jedoch diese Regelwerke, so schälen sich allgemein gültige Konstruktionsregeln heraus, die man gelegentlich nur mit Ergänzungen für den Spezialfall versehen muss. Nachfolgend ein Auszug aus den allgemeingültigen Regeln zum beschichtungsgerechten Gestalten von Oberflächen:

- Alle gasförmigen, flüssigen oder festen Medien müssen die Oberfläche (vor allem Falze, Bördelungen, Bohrungen usw.) ungehindert erreichen und ungehindert wieder verlassen können.
- Vertiefungen aller Art sollen so angebracht werden, dass sie beim Tauchen in flüssige Medien ohne Bildung von Luftblasen befüllt und ohne Bildung von Rückständen entleert werden können.
- Scharfe Kanten sollten durch Rundungen oder Abschrägen entschärft werden.
- Bohrungen sollten so ausgeführt werden, dass kein Materialstau am Einlauf durch scharfe Kanten entsteht. Am besten sollten Bohrungen angesenkt werden.
- Spitze Ecken oder Winkel sollten durch Schweissauftrag ausgefüllt werden.

Hinsichtlich dem PVD- / CVD (physical / chemical vapour deposition) beschichtungsgerechten Gestalten von Oberflächen muss berücksichtigt werden, dass diese beiden genannten Verfahren Vakuumbeschichtungsverfahren sind und somit auf Vakuumtauglichkeit der Bauteile Wert gelegt werden muss. So dürfen keine Hohlräume mit eingeschlossenen Gasen und kein grober Schmutz in die Beschichtungskammer mit eingebracht werden. Das CVD - Verfahren ist ein richtungsunabhängiges Beschichtungsverfahren, das heisst, die Bau-

teile werden aus der Gasphase rundum beschichtet. Die Beschichtungstemperaturen liegen hier oberhalb von 800 °C.

Beim PVD-Verfahren, einem richtungsabhängigen Verfahren, müssen die Bauteile vor den Beschichtungsquellen (Targets) rotieren um eine gleichmässige Schichtdickenverteilung zu gewährleisten. Bohrungen bzw. Vertiefungen können, aufgrund von Abschattungseffekten, nur bis zu einem Verhältnis Durchmesser / Tiefe ≈ 1 beschichtet werden. Beschichtungstemperaturen liegen hier meist zwischen 100 °C und 500 °C. Das PACVD-Verfahren (Plasma-Assisted CVD = plasma-unterstütztes CVD) stellt einen Sonderfall der CVD-Verfahren dar. Hier wird die Reaktion durch eine elektrische Entladung im „thermischen Plasma“ bei Atmosphärendruck oder im „kalten Plasma“ bei Niederdruck initiiert. Die Temperaturen liegen hierbei weit unter 300 °C.

Bei beiden Vakuumbeschichtungsverfahren ist zu berücksichtigen, dass das Bauteil an einer Stelle geführt bzw. gehalten werden muss, die unbeschichtet bleibt. Zur Aufnahme dienen meistens Bohrungen bzw. Gewindebohrungen oder Hülsen (z. B. bei Wendelbohrern). Häufig werden Bauteile auch durch Magnethalter an Gestelle befestigt (z. B. Wendeschneidplatten).

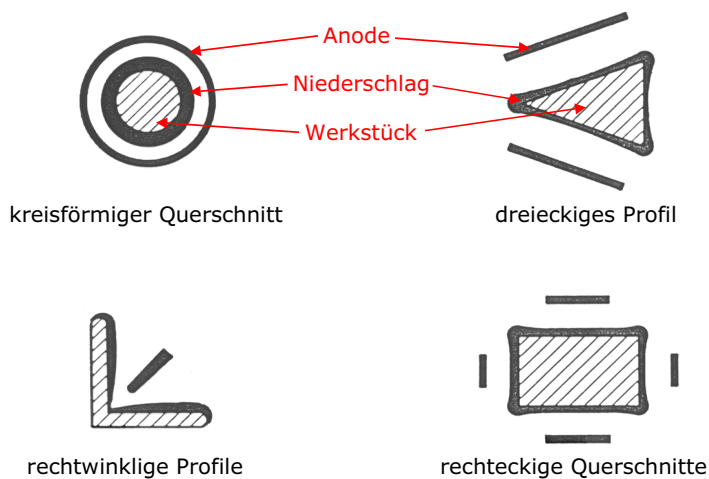


Bild (B037besZ) Einfluss der Anodenanordnung auf die Niederschlagsverteilung (03.18.001)

4.4. Verfahren: CVD (Chemical Vapor Deposition)

Ebenfalls in einer Vakuumkammer, aber durch chemische Reaktion des Beschichtungsmaterials mit dem Substrat.



Bild (B010besZ) CVD-Anlage, Blick in Vakuumkammer (Aixtron)

Zentrales Element jedes Reaktors ist ein Susceptor – ein drehbares Gestell, wo die zu beschichtenden Substrate aufgehängt sind. Aufgeheizt wird ein CVD-Reaktor durch Wirbelstrominduktion, es existieren Varianten mit IR- und Halogenlampen. Die Schichtbildung erfolgt durch Reaktion der gasförmigen Schichtmoleküle mit dem heissen Substrat.

Demzufolge eignet sich das Verfahren nur für Substrate, welche bei den hohen Prozesstemperaturen von 800–1100°C nicht Schaden nehmen. Zudem muss das Schichtmaterial in geeigneter chemisch gebundener Form vorliegen.

Übliche Schichtdicken betragen zwischen 1 und 25 µm.



Bild (B014besZ) CVD-Anlage für Diamantschichten (Aixtron)

Vorteile	Nachteile
sehr gute Verbindung Schicht-Substrat	hohe thermische Belastung
für Diamant-Schichten geeignet	umweltschädliche Abfälle

Tabelle (008besZ) Vorteile, Nachteile CVD

4.5. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Vakuumtechnik Dresden	Vakuumtechnik
Ulvac	PVD/CVD-Maschinen
Balzers	PVD/CVD-Maschinen
KWC Armaturen	Einige PVD-beschichtete Armaturen
APVV	Lohnbeschichter
ZOM Oberflächenbearbeitungs GmbH	Beschichtung von Werkzeugen
Plasmotec	Entwickelt Sonderschichten
PVT Plasma und Vakuum Technik GmbH	PVD Anlagen und Lohnbeschichtungen
Aixtron	CVD-Anlagen für CDs und Wafer

Tabelle (T009besZ) Firmen Vakuumbeschichten

Organisation	Beschreibung
Wissenstransfer Oberflächentechnik	Förderungsprojekt
neue Materialien	Seite über neue Materialien und Verfahren
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T010besZ) Organisationen Vakuumbeschichten

5. Beschichten aus dem ionisierten Zustand – Galvanisches Beschichten

Beim Galvanisieren wird durch Elektrolyse in Salzbadern eine Metallschicht von rund $10\ \mu\text{m}$ Dicke auf das Substrat abgeschieden. Kleine Teile werden als Schüttgut in einer Trommel ins Bad gehängt, grössere an ein Gestell gehängt.

Schichtstoffe sind häufig Cr, Ni, Sn oder Zn. Diese Schichten dienen als Korrosionsschutz, zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit oder Oberflächengüte (Werkzeuge) oder optischen Zwecken (Au).

Relativ neu ist das Galvanoforming: Auf metallisierten Wachsstücken wird eine Edelmetallschicht abgeschieden, um so materialsparend komplexe Schmuckstücke herzustellen.

Nachteilig fällt die hohe Umweltbelastung auf.

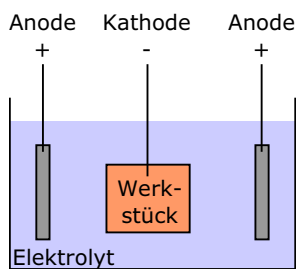


Bild (B025besZ) Zwischen Kathode und Anode fliesst ein Gleichstrom, welcher bewirkt, dass sich die Anode zersetzt und sich an der Kathode eine Beschichtung bildet.



Bild (B026besZ) Schüttguttrommel (Dörre)



Bild (B028besZ) Gestell zum Aufhängen der Werkstücke (Dörre)



Bild (B027besZ) Grosse Galvanikanlage (Ludy)

Das folgende [Video](#) soll helfen, die Vorgänge beim Galvanisieren besser zu verstehen (Film: Bundesinnungsverband der Galvaniseure).

vorgelagerte Verfahren	verwandte Verfahren	nachgelagerte Verfahren
Verschiedene Reinigungsstufen	Chemisches Beschichten	
	Vakuumbeschichten	

Tabelle (T011besZ) Vorgelagerte, verwandte und nachgelagerte Verfahren

5.1. Einsatzgebiet und Teilebeispiele

Galvanisieren wird eingesetzt für:

- Leiterplatten
- Hochfrequenztechnik
- Elektrische Kontakte
- Allergiefreie Werkzeuge für Körperpflege und Medizin
- Schmuck
- Armaturen
- Musikinstrumente
- Kleidungsaccessoires
- Brillen
- Billig.Uhren
- Tafelgeräte
- Schreibgeräte



Bild (B029besZ) Leiterplatten (Degussa)



Bild (B030besZ) Ästhetische Beschichtungen (Degussa)



Bild (B031besZ) Korrosionsschutz (Degussa)



Bild (B036besZ) Korrosionsschutz von Schrauben (Dörr)



Bild (B034besZ) Schmuck (Degussa)

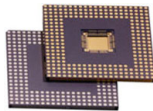


Bild (B035besZ) Vergoldete Steckkontakte (Degussa)



Bild (B032besZ) Korrosionsschutz von Nieten (Galvano Weis)



Bild (B033besZ) Tafelgeschirr (Degussa)

5.2. Konstruktionsrichtlinien

Beim Beschichten mit Flüssigkeiten besteht immer die Gefahr, dass Reste des Fluids in Hohlräumen des Werkstücks zurückbleiben.

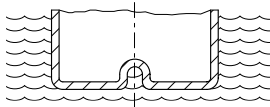


Bild (B038besZ) Vermeidung von Gasblasen und Rückständen durch Anbringen von Bohrungen



Bild (B040besZ) Vermeidung von Gasblasen und Rückständen durch Anbringen von Bohrungen

Einige Gestaltungsrichtlinien, die besonders beim Galvanisieren von Oberflächen zu berücksichtigen sind:

- Beschränkung des erforderlichen Aufwandes für das Oberflächenveredeln auf die wesentlichen Bauteilflächen,
- Abscheiden eines geringeren Niederschlages auf die unwesentlichen Flächen,
- Beeinflussung der Niederschlagsverteilung durch die Anodenform, Anodenanordnung und durch Hilfskathoden beachten.
- Innere und äussere Kanten dürfen auf keinen Fall scharfwinklig sein sondern müssen immer mit einem möglichst grossen Krümmungsradius ausgebildet werden.
- Vertiefungen wie Rillen, Nuten, Falten, Mulden sollten beim Galvanisieren möglichst vermieden werden.

5.3. Firmen und Organisationen

Siehe auch [Publikationsverzeichnis – Weblinks](#)

Firma	Produkte
Degussa Galvanotechnik	
Galvano Weis	
Ludy	Galvanikanlagen

Tabelle (T012besZ) Firmen Galvanisieren

Organisation	Beschreibung
Bundesinnungsverband der Galvaniseure	
Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie	
Galvaonline	Informations-Service für die Galvanotechnik
Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik	
Swissmem	Verband der Maschinen und Metallindustrie
Metallbauer.ch	Schweizer Branchenverzeichnis
Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus	Wirtschaftsverband

Tabelle (T013besZ) Organisationen Galvanisieren

6. Zusammenfassung

Mittels Beschichten wird auf das Grundmaterial eine, meist dünne, Schicht eines Materials aufgetragen. Damit werden die physikalischen, chemischen Eigenschaften des Bauteiles lokal oder gesamthaft geändert.

Um eine Oberfläche zu beschichten stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, bei denen das Material zur Beschichtung als Pulver oder Dampf oder im ionisierten Zustand auf das Grundmaterial aufgetragen wird.

Verständnisfrage 1

Erklären Sie die Funktion und das Verfahren des Feuerverzinkens. Nennen Sie Bauteile welche feuerverzinkt sind

Verständnisfrage 2

Nennen Sie Produktbeispiele, welche Vakuumbeschichtet sind.

Antwort 1

- siehe Skript
- Schrauben, Geländerteile, Rohre, Karosserieteile

Antwort 2

- Werkzeuge
- CD, DVD
- Schmuck
- Armaturen

Publikationsverzeichnis – Literatur

- [1] Awiszus, Birgit; Bast, Jürgen und Dürr, Holger (2004): Grundlagen der Fertigungstechnik; Fachbuchverlag, Leipzig
- [2] Beitz, Wolfgang und Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.) (2001): Doppel - Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [3] Fischer, Ulrich (2002): Tabellenbuch Metall; Europa Lehrmittel, Hahn
- [4] Koether, Reinhard und Rau, Wolfgang (2004): Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure; Fachbuchverlag, Leipzig
- [5] Sautter, Rudolf (1997): Fertigungsverfahren; Vogel Fachbuch Kamprath Reihe, Würzburg

Publikationsverzeichnis – Weblinks

Firmen

- Galvaswiss: <http://www.galvaswiss.ch>
- Verzinkerei Stooss: <http://www.verzinkerei-stooss.ch>
- VK Kriessern: <http://www.vkkriessern.ch>
- Sulzer Metco: <http://www.sulzermetco.ch>
- Inocermic: <http://www.inocermic.de>
- Degussa Galvanotechnik: <http://www.degussa-galvano.de>
- Galvano Weis: <http://www.galvano-weis.de>
- Ludy: <http://www.ludy.de>

Organisationen

- Vereinigung Schweizerischer Verzinkereien: <http://www.verzinkereien.ch>
- International Zinc Association: <http://www.iza.com>
- Europäische Vereinigung für allg. Verzinkung (EGGA): <http://www.egga.com>
- Swissmem: <http://www.swissmem.ch>
- Metallbauer.ch: <http://www.metallbauer.ch>

- Deutscher Verband des Maschinen- und Anlagebaus:
<http://www.vdma.org>
- Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V.:
<http://www.gts-ev.de>
- Bundesinnungsverband der Galvaniseure:
<http://www.biv.org>
- Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie:
<http://www.zvei.org>
- Galvaonline: <http://www.galvaonline.com>
- Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik:
<http://www.dgo-online.de>

Grundlagen des Dimensionierens

Autor: Prof. Dr. M. Meier

1. Überblick

Motivation

Das Dimensionieren von Bauteilen gehört zu den grundlegenden Kompetenzen von Ingenieur/-innen. In der Berufspraxis werden Sie täglich mit Dimensionierungsaufgaben beschäftigt sein. Bauteile auf Papier exakt berechnen gehört ebenso dazu wie Konstruktionsvorschläge im Kopf aufgrund von Erfahrungswerten abzuschätzen.

Lernziele

In dieser Sektion soll der Begriff Dimensionieren in den Gesamtprozess eingeordnet, die Ziele des Dimensionierens geklärt und den Bezug zur Mechanik hergestellt werden.

Die Studierenden verstehen den Prozess des Dimensionieren und können die Teilschritte mit dem Wissen aus der Mechanik verbinden. Im Einzelnen sind dies:

- die Kraftanalysen innerhalb einer Baugruppe durchführen,
- das Freilegen von Bauteilen und Modellierung der Wirkkontakte und Wirkkräfte,
- das Erkennen von kritischen Querschnitten,
- sowie das Handhaben des Spannungstensors und bestimmen der Hauptspannungen.

Diese Sektion kann gleichfalls als Überblickssection für weitere product-Innovation-Sektionen verstanden werden. Eng mit der Dimensionierung hängen die folgenden Themen zusammen: *Dimensionierung bei ruhender Belastung, Berechnungsmethoden der Festigkeitslehre, Kerbwirkung und Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen.*

Einleitung

Das Dimensionieren ist als begleitender Prozess während des Konzept- und Entwurfsprozesses zu verstehen. Ziel dieses Prozesses ist es, einerseits Bauteile zu gestalten, welche ihre vorgesehene Funktion versagensfrei ausüben, andererseits aber auch optimal im Verbund der Baugruppe funktionieren.

Der Dimensionierungsprozess ist sehr iterativ und vielfach sogar sprunghaft, sodass es sich lohnt, hier einem roten Faden zu folgen. Die Vorgehensempfehlung wird ergänzt durch einzelne einfache Beispiele, welche die Schritte praxisnah erläutern.

2. Beispiel: Konstruktion einer Schere

Anhand der Konstruktion einer Schere soll das Vorgehen für einen Dimensionierungsprozesses beispielhaft veranschaulicht werden. Stellen Sie sich vor: Sie sind hauptverantwortlich für die Konstruktion einer Schere und haben einen ersten Entwurf gestaltet.

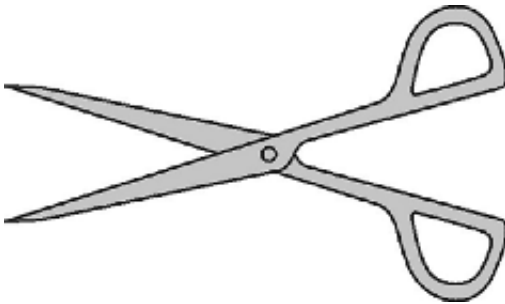


Bild (B400gdiz) Schere

Ihre Aufgabe ist es nun, den Entwurf auf Festigkeit zu überprüfen und die Gestalt entsprechend zu optimieren. Wie gehen Sie vor?

2.1. Betriebszustand bestimmen

Als sinnvoller Belastungsfall kann das Durchschneiden eines kräftigen Gegenstandes an der vordersten Spitze mit maximaler Handkraft (Kraft zwischen zwei Fingern) angenommen werden. Mittels einer Federwaage kann diese maximale Kraft der Finger abgeschätzt werden:

$$M_{\text{Finger, max}} = 50 \text{ N} \quad (1)$$

Weitere Belastungsfälle sind nicht naheliegend.

2.2. Kritische Bauteile auswählen

Als kritische Bauteile sind das Scherenblatt selber (beide Seiten sind identisch) und der Niet in der Verbindung zu betrachten. Im Folgenden soll nur das Scherenblatt weiter verfolgt werden (Experiment).

2.3. Bauteil freilegen und Belastung modellieren

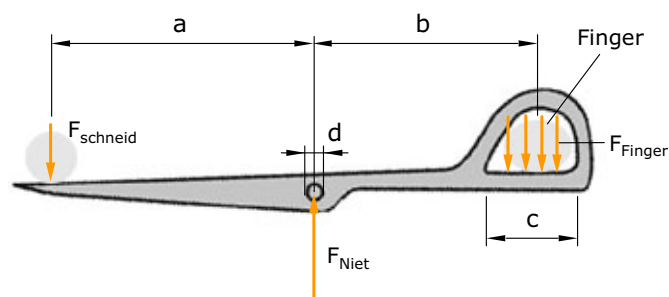


Bild (B401gdiz) Scherenblatt

Für das Schneidgut betrachten wir aus Sicht der Momentenverteilung den extremsten Fall, wo eine Einzelkraft am äussersten Ende angreift. Der Finger kann als verteilte Last innerhalb der Öffnung modelliert werden.

$$F_{\text{schneid}} = \frac{F_{\text{Finger}} \cdot b}{a} \quad (2)$$

2.4. Bestimmung der kritischen Bauteilquerschnitte und der Schnittkräfte

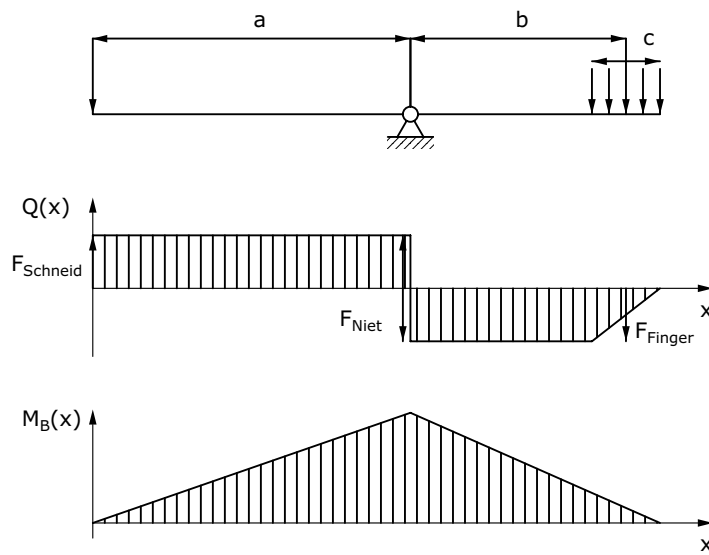


Bild (B402gdiZ) Schnittkräfte

2.5. Diskussion von Optimierungsschritten

Die Momentenverteilung zeigt eine mehr oder weniger lineare Zunahme der Belastung in Richtung des Nietes. Die Form der Klinge nimmt diese Belastungsvariante durch eine lineare Querschnittsveränderung auf. Die bruske Querschnittsverjüngung auf der rechten Seite erscheint jedoch nicht optimal, weil wir in der Nähe des Maximums der Biegespannungen liegen. Eine erste gestalterische Optimierung nimmt dieses „Gefühl“ auf.

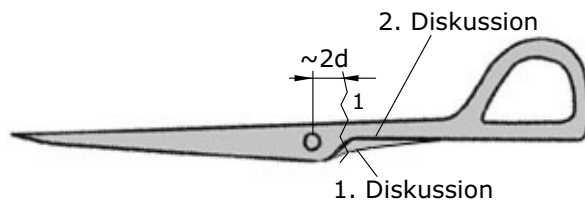


Bild (B403gdiz) Scherenblatt, gestalterisch optimiert

Bemerkung: Aus Kollisionsüberlegungen mit der zweiten Klinge müsste die Formanpassung wahrscheinlich nach oben erfolgen.

Zusätzlich kann diskutiert werden, ob der Niet selber den Querschnitt schwächt und es somit keinen Sinn macht, auch links und rechts vom Niet mehr „Material“ als nötig einzubauen. Im oberen Bild sind die beiden Optimierungen eingestaltet.

Als kritischer, bestimmender Querschnitt wird die Stelle 1 festgelegt.

2.6. Bestimmung der Spannungen im kritischen Querschnitt

Mit der Berechnung von Spannungen für rechteckige Querschnitte infolge Biegung erhalten wir:

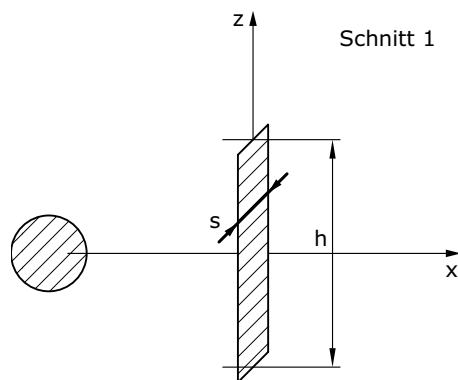


Bild (B404gdiz) Bestimmung der Spannungen im kritischen Querschnitt

$$\sigma_x = \frac{M_B(x)}{W_B} = \frac{6 F_{\text{Finger}} (-b - 2d)}{sh^2} \quad (3)$$

Nehmen wir an, dass:

- $F_{\text{Finger}} = 50 \text{ N}$
- $b = 50 \text{ mm}$
- $d = 2 \text{ mm}$
- $s = 1 \text{ mm}$
- $h = 6 \text{ mm}$

so erhalten wir:

$$\sigma_x = 383 \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

Die Schubspannungen sind:

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \frac{F_{\text{Finger}}}{A} = \frac{F_{\text{Finger}}}{s \cdot h} = \frac{50}{6} = 8.3 \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

also vernachlässigbar gegenüber den Normalspannungen.

Wir haben demnach in erster Näherung eine einachsige Beanspruchung und:

$$\sigma_1 = 383 \text{ N/mm}^2 \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (7)$$

2.7. Festigkeitsberechnung durchführen

Wir wählen innerhalb der Gestaltung auch ein sinnvolles Material (haltbar, verschleissfest) und entscheiden uns für einen Kraftarbeitsstahl mit einer Fließgrenze von 480 N/mm^2 .

Die Sicherheit gegen Fließen des Scherenblattes ist demnach:

$$S_F = \frac{480}{383} \cong 1.25 \quad (8)$$

Eine Versagensanalyse infolge Ermüdung entfällt.

2.8. Diskussion

Das reale Produkt, von welchem diese Motivation abgeleitet wurde, ist im folgenden Bild dargestellt. Eine Diskussion einer optimalen Formgebung zur Reduktion von Material wäre sicher sinnvoll.



Bild (B405gdiz) Schere als reales Produkt

3. Eingliederung in den Entwicklungsprozess

Eingliederung und Benennungen

Innerhalb der verschiedenen Entwicklungsprozesse, namentlich dem Konzeptprozess und dem Entwurfsprozess wurden die Ausdrücke Grobdimensionieren, Auslegen, Dimensionieren, festigkeitsgerechtes Gestalten, Festigkeitsnachweis, Optimieren etc. verwendet. Alle diese Ausdrücke haben zum Ziel, Produkte bzw. Bauteile zu gestalten, die aus Sicht des Versagens ihre Funktion während der gesamten Lebenslauf erfüllen.

Obschon mehrmals erwähnt wurde, dass die Teilprozesse und die Tätigkeiten innerhalb des Entwicklungsprozesses selten sequentiell erfolgt, sondern iterativ, wenn nicht sogar sprunghaft von Produktmodell zu Produktmodell und das Dimensionieren immer wieder darin auftaucht, soll hier ein Versuch der Einordnung der Ausdrücke unternommen werden:

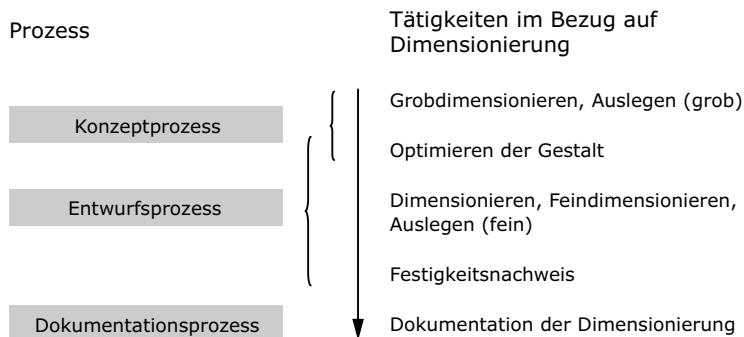


Bild (B001gdiZ) Prozesse und Dimensionierungs-Tätigkeiten

Die einzelnen Ausdrücke sind nicht exakt definiert und vielfach Synonyme. Eine sinnvolle Einteilung ist:

- Grobdimensionieren, (Grobauslegen):
Schon während des Konzeptprozesses werden erste Abschätzungen der Bauteilgrößen durchgeführt, meist um erste Machbarkeiten oder Platzverhältnisse und Anordnungen zu überprüfen. Die Modellbildungen und Berechnungen erfolgen meist von Hand und basieren auf stark vereinfachten Modellen.
- Dimensionieren, Feindimensionieren, Feinauslegen

Während des Entwurfsprozesses werden die Bauteile vollständig gestaltet, nicht nur in ihrer groben Ausprägung, sondern auch in der Detailgestalt. In dieser Phase erfolgen vertiefte Berechnungen, teilweise von Hand oder mittels Berechnungsprogrammen (spezialisierte Programme oder Finit-Element-Programme).

- Festigkeitsnachweis
Im Anschluss an die Gestaltung aller Baugruppen und Bauteile eines Produktes erfolgt häufig für kritisch erachtete Bauteile eine Umkehrung der Dimensionierung, indem ausgehend von der nun festgelegten Gestalt und den Belastungen aus der Belastungsannahme, die Erfüllung der Festigkeit bzw. die verbleibende Sicherheitsspanne nachgewiesen wird.
- Optimierung
Optimierung in Bezug auf das Dimensionieren wird während jedes Berechnungsschrittes angestrebt. Man setzt sich beim Dimensionieren das Ziel, nicht nur Bauteile zu gestalten, welche die Belastung ertragen, sondern die Belastung, das Material, die geometrische Gestalt derart zu variieren, dass dieses Ziel optimal, z. B. mit minimalstem Gewicht, mit einfachen Mitteln zu fertigen, usw. erreicht wird.
- Dokumentation der Dimensionierung
Die wesentlichen Dokumente einer Produkt-Entwicklung werden abgelegt, dies für folgende weitere Entwicklungen, aber auch aus rechtlichen Aspekten. Beim Dimensionieren ist dies für alle durchgeführten Berechnungsschritte sinnvoll, jedoch unabdingbar für den Festigkeitsnachweis von Bauteilen, welche als kritisch betrachtet werden. Die Ablage erfolgt in der Produktdokumentation.

3.1. Umfeld und Werkzeuge des Dimensionierens

Die Dimensionierung von Bauteilen erfolgt nie sequentiell im Anschluss an den Gestaltungsprozess, sondern immer parallel, teilweise iterativ und zusammen mit der Wahl des Werkstoffs und Fertigungsverfahrens.

Der Konstrukteur hat gleichzeitig funktions-, festigkeits-, werkstoff-, fertigungs- und kostengerecht zu gestalten.

Wenn wir demnach von Optimierung sprechen, so bewegen wir uns in einem vieldimensionalen Raum, wo gleichzeitig das Material (bearbeitungsgerecht, kostengerecht, korrosionsgerecht usw.) und das Fertigungsverfahren (fertigungsgerecht, einspanngerecht, kostengerecht usw.) optimal gewählt werden muss und dies in Verbindung mit der Dimensionierung.

Mit einer gewissen Berechtigung könnte argumentiert werden, dass analytische bzw. händische Berechnungsmethoden in einer Zeit hochmoderner, automatischer Berechnungsmethoden (z. B. die Methode der Finiten Elemente) nicht zeitgemäss seien. Diesem Argument sei entgegengestellt, dass erstens in diesem Entwicklungsstadium meistens noch kein CAD-Datenmodell existiert und eine Überschlagsrechnung rasch erste Bauteildimensionen ergibt. Zweitens setzt die Modellerstellung für die Lastannahmen und Randbedingungen die Grundkenntnisse der Mechanik und der Festigkeitsrechnung voraus und die Interpretation und Diskussion von numerischen Resultaten kann nur dann korrekt erfolgen, wenn die erhaltenen Daten auch verstanden werden.

Der Einsatz moderner Berechnungsverfahren soll in eigener Sektion behandelt werden und hier lediglich das Grundlagenverständnis gefördert werden.

3.2. Beziehung zur Mechanik

Mechanik ist ein Teilgebiet der Physik und wendet die physikalischen Gesetze an realen Objekten an. Der Bezug der Mechanik zur Realität ist jedoch sehr abstrakt und generisch und benötigt, um an realen Produkten Anwendung zu finden, eine weitere Konkretisierungsstufe.

Die wesentlichen Konkretisierungen sind dabei:

- Modellierung

Die Modellierung im Sinne der Festigkeitslehre orientiert sich an der realen Baugruppe, den darin gestalteten oder zu gestaltenden Wirkflächenkontakten und Stützstrukturen der Bauteile und führt dies in ein Modell über.

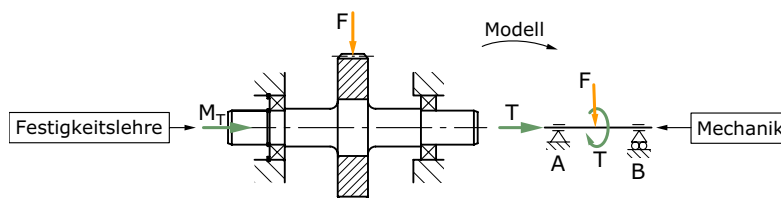


Bild (B002gdiz) Modellierung im Sinne der Festigkeitslehre

- Materialbezug

In der Mechanik werden die Materialwerte zwar angesprochen, jedoch nicht auf reale, praxisbezogene Werte abgestützt. In der Festigkeitslehre sollen die realen Werten, welche in umfangreichen Tabellen vorhanden sind, Anwendung finden.

- Normbezug

Viele Festigkeitsberechnungen sind durch Normen beschrieben und durch Erfahrung abgestützt. Aus rechtlichen Gründen sind wir aufgefordert, diese Richtlinien der Normen zu berücksichtigen und nur in begründeten Fällen davon abzuweichen.

4. Ziele der Dimensionierung

Vielfach wird vergessen, was das eigentliche Gesamtziel einer Bauteildimensionierung darstellt. Für den Entwickler geht es nicht nur darum, die Belastung der Teile zu kennen, sondern auch die Bauteilgestalt so zu wählen, vielfach auch zu variieren, dass „optimale“ Gesamtlösungen resultieren. Die optimale Gesamtlösung besteht aus drei Zielfunktionen:

1. einer unter allen Betriebsbedingungen ausreichenden Sicherheit gegen Versagen – und zwar Versagen infolge Bruch, Fliesen, Knicken, Beulen, zu grosse Deformation, Ermüdung, ...
2. einer möglichst gleichmässigen Beanspruchung in möglichst allen Bereichen der Bauteile: Zonen mit völliger Unterbelastung zu entwerfen heisst Ressourcen zu verschwenden. Im Zusammenhang mit dem Ziel der Optimierung von Strukturen kann Prof. Mattheck zitiert werden: „Der Hühnerknochen, den Sie gestern abgeknabbert und weggeworfen haben, war ein High-tech-Produkt! Noch mehr: Er war der Superlativ eines funktionell an die mechanischen Erfordernisse angepassten Leichtbaudesigns. Kein Ingenieur der Welt ist bis heute in der Lage, dieses in seiner äusseren Gestalt und in seiner Innenarchitektur im Hinblick auf minimales Gewicht und höchste Festigkeit vortrefflich optimierte Bauteil zu kopieren“.
3. die Ziele eins und zwei ökonomisch optimal miteinander zu verbinden bzw. zu vermitteln, indem das geeignete Material für das Bauteil verwendet wird und die gewählte Gestalt eine möglichst kostengünstige Fertigung erlaubt.

Einmal mehr stehen wir vor einem System von Ungleichungen und iterativen Prozessen und haben die Aufgabe, mehrere, teils disparate Forderungen zu optimieren. Die Welt der Teile-Dimensionierung ist alles andere als einfach: Zu den drei genannten Zielsetzungen kommt hinzu, dass zu verschiedenen Zeitpunkten des Betriebes verschiedene Belastungskombinationen auf ein Bauteil wirken können. Auf welchen dieser Belastungszustände soll nun das Bauteil optimiert werden? Hier müssen immer wieder Kompromisse, Vereinfachungen oder Suboptima akzeptiert werden. Sodann kommt erschwerend hinzu, dass die zweite und dritte Zielsetzung in starker Konkurrenz zu einander stehen. Der zweite Punkt fordert komplexe Formen (um optimal zu sein), die dritte Zielsetzung verlangt hingegen eine möglichst kostengünstige Herstellung und somit möglichst einfache Formen.

Eine Hilfestellung zur Lösungsfindung aus diesem Dilemma bietet der rote Faden durch die Bauteildimensionierung.

5. Ablauf einer Bauteildimensionierung

Um die Dimensionierung möglichst effizient mit Blick auf die Zielsetzung durchzuführen, empfiehlt sich folgendes strukturierte Vorgehen: Die Ausgangslage bildet ein grobmasstäblicher oder masstäblicher Entwurf der Baugruppe. Wir gehen in sieben Schritten vor:

1. Betriebszustände bestimmen
2. Kritische Bauteile auswählen
3. Bauteile freilegen und äusseren Kräfte/ Momente (Belastung) und die Modellbildung bestimmen
4. Bestimmen der kritischen Bauteilquerschnitte und der Schnittkräfte
5. Spannungen (Beanspruchung) in kritischen Querschnitten bestimmen
6. Festigkeits- und Versagensberechnungen durchführen
7. Ergebnisse diskutieren und Entwürfe optimieren.

5.1. Bestimmung der Betriebszustände

Jedes Produkt kann während der Benutzung unterschiedlichsten Betriebszuständen bzw. Belastungszuständen, meist Lastfälle genannt, unterliegen. Eine Auswahl der relevanten Belastungszustände, die durchaus unterschiedliche Kraftkombinationen aufweisen können, muss getroffen werden. Welche konkreten Zustände, die sogenannten Lastfälle, aus der unendlich vorliegenden Zahl als relevant und maximal angenommen werden, ist ein Ingenieur-Entscheid.

Beispiel Fahrrad

Die Belastungsannahmen eines konventionellen City-Bikes könnten sein:

- Lastfall 1:
Fahren mit 30km/h auf Pflasterstein-Unterlage
- Lastfall 2:
Kurvenfahren mit 20km/h auf Radius 6m auf ebener Grundlage
- Lastfall 3:
Sprung mit Velo ab 20cm hohem Gehsteig mit 10 km/h

Alle Lastfälle sind für eine 80 kg schwere Person festgelegt. Dass diese Belastungsannahmen (Lastfälle) für Mountain-Bikes völlig anders ausfallen würden, liegt auf der Hand.

Es ist in diesem Schritt wichtig, dass kritische Belastungsfälle definiert, jedoch keine undenk바aren Kombinationen angenommen werden.

Beispiel Auto

Die Belastungsannahmen eines Autos könnten sein:

- Lastfall 1: Kurvenfahrt mit Radius 4 m
- Lastfall 2: Fahrt auf Autobahn mit 250 km/h

Beide Lastfälle kombiniert ergeben einen unrealistischen Fall.

Die wirklichen Lastzustände exakt festzulegen ist meistens schwierig. Wir unterscheiden die analytische Bestimmung und die Schätzung der Betriebsfälle.

5.1.1. Die analytische Bestimmung der Betriebszustände

Mit der dynamischen Systembeschreibung der Verhalten der einzelnen Komponenten kann das zeitliche Verhalten des Gesamtsystems mathematisch beschrieben werden.

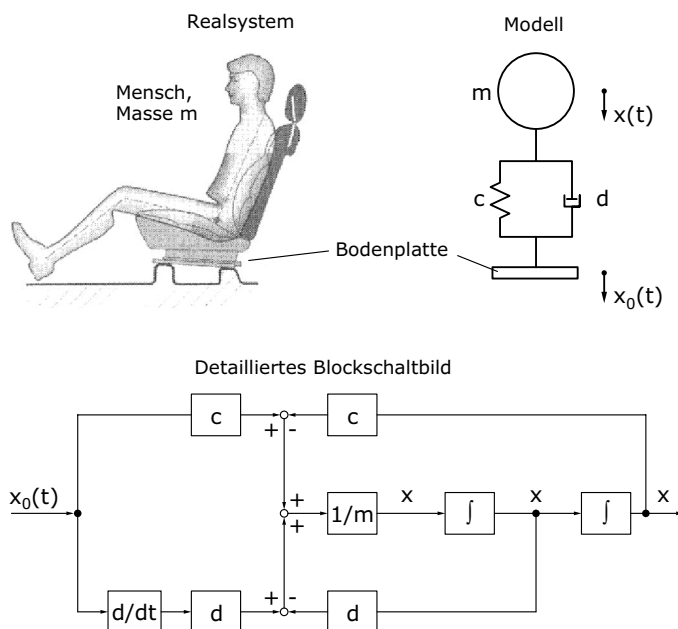


Bild (B003gdiz) Analytische Bestimmung der Betriebszustände

Die mathematische Beschreibung erfolgt meist in rechnergestützten Programmen wie z. B. Matlab oder MATRIXX.

5.1.2. Abschätzung der Betriebszustände

Ingenieurmässig einfacher ist es häufig, den „Normalzustand“ (Nennbelastung) zu bestimmen und die Abweichungen davon in einem Überhöhungsfaktor zusammenzufassen, dem Betriebsfaktor c_B ;

$$F_{\max} = c_B F_{\text{nenn}} \quad (9)$$

mit:

F_{\max} : maximaler Belastungswert;

F_{nenn} : Nennwert der Belastung

Der Betriebsfaktor c_B kann für verschiedene Belastungsfälle unterschiedliche Grösse aufweisen. Als Beispiel zeigt das nächste Bild den Momentverlauf eines Motors beim Anlaufen:

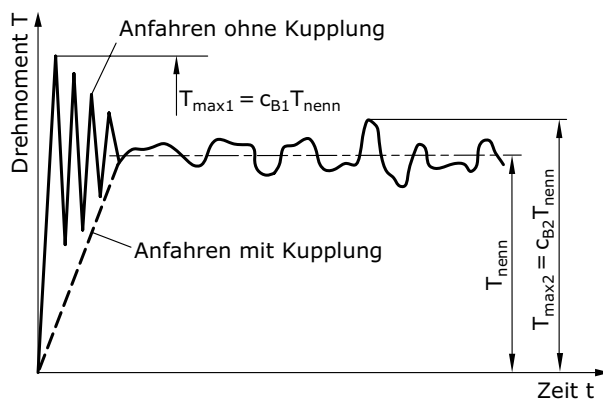


Bild (B004gdiZ) Momentverlauf eines Motors

Erfahrungswerte für den Betriebsfaktor c_B sind:

Beschreibung	Beispiele	c_B
Gleichmässige Bewegung, nur leichte Abweichungen von Nennbelastung	Elektromotoren	1.0–1.1
Alternierende Bewegungen (Hin- und Herbewegung) mässige Abweichungen von Nennbelastung	Kolbenmotoren	1.2–1.5
Stossende Hin- und Herbewegungen	Pressen, Sägen	1.6–2.0
Schlagende Bewegungen	Hämmern	2.0–3.5

Tabelle (T001gdiz) Betriebsfaktor Erfahrungswerte

Man kann diese Betriebsfaktoren auch als Unsicherheitsfaktoren auf der Belastungsseite benennen. Je genauer wir uns analytisch oder experimentell an die wirklichen Gegebenheiten annähern, desto kleiner wählen wir diesen c_B -Wert.

Ein interessantes Beispiel für die analytische Bestimmung des c_B -Wertes ist der Kolbenmotor. Direkt auf den Kolben wirkt ab dem Zündpunkt für eine beschränkte Zeitdauer der Gasdruck im Zylinder. Zusätzlich wird die Kolbenmasse in dieser Phase beschleunigt. Ab einem späteren Drehwinkel wird der Gasdruck Null und die Beschleunigungsenergie des Kolbens wird wieder durch Abbremsen in das System zurück gebracht. Über den Verlauf von 2π wechselt demnach die Kraft auf den Kolbenzapfen von stark positiven Werten bis zu negativen Werten., das Integral über eine Umdrehung ergibt jedoch die Nennkraft (aus der Nennleistung bestimmbar). Die Momentüberhöhung (c_B) dieses Nennmomentes an dieser Stelle kann Werte um 7 erreichen. Weiter nach hinten in Richtung der Abgangswelle werden diese Überhöhungen mit Ausgleichsmassen reduziert.

5.2. Selektion der kritischen Bauteile für die einzelnen Lastfälle

Im Folgenden selektieren wir jene Teile, die unter einem der betreffenden Lastfälle als kritisch zu betrachten sind. Um die richtige Wahl zu treffen, d. h. die kritischen Teile zu finden, bedarf es wiederum eines geübten Ingenieur-Blicks. Überlegungen des Kraftflusses, der Kraftumlenkungen und Kraftverengungen helfen uns hier, die richtige Auswahl zu treffen.

Innerhalb dieses Schrittes sollen auch schon zusätzliche gestalterische Optimierungen der Bauteile erfolgen; die Lastannahmen und die Überlegungen der Kraftflüsse helfen, pragmatisch den vorliegenden Entwurf (dieser ist noch bei weitem nicht definitiv festgelegt) noch zu verbessern, um den drei Optimierungszielen näher zu kommen.

Dieser Schritt muss nun für jeden Belastungsfall durchgeführt werden, denn jeder Fall kann auf unterschiedliche Bauteile kritisch wirken; jeder Fall kann sogar auf dasselbe Teil völlig unterschiedlich einwirken, so dass die Gestaltungsoptimierung eines Bauteiles von verschiedenen Lasten aus betrachtet werden muss.

Beispiel City-Bike: Der Lastfall 1 wird z. B. die Fahrradnabe und die Wälzlager der Räder dynamisch belasten; der Lastfall 3 wird sicher das Lenkrad als kurzfristig statisch belastetes kritisches Bauteil festlegen.

5.3. Freilegen der Bauteile und Bestimmung der äusseren Kräfte / Modellierung

Der vorliegende Lastfall liefert uns die äusseren, auf die Baugruppe angreifenden Kräfte und Momente. Diese punktförmig angreifenden Einzelkräfte, flächig verteilten Kräfte oder Massenkräfte sowie Momente belasten die selektierten Bauteile, über die Strukturen auf die Wirkflächen gelenkt.

Zur Ermittlung aller äusseren Kräfte des Bauteiles löst man das kritische Bauteil gedanklich von allen umgebenden Stützstrukturen und Wirkflächen (freimachen des Bauteils), ersetzt dann die entfernten Wirkflächenkontakte durch Kräfte (Einzelkräfte und verteilte) und Momente.

Die Bestimmung der unbekanntenen Kräfte und Momente erfolgt durch Gleichgewichtsbetrachtungen der „angreifenden“ Kräfte und Momente und der „abführenden“ Kräfte und Momente am freien Bauteil, unter gleichzeitiger Berücksichtigung der inneren Kräfte (Gewicht, dynamische Kräfte) mit den Gesetzen der Statik und Dynamik, teilweise auch z. B. Wärmelehre).

Zur Bestimmung der Kräfte helfen uns einige „Gesetze“:

Seile und Ketten übertragen nur Zugkräfte

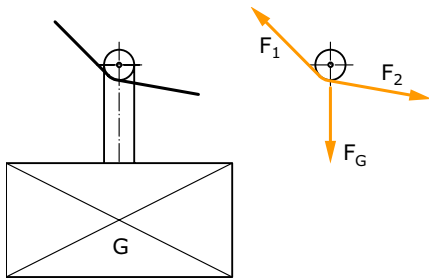


Bild (B005gdiZ) Seile und Ketten

Gelenkstäbe übertragen nur Zug- und Druckkräfte

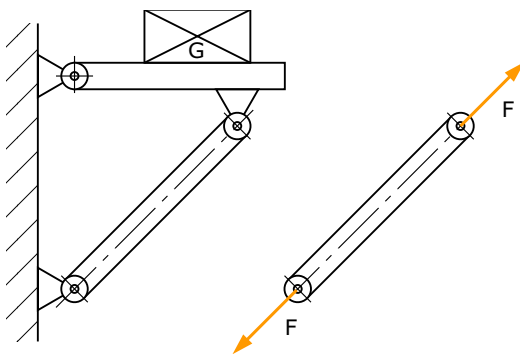


Bild (B006gdiZ) Gelenkstäbe

Berührungsflächen übertragen (bei Reibungsfreiheit)
nur Normalkräfte

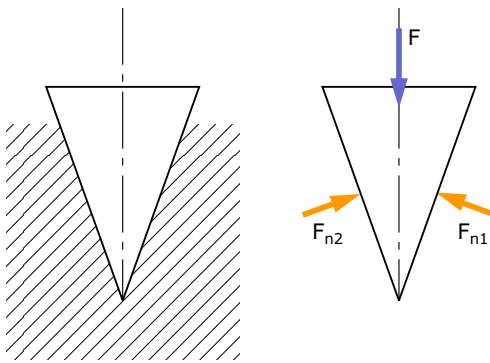


Bild (B007gdiz) Berührungsflächen

Wälzkörper übertragen nur Radialkräfte

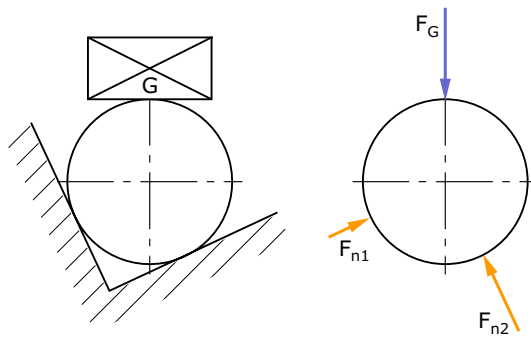


Bild (B008gdiz) Wälzkörper

5.3.1. Modellierung einer Bolzenverbindung – Einführung

Nun folgt eine der wesentlichen Ingenieur-Aufgaben, die Modellierung des realen Systems zu einem berechenbaren mechanischen System. Diese Aufgabe wird dadurch erschwert, dass es hier weder Richtig noch Falsch gibt, sondern viele Möglichkeiten einer Modellierung sinnvoll und erklärbar sind. Ingenieur/-innen müssen eine begründbare Modellierung finden, die sich der Wirklichkeit bestmöglich annähert und trotzdem berechenbar bleibt. Bei mehreren möglichen Modellierungen wählt man sinnvollerweise jene, welche die grössere Beanspruchung im Bauteil ergibt (konservative Modellierung). Dies kann am besten anhand eines Beispiels gezeigt werden.

Ein Beispiel dazu stellt die Bolzenverbindung einer Stange mit einer Gabel dar: Die Stange sei mit F belastet und die Gabel demnach mit je $F/2$:

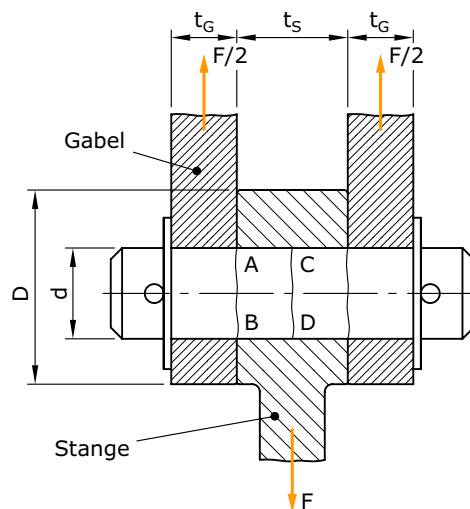


Bild (B024sbvz) Modellierung der Kräfteverteilung

Diese reale Aufgabenstellung kann nun durch verschiedene Modellierungen angenähert werden:

5.3.2. Modellierung einer Bolzenverbindung –

Modell 1: Bolzen ist in Stange und Gabel frei aufgelegt

Eine erste Modellierung erhalten wir mit der Annahme, dass der Bolzen in der Gabel als auch in der Stange frei aufliegt und sich frei biegen kann. Dies ist eine nahe liegende Modellierung bei Spielpassung in beiden Auflagern oder bei weichem Bauteilverhalten der Stange und Gabel.

Damit ergeben sich linienverteilte Kräfte, welche über die Wirkflächen von Gabel und Stange übertragen werden.

Freilegen des kritischen Bauteiles Bolzen:

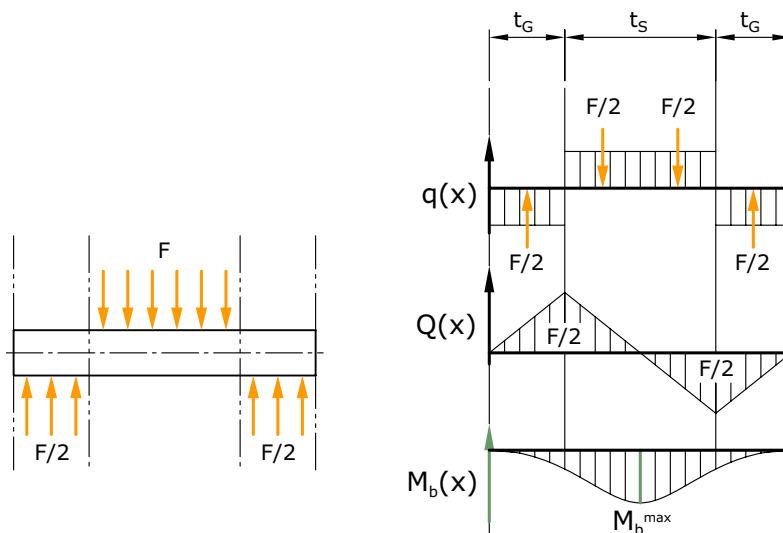


Bild (B010gdiz) Kräfte und Momente entlang des Bolzens bei freier Auflage

Noch einfacher modelliert wären die äusseren Kräfte durch Einzelkräfte:

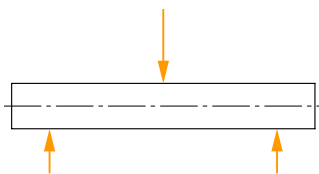


Bild (B011gdiz) Einzelkräfte an einem Bolzen

oder, als weitere Alternative, durch zwei Einzelkräfte bei der Stange:

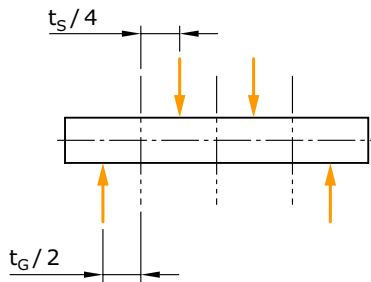


Bild (B012gdiZ) Zwei Einzelkräfte bei der Stange

Jede dieser Modellierungen ergibt ein unterschiedliches $Q(x)$ und $M_B(x)$.

Durch die Modellierung als verteilte Kräfte und ebenso durch die Modellierung mit 4 Einzelkräften erhalten wir an der Stelle C-D dasselbe Biegemoment:

$$M_B (C - D) = \frac{F(t_s + 2t_g)}{8} \quad (10)$$

Bemerkung: Mit der Modellierung mit drei Einzellasten wird das Moment:

$$M_B (D - D) = \frac{F}{4(t_s + t_g)} \quad (11)$$

Modellierung einer Bolzenverbindung –

Modell 2: Bolzen ist in Stange fest eingespannt

Eine zweite Modellierung erhalten wir, indem wir den Bolzen gedanklich in der Stange fest einspannen (Presssitz und starres Material) und sich dieser darin nicht verbiegen kann. In diesem Fall modellieren wir eine Einspannstelle an der Stelle A-B mit verteilter Last:

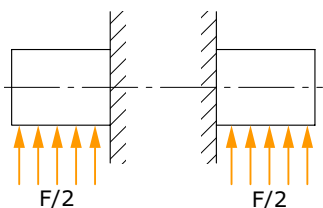


Bild (B013gdiz) Einspannstelle an der Stelle A-B mit verteilter Last

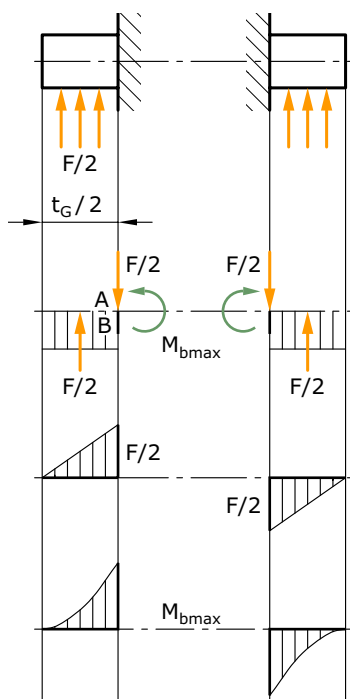


Bild (B014gdiz) Kräfte und Momente entlang des Bolzens bei Einspannung in der Stange

oder durch Einzelkraft:

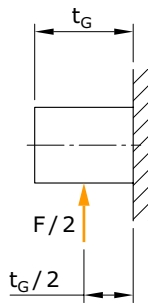


Bild (B015gdiZ)

Hier erhalten wir für beide Fälle das maximale Biegemoment mit:

$$M_B (A - B) = \frac{F \cdot t_g}{4} \quad (12)$$

Modellierung einer Bolzenverbindung –
Modell 3: Bolzen ist in Gabel fest eingespannt

Wieder anders werden die Verhältnisse im dritten Modellierungsfall, wo der Gabelbereich starr ist (Presssitz – Gabel bzw. starres Material). Wir erhalten eine unbestimmte Kräftesituation mit der folgenden Darstellung:

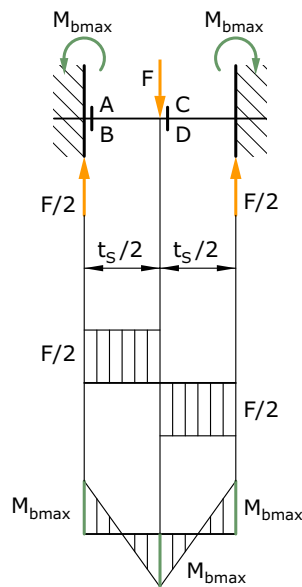


Bild (B016gdiz) Kräfte und Momente entlang des Bolzens bei Einspannung in Gabel

Das maximale Biegemoment (nach Castigliano) ist:

$$M_B (A - B) = \frac{F \cdot t_s}{8} \quad (13)$$

5.3.3. Modellierung einer Bolzenverbindung – Überblick, Wahl

Im Überblick aus der unendlichen Anzahl möglicher Modellierungen erhalten wir 4 verschiedene Modelle mit vielen unterschiedlichen Momentbelastungen bei der Stelle C-D.

Wenn wir willkürlich $F = 1$; $t_S = 1$; $t_G = 1$ ansetzen, so sind die Momente:

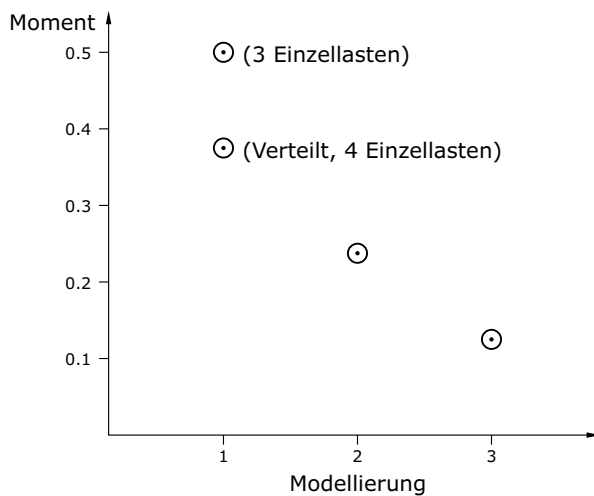


Bild (B017gdiz) 4 Modelle und ihre unterschiedlichen Momentbelastungen

also sehr unterschiedliche quantitative Antworten desselben realen Problems.

Wenn wir uns gedanklich noch weiter in die Modellierung des frei biegbaren Bolzens vertiefen, so erkennen wir ein Verschieben der Kraftauflage im gebogenen Zustand gegen die Stelle A-B und somit eine Verkleinerung der realen Momente in C-D.

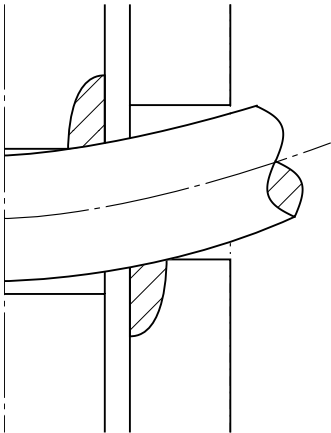


Bild (B018gdiZ) Verschiebung der Auflagezone infolge Durchbiegung des Bolzen

Dies zeigt uns, dass die Modellierung nach Fall 1 mit drei Einzellasten sehr unrealistisch ist; die Modellierung 1 mit verteilter Last bzw. 4 Einzellasten auch sehr konservativ ist und auf der sicheren Seite liegt. Die „Wahrheit“ liegt irgendwo unterhalb dieses Falles in Richtung Fall 2 und 3. In der Praxis wird häufig mit dem Fall 1 (verteilt oder 4 Einzellasten) konservativ dimensioniert.

5.4. Bestimmung der kritischen Bauteilquerschnitte und der Schnittkräfte

Ausgehend von den inneren und äusseren Kräften und Momenten und den Gesetzmässigkeiten des Gleichgewichts, kann in jedem Querschnitt des Bauteiles die Schnittbeanspruchung (Kinemate) berechnet werden. Dazu das folgende Beispiel:

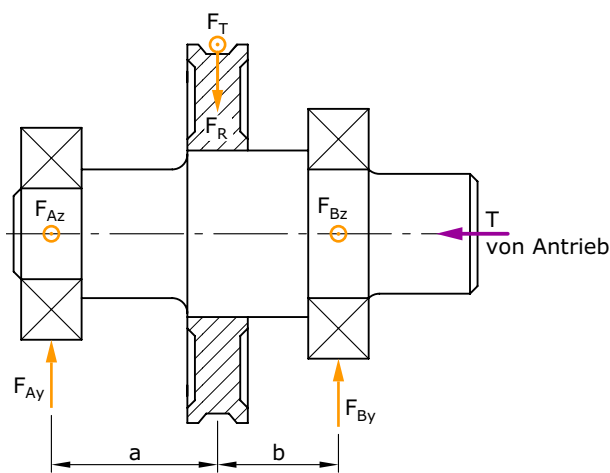


Bild (B019gdiz) Riementrieb gelagert

Freilegen des kritischen Bauteiles Welle und Modellierung der äusseren Belastung:

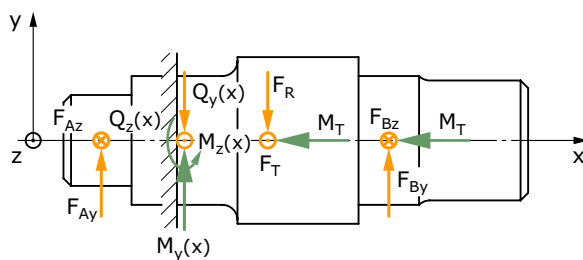


Bild (B020gdiz) Modellierung der äusseren Belastung der Welle

Aufzeichnen der Belastung für jede Stelle x des Bauteiles:

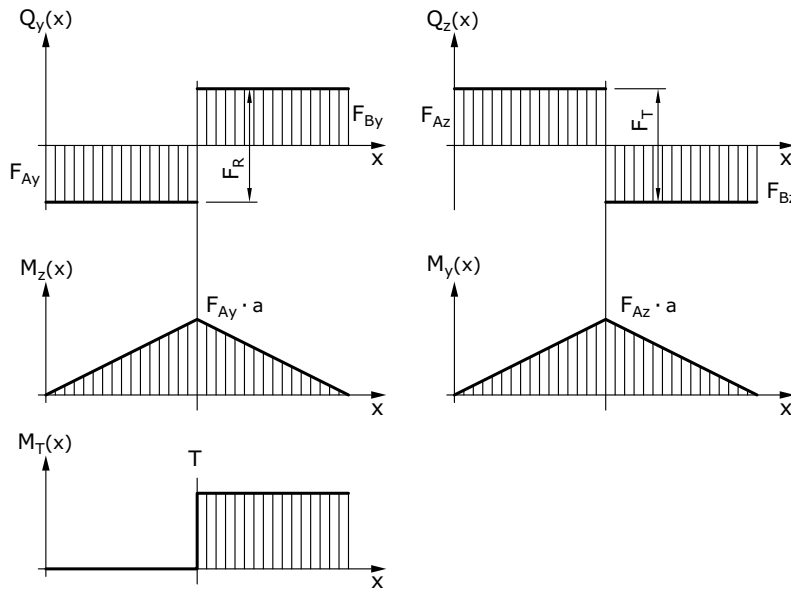


Bild (B021gdiz) Querkräfte und Momente

Welcher Querschnitt als besonders kritisch für die Belastung zu wählen ist, muss durch die Kräfte- und Momentenverlauf-Darstellung über das ganze Bauteil in Kombination mit der geometrischen Gestalt der Bauteile an den verschiedenen Stellen abgeschätzt werden.

Meist müssen mehrere Stellen überprüft werden.

Beispiel: In unserem Beispiel wäre es angebracht, die Stellen 1 und 2 als kritische Querschnitte zu wählen. Falls der Querschnitt 3 noch kleiner gewählt würde (keine Torsionsbelastung), auch diesen.

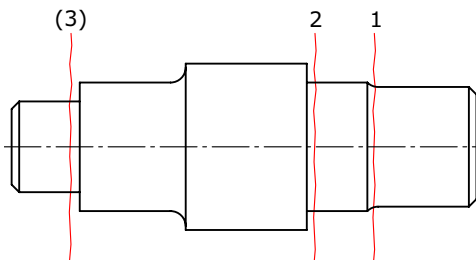


Bild (B022gdiz) Kritische Querschnitte

5.4.1. Flächenmittelpunkt

Die Schnittkräfte und Schnittmomente werden meist auf den Flächenmittelpunkt S reduziert.

Dem Flächenschwerpunkt S kommt daher besondere Bedeutung zu. Bei symmetrischen Querschnitten liegt er durch den Schnittpunkt zweier Symmetrielinien fest. Bei beliebigen Flächen kann man ihn durch die Flächenmomente erster Ordnung bestimmen.

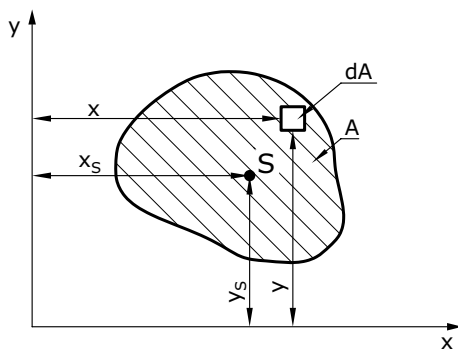


Bild (B023gdiZ) Schwerpunkt S einer beliebigen Querschnittsfläche A . dA infinitesimales Flächenelement.

Nach Bild (B024gdiZ) gelten mit der Querschnittsfläche A und dem Flächenelement dA für die Schwerpunktkoordinaten die Beziehungen:

$$x_s = \frac{1}{A} \int x dA \quad (14)$$

$$y_s = \frac{1}{A} \int y dA \quad (15)$$

Bei zusammengesetzten Flächen, wie sie im Maschinenbau häufig vorkommen, lassen sich die einzelnen Flächen als Teilflächen-Schwerpunkte zusammenziehen.

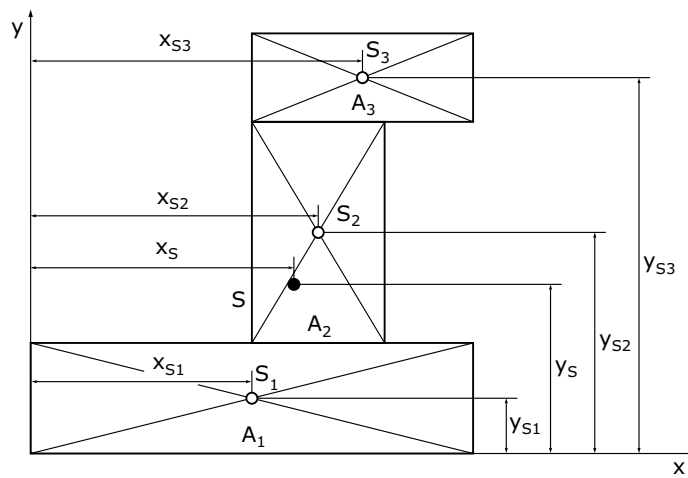


Bild (B024gdiZ) Beispiel einer Flächenschwerpunktberechnung zusammengesetzter, symmetrischer Flächen. Teilschwerpunkt S_1 , Gesamtschwerpunkt S .

$$x_s = \frac{A_1 x_{s1} + A_2 x_{s2} + A_3 x_{s3}}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (16)$$

$$y_s = \frac{A_1 y_{s1} + A_2 y_{s2} + A_3 y_{s3}}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (17)$$

oder allgemeiner für zusammengesetzte Geometrien:

$$x_s = \left(\frac{1}{A} \right) \sum x_i A_i \quad (18)$$

$$y_s = \left(\frac{1}{A} \right) \sum y_i A_i \quad (19)$$

5.4.2. Die Schnittreaktion

An einem beliebigen Querschnitt erhalten wir im allgemeinsten Fall Belastungsvektorentensor mit den drei Kraftkomponenten und drei Momenten.

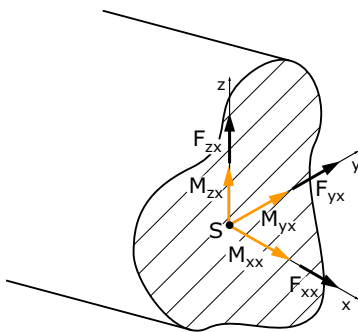


Bild (B025gdiZ) Kraftkomponenten und Momente am Querschnitt

Die üblichen Bezeichnungen sind:

F_{xx}	Normalkraft (häufig auch als F_x bezeichnet)
F_{yx}, F_{zx}	Querkräfte (häufig auch als Q_z , oder Q_y, Q_z bezeichnet)
M_{yx}, M_{zx}	Biegemomente (häufig auch als M_B oder M_y, M_z bezeichnet)
M_{xx}	Torsionsmoment (häufig auch als M_T oder T bezeichnet)

Tabelle (T002gdiz) Kraft und Momentbezeichnungen

Die Bezeichnung der Indizes ist hierbei:

- Index bezeichnet die Richtung der Kraft oder des Moments,
- Index bezeichnet die Richtung der Normalen der betrachteten Schnittfläche.

Die Belastung kann mit den beiden Vektoren F und M beschrieben werden. Vielfach überlagert sich zu einer ruhenden Belastung in einem Querschnitt noch eine dynamische (wechselnde). Diese wird innerhalb der Wechselfestigkeitsberechnung (Ermüdungsfestigkeit) von Bedeutung sein.

Auch diese wechselnde Belastung kann mit zwei Vektoren, ΔF und ΔM , beschrieben werden.

5.5. Bestimmung der Spannungen in den kritischen Querschnitten – Spannungstensor T

Die berechneten inneren Kräfte und Momente am betrachteten Querschnitt verformen das Bauteil. Der Werkstoff des Bauteils versucht sich zu widersetzen. Er bildet dabei innere Kräfte, die (bezogen auf die Flächeneinheit) Spannungen heissen. Es gibt Normalspannungen σ und Schubspannungen τ .

Je nach Belastungsart, Geometrie des Querschnittes und Ort im Querschnitt sind diese Spannungen unterschiedlich gross.

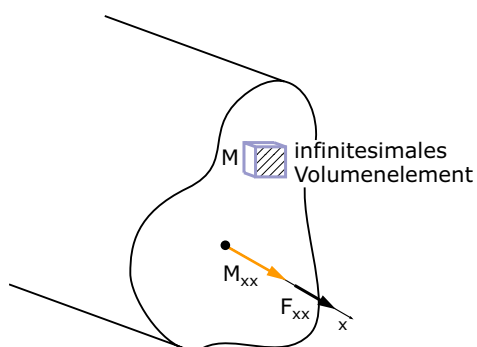


Bild (B026gdiZ) Infinitesimales Element im kritischen Querschnitt

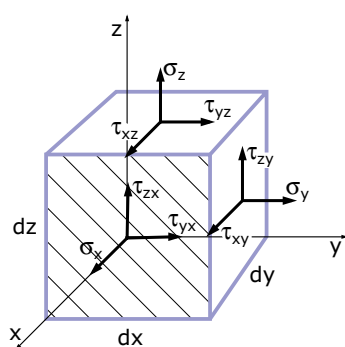


Bild (B027gdiZ) Infinitesimales Volumenelement

Für jede Stelle im Querschnitt kann ein infinitesimales Volumenelement dx, dy, dz heraus geschnitten und die Spannungen an den Flächen des Würfels (mit Berechnungsmethoden der Festigkeitslehre) bestimmt werden. Wir erhalten einen 3×3 Tensor.

$$\underline{\underline{T}}(x,y,z) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yz} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (20)$$

Im allgemeinen Fall liegt ein dreiachsiger Spannungszustand vor.

Die Normalspannungen stehen senkrecht auf den Flächen. Die Indizes kennzeichnen die Koordinatenrichtungen.

Zu jeder Fläche gehören jeweils zwei senkrecht aufeinander stehende Schubspannungen. Von jeder Schubspannung gibt der erste Index die Richtung der Schubspannung und der zweite die Richtung der Flächennormalen an.

Es gilt zusätzlich die Momentenbedingung, um eine Parallele zur x-Achse durch den Mittelpunkt des Quaders:

$$2\tau_{yz} \frac{dz}{2} dx dy - 2\tau_{zy} \frac{dy}{2} dx dz = 0 \quad (21)$$

$$\tau_{zy} = \tau_{yz} \quad (22)$$

bzw. um die y-Achse und z-Achse:

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} \quad (23)$$

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} \quad (24)$$

Das Gesetz der zugeordneten Schubspannungen: Die Schubspannungen in zwei senkrecht aufeinander stehenden Flächen sind gleich gross und zeigen entweder beide zur Spurgeraden oder von der Spurgeraden weg.

Als Zugspannungen verlängern und als Druckspannungen stauchen die Normalspannungen das Körperelement. Die Schubspannungen hingegen verschieben parallele Flächen gegeneinander, sodass sich der ursprünglich rechte Winkel des Würfелеlementes ändert.

Ein ebener Spannungszustand liegt vor, wenn eine der Flächen des Würfels spannungsfrei ist, z. B.:

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Neben den statischen, ruhenden Spannungskomponenten kann auch der zeitlich wechselnde Spannungstensor (Tensor der Spannungsamplituden) gleichermassen dargestellt werden, mit:

$$\underline{T} = \underline{a} \quad (26)$$

Die Berechnungsmodelle und -methoden für die konkrete Bestimmung der Spannungsverteilung bei unterschiedlicher Belastungsart bzw. Bauteilgeometrie ist in der Sektion: Berechnungsmethoden der Festigkeitslehre zu finden.

5.6. Bestimmung der Spannungen in den kritischen Querschnitten – Mohr'scher Spannungskreis

Für die Festigkeitsberechnung und Dimensionierung kommt neben der Darstellung der Spannungen innerhalb des Spannungstensors der Darstellung der Spannungssituation auf dem Mohr'schen Spannungskreis grosse Bedeutung zu. Aus diesem Grund werden hier die wesentlichen Punkte zusammengefasst.

Die Grösse der Spannungen in einem Punkt M bzw. an den Flächen des Körperelementes hängen von der Lage des infinitesimalen Quaders bzw. den Schnittrichtungen ab. Durch Drehen des infinitesimalen Elementes verändern sich die Spannungskomponenten. Von den unendlich vielen, gedrehten Stellungen des Körperelementes gibt es eine spezielle Lage, bei welcher in den Schnittebenen die Schubspannungen verschwinden und die Normalspannungen Extremwerte

erhalten. Diese Spannungen heissen Hauptspannungen, ihre Richtungen Hauptspannungsrichtungen und ihre zugehörigen Schnittebenen Hauptebenen.

Vereinbarungsgemäss haben die Hauptspannungen die Indizes 1, 2, und 3 wobei der Index 1 meist zur algebraisch grössten positiven Hauptspannung gehört. Es soll gelten:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \quad (27)$$

Die Abhängigkeit der Normal- und Schubspannungen von der Schnitttrichtung lässt sich aus den Gleichgewichtsbedingungen am zweiachsigen Spannungszustand geometrisch einfach ermitteln. Als Beispiel zeigt das folgende Bild (B028gdiZ) einen ebenen Spannungszustand. Mit:

$$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (28)$$

und den zulässigen Schubspannungen

$$\tau_{zx} = \tau_{zy} = 0 \quad (29)$$

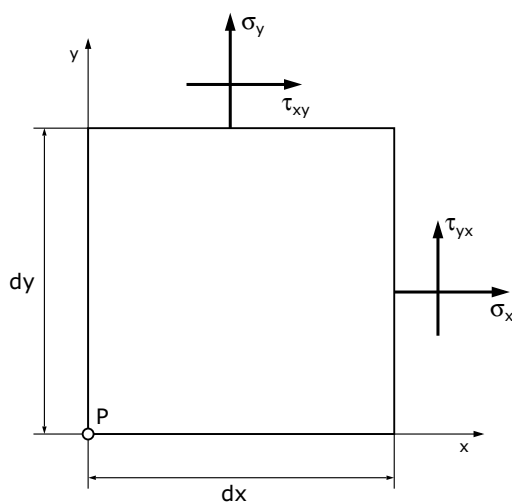


Bild (B028gdiZ) Zweiachsiger Spannungszustand

Wir schneiden das infinitesimale Flächenelement auf und bilden das Gleichgewicht der Kräfte (nicht Spannungen).

Der im mathematischen Sinne positiv zählende Winkel ψ legt die variable Schnitttrichtung fest.

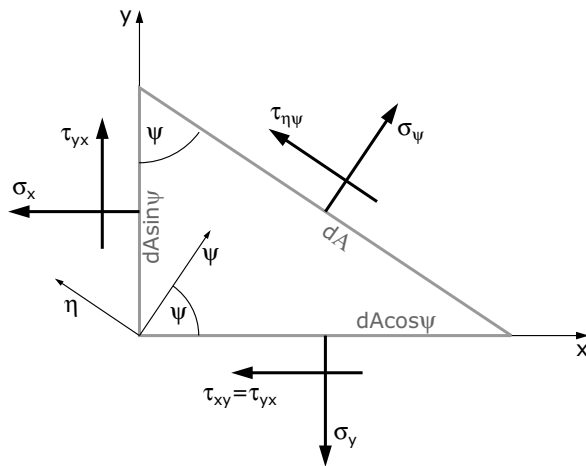


Bild (B029gdiz) Normalspannung und Schubspannung bei einem ebenen Spannungszustand einer Schnittebene

Aus den Bedingungen für das Kräftegleichgewicht in ψ - und η -Richtung resultieren für die Normalspannung und Schubspannung folgende Beziehungen:

$$\begin{aligned} \sigma_{\psi} dA - (\sigma_x dA \cos \psi) \cos \psi - (\sigma_y dA \sin \psi) \sin \psi \\ - 2\tau_{xy} dA \cos \psi \sin \psi = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\sigma_{\psi} = \sigma_x \cos^2 \psi + \sigma_y \sin^2 \psi + 2\tau_{xy} \cos \psi \sin \psi \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \tau_{\eta\psi} dA + (\sigma_x dA \cos \psi) \sin \psi - \tau_{xy} dA \cos^2 \psi \\ - (\sigma_y dA \sin \psi) \cos \psi + \tau_{xy} dA \sin^2 \psi = 0 \end{aligned} \quad (32)$$

$$\tau_{\eta\psi} = (\sigma_y - \sigma_x) \cos\psi \sin\psi + \tau_{xy} (\cos^2\psi - \sin^2\psi) \quad (33)$$

Werden die trigonometrischen Anteile anstelle ihrer Potenzen durch ein Vielfaches der Argumente dargestellt, so wird:

$$\cos^2\psi = \frac{1 + \cos 2\psi}{2} \quad (34)$$

$$\sin^2\psi = \frac{1 - \cos 2\psi}{2} \quad (35)$$

$$2\sin\psi \cos\psi = \sin 2\psi \quad (36)$$

für die Normalspannung σ_ψ

$$\sigma_\psi = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\psi + \tau_{xy} \sin 2\psi \quad (37)$$

und die Schubspannung $\tau_{\eta\psi}$

$$\tau_{\eta\psi} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\psi + \tau_{xy} \cos 2\psi \quad (38)$$

Durch Kombination der umgeformten Gleichungen (32) und (33) kann ψ eliminiert werden. Die daraus resultierende Beziehung lautet:

$$\left(\sigma_\psi - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{\eta\psi}^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \quad (39)$$

oder allgemein

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 \quad (40)$$

Gleichung (40) stellt geometrisch in einem σ - τ -Koordinatensystem die Gleichung eines Kreises dar, mit den Mittelpunktkoordinaten:

$$\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}; 0\right) \quad (41)$$

und dem Radius:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (42)$$

Ein solcher Spannungskreis wird als Mohr'scher Spannungskreis bezeichnet.

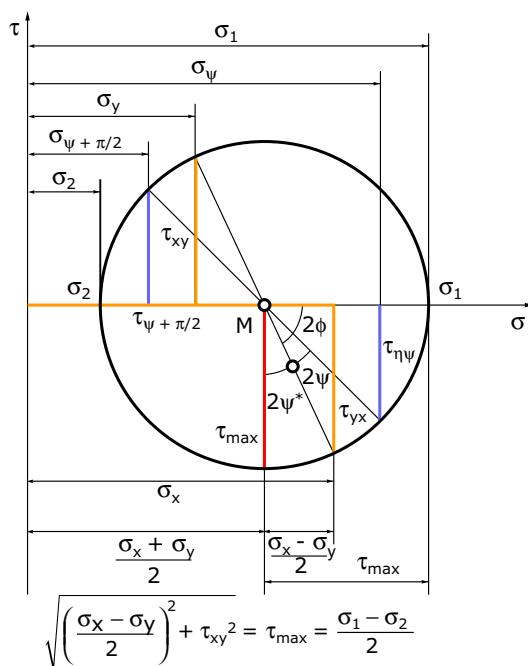


Bild (B030gdiz) Mohr'scher Spannungskreis für den ebenen Spannungszustand

Die Verbindungslinie zwischen dem Mittelpunkt und dem Kreispunkt (σ_x ; τ_{xy}) symbolisiert die ursprüngliche x-Ebene.

Durch Abtragen des doppelten Schnittwinkels 2ψ von dieser Geraden lassen sich die Spannungen ablesen, die in einer Schnittebene im Winkel ψ zur x-Ebene auftreten. Damit sind die Spannungen in einer dazu senkrechten Schnittebene (ehemals y-Ebene), d. h. in einer Schnittebene $\psi + \pi/2$ ebenfalls bekannt und aus dem Mohr'schen Spannungskreis zu entnehmen.

Für den eingetragenen Winkel 2φ , d.h. für einen bestimmten Schnittwinkel φ , verschwinden die Schubspannungen und die Normalspannungen nehmen Extremwerte an. Sie werden zu Hauptspannungen.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (43)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (44)$$

Der Winkel φ folgt aus Gleichung (45). Es ist

$$\tan 2\varphi = -\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (45)$$

Die Gleichung lässt sich auch unmittelbar aus dem Spannungskreis ablesen.

Die nach ψ differenzierte und Null gesetzte Gleichung (35) liefert den Schnittwinkel ψ^* für die maximale Schubspannung τ_{\max} :

$$\tan 2\psi^* = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} \quad (46)$$

Durch Vergleich von Gleichung (46) mit Gleichung (45) zeigt sich, dass:

$$\tan 2\psi^* = -\frac{1}{\tan 2\varphi} \quad (47)$$

gelten muss. Damit Gleichung (42) erfüllt wird, ergibt sich für die Winkel

$$2\psi^* = 2\varphi + \frac{\pi}{2} = 2\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \quad (48)$$

$$\psi^* = \varphi + \frac{\pi}{4} \quad (49)$$

Die maximalen Schubspannungen liegen also in der Schnittebene, die mit den Hauptebenen den Winkel 45° bilden. Durch Einsatz von ψ nach Gleichung (40) in Gleichung (35) folgt mit Hilfe einiger trigonometrischer Umformungen:

$$\tau_{\max} = \tau_{\eta\psi\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (50)$$

Die Beziehung nach Gleichung (50) kann man auch dem Spannungskreis entnehmen. Ferner zeigt der Mohr'sche Spannungskreis, dass mit:

$$\sigma_x + \sigma_y = \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_\psi + \sigma_{\psi+p} \quad (51)$$

die Summe der Normalspannungen von zwei senkrecht stehenden Ebenen für jeden Schnittwinkel konstant ist.

Dieser Spannungskreis gilt entsprechend für die von σ_x und σ_y bzw. σ_1 und σ_2 aufgespannte Ebene. In gleicher Weise findet man die

Spannungskreise für die $\sigma_y\sigma_z$ - bzw. $\sigma_2\sigma_3$ -Ebene und die $\sigma_2\sigma_x$ - bzw. $\sigma_3\sigma_1$ -Ebene.

Das folgende Bild zeigt in einer Ebene zusammengefasst die Spannungskreise für den dreiachsigen Spannungszustand.

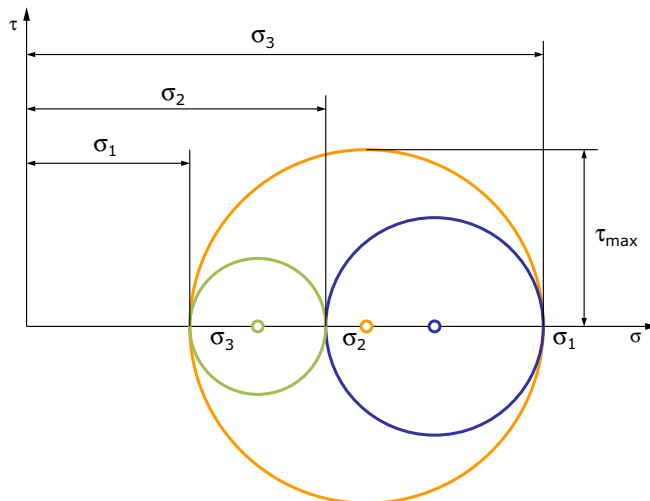


Bild (B031gdiZ) Mohr'sche Spannungskreise für den allgemeinen dreiachsigen Spannungszustand

Ein einachsiger Spannungszustand hat demnach:

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (52)$$

im Mohr'schen Spannungskreis die folgende Darstellung:

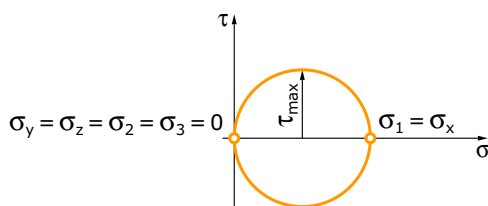


Bild (B032gdiZ) Einachsiger Spannungszustand im Mohr'schen Spannungskreis

Anstelle der Darstellung im Mohr'schen Spannungskreis können die Hauptspannungen natürlich auch mit linearer Algebra bzw. mit Rechenprogrammen direkt aus dem Spannungstensor berechnet werden.

5.7. Festigkeits- und Versagensberechnung durchführen

Wenn wir voraussetzen, dass wir nun die: erste optimierte Gestalt der Bauteile, alle äusseren Kräfte und deren Verteilung über den Wirkkontakt, die kritischen Querschnitte und die Schnittkräfte und Schnittmomente (statisch und dynamisch) sowie die Spannungsverteilung für die kritischen Orte dieser Querschnitte (ruhende Spannungen als auch die wechselnden) bestimmt haben, können wir die Bauteile auf Sicherheit gegen Versagen überprüfen.

Wir betrachten die folgenden Versagensfälle: Versagen infolge zu grosser Spannungen bei ruhender sowie wechselnder Beanspruchung, Versagen infolge zu grosser Deformation und Versagen infolge Instabilitäten.

5.7.1. Versagensfälle infolge zu hoher Spannungen

Grundsätzlich müssen Bauteile immer auf zwei verschiedene Kriterien der Spannungen überprüft werden.

Bauteile, welche einer gleichbleibenden Belastung ausgesetzt sind bzw. deren Belastungswechsel während des gesamten Bauteillebens nicht grösser als 10^4 Zyklen (Lastwechsel) aufweisen, werden auf Versagen durch ruhende Belastung überprüft (siehe auch [Bauteildimensionierung bei ruhender Belastung](#)) und zwar sowohl auf Versagen durch Fließen als auch auf Versagen infolge Bruch (Gewaltbruch).

Bauteile, welche während des Lebenszyklus mehr als $5 \cdot 10^6$ Zyklen aufweisen, müssen zusätzlich auf Versagen durch wechselnde Belastung (Dauerbruch) überprüft werden (siehe auch Ermüdungsfestigkeit).

Vor allem in diesem Fall sind geometrische Diskontinuitäten der Bauteile wie Einstiche, Absätze, Bohrungen – insgesamt als Kerben bezeichnet – von Bedeutung (siehe auch [Kerbwirkung](#)).

5.8. Diskussion und Optimierung des Entwurfs

Wir haben nun für den vorliegenden Entwurf eine endliche Zahl von Lastfällen eruiert, bei denen wir eine oder mehrere Bauteile als kritisch bezeichnet haben. Zu diesen Teilen wurden wiederum ein oder mehrere Querschnitte bestimmt, die hinsichtlich Beanspruchung kritisch erscheinen. Für diese Querschnitte berechnen wir die Kräfte und Momente. Diese Kräfte bewirken Spannungen für jeden Ort des Querschnittes. Vielfach gibt es pro Querschnitt mehrere kritische Orte.

Die Spannungen lassen sich als Tensor und / oder mit dem Mohr'schen Spannungskreis darstellen und daraus die Hauptspannungen sowie maximalen Schubspannungen bestimmen. Mittels der Spannungen kann das Versagen infolge zu hoher Spannungen bestimmt werden.

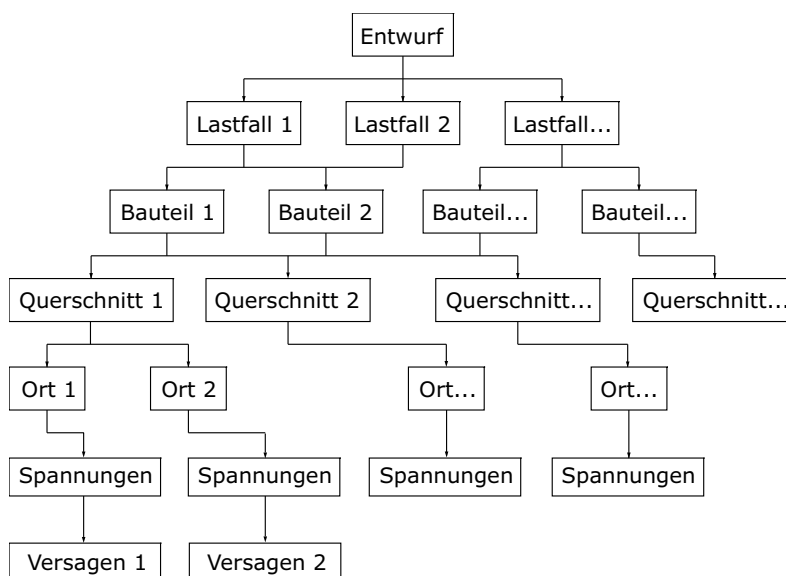


Bild (B033gdiZ) Berechnungsbaum eines Entwurfes

Im Bild (B033gdiZ) ist ersichtlich, wie die baumförmige Aufweitung dieser Berechnungsschritte schnell eine sehr grosse Anzahl von Einzelberechnungen ergibt. Nur die gezielte Auswahl von „richtigen“ Berechnungen kann viel Zeit einsparen.

Die Resultate der Spannungsberechnung bzw. der Versagensberechnung sind wiederum (soweit nicht schon abschliessend) die Ausgangsbasis zur Diskussion der Bauteil- bzw. Entwurfsgüte in Bezug auf alle genannten Ziele. Die Erkenntnisse aus der Berechnung werden als

Basis genommen, um den Entwurf zu verbessern und zu optimieren, gemäss der dargelegten Ziele. Erst wenn die Güte zufriedenstellend ist, wird der Entwurf definitiv gemacht und von einer reinen Dimensionierungsberechnung in eine Festigkeits- (bzw. Versagensnachweis-) Berechnung (auch Festigkeitsnachweis genannt) übergegangen.

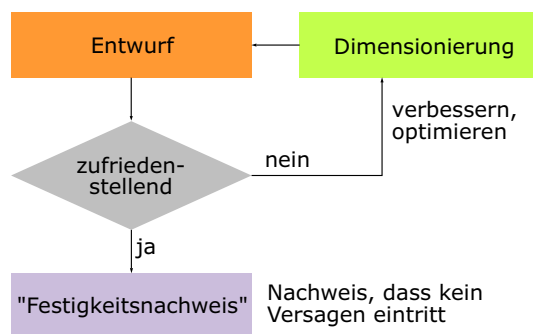


Bild (B034gdiz) Flussdiagramm für Dimensionierung und Festigkeitsnachweis

6. Zusammenfassung

Mittels Dimensionieren werden die Abmessungen von Bauteilen belastungsgerecht festgelegt oder gegebene Bauteile auf die Beanspruchung überprüft. Die Dimensionierung erfolgt über folgende sieben Schritte.

1. Betriebszustände bestimmen
2. kritische Bauteile auswählen
3. Bauteile freilegen, modellieren
4. kritische Querschnitte bestimmen
5. Spannungen berechnen
6. Festigkeitsnachweis
7. Diskussion und Optimierung der Gestalt

Die Modellierung der wirkenden Kräfte und Randbedingungen ist ein kritischer Schritt.

Die Spannungskomponenten innerhalb eines kritischen Querschnittes werden über die Hauptspannungen in eine vergleichbare Form gebracht, und mit dem Mohr'schen Spannungskreis dargestellt.

Verständnisfrage 1

Im untenstehenden Bild ist ein Kegelrad-Stirnradgetriebe dargestellt.

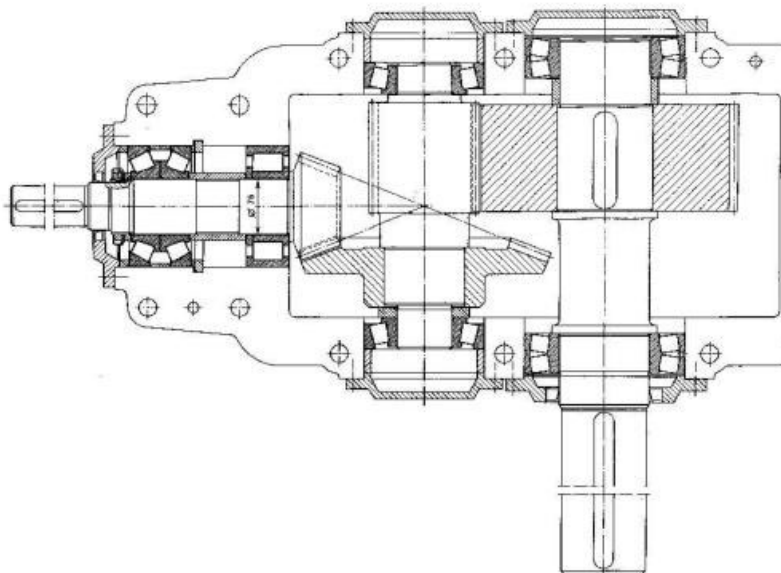


Bild (B101gdZ) Kegelrad-Stirnradgetriebe S.44
(FAG Katalog Gestaltung von Wälzlagerungen)

Wir interessieren uns für den linken Teil der Konstruktion, wo die Antriebsleistung über eine Passfeder auf die Welle übertragen, durch die gelagerte Welle auf das Ritzel geleitet und von dort auf das Tellerad übertragen wird. Zeigen Sie den Kraftfluss und die äusseren Kräfte der Welle in dieser Konstruktion.

Zeigen Sie die Kräfte und Momentenverteilung über die Längen.

Verständnisfrage 2

Eine Welle ist auf Torsion und Biegung beansprucht. Im Querschnitt x sind die folgenden Momente bekannt.

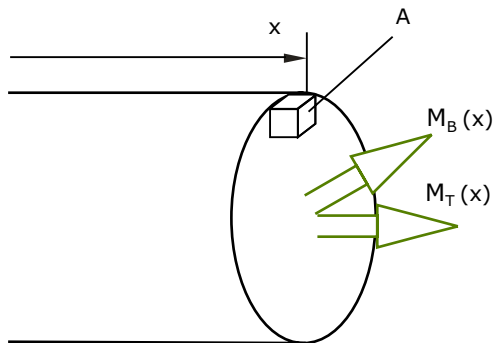


Bild (B201gdiZ) Beanspruchungszustand

Für das infinitesimale Volumenelement A sind die Spannungen berechnet und betragen:

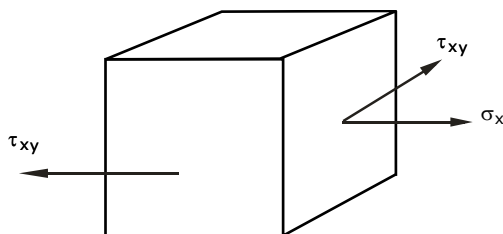


Bild (B202gdiZ) Spannungen im infinitesimalen Volumenelement mit:
 $\sigma_x = 200 \text{ N/mm}^2$ und $\tau_{yx} = 180 \text{ N/mm}^2$

Alle anderen Komponenten sind Null. Stellen Sie den Tensor dar und berechnen Sie mittels Matlab sowie des Mohr'schen Spannungskreises die Hauptspannungen $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

$$\begin{aligned} \mathbb{I} &= ? \\ \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 &= ? \end{aligned} \quad (53)$$

Wie gross ist die grösste Schubspannung?

Verständnisfrage 3

Eine Palette ist durch Spannungen in der Ebene belastet und senkrecht dazu spannungsfrei.

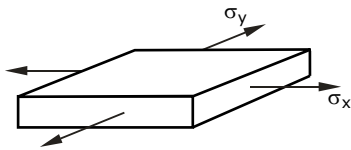


Bild (B600gdiZ) Platte unter ebener Spannung mit:
 $\sigma_x = 200 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_y = 80 \text{ N/mm}^2$

Zeigen Sie den Spannungstensor und berechnen Sie die Hauptspannungen mit Matlab und mit dem Mohr'schen Spannungskreis. Was passiert, wenn σ_y negativ wird ($\sigma_y = -40 \text{ N/mm}^2$)?

Verständnisfrage 4

Im folgenden Bild (B401gdiZ) sehen Sie einen ersten Entwurf eines Riementriebes mit Handkurbelbetrieb. Zeigen Sie die kritischen Bauteile und die kritischen Querschnitte. Zeigen Sie Verbesserungspotential für den Entwurf.

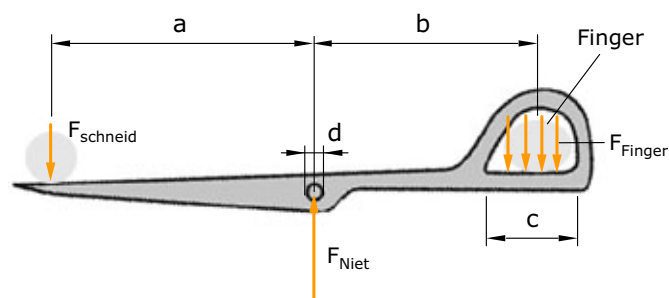


Bild (B401gdiZ) Reibtrieb mit Handkurbel

Systematik: Bearbeiten sie folgende Fragenstellungen:

- konstruktive Diskussion des Kraftflusses
- Betriebszustände (Normalbetrieb, aussergewöhnliche Lastfälle)
- kritische Bauteile (Kurbel, Welle, Lager, Riemen)
- durch Freilegen der Teile die äusseren Kräfte und Momente bestimmen
- gefährdete Querschnitte durch Aufzeichnen der Belastung über dem Bauteil bestimmen

Verständnisfrage 5

Sie haben eine zusammengesetzte Profilstruktur aus einzelnen Halbzeugen gestaltet (siehe B501gdiz). Berechnen Sie mit Hilfe von x_S und y_S den Schwerpunkt des gesamten Querschnitts.

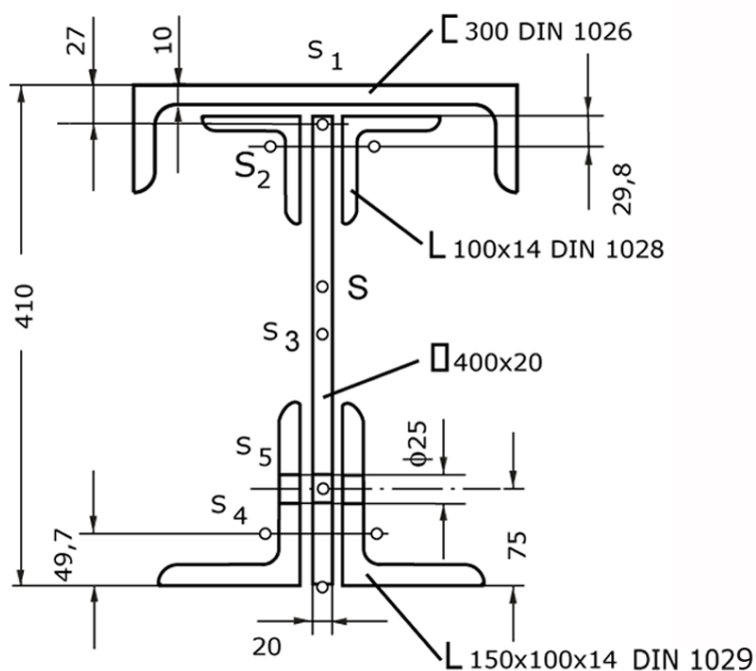


Bild (B501gdiz) Aus Einzelprofilen zusammengesetztes Profil

Die DIN genormten Teile haben die folgenden Flächen:

- 300 DIN 1026: $A = 58,8 \text{ cm}^2$
- 100 x 14 DIN 1028: $A = 26,2 \text{ cm}^2$
- 150 x 100 x 14 DIN 1029: $A = 33,2 \text{ cm}^2$

$$x_S = \left(\frac{1}{A} \right) \sum x_i A_i$$

$$y_S = \left(\frac{1}{A} \right) \sum y_i A_i$$

(54)

Publikationsverzeichnis - Literatur

- [1] Hintzen, Hans; Laufenberg, Hans und Matek, Wilhelm (1998):
Konstruieren und Berechnen, Vieweg-Verlag, Wiesbaden

Bauteildimensionierung bei ruhender Belastung

Autor: Prof. Dr. Markus Meier

1. Überblick

Motivation

Die heutigen Treträder (Trottinett, Kickboard) mit den kleinen Laufrädern besitzen alle ähnliche Lenkmechanismen. Ein längeres Rohr ist in den Klappmechanismus drehbar montiert.

Als ein kritischer Lastfall wird der Zusammenstoss mit dem Gehsteig festgelegt. Das Gewicht des Fahrers drückt in diesem Fall stark gegen den Lenker (F) und die Stelle direkt über der Lenkrohrlagerung Q ist stark beansprucht.

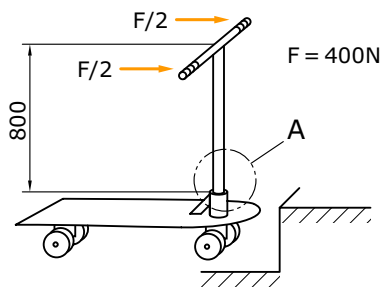


Bild (B022rbeZ) Lastfall wegen Unfall

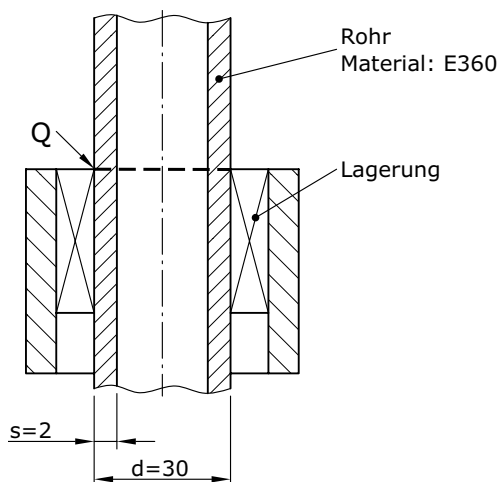


Bild (B023rbeZ) Kritische Stelle A am Rohr

Es stellen sich die folgenden Fragen:

- Wie schätzen Sie die Kraft F ab?
- Welche Beanspruchung wirkt im Querschnitt Q ?
- Wie sieht der Spannungstensor aus?
- Können Sie abschätzen, inwiefern das Rohr die Beanspruchung erträgt?

Lernziele

In dieser Sektion sollen:

- die unterschiedlichen Versagensfälle welche für Bauteile auftreten, klassiert werden,
- die Materialkennwerte, welche Versagen durch Fließen oder Bruch beschreiben, vorgestellt werden,
- die verschiedenen Versagenshypothesen, welche für Versagen durch Fließen und Bruch angewendet werden und
- die korrekte Anwendung der verschiedenen Versagenshypothesen gelehrt werden und
- die Sicherheitswerte für den Festigkeitsnachweis und deren Interpretation für die ruhende Belastung vorgestellt und vertieft werden.

Einleitung

Viele Bauteile unterliegen einer äusseren Belastung. Aus dieser Belastung resultieren für die kritischen Bereiche des Bauteils Beanspruchungen bzw. Spannungen. Bauteile ertragen ein gewisses Mass an Spannungen, welches von der Beanspruchungsart und dem Material abhängig ist. In der folgenden Sektion werden die wesentlichen Grundlagen für die korrekte Dimensionierung von Bauteilen unter statischer bzw. ruhender Belastung gezeigt. Die Gesamtheit des Spannungszustandes kann in einem Spannungstensor dargestellt werden. Der Einfluss des Spannungstensors und des Materialverhaltens auf die Belastbarkeit sowie das Versagen infolge Fließen oder Bruch wird erläutert.

2. Ruhende, zügige Beanspruchung

Bauteile können unterschiedlichster Klassen von Beanspruchungen unterliegen. Die Unterscheidung kann erfolgen in ruhende, zügige Beanspruchung und in wechselnde Beanspruchung.

Ruhende, zügige Beanspruchung (statische Beanspruchung)

Die Beanspruchung entsteht bei langsamer bis mässiger Geschwindigkeit (zügig) und das Bauteil erfährt während der gesamten Lebensdauer keine Lastwechsel bzw. nur eine begrenzte Anzahl $N < 10^4$ von Lastwechsel (ruhend). Vielfach wird diese Beanspruchung auch statisch genannt.

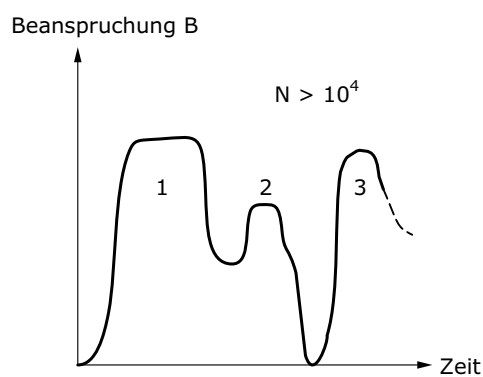


Bild (B001rbeZ) Beanspruchungsverlauf

Wechselnde Beanspruchung

Bauteile, welche einer wechselnden (zyklischen) Belastung unterworfen sind, bei der die Zykluszahl während der Lebensdauer des Bauteils $N > 10^4$ ist, bezeichnet man als wechselnd beansprucht.

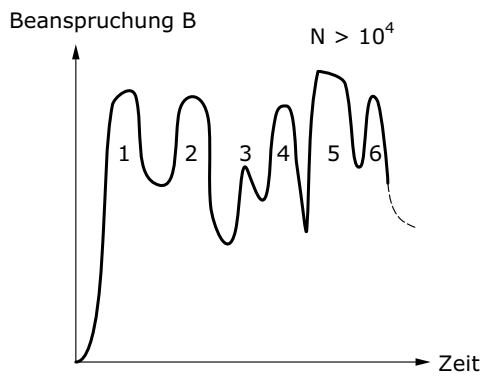


Bild (B002rbeZ) Beanspruchungsverlauf

Die vorliegende Sektion befasst sich mit der Auslegung von Bauteilen bei ruhender, zügiger Beanspruchung.

3. Versagensfälle bei ruhender, zügiger Beanspruchung

Ein Bauteil, das einer statischen Beanspruchung unterliegt, kann unterschiedlich versagen, durch

- Fließen,
- Bruch,
- zu grosse Deformation oder
- Instabilität.

Versagen durch Fließen

Das Bauteil wird an die Grenze der Beanspruchung belastet und ein Fließen (plastische Deformation) tritt ein. Zwischen Eintritt des Fließens und dem definitiven Versagen durch Bruch liegt - abhängig von der Beanspruchungsart und dem Material - eine weitere Beanspruchungsdifferenzierung (Belastungskurve).

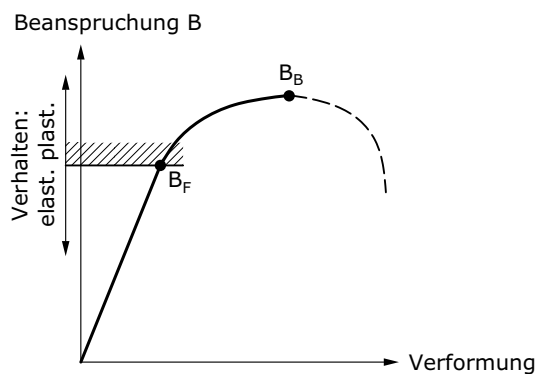


Bild (B003rbeZ) Spannungs-Dehnungsdiagramm; B_F : Beanspruchungsgrenze durch Fließen, B_B : Beanspruchungsgrenze durch Bruch

Versagen durch Bruch

Bestimmte Beanspruchungskombinationen (allseitige Zugspannungen) bzw. bestimmte Materialien (sprödes Materialverhalten) zeigen keine plastischen Bereiche, sondern im Anschluss an das elastische Verhalten, direkt den Bruch.

Beanspruchung B

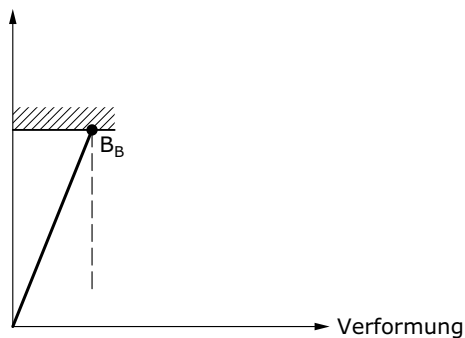


Bild (B004rbeZ) Spannungs-Dehnungsdiagramm bei Bruchversagen; B_B : Beanspruchungsgrenze durch Bruch

Versagen durch zu grosse Deformation

Bauteile können gestalterische Restriktionen vor allem mit den benachbarten Bauteilen (Wirkflächen) besitzen, die nur eine bestimmte Verformung bzw. Deformation zulassen. Oberhalb dieser Verformung ist die Funktion des Bauteiles bzw. des Bauteilverbundes nicht mehr gewährleistet.

Beanspruchung B

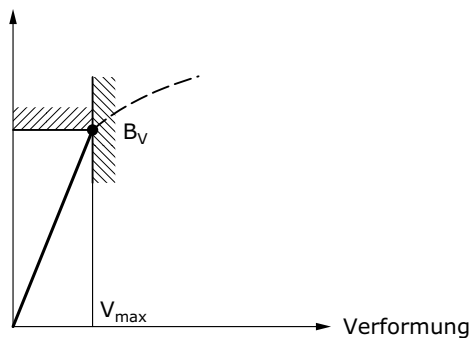


Bild (B005rbeZ) Spannungs-Dehnungsdiagramm bei zu grosser Deformation; B_V : Belastungsgrenze Verformung

Versagen durch Instabilität

Bestimmte Beanspruchungen in Bauteilen können zu Instabilitäten der Verformung führen, vor allem schlanke Bauteile unter Bruch (Knicken). Beanspruchungen aber auch azimutale oder achsiale Druckspannungen (Beulen) bei zylindrischen Bauteilen führen zu sofortigem Versagen.

Beanspruchung B

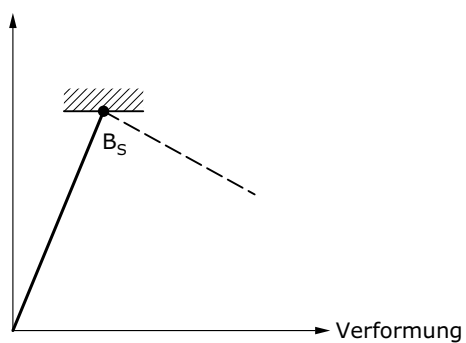


Bild (B006rbeZ) Belastungsgrenze durch Instabilität B_S

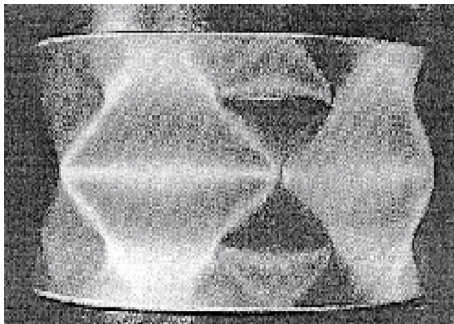


Bild (B029rbeZ) Beispiel: gebeulter Zylinder

In den folgenden Abschnitten liegt das Schwergewicht auf dem Versagen durch Fließen und durch Bruch.

4. Werkstoffkennwerte

Bauteile können, infolge der statischen Beanspruchung durch Fließen oder Bruch versagen. Die Bauteilgeometrie und die Belastungsart ergeben im Bauteil eine beliebige Varianz von unterschiedlichen Spannungszuständen (Spannungstensor T).

Aus rein praktischen Überlegungen kann nicht für jeden möglichen, dreidimensionalen Spannungszustand die Grenzwerte B_F , B_B ermittelt werden, so dass man sich damit begnügen muss, den vorliegenden komplexen, meist dreidimensionalen Spannungszustand, beschreibbar durch den Spannungstensor T auf eine einachsige skalare Vergleichsspannung σ_V zu reduzieren und diese mit Grenzwerten des Werkstoffes (Grenzwert der Spannung, oberhalb welchem das Versagen eintritt) zu vergleichen. Diese Grenzwerte werden meist in Zugversuchen an genormten Prüfkörpern bestimmt. Wir schlagen sie in Werkstoffblättern und Normlisten nach.

Grenzwerte

Die Angaben der Grenzwerte σ_G für Werkstoffe sind vielfach sehr verwirrend und unterscheiden sich in der Aussagekraft für unsere Bedürfnisse nur unbedeutend. Die wichtigsten Grössen für uns sind

- σ_{zul} die Proportionalitätsgrenze (das Hook'sche Gesetz gilt bis zu dieser Grenze) und
- σ_F die Fließgrenze, vielfach auch als Streckgrenze σ_S oder bei nicht ausgeprägter Streckgrenze als Dehngrenze $\sigma_{0,2}$ bezeichnet.

Diese Grössen bezeichnen mehr oder weniger den Übergang zwischen elastischem Verhalten (Hook'sches Stoffgesetz) und dem Beginn des plastischen Fließens im Probestab. (Anstelle des griechischen Buchstabens σ wird vielfach R verwendet).

- σ_B die Zugfestigkeit wird vielfach auch Bruchfestigkeit genannt und teilweise mit R_m bezeichnet. Dieser Wert stellt den maximalen Spannungswert dar, der zu Einschnürung des Probekörpers und zum Bruch führt.

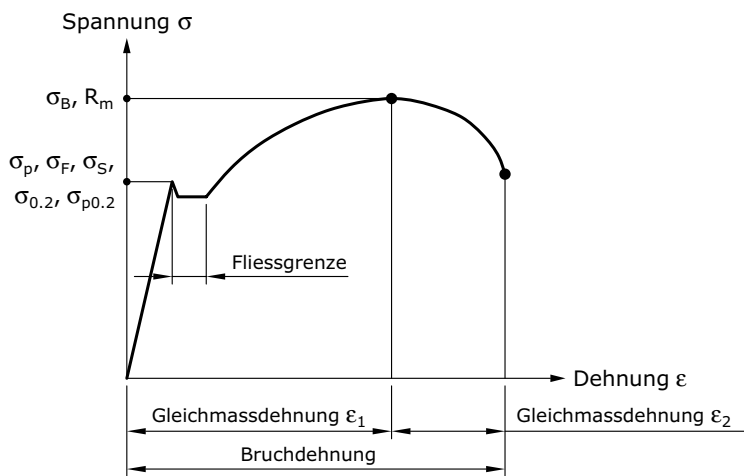


Bild (B007rbeZ) Verschiedene Begriffe, ähnlicher Bedeutung für die Grenzwerte σ_G

Innerhalb der weiteren Kapitel verwenden wir σ_F und σ_B für diese skalaren Versagensgrenzen.

Zur Ermittlung dieser Grenzwerte werden glatte Rund- oder Flachproben unter einachsigen Spannungszustand (meist Zugversuch) beansprucht. Die erhaltenen Messergebnisse sollten grundsätzlich von den Probeabmessungen unabhängig sein. Dies wird so gut wie möglich gewährleistet, indem die Proportionen der Proben und die Durchführung der Versuche genormt sind.

4.1. Einfluss der Temperatur

Bei erhöhter Bauteiltemperatur (für Stahl $\nu > 200^\circ\text{C}$) müssen die Grenzwerte der Warmstreckgrenze $\sigma_{F/u}$ und Warmfestigkeit $\sigma_{B/u}$ als Grössen eingesetzt werden.

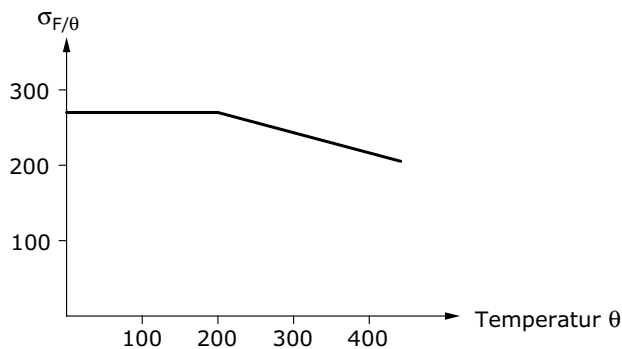


Bild (B008rbeZ) Temperatureinfluss auf die Fließgrenze

Oberhalb der Kristallerholungstemperatur (Stahl rund 350°C) kommt der Fließvorgang nicht mehr durch Verfestigung zum Stillstand, sondern schreitet fort.

Bei tiefen Temperaturen erhöhen sich die Grenzwerte, gleichzeitig nimmt aber bei vielen Materialien das Sprödbbruchverhalten zu. (Ausnahmen bildet z.B. Aluminium).

4.2. Weitere Einflüsse

Weitere Einflüsse auf die Werkstoffkennwerte haben

- die Belastungsgeschwindigkeit:
Ein Anstieg der Belastungsgeschwindigkeit erhöht die Grenzwerte und die Neigung zu Sprödbbruch.
- die Bauteilgrössen:
Im Herstellungsprozess des Halbzeugs ergeben grössere Dimensionen kleinere Grenzwerte. Die Grössenabhängigkeit der Werkstoffgrenzwerte, basierend auf den Werten eines Bezugsquerschnittes d_B , wird durch den Faktor K_1 berücksichtigt.
- Die Wärmebehandlung:
Die Wärmebehandlung selber und die Bauteilgrösse bei der Wärmebehandlung beeinflussen die Grenzwerte in starkem Masse.

5. Festigkeitshypothesen und Vergleichsspannung für ruhende Beanspruchung

Wir sind mit dem allgemeinen Problem konfrontiert, ein Bauteil, das einem beliebigen Spannungszustand unterliegt, mit einer einachsigen beanspruchten Probe, deren Festigkeitskennwerte bekannt sind, zu vergleichen.

Das Zurückführen eines mehrachsigen Spannungszustandes auf einen äquivalenten einachsigen Wert, als Vergleichsspannung σ_V bezeichnet, erfolgt mit Hilfe gewisser Funktionen, den sogenannten Festigkeitshypothesen. Diese wurden aufgrund verschiedener Versagensmodelle unterschiedlicher Beanspruchung und für unterschiedliches Werkstoffverhalten hergeleitet. Weil keine Hypothese sich als allgemeingültig für alle in der Praxis auftretenden Fälle erweist, gelten mehrere Festigkeitshypothesen. In welchem Beanspruchungsfall bzw. welchem Werkstoff welche Hypothese eingesetzt wird, soll im Folgenden gezeigt werden.

Beispiel

In der Kurbelwelle in Bild (B009rbeZ) herrscht in Schnitt A-A ein komplizierter, dreiachsiger Spannungszustand T , wobei neben den Zug- und Biegebeanspruchungen, Torsion und Schubspannungen auftreten. Dieser Spannungszustand T gilt es zu bestimmen und in eine skalare Vergleichsspannung σ_V zu überführen, welche mit dem Werkstoffgrenzwert σ_G verglichen wird.

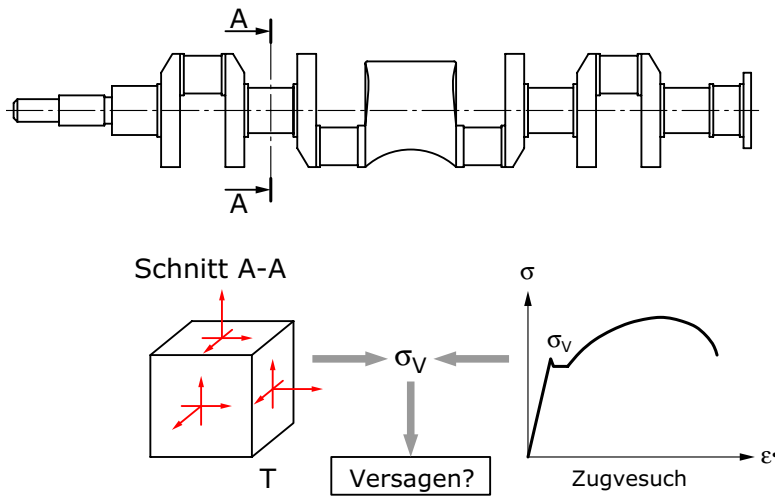


Bild (B009rbeZ) Kurbelwelle

Im Folgenden werden die drei gebräuchlichsten Versagens-Hypothesen dargelegt. Immer wird als Resultat die skalare Grösse Vergleichsspannung σ_V als Funktion des vorliegenden, meist dreidimensionalen Spannungszustandes T erhalten.

5.1. Normalspannungshypothese

Die von Rankine vorgeschlagene Hypothese gilt für sprödes Bauteilverhalten. Sie geht davon aus, dass das Versagen durch Trennbruch in einer Ebene senkrecht zur grössten Normalspannung (nach unserer Konvention $=\sigma_1$) eintritt. Für den allgemeinen dreiachsigen Spannungszustand bedeutet dies:

$$\sigma_V = \sigma_1 \quad (1)$$

Diese Hypothese ist anzuwenden für Belastungen bei spröden Werkstoffen, wie z.B. Grauguss, Keramik oder Glas. Auch bei dreiachsigem Spannungszustand, bei dem alle Hauptspannungen Zugspannungen ähnlicher Grössenordnung sind und sich Deformationen dadurch behindern, kommt die Normalspannungshypothese zur Anwendung.

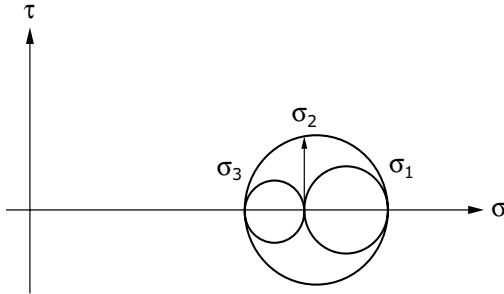


Bild (B024rbeZ) Wenn die Hauptspannungen alle im Zugbereich liegen und ähnlich gross sind, tritt sprödes Materialverhalten auf.

Unter diese Spannungsverhältnisse fallen auch vielfach Kerben.

Im allgemeinen, zweiachsigen Spannungszustand ($\sigma_z=0$) ergibt sich für die Vergleichsspannung aus dem Mohr'schen Spannungskreis Bild (B010rbeZ).

$$\sigma_V = \sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2)$$

oder falls zusätzlich auch $\sigma_y=0$ ist:

$$\sigma_V = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (3)$$

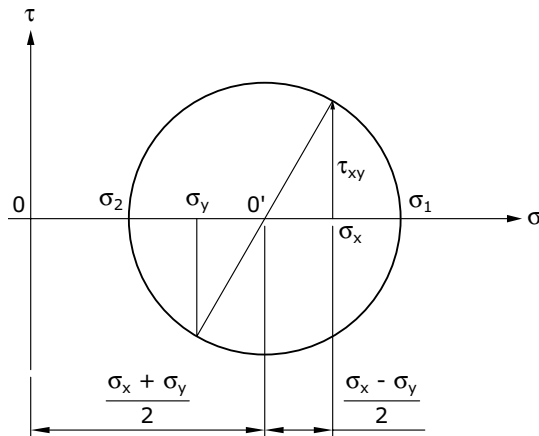


Bild (B010rbeZ) Schubspannungshypothese. Darstellung mit Hilfe des Mohr'schen Spannungskreises für den zweiachsigen Spannungszustand.

5.2. Schubspannungshypothese

Die von Tresca vorgeschlagene Hypothese gilt für zähes Bauteilverhalten. Fließgefahr tritt nach dieser Hypothese ein, wenn die maximale Schubspannung einen Versagensgrenzwert aufweist, oder mit anderen Worten, die Schubspannung τ_{\max} ist für das Versagen massgebend.

$$\sigma_V = 2\tau_{\max} \quad (4)$$

Die Schubspannungshypothese bewährt sich vor allem bei zähem Materialverhalten, wie dies z.B. bei Stählen mit ausgeprägter Streckgrenze vorliegt. Auch sinnvoll ist die Anwendung dieser Hypothese bei spröden Materialien unter allseitiger Druckbelastung.

Bei mehrachsigen Spannungszustand erhält man die maximale Schubspannung aus dem grössten Mohr'schen Spannungskreis Bild (B025rbeZ)

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (5)$$

oder

$$\sigma_V = 2\tau_{\max} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (6)$$

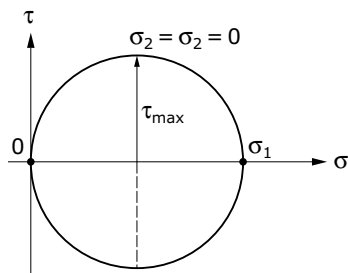


Bild (B026rbeZ) Schubspannungshypothese. Darstellung mit Hilfe des Mohr'schen Spannungskreises. Maximale Schubspannung bei einachsigem Spannungszustand.

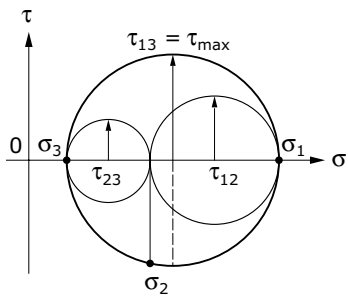


Bild (B025rbeZ) Schubspannungshypothese. Darstellung mit Hilfe des Mohr'schen Spannungskreises. Maximale Schubspannung bei mehrachsigem Spannungszustand.

Für zweiachsige Spannungszustände ergeben sich zwei mögliche Fälle:

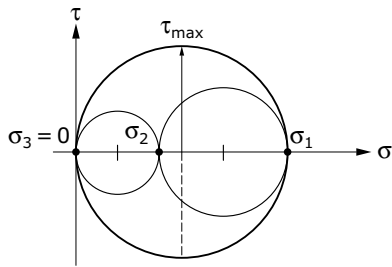


Bild (B027rbeZ) Schubspannungshypothese. Darstellung mit Hilfe des Mohr'schen Spannungskreises. Maximale Schubspannung bei zweiachsigem Spannungszustand mit $\sigma_3 = 0$.

und

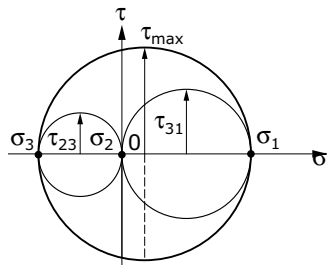


Bild (B028rbeZ) Schubspannungshypothese. Darstellung mit Hilfe des Mohr'schen Spannungskreises. Maximale Schubspannung bei zweiachsigem Spannungszustand mit $\sigma_2 = 0$.

Aus dem Mohr'schen Spannungskreis kann man für den Fall $\sigma_3 = 0$ zeigen, dass

$$\sigma_x + \sigma_y > \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (7)$$

ist, und σ_y wird dann zu

$$\sigma_V = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (8)$$

Im Fall $\sigma_2 = 0$ gilt

$$\sigma_x + \sigma_y < \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (9)$$

und damit ist

$$\sigma_V = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (10)$$

oder falls $\sigma_y = 0$ wird die Gleichung (10) zu:

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (11)$$

5.3. Gestaltänderungsenergiehypothese

Die von Mises, Huber und Hencky formulierte Gestaltänderungsenergiehypothese geht davon aus, dass das Fließen isotroper Körper unabhängig von Koordinatensystemen ist und von der Gleichheit gewisser Energien (skalare Grössen) bestimmt wird.

Nach dieser Hypothese tritt das Fließen erst ein, wenn die für die Gestaltänderung notwendigen Arbeiten beim mehrachsigen und einachsigen Spannungszustand gleich sind.

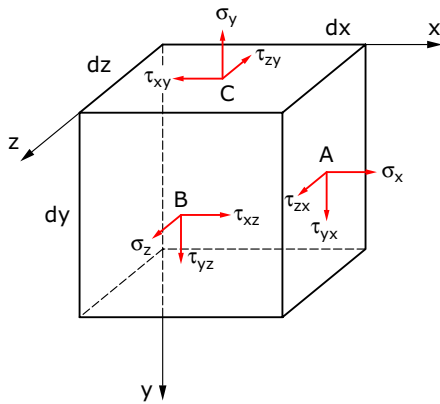


Bild (B013rbeZ) Spannungen und Verformungen in einem infinitesimalen Element. Mehrachsiger Spannungszustand.

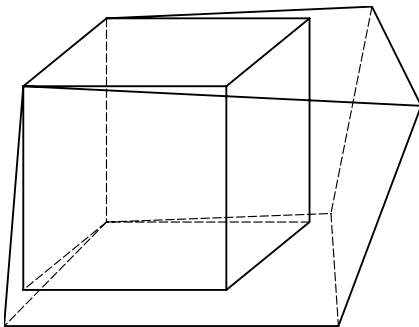


Bild (B014rbeZ) Das infinitesimale Element wird verformt.

Unter Wirkung eines komplexen mehrachsigen Spannungszustands in Bild (B013rbeZ) wird sich das infinitesimale Element wie in Bild (B014rbeZ) verformen.

Die Gestaltänderungshypothese setzt voraus, dass das Fließen dann eintritt, wenn die notwendigen Arbeiten für die Gestaltänderung bei einachsigen und mehrachsigen Spannungszustand den gleichen Wert aufweisen.

Ohne Herleitung der energetischen Betrachtungen soll im Folgenden direkt das Resultat dieser Hypothese angegeben werden.

$$\sigma_V = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (12)$$

und für den allgemeinen dreiachsigen Spannungszustand in x-, y-, z-Komponenten:

$$\sigma_V = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (13)$$

Entsprechend für den allgemeinen zweiachsigen Spannungszustand:

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (14)$$

bzw. für zusätzliche $\sigma_y=0$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (15)$$

Die Gestaltänderungsenergiehypothese und die Schubspannungshypothese werden für zähes Materialverhalten angewandt. Die Gestaltänderungsenergiehypothese gibt im Allgemeinen kleinere Vergleichsspannungen als die Schubspannungshypothese (maximale Abweichung 15% bei $\sigma_2/\sigma_1=0.5$ oder $\sigma_2/\sigma_1=-1$) und bessere Übereinstimmung mit den Ergebnissen der experimentellen Forschung bei schwingender Beanspruchung. Infolge des kleineren σ_V -Wertes ergeben sich mit der Gestaltänderungshypothese schlankere Konstruktionen bzw. die Schubspannungshypothese liefert grössere Dimensionen und ist somit konservativer.

6. Zulässige Vergleichsspannung bei ruhender Belastung

Wir haben gesehen, dass die Kräfte und Momente, unter Umständen überhöht mit dem Betriebsfaktor c_B , auf den betrachteten kritischen Querschnitt reduziert werden. Für diesen Querschnitt werden die Spannungskomponenten des Spannungsvektors T berechnet.

Mit Hilfe des Mohr'schen Spannungskreises können daraus die Hauptspannungen $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ für T bestimmt werden.

Aus diesen Hauptspannungen bzw. bei einfacheren Fällen direkt aus den x -, y -, z -Komponenten von T kann die skalare Vergleichsspannung σ_V hergeleitet werden. Die Herleitung erfolgt durch Wahl der geeigneten Versagenshypothesen, welche vom Belastungsfall und Werkstoff abhängig ist.

Der resultierende Vergleichswert σ_V muss nun mit dem Grenzwert des Werkstoffes verglichen werden, um zu entscheiden, inwiefern das Bauteil der Beanspruchung gewachsen ist. Dies nennt man Festigkeitsnachweis.

Dieser erfasst die real auftretende Gefährdung des Maschinenteils jedoch nicht exakt. Einige Gründe dafür sind:

- Form nur approximativ erfasst:
Vereinfachungen der geometrischen Form der Bauteile für die Berechnungen.
- Ungenauigkeit bei der Herstellung nicht berücksichtigt.
- Ungenauigkeit der Berechnungsmodelle:
Ein Modell setzt eine vereinfachte Erfassung der Wirklichkeit (z.B. Belastungsfall, Festigkeitshypothese) voraus.
- Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Grenzfestigkeitswerte des Materials.
- Streuung der Festigkeitseigenschaften für verschiedene Lieferungen nicht berücksichtigt.
- Fehlstellen im Material, die durch die Qualitätskontrolle nicht lokalisiert werden können.
- Eigenspannungen, die nicht genau berechnet werden können.

Wegen Unsicherheiten werden in der Praxis Sicherheitszahlen bei den Vergleichen der auftretenden Spannungen mit den zulässigen Spannungen verwendet:

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma_G}{S_j} \quad (16)$$

wobei σ_G die Grenzbelastung darstellt und S_j die Sicherheitszahl gegen Versagen durch Fließen oder Bruch.

Die Grenzbelastung σ_G ist gleichzusetzen mit:

$$\sigma_G = \sigma_F \text{ bzw. bei nicht ausgeprägter Fließgrenze: } \sigma_G = \sigma_{0.2} \quad (17)$$

bei Versagen durch Fließen, also für zähes Bauteilverhalten und

$$\sigma_G = \sigma_B \quad (18)$$

bei Versagen durch Bruch, also für sprödes Bauteilverhalten.

Bemerkung: Wir schreiben bewusst sprödes Bauteilverhalten und nicht sprödes Material, denn auch zähes Material verhält sich z.B. bei allseitigen Zugspannungen, welche in ähnlicher Grössenordnung liegen, spröde.

Die Sicherheitszahlen sind von den vorhandenen Unsicherheiten bei der gesamten Berechnung abhängig. In bestimmten Fällen existieren gesetzliche Vorschriften über die einzuhaltenden Sicherheitszahlen (z.B. bei Seilbahnen, Schiffsbau, Druckgefässen). Für einzelne genormte Bauteile sind entsprechende Werte empfohlen (z.B. Schrauben $S_F = 1.2$). Die Festlegung der Sicherheitswerte wird, falls nichts anderes vorgegeben, durch den Entwicklungsingenieur bzw. Konstrukteur festgelegt. Einerseits basiert seine Überlegung auf der Unsicherheit der Berechnung, andererseits aber auch in der Abschätzung der Folge eines Versagens. Für die allgemeinen Berechnungen werden häufig die folgenden Richtwerte verwendet.

Art des Versagens:

- Versagen durch Fließen: $S_F = 1.2\text{--}2.0$, vielfach 1.5
- Versagen durch Bruch: $S_B = 2\text{--}4$, vielfach 2.0

Zusammengefasst muss demnach die errechnete Vergleichsspannung kleiner sein als die zulässige Spannung σ_{zul} und diese ist bei Anwendung der Gestaltänderungs- oder Schubspannungshypothese

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_F}{S_F} \quad (19)$$

bei Anwendung der Normalspannungshypothese entsprechend

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma_{\text{B}}}{S_{\text{B}}} \quad (20)$$

Formal gilt demnach für die Schubspannungs- und Gestaltänderungshypothese

$$\sigma_{\text{V}} \leq \sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma_{\text{F}}}{S_{\text{F}}} \quad (21)$$

und für die Normalspannungshypothese

$$\sigma_{\text{V}} \leq \sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma_{\text{B}}}{S_{\text{B}}} \quad (22)$$

7. Bauteilbeanspruchung oberhalb der Grenzbeanspruchung

Zähes Bauteilverhalten beinhaltet „Belastungs-Reserven“, die vielfach bewusst ausgenutzt werden.

- Plastische Reserve zwischen Fließbeginn und Versagen durch Bruch und
- Beanspruchungsbedingte Reserve.

7.1. Plastische Reserve

Bauteile mit zähem Verhalten werden auf Versagen durch Fließen dimensioniert (Schubspannungshypothese oder Gestaltänderungshypothese). Zwischen diesem Fließbeginn und dem Versagen durch Trennbruch der Bauteile liegt jedoch vielfach eine grosse Belastungsreserve.

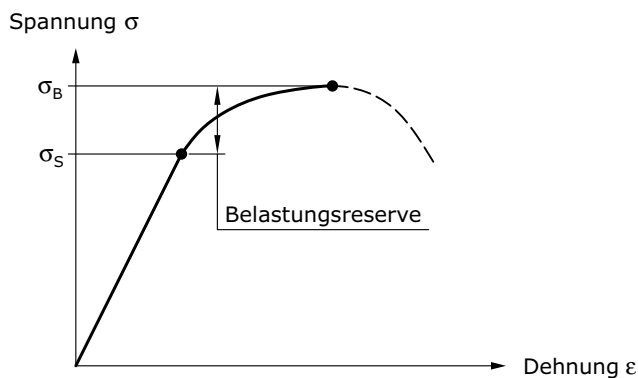


Bild (B015rbeZ) Plastische Reserve

Diese Belastungsreserve wird teilweise gezielt ausgenutzt. Bedingungen sind:

- Es handelt sich um zähes Materialverhalten mit vorhandener plastischer Reserve,
- Die Berechnungsgrundlagen sind gut,
- Die verbleibende plastische Deformation beeinflusst die Funktionalität nicht,
- Keine gesetzlichen Vorgaben und
- Die Folgen eines Versagens sind abschätz- und verantwortbar.

7.2. Beanspruchungsbedingte Reserve

Eine Versagensgrenze kann zwar lokal innerhalb eines Querschnittes erreicht werden, für den gesamten kritischen Querschnitt jedoch ohne Bedeutung sein. Der Rest des Querschnittes kann weiterhin weit unterhalb der Belastungsgrenze liegen und das globale plastische Versagen verhindern.

Beispiel

Ein typisches Beispiel für solche Belastungsreserven ist der Biegestab.

Die Spannungsverteilung innerhalb eines Biegestabs ist linear. Das Maximum wird in der äussersten Faser erreicht.

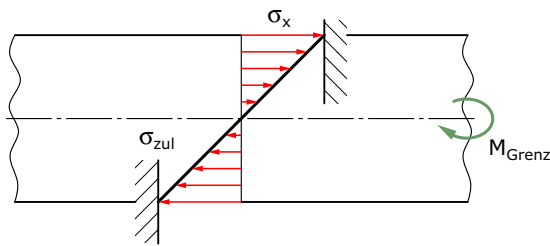


Bild (B016rbeZ) Biegestab mit $\sigma_v = |\sigma_x| \leq \sigma_{zul}$

Im Bild erreicht bei M_{Grenz} die äusserste Faser im Zug- und Druckbereich σ_{zul} , die Fließgrenze. Alle anderen Orte im Querschnitt sind jedoch $\sigma_v < \sigma_{zul}$.

Eine Erhöhung des Biegemomentes $M > M_{Grenz}$ bewirkt bei zähem Materialverhalten plastisches Fließen in den äussersten Zonen.

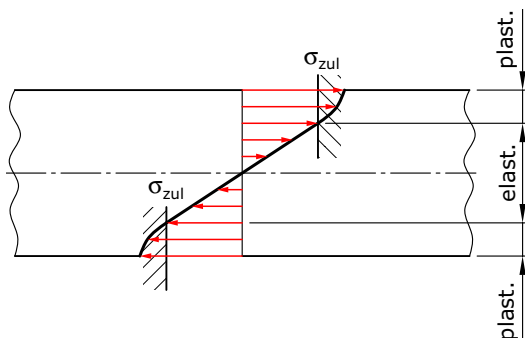


Bild (B017rbeZ) Plastisches Fließen im Biegestab

Diese Zonen werden jedoch weiterhin gestützt. Diese plastische Reserve infolge der linearen Spannungsverteilung kann mit dem Verhältnis σ_B/σ_F abgeschätzt werden.

Vielfach wird anstelle dieser Abschätzung die Fließgrenze für Biegebeanspruchung um 15% erhöht:

$$\sigma_{R\text{bieg}} = 1.15 \cdot \sigma_{F\text{zug}} \quad (23)$$

Dieselben Verhältnisse liegen auch bei:

- torsionsbeanspruchten Bauteilen,
- druckbelasteten, dickwändigen, rotationssymmetrischen Bauteilen und
- Kerben vor.

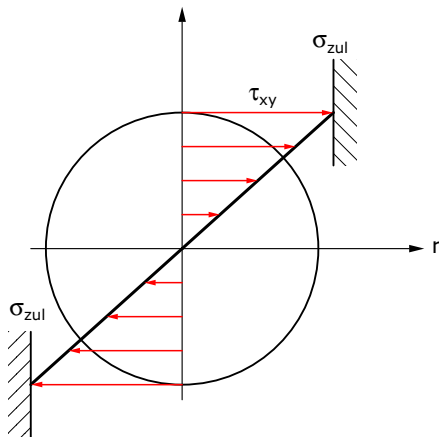


Bild (B018rbeZ) Spannungen im torsionsbeanspruchten Bauteil

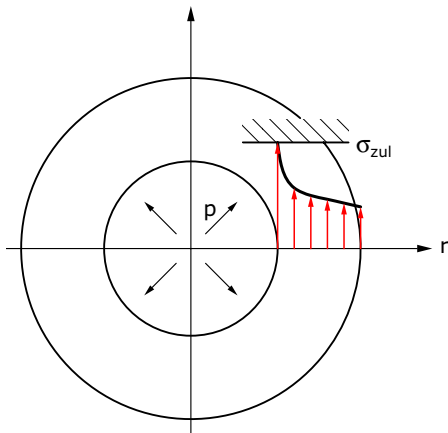


Bild (B019rbeZ) Spannungen im druckbelasteten Bauteil

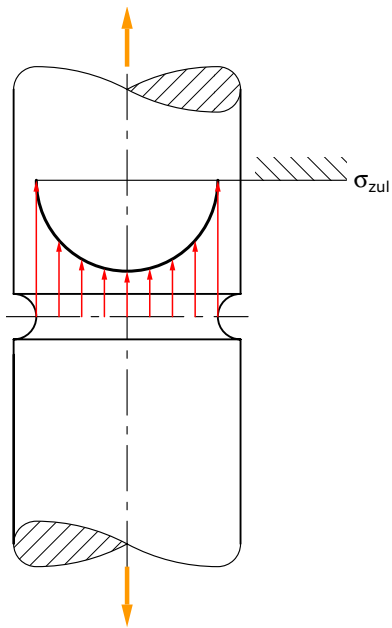


Bild (B020rbeZ) Spannungen am gekerbten Bauteil

Häufig werden die Belastungen solcher Bauteile nicht durch die Beanspruchungsgrenze, sondern durch die maximale Deformation begrenzt.

8. Zusammenfassung

Ausgehend von der Belastung des Lastfalls wird die Beanspruchung im kritischen Querschnitt berechnet. Für jeden Ort im Querschnitt ergibt sich im allgemeinen Fall eine unterschiedliche Beanspruchung, die mit dem Spannungstensor $T(x,y,z)$ charakterisiert werden kann. Der Spannungstensor T kann übergeführt werden in einen skalaren Vergleichswert σ_V , der die Höhe der Beanspruchung charakterisiert.

Abhängig vom Material und von der Beanspruchungsart existieren verschiedene Ansätze für die Berechnung der Vergleichsspannung σ_V . Für zähes Bauteilverhalten (zähes Material, jedoch nicht unter dreiachsiger Zugbeanspruchung oder sprödes Material unter hydrostatischem Druck) gilt die Schubspannungshypothese (konservativer)

$$\sigma_V = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (24)$$

oder es gilt die Gestaltänderungshypothese (progressiver)

$$\sigma_V = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (25)$$

Für sprödes Bauteilverhalten (sprödes Material oder zähes Material unter dreiachsiger Zugbeanspruchung) gilt die Normalspannungshypothese

$$\sigma_V = \sigma_1 \quad (26)$$

In jedem Fall sollte

$$\sigma_V \leq \sigma_{zul} \quad (27)$$

sein, wobei σ_{zul} mit den Materialwerten σ_G aus dem Zugversuch des gesamten Probekörpers und einem festzulegenden Sicherheitswert S zu bestimmen sind. σ_{zul} beträgt für sprödes Bauteilverhalten

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_B}{S_B} \quad (28)$$

und für zähes Bauteilverhalten

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_F}{S_F} \quad (29)$$

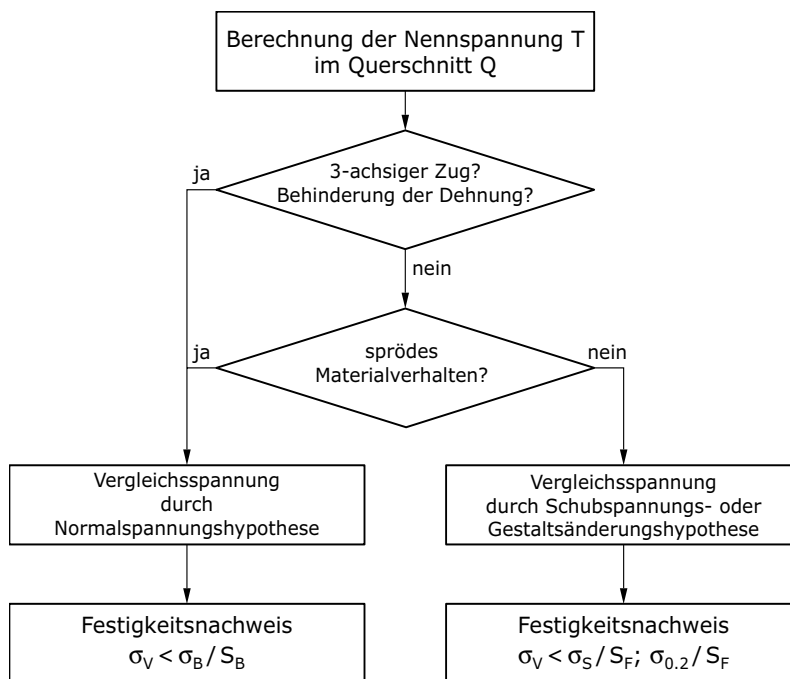


Bild (B021rbeZ) Flussdiagramm – Vergleichsspannungsberechnung (siehe auch Sektion Kerbwirkung)

Höhere Belastungen können zugelassen werden durch bewusstes Ausnutzen der

- plastischen Reserve und
- der Reserve infolge Spannungsverteilung.

Eine hilfreiche Zusammenstellung der Berechnungsanweisungen für die Vergleichsspannung σ_v ist in der Tabelle „[Vergleichsspannungen für verschiedene Spannungszustände](#)“ gegeben.

Verständnisfrage 1

Ordnen Sie die Fließgrenze σ_F , die Proportionalitätsgrenze σ_B , den $\sigma_{0.2}$ -Wert und die Bruchgrenze σ_B nach ihrer Grösse ein.

Verständnisfrage 2

Wie verändert sich das Verhältnis σ_B/σ_F bei tieferer Temperatur?

Verständnisfrage 3

Sie finden in Werkstoff-Unterlagen die Streckgrenze für ein Stangenmaterial mit dem Bezugsdurchmesser $d_B = 16\text{mm}$. Ihr Bauteil hat den Halbzeugdiameter von 30mm . Müssen Sie nun mit höheren oder tieferen Festigkeitswerten rechnen?

Verständnisfrage 4

Die Kupplung eines Antriebes ist bei jedem Anlauf maximal beansprucht und dann konstant beansprucht. Die Maschine wird täglich einmal in Betrieb genommen und arbeitet 250 Tage im Jahr. Die Lebensdauer der Maschine soll 20 Jahre betragen.

Nach welchem Belastungstyp berechnen sie die Bauteile der Kupplung?

Verständnisfrage 5

Welche Versagensfälle unterscheiden Sie im ruhenden Belastungsfall?

Verständnisfrage 6

Ihr Bauteil besteht aus GG20 und ist auf Biegung beansprucht. Welches Versagensmodell legen Sie zugrunde?

Verständnisfrage 7

Ein Bauteil besteht aus Vergütungsstahl und besitzt an verschiedenen Stellen die folgenden Hauptspannungstensoren.

$$T_1 \begin{bmatrix} 100 & & \\ & 200 & \\ & & -50 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$T_2 \begin{bmatrix} -300 & & \\ & 0 & \\ & & 200 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$T_3 \begin{bmatrix} 100 & & \\ & 200 & \\ & & 500 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Bestimmen Sie die verschiedenen Vergleichsspannungen nach der Schubspannungs- und Gestaltänderungsenergiehypothese. Welche Stelle hat die grösste Vergleichsspannung?

Verständnisfrage 8

Sie bearbeiten eine Dimensionierung eines biegebeanspruchten Bauteiles. Ein Kollege argumentiert, Sie hätten bis heute Sicherheitswerte für ähnliche Bauteile mit < 1 eingesetzt bzw. Sie hätten über die Fließgrenze ausgelegt.

Wie argumentieren Sie?

Antwort 1

In erster Näherung sind $\sigma_P = \sigma_F = \sigma_{0,2}$ gleich gross und σ_B grösser, genauer abgeschätzt ist jedoch: $\sigma_P < \sigma_F < \sigma_{0,2} < \sigma_B$.

Antwort 2

Tiefe Temperaturen erhöhen einerseits die Grenzwerte, reduzieren aber die Zähigkeit des Materials (Ausnahme Al). Der Wert σ_B / σ_F wird demnach kleiner oder mindestens die plastische Verformung ε_{pl} kleiner.

Antwort 3

Mit tieferen Festigkeitswerten, denn die Festigkeitswerte nehmen mit der Grösse ab; der Wert K_1 muss bestimmt werden.

Antwort 4

Anzahl Belastungszyklen: $250 \cdot 20 = 5 \cdot 10^3$ Zyklen.

Diese Anzahl von Belastungszyklen wird noch als ruhende Belastung bezeichnet.

Antwort 5

Versagen durch:

- Fliesen,
- Bruch,
- zu grosse Verformung und
- Instabilität (Knicken, Beulen).

Antwort 6

Gusseisen mit Lamellengraphit verhält sich spröde. Aus diesem Grund ist die Normalspannungshypothese korrekt: $\sigma_V = \sigma_1 = \text{maximale Zugspannung}$.

Antwort 7

	Schubspannungshypothese	Gestaltänderungshypothese
1	250	218
2	500	436
3	400	360

Tabelle (T001rbeZ) Antwort 7

Bemerkung: $\sigma_V = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$

Die grösste Vergleichsspannung hat die Stelle 2; wobei diese sowohl mit der Schubspannungshypothese als auch der Gestaltsänderungsenergiehypothese maximal ist. Die Schubspannungshypothese ergibt rund 10–13% höhere Vergleichswerte.

Antwort 8

Falls:

- es keine rechtlichen Grundlagen gibt,
- zähes Materialverhalten vorliegt,
- die Berechnungsannahmen als realitätsnah betrachtet werden können und
- ein Versagen des Bauteiles nicht zu Schaden führt,

kann ein $S < 1$ durchaus korrekt sein, denn Sie nutzen in der Biegespannungsverteilung des Bauteiles dann die plastische Reserve aus.

Relevante Cases

- [Spannungstensor](#)

Related Documents

- [Vergleichsspannungen für verschiedene Spannungszustände](#)

Publikationsverzeichnis – Literatur

- [1] DIN 53288 (1981): Zugversuch; Beuth Verlag, Berlin
- [2] Issler, Lothar; Ruoss, Hans und Häfele, Peter (2004): Festigkeitslehre – Grundlagen; 2. korrigierter Nachdruck, Springer-Verlag
- [3] Sayir, Mahir Behar (1996): Mechanik 2. Deformierbare Körper
- [4] Steinhilper, Waldemar und Röper, Rudolf (2000): Maschinen- und Konstruktionselemente Band 1: Grundlagen der Berechnung und Gestaltung; 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg

Kerbwirkung

Autor: Prof. Dr. M. Meier

1. Überblick

Motivation

Ein Baumwerk mit dem Hauptstamm und den verzweigenden Ästen erträgt enorm hohe Windbelastungen, ohne an den Verzweigungen (Orte der grössten Biegebeanspruchung) zu brechen. Falls Sie diese Verzweigstellen leicht ankerben würden, könnte dieser Baum dem nächsten Sturm mit Sicherheit nicht standhalten, obschon durch die Kerbe keine merkliche Querschnittsreduktion auftritt. Wieso?



Bild (B000kerZ)

Antworten/Diskussion

Die elementare Spannungsberechnung an der Verzweigstelle würde vereinfacht heissen:

$$\sigma_v = \sigma_x = \frac{M_B}{W_B} \quad (1)$$

$$W_B = \frac{d^3 \pi}{16} \quad (2)$$

Wenn Sie einen Ast mit Durchmesser 100 mm mit 5 mm ankerben, erhöht sich die Spannung um ungefähr

$$\left(\frac{100}{95}\right)^3 \cdot 100\% \sim 16\% \quad (3)$$

Damit wäre ein Bruch nicht zu erklären.

Der Grund liegt darin verborgen, dass an dieser Kerbe eine Spannungserhöhung von Faktor 4–5 auftritt und sich Holz spröd verhält.

Lernziele

Die Studierenden sollen erkennen, dass die Ergebnisse der elementaren Spannungsberechnungen, wie sie in den Grundlagen der Festigkeitsrechnung gelernt werden, nur ein ideales Bild zeigen. Es soll gezeigt werden, wie die geometrischen Störungen in realen Bauteilen, wie Absätze oder Einstiche, die Spannungen markant überhöhen. Verschiedene Annäherungen an diese realen Spannungsverteilungen als auch die Einflussparameter sollen vorgestellt werden. Die wichtigsten Formelemente werden behandelt.

Die Studierenden sollen auch lernen, dass durch geschickte Gestaltung der Formelemente und Bauelemente der Einfluss der Kerben markant vermindert werden kann.

Einleitung

In der elementaren Spannungsberechnung wird davon ausgegangen, dass der Kraftfluss in einem Bauteil ungestört „fließt“. Die Zugbelastung ergibt so eine über dem Querschnitt konstante Spannungsverteilung, Biegung und Torsion eine lineare Funktion, etc. Äussere Kerben wie Absätze, Einstiche, Bohrungen, aber auch innere Störungen, wie z. B. Einschlüsse, wirken jedoch auf den Kraftfluss, „stören“ ihn und es resultieren überhöhte Spannungen, die von der idealen Spannungsfunktion abweichen.

Diese Kerbwirkungen können Spannungswerte ergeben, die um Faktoren höhere Beträge aufweisen, als die elementare Verteilung. Für verschiedenste, in der Praxis häufig eingesetzte Gestaltungselemente sind diese Kerbeinflüsse untersucht worden und über funktionelle Näherungen publiziert. Es existieren ebenso viele Empfehlungen und Richtlinien, wie der negative Einfluss der Kerbwirkung vermindert werden kann.

2. Kraftfluss

Bei der Gestaltung eines Maschinenteils wird neben dem Festigkeitsnachweis auch eine möglichst gleichmässige Werkstoffausnutzung in allen Bereichen angestrebt. Lokale Spannungsüberhöhungen bzw. benachbarte Zonen mit unterdurchschnittlicher Beanspruchung sollen durch optimierte Gestaltung vermieden werden. Die Begründung ist klar: Wir wollen die Materialien in allen Querschnitten und Zonen gleichmässig hoch ausnutzen.

Der Begriff „Kraftfluss“ hilft, eine Reihe von qualitativen Aussagen zu machen, die unterschiedlich belasteten Bereiche zu zeigen und für die Verbesserung der Gestalt nützlich. Der Kraftfluss stellt den Weg einer Kraft (eines Momentes) in einem Bauteildar. Vom Angriffspunkt (Einleitungsstelle) bis zur Stelle, an der diese durch eine Reaktionskraft (Angriffsmoment), wie z. B. durch Lagerkräfte, im Gleichgewichtszustand aufgenommen wird. In verschiedenen Publikationen wird versucht, den Kraftfluss durch Kraftflusslinien zu visualisieren.

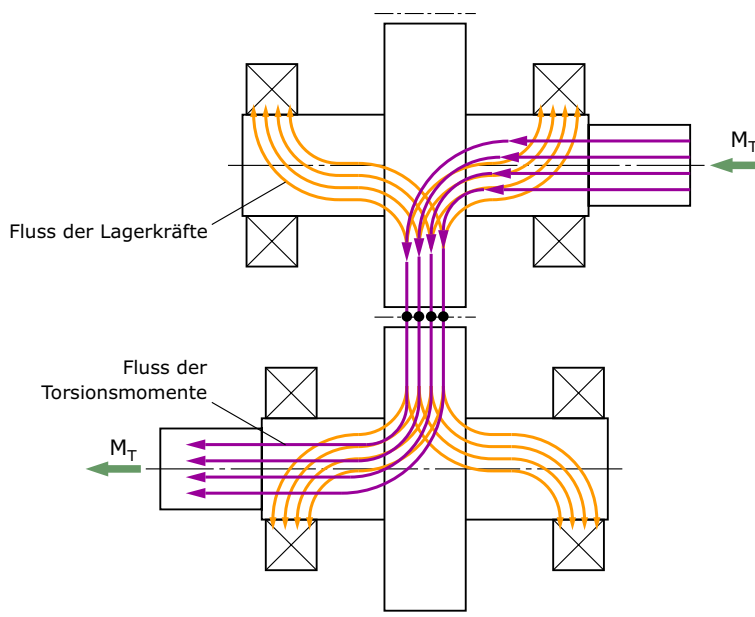


Bild (B021kerZ) Kraftfluss des Momentes und der Lagerkräfte

3. Kerben, Kerbwirkung und Formzahl

Der Kraftfluss ist selten homogen geradlinig, sondern wird innerhalb der Bauteile verschiedentlich umgeleitet, verengt und wieder erweitert. In den Bereichen, wo der Kraftfluss eine solche Flussveränderung erfährt, sind vielfach Kerben die Ursache. In der ingenieurmässigen Praxis begegnen uns eine Vielzahl von unterschiedlichen Kerben und Kerbformen, die meisten davon sind konstruktions- oder funktionsbedingt sind, wie z. B.:

- Stellen mit plötzlichen Querschnittänderungen wie Bohrungen, Nuten oder Absätze
- Stellen mit plötzlichen Kraftumlenkungen wie Ecken, Ringverstärkungen, Überlappungen oder Schweissnähte
- Stellen mit plötzlichen Steifigkeitsänderungen wie Löt- oder Klebefugen.

Es existieren auch ungewollte Kerben, wie z. B. durch Verunreinigung (Poren, Einschlüsse, Risse oder Korrosion) oder durch Verschleiss, die erst während dem Betrieb auftreten und beachtet werden müssen.

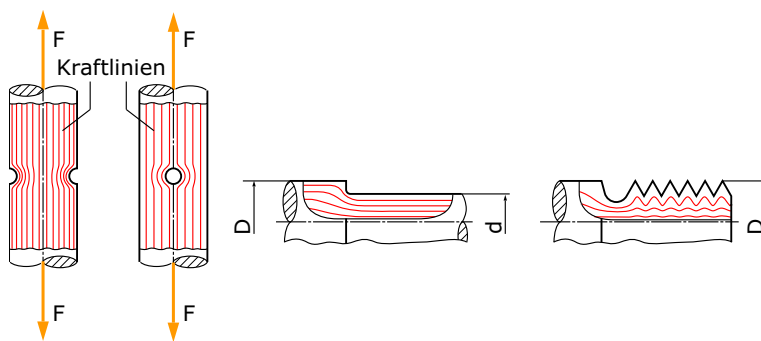


Bild (B031kerZ) Verschiedene Arten von konstruktions- oder funktionsbedingten Störungen des Kraftflusses (Kerben). Die Kraftflusslinien sind eingezeichnet. a) Zugstab mit Aussenkerbe; b) Zugstab mit Bohrung; c) Welle mit Schulter; d) auf Zug beanspruchter Gewindebolzen

Verdichtungen der Kraftlinien sind aus Sicht der Festigkeitsrechnung gleichbedeutend mit Spannungserhöhungen. In einem Kerbbereich resultiert ein nicht konstanter Spannungsverlauf und eine lokale Überhöhung der Spannung mit der Spannungsspitze $\sigma_{\max K}$ im Kerbgrund.

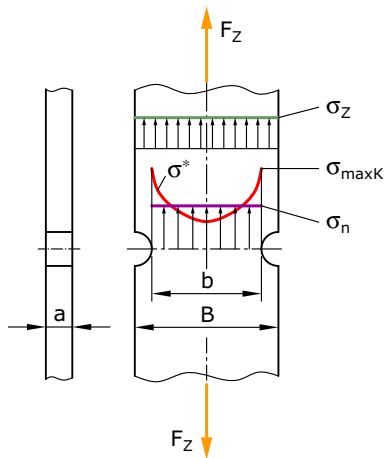


Bild (B032kerZ) Spannungserhöhung mit Kerbe

Genügend weit weg von der Kerbe gilt:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{A} = \frac{F_z}{a \cdot B} \quad (4)$$

Die Nennspannung im Kerbgrund ist:

$$\sigma_n = \frac{F_z}{A_N} = \frac{F_z}{a \cdot b} \quad (5)$$

Der Funktionsverlauf von σ^* und somit der Wert von $\sigma_{\max K}$ hängt ab von der

- Geometrieform des Bauteiles
- Belastungsart (Zug, Druck, Biegung, Torsion)

Wenn der tatsächliche Spannungsverlauf σ^* ist, so gilt aus Gleichgewichtsbedingungen:

$$F = \int_A \sigma \cdot dA = \sigma_n \cdot A \quad (6)$$

Neben Punkten im Querschnitt mit $\sigma^* > \sigma_n$ existieren auch unterdurchschnittlich belastete Bereiche, mit $\sigma^* < \sigma_n$.

Als Formzahl α bezeichnet man allgemein das Verhältnis der Spannungsspitze im Kerbgrund σ_{\max} und der Nennspannung in der Kerbe

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max K}}{\sigma_n}; \sigma_{\max K} \geq \sigma_n \quad (7)$$

Und wir unterscheiden Formzahlen für Normalspannungen und für Torsionsspannungen:

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max K}}{\sigma_n} \quad (8)$$

$$\alpha_\tau = \frac{\tau_{\max K}}{\tau_n} \quad (9)$$

σ_n und τ_n werden mit der elementaren Spannungsberechnung der entsprechenden Belastung und der Geometrie im Kerbgrund bestimmt. Die Formzahl gilt für den elastischen Bereich der Beanspruchung. Den Einfluss der Kerbgeometrie auf die Formzahl α wird in Formzahldiagrammen oder in Formzahlfunktionen abgebildet.

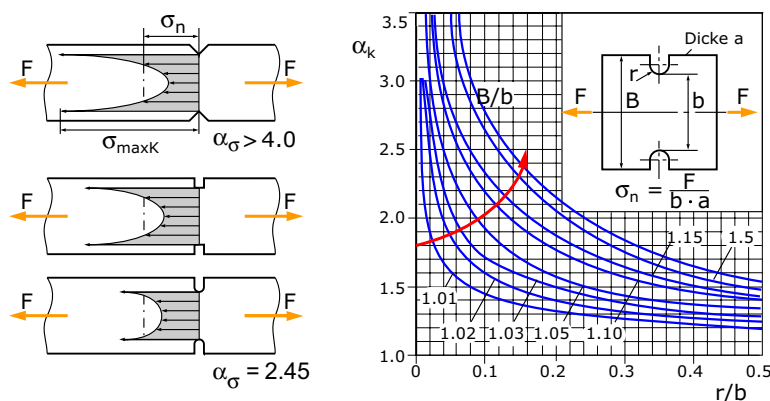


Bild (B033kerZ) Der Einfluss der Kerbgeometrie auf α_k am Beispiel einer Flachprobe mit Aussenkerbe und Zugbelastung

Die Kurven gehen in diesem Beispiel einer Flachprobe asymptotisch gegen 1 und zu maximalen Kerbfaktoren 4 und mehr bei starker Kerbwirkung.

Im Allgemeinen gilt, dass $\alpha_{\sigma(\text{Zug})} < \alpha_{\sigma(\text{Biegung})} < \alpha_{\tau(\text{Torsion})}$ und $\alpha > 1$.

Zug	Biegung	Torsion
Nennspannungs- und wirkliche Spannungsverteilung		
Nennspannung		
$\sigma_n = \frac{F}{A}$	$\sigma_n = \frac{M_B}{W_B}$	$\tau_n = \frac{M_T}{W_p}$
Formzahl		
$\alpha_{\sigma(\text{Zug})} = \frac{\sigma_{\text{maxK}}}{\sigma_n}$	$\alpha_{kb} = \frac{\sigma_{\text{maxK}}}{\sigma_n}$	$\alpha_{\tau(\text{Torsion})} = \frac{\tau_{\text{maxK}}}{\tau_n}$

Tabelle (T001kerZ) Spannungsverteilung an einem Rundstab mit identischer umlaufender Ringkerbe und unterschiedlicher Belastungsart. Wobei:

A: durch Kerbe geschwächter Nettoquerschnitt

W_B : Widerstandsmoment im Nettoquerschnitt

W_p : Polares Widerstandsmoment im Nettoquerschnitt

Es gibt jedoch auch seltene Fälle, bei denen $\alpha < 1$. Beispielsweise ergeben sich bei reiner Biegebelastung einer Flachprobe mit Loch Spannungsspitzen im inneren Bereich. Unter Berücksichtigung des Gleichgewichtes werden die Randfasern entlastet.

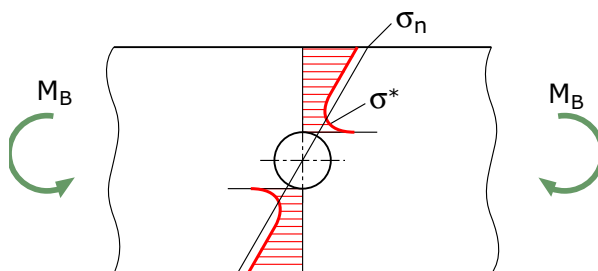


Bild (B035kerZ) Vergleich der Spannungsverläufe bei der Biegebeanspruchung einer Platte mit Loch und ohne Loch – einer der wenigen Fälle, wo ($\alpha \leq 1$).

4. Bestimmung der Formzahl

Wesentliche theoretische Grundlagen zur Berechnung der Spannungsverteilung um Kerben mit kontinuierlichen Lösungen sind durch [Neuber] und [Petersen] für eine grosse Anzahl von Kerben erarbeitet worden. Mit Hilfe der Finite Element Methode lassen sich die Spannungen für praktisch alle beliebigen Kerben numerisch berechnen, vor allem auch beliebig räumliche. Ein einfaches Beispiel zeigt Bild (B041kerZ). Für die korrekte Bestimmung der Spannungsspitze $\sigma_{\max K}$ ist ein feines lokales Netz notwendig.

Um die Rechenzeit zu reduzieren werden bei den Berechnungen in der Praxis vielfach keine lokalen Verfeinerungen des Netzes vorgesehen, sondern die schon bekannten Formzahlen in die Programme eingesetzt.

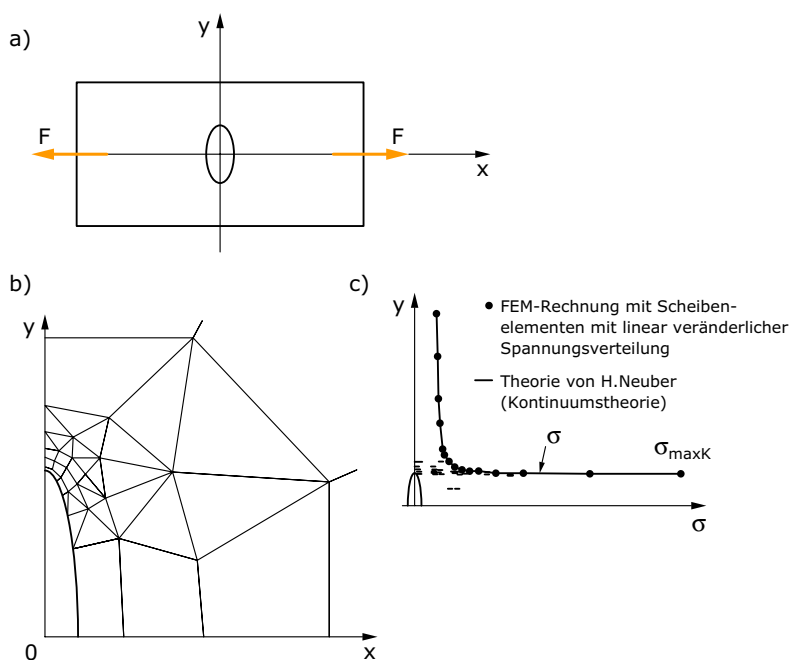


Bild (B041kerZ) Idealisierung und Spannungsverteilung für eine Platte mit elliptischem Loch. Ausschnitt von a) vergrössert. Spannungsverteilung. Vergleich der mit Hilfe der Theorie von Neuber und der mit der Methode der Finite Elemente erzielten Resultate.

Die in der Praxis auftretenden Formzahlen erstrecken sich über einen Bereich von 1.1 bis nahezu 5. Dabei entspricht die Formzahl 1.1 einem fein bearbeiteten, glatten Rohr mit einer geringen Änderung der Wandstärke. Formzahlen von 2 bis 3 sind typisch für gut durchgestal-

tete Konstruktionen. Formzahlen von 4 bis 5 sind typisch für geschraubte oder genietete Verbindungen, für Einkerbungen mit scharfen Übergängen.

Die Formzahl kann auch experimentell mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen, Spannungsoptik an Plexiglasmodellen oder mit Interferometrie ermittelt oder mindestens visualisiert werden.

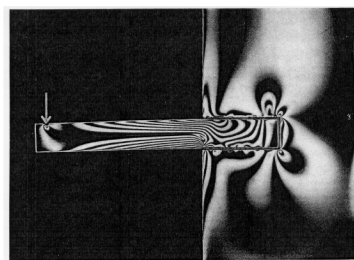
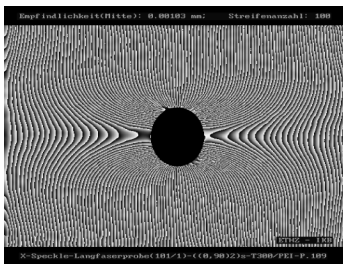


Bild (B042kerZ) Optische Methoden zur Bestimmung der lokalen Spannungserhöhungen: Links mit Hilfe der Speckle-Interferometrie, rechts mittels Plexiglasmodell.

Für viele standardisierte Formelemente (Geometrie-Features) wurden die Formzahlen numerisch berechnet und in Tabellen zusammengefasst.

Als Beispiel wird im Folgenden die Formzahl eines abgesetzten Rundstabes unter Zugbelastung gezeigt:

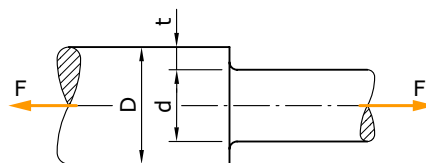
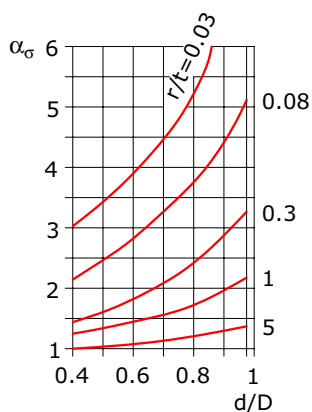


Bild (B043kerZ) Formzahlen für gekerbte Rundstäbe unter Zug

Die so resultierenden Kurvenscharen werden mittels mathematischer Funktionen beschrieben und in allgemeinsten parametrischer Form gilt für Absätze und Rundnut:

4.1. Formzahl für Absatz und Rundnut

$$\alpha_{\sigma, \tau} = 1 + \frac{1}{\sqrt{A \frac{r}{t} + 2B \frac{r}{d} \left(1 + 2 \frac{r}{d}\right)^2 + C \left(\frac{r}{t}\right)^2}} \cdot \frac{d}{D} \quad (10)$$

Geometrie/Belastung	A	B	C	Z
	0.22	1.37	-*	-*
	0.2	2.75	-*	-*
	0.7	10.3	-*	-*
	0.62	3.5	-*	-*
	0.62	5.8	0.2	3
	3.4	19	1	2

Tabelle (T002kerZ) Formzahl für Absatz mit Rundnut

* = nicht bekannt (Null setzen!)

4.2. Formzahl für Absatz mit Freistich

Vielfach werden an Achsen und Wellen „Schulter-Absätze“ und Freistriche gestaltet, um z. B. Wälzlager-Wirkflächen zu realisieren.

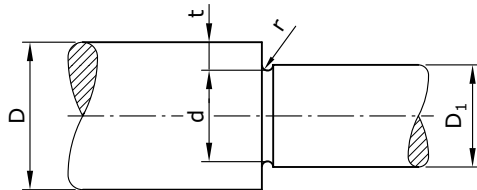


Bild (B045kerZ) Absatz mit Freistich

Die Formzahl dieses Elementes kann durch Kombination eines Absatzes ($\alpha_{\sigma A}$, $\alpha_{\tau A}$) von D auf d und einer Rundnut ($\alpha_{\sigma R}$, $\alpha_{\tau R}$) mit D und t bestimmt werden.

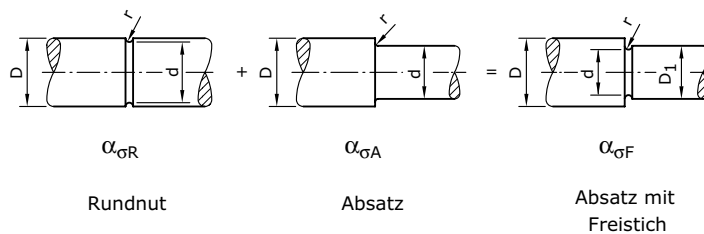


Bild (B046kerZ) Bestimmung von α für Absatz mit Freistich

Die Anweisung zur Kombination der zwei Einzel-Formzahlen ist:

$$\alpha_{\sigma F} = (\alpha_{\sigma R} - \alpha_{\sigma A}) \cdot \sqrt{\frac{D_1 - d}{D - d}} + \alpha_{\sigma A} \quad (11)$$

$$\alpha_{\tau F} = 1.04 \alpha_{\tau A} \quad (12)$$

4.3. Formzahl für Rundstäbe mit Querbohrung

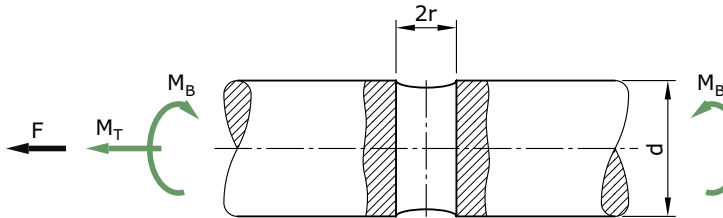


Bild (B047kerZ) Rundstab mit Querbohrung

$$\alpha_{\sigma}(\text{Zug}) = 3 - \left(2 \frac{r}{d}\right) \quad (13)$$

$$\alpha_{\sigma}(\text{Bieg}) = 1.4 \left(\frac{2r}{d}\right) + 3 - 2.8 \sqrt{\frac{2r}{d}} \quad (14)$$

$$\alpha_{\tau} = 2.023 - 1.125 \sqrt{\frac{2r}{d}} \quad (15)$$

Bei der Biegung ist die Formzahl von der relativen Richtung des Momentes und der Bohrung abhängig. Falls die Bohrung in Richtung des Momentenvektors liegt, wird $\alpha_{\text{bieg}} \approx 1$ (kleiner 1!).

5. Spannungsverteilung bei örtlicher Überschreitung der Fließgrenze

Wird bei steigender Belastung im Kerbgrund die Fließgrenze überschritten, kommt es bei verformbaren Materialien zu einer örtlich begrenzten Plastifizierung des Werkstoffes. Damit ändert sich die Spannungsverteilung.

Nach der Entlastung bleibt eine Druckspannung im Kerbgrund zurück, die im entlasteten Zustand durch eine geringe Zugspannung im restlichen Querschnitt kompensiert wird.

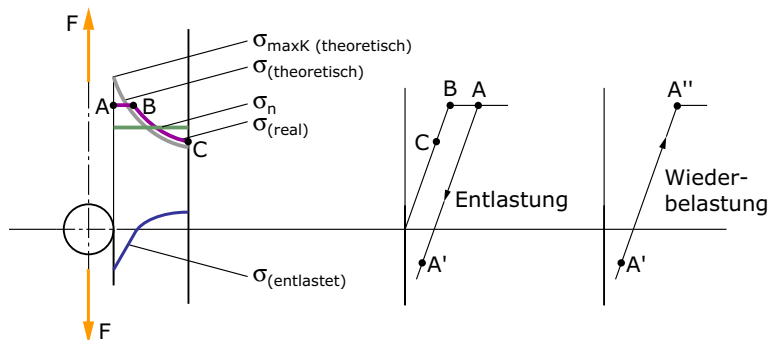


Bild (B051kerZ) Abbau von Spannungsspitzen bei überschreiten der Fließgrenze im Kerbgrund; -theoretischer Spannungsverlauf (Türkis); -tatsächlicher Spannungsverlauf bei lokaler Überschreitung der Fließgrenze (ideal plastisch) des Materials (Lila); -Spannungsverteilung nach der Entlastung (Blau)

Bei erneuter (identischer) Belastung ab diesem spannungsinduzierten Zustand wird die Fließgrenze an keinem Punkt neuerdings überschritten.

6. Kerb-Einfluss-Überlagerung

Maschinenelemente sollten so gestaltet werden, dass sich Kerbeinflussbereiche nicht überlagern. Im untenstehenden Bild überlagern sich die Kerbwirkung der Wellenschulter mit der Kerbwirkung der Passfeder.

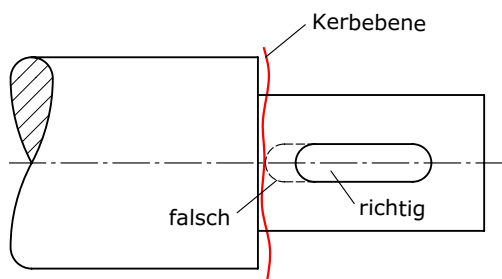


Bild (B061kerZ) Kerbüberlagerung bei Wellenschultern und gleichzeitiger Passfeder

Auch eine Kerbwirkung erzielen unstete Spannungsübergänge. Unstete Spannungssprünge sind z. B. zwischen einem Press- oder Schrumpfsitz und der Umgebung gegeben. Auch in diesen Zonen muss darauf geachtet werden, dass sich nicht weitere Kerbeinflüsse überlagern.

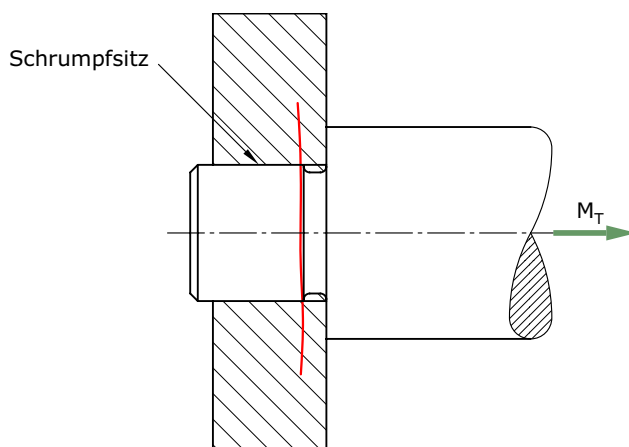


Bild (B062kerZ) Kerbüberlagerung bei Wellenschultern und gleichzeitiger Schrumpfpassung

Die durch Überlagerung resultierende Formzahl α ergibt sich aus der Multiplikation der beiden Kerbwirkungen:

$$\alpha = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \quad (16)$$

7. Einfluss der Kerbwirkung auf die Festigkeitsrechnung

In der Festigkeitsrechnung für ruhende Belastungsfälle wurden die Spannungen mit der elementaren Berechnung bestimmt. In dieser Sektion erkennen wir nun aber, dass Abweichungen um Faktoren von diesen idealen Spannungsverläufen auftreten können. Wir haben aber auch gesehen, dass diese Spannungsspitzen sehr lokal auftreten, ohne ganze Querschnitte zu gefährden. Deshalb gilt:

Für ruhende Belastung und zähes Materialverhalten

Die Spannungsspitzen infolge Kerbwirkung werden nicht berücksichtigt und die Vergleichsspannung erfolgt auf der Basis der idealen (elementar berechneten) Spannungswerte im Kerbgrund (σ_n) mit z. B. der Gestaltänderungs- oder Schubspannungshypothese.

$$\sigma_V = \sqrt{(\sigma_{xZugn} + \sigma_{xbiegn})^2 + 3\tau_{tn}^2} \quad (17)$$

Für ruhende Belastung und sprödes Materialverhalten

Die Spannungsspitzen ergeben eine Rissbildung. Aus diesem Grund muss mit den maximalen Spannungsspitzen im Kerbgrund dimensioniert werden (Normalspannungshypothese).

$$\sigma_V = \left(\frac{\alpha_{\sigma Zug} \sigma_{xZugn} + \alpha_{\sigma biegn} \sigma_{xbiegn}}{2} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{(\alpha_{\sigma Zug} \sigma_{xZugn} + \alpha_{\sigma biegn} \sigma_{xbiegn})^2 + 4\alpha_{\tau} \tau_t^2} \quad (18)$$

Für wechselnde Belastung

Für alle Fälle von Bauteilen, welche wechselnd belastet werden, müssen die Kerbeinflüsse berücksichtigt sein. Die Sektion der Ermüdung widmet sich vertieft dieser Thematik.

8. Gestaltungsrichtlinien zur Minderung der Kerbwirkung

Eine Verminderung der Formzahlen α_K ist bestmöglich anzustreben. Deshalb werden im Folgenden einige konstruktive Richtlinien und Empfehlungen für die Bauteilgestaltung zusammengestellt.

Der Übergangsradius einer Welle (Wellenschulter) muss für eine korrekte Montage von z. B. Wälzlagern kleiner sein als der Rundungsradius der zu montierenden Teile sein (siehe Bild d). Dieser kleine Rundungsradius verursacht hohe α -Werte. Durch die Änderung der Gestaltung der Welle bzw. der Wirkflächen zueinander (Bilder b–d) können die negativen Einflüsse der Kerbwirkung wesentlich vermindert werden.

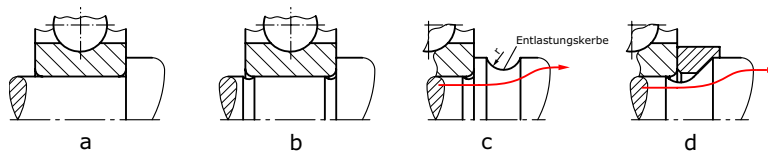


Bild (B081kerZ) Gestaltung des Übergangs von einem kleinen zu einem grösseren Welledurchmesser; a.) Aufgezogenes Wälzlager mit kleinem Rundungsradius (schlechte Lösung); b.) Vergrösserte Ausrundung des Wellenabsatzes durch Einstich; c.) Zusätzliche Entlastungskerbe d.) Vergrösserte Ausrundung und konischer Übergang mit Stützring

Die Wirkung der Gestaltung der Welle gemäss c und d erkennt man mit Überlegungen des Kraftflusses. Die Kraftlinien werden durch die sogenannten „Entlastungskerb“, welche nicht funktionell bedingt sind, sanfter umgelenkt und reduzieren die α -Werte.

Zur Verminderung der Kerbwirkung in einer kraftschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung (Pressring oder Schrumpfsitz) sind einige gestalterische Massnahmen in Bild (B082kerZ) illustriert.

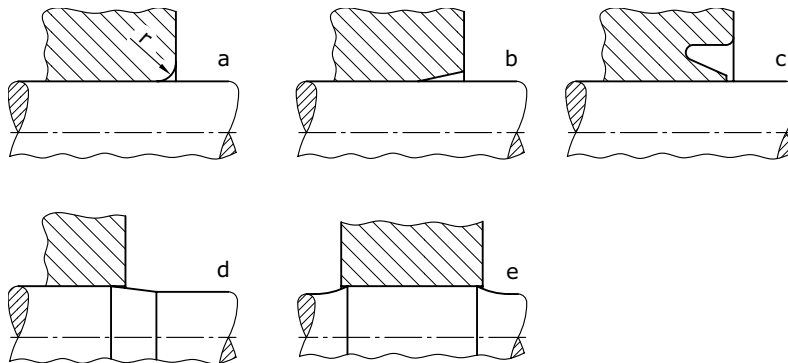


Bild (B082kerZ) Gestaltung der Wirkfläche des Pressverbandes, um die Kerbwirkung zu mildern: a) Abrunden der Nabenkante; b) Allmähliche Erweiterung der Bohrung; c) Konischer Übergang der Welle; d) Entlastungsrille in der Nabe; e) Einspannstelle verdickt

Um die Kerbwirkung im Torsions-Übergang zwischen Welle und Nabe zu mindern, wird vorteilhaft ein gemässigttes Einbringen des Momentes von Welle zu Nabe angestrebt. Dies erfolgt z. B. durch eine elastische Nabengestaltung auf der Seite der Momenteneinleitung.

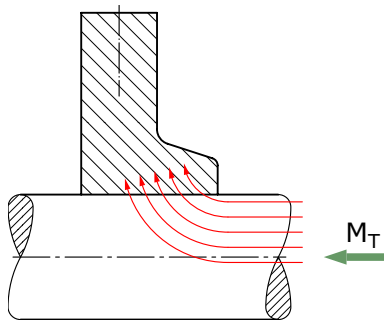


Bild (B083kerZ) Elastischer Übergang von Welle auf

Induzierte Druckspannungen

Oberflächenspannungen im Druckbereich, z. B. durch Oberflächenhärte, Kugelstrahlen und Rollen ergeben bei Belastung tiefere $\sigma_{\max K}$ und reduzieren somit die Kerbwirkung. Der Mechanismus ist im folgenden Bild illustriert:

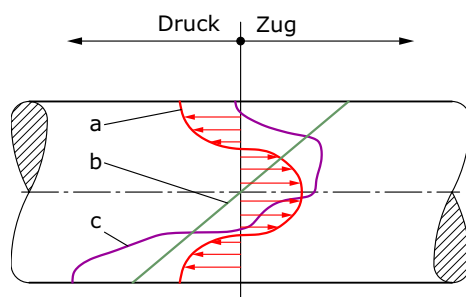


Bild (B084kerZ) Rundstab ohne Kerbe auf reine Biegung belastet a) Druckeigenspannungen am Rand durch z. B. Oberflächenhärten im unbelasteten Zustand (Türkis); b) elementare Biegespannungen durch Biegemoment (Blau); c) Resultierende überlagerte Spannung unter Belastung (Lila)

Der Konstrukteur hat entsprechend die folgenden Ziele nach Prioritäten geordnet vor Augen:

- Konstruktionen gestalten, welche die Kraftflüsse eindeutig und möglichst geradlinig auf kurze Wege lenken
- Verengungen durch Kerben verhindern
- Notwendige Kerben durch spezielle Formgebungen in ihrer Wirkung abschwächen.

Dass auch der dritte Punkt recht eindrücklich α_K -mindernd wirkt, zeigt der folgende Ausschnitt einer Untersuchung. Mattheck untersuchte das Wachstum der Bäume und machte als eine der Schlussfolgerungen daraus die allgemeine Aussage, dass die Natur „Kerben“ durch gezielte Formgebung im Wachstum bestmöglich verhindert. Wie dies durch kleinste Formänderungen erfolgen kann, zeigt die folgende Konstruktion:

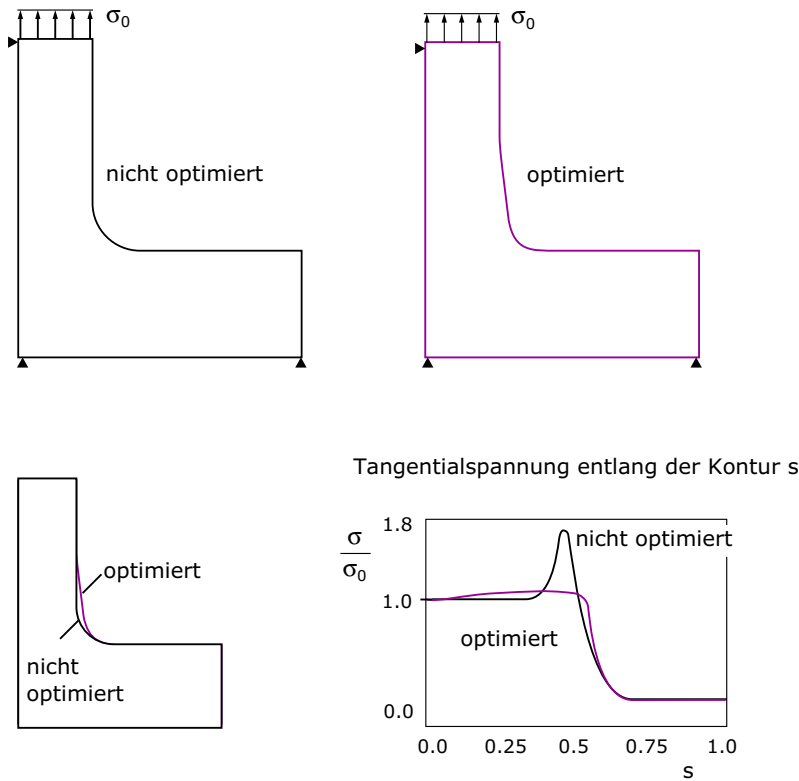


Bild (B085kerZ) Optimierung einer Zuglasche mit der CAO-Methode

Links eine nicht optimierte Ausrundung und die daraus resultierende Spannung auf der Oberfläche des Bauteiles mit der umlaufenden Koordinate s . Eine Spannungserhöhung von knapp $\alpha = 1.8$ ist das Resultat. Durch eine kleine Formkorrektur (siehe oben rechts bzw. unten links) der Kerbe liegt α fast konstant bei 1. Mit solchen Optimierungen, Software dazu ist zur Zeit Gegenstand der Forschung, lassen sich schlankste Konstruktionen erzielen.

9. Zusammenfassung

Herstellungs- oder konstruktionsbedingte Kerben stören den Kraftfluss in einem Bauteil. Die Spannungsverteilung weicht, abhängig vom Mass dieser Störung, markant von der elementar berechneten Nennspannung ab.

Die Abweichung wird mit der Formzahl α quantitativ charakterisiert. Die Formzahlen unterscheiden sich in Bezug auf den Spannungstyp und sind aus Diagrammen ablesbar oder mit parametrisierten Beziehungen berechenbar.

Kerbeeinflüsse können sich gegenseitig überlagern und den Einfluss verstärken. Bei sich plastisch verhaltenden Bauteilen bauen sich Spannungsspitzen örtlich ab und führen nicht zu einer Erhöhung der Vergleichsspannung. Bei sich spröde verhaltenden Bauteilen geht die Spannungserhöhung in die Berechnung der Vergleichsspannung ein. Konstruktionshinweise helfen, Versagen durch Kerbeeinflüsse zu verhindern.

Verständnisfrage 1

In welchen Fällen weicht die Spannungsverteilung von der idealen Funktion ab?

Verständnisfrage 2

Von welchen Faktoren ist die Formzahl abhängig?

Verständnisfrage 3

In welchen Wertbereichen bewegt sich die Formzahl grob?

Verständnisfrage 4

Sie haben eine Wellenschulter gestaltet. Der grössere Durchmesser ist 12 mm, der kleinere Durchmesser 8 mm. Die Welle wird hauptsächlich auf Biegung beansprucht. Berechnen Sie die Formzahl einmal mit einem Radius $r=1$ und einmal mit $r=2$.

Verständnisfrage 5

Sie haben die folgende Gestaltung (B102kerZ) vor sich.
Was würden Sie verbessern?

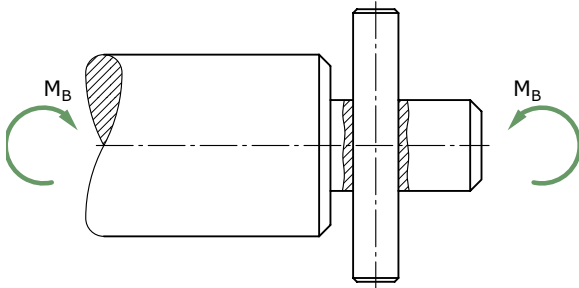


Bild (B102kerZ) Überlagerung von Kerbeinflüssen

Verständnisfrage 6

Wieso wird die Kerbwirkung bei ruhender Belastung und zähem Materialverhalten nicht berücksichtigt, wenn das Material Baustahl an und für sich zäh ist?

Verständnisfrage 7

Ein Bauteil aus Baustahl wird ruhend belastet. Die Spannungsberechnung zeigt, dass alle Hauptspannungen nahe beieinander im Zugbereich liegen. Müssen in diesem Fall die Formzahlen berücksichtigt werden oder nicht?

Antwort 1

- bei Querschnittsverengungen
- bei Kraftflussumlenkungen
- bei Steifigkeitsänderungen
- bei Einschlüssen in Materialien

Antwort 2

- Geometrie des Bauteiles
- Spannungsart

Antwort 3

Die Formzahl bewegt sich grob zwischen 1 und 6.

Antwort 4

Berechnet wird α_σ

$$\begin{aligned} r / t &= 0.5 \text{ bzw. } 1 \\ r / d &= 1/8 \text{ bzw. } 1/4 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\alpha_\sigma = 1.77 \dots 1.55 \Rightarrow 12\% \text{ Senkung} \quad (20)$$

Antwort 5

2 Kerbeinflüsse überlagern sich; jener durch den Absatz und jener der Bohrung. Durch Verschiebung des Absatzes nach links bzw. Stiftes nach rechts verbessern Sie die Situation.

Antwort 6

Die Spannungsspitzen bauen sich lokal plastisch ab und reduzieren die Tragfähigkeit des gesamten Bauteiles nicht.

Antwort 7

Ja unbedingt. Durch die allseitige Zugbeanspruchung liegt sprödes Materialverhalten vor, auch wenn das Material Baustahl an und für sich zäh ist.

Elementare Beanspruchungsfälle 1

Autor: Prof. Dr. Markus Meier

1. Überblick

Motivation

In der früheren Entwurfsphase eines neuen Produktes sind erst Skizzen und Grobentwürfe vorhanden. Die Dimensionen der Bauteile (Durchmesser, Dicke, Profilgeometrie usw.) sind noch unbekannt. Somit sind auch noch keine CAD-Daten vorhanden.

Nun müssen mit einfachen analytischen Überschlagsrechnungen die Dimensionen abgeschätzt werden. an der SKizze eines Rollers müssen der Durchmesser des Lenkrohrs, die Breite und Dicke der Trittfläche, der Durchmesser der Rollenachsen usw. festgelegt werden. Die Grundlagen der elementaren Belastungsfälle helfen einerseits bei der Grobdimensionierung, andererseits bilden sie auch die Grundlage, um in späteren Entwicklungsphasen Resultate komplexer Fälle (mittels Computerprogrammen berechnet) zu interpretieren.

Lernziele

Auf der theoretischen Grundlage der Mechanik aufbauend lernen Sie die elementaren Beanspruchungsfälle der angewandten Festigkeitslehre kennen:

- Zug-, Druck-, Biegungs-, Torsions- und Schubbeanspruchung,
- die Pressung zwischen gewölbten Körpern,
- die Beanspruchung rotationssymmetrischer Körper,
- die unter radialem Druck auftretenden Einzel- und Vergleichsspannungen.

Sie können

- alle diese Fälle erklären und interpretieren und
- einfach konkrete Festigkeitsberechnungen selbständig durchführen.

Einleitung

Viele Konstruktionen lassen sich für eine erste grobe Dimensionierung auf einfache Bauformen, beansprucht durch elementare Beanspruchungsfälle reduzieren.

Einfache Bauformen sind dabei Stäbe, Platten, Profile etc. Und elementare Beanspruchungsfälle sind Zug-, Druck-, Biegung, Torsion oder einfache Kombinationen daraus.

Komplexe Formen, schwierige Beanspruchungsfälle lassen sich nur noch durch numerische Verfahren wie z.B. die Finite-Elemente-Methode berechnen.

2. Zug-, Druck-Beanspruchung

Normalkräfte im Schwerpunkt S konzentriert, erzeugen in der Fläche A_i uniform verteilte Normalspannungen.

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_i} \quad (1)$$

Diese Nennspannung ist nicht von der Form des Querschnittes, sondern nur von dessen Grösse abhängig.

Als Beispiel verursacht beim T-Stab mit der Querschnittfläche A nach Bild B001zugZ die im Schwerpunkt S angreifende Normalkraft F_x eine gleichförmig über dem Querschnitt verteilte Zug- bzw. Druckspannung (negativ).

$$\sigma_x = \frac{F_x}{A} \quad (2)$$

Bild B002zugZ gibt, falls F_x die einzige Belastung ist, die zugehörigen Mohr'schen Spannungskreise an.

- Zug

$$\sigma_1 = \sigma_x \quad (3)$$

- Druck

$$\sigma_3 = \sigma_x \quad (4)$$

σ_x ist eine Hauptspannung. Die maximalen Schubspannungen τ_{\max} treten in einem Winkel von 45° zu σ_x auf.

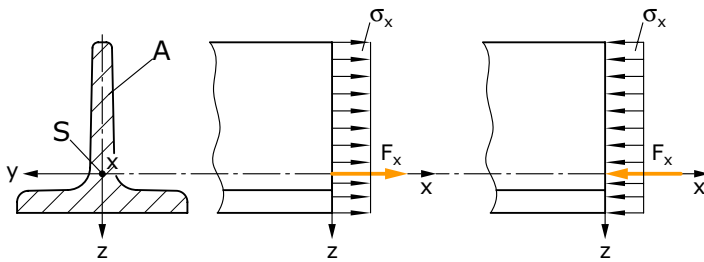


Bild (B001zugZ) Zug- bzw. Druckspannungen im Querschnitt mit der Fläche A eines T-Stabes infolge der Normalkräfte F_x , im Flächenschwerpunkt S angreifend:

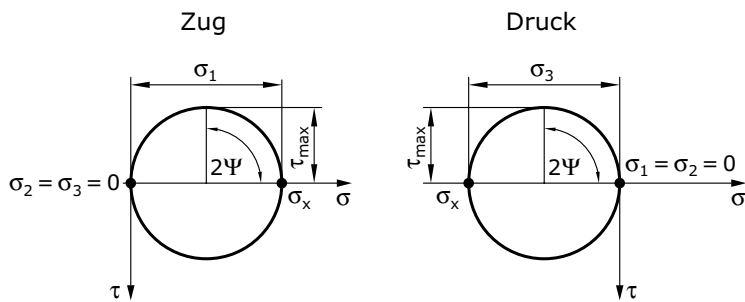


Bild (B002zugZ) Mohr'scher Spannungskreis für Zug- (linkes Bild) bzw. Druckspannungen (rechtes Bild) aus Bild (B001zugZ)

2.1. Anschauungsbeispiele

Am einfachen Beispiel einer Zugprobe können die zwei Versagensfälle Trennbruch für spröde Werkstoffe und Gleitbruch für zähe Werkstoffe gut illustriert werden.

Im Bild B003zugZ versagt das Teil mit sprödem Verhalten infolge der Normalspannung. Es entsteht ein Bruch quer zur Belastung. Im Bild B004zugZ bricht das Teil infolge der Schubspannungsbelastung, wie sie bei zähem Verhalten auftritt. Der Bruch erfolgt mit einer 45°-Neigung gegenüber der Belastung.

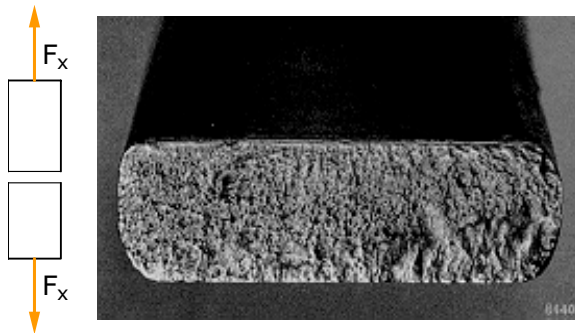


Bild (B003zugZ) Sprödbruch (Normalspannungshypothese)

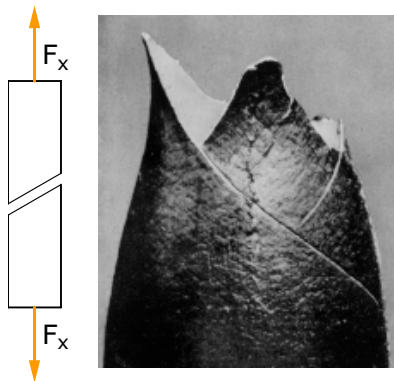


Bild (B004zugZ) Gleitbruch (Schubspannungs- bzw. Gestaltänderungshypothese)

3. Biege-Beanspruchung

Den folgenden Beziehungen zur Balkenbiegung liegen einige Annahmen zugrunde:

1. Querschnitte, die vor der Deformation eben waren, bleiben eben.
2. Die Verschiebungen senkrecht zur Balkenlängsachse sind unabhängig von der Koordinate in Querrichtung. Alle Punkte eines Querschnittes erfahren die gleiche Verschiebung in z-Richtung (Durchbiegung); anders ausgedrückt: die Balkenhöhe ändert sich infolge der Biegeverformung nicht.
3. Die verformten Querschnitte stehen senkrecht auf der Biegelinie.

Experimente zeigen, dass die obigen Annahmen für schlanke Balken mit konstantem oder schwach veränderlichem Querschnitt hinreichend genau sind.

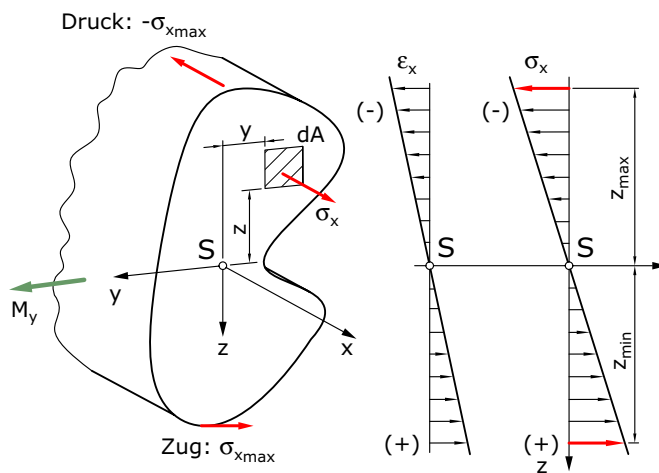


Bild (B001bieZ) Normalspannungsverteilung infolge Biegung um die y-Achse

Unter diesen Voraussetzungen lässt sich zeigen, dass das Moment eine lineare Normalspannungsverteilung im infinitesimalen Element dA

$$\sigma_x = \frac{M_y}{I_y} z \quad (5)$$

mit I_y dem Flächenträgheitsmoment 2. Ordnung erzeugt. Die maximalen Spannungen erhalten wir, wenn wir den maximalen Abstand z_{\max} für z setzen:

$$\sigma_{x_{\max}} = \frac{M_y}{I_y} z_{\max} = \frac{M_y}{W_y} \quad (6)$$

mit W_y dem sogenannten Widerstandsmoment

$$W_y = \frac{I_y}{|z_{\max}|} \quad (7)$$

Die Flächenmomente 2. Ordnung bzw. Trägheitsmomente I erhalten besondere Bedeutung in der Berechnung der Biegung. Für eine beliebige Querschnittfläche A nach Bild B002bieZ gilt für die axialen Flächenmomente:

$$I_y = \int z^2 dA \quad (8)$$

$$I_z = \int y^2 dA \quad (9)$$

für das polare Flächenmoment (das wir später für die Torsion benötigen):

$$I_p = I_y + I_z = \int (z^2 + y^2) dA \quad (10)$$

und für das gemischte Flächenträgheitsmoment (Deviationsmoment):

$$I_{yz} = -\int yz dA \quad (11)$$

Das Zusatzdokument „[Flächenträgheits- und Widerstandsmomente](#)“ enthält für verschiedene symmetrische Querschnittformen, entsprechend den Gleichungen (8) und (9), die Hauptflächenmomente I_x , I_z , I_p sowie die zugehörigen Widerstandsmomente W_y , W_z und W_p .

$$W_y = \frac{I_y}{|z_{\max}|} \quad (12)$$

$$W_z = \frac{I_z}{|y_{\max}|} \quad (13)$$

Sind bei beliebigen Querschnitten die Funktionen:

$$dA = f(y) \text{ und } dA = f(z)$$

mathematisch schwierig erfassbar, so führen Näherungsrechnungen durch Einteilungen der Fläche in Flächenelemente für die Berechnung der Flächenmomente zweiter Ordnung zum Ziel.

Vielfach werden die Trägheitsmomente in gedrehten und/oder verschobenen Koordinatensystemen benötigt.

3.1. Drehung des Koordinatensystems um die x-Achse

Zwischen den um den Winkel φ verdrehten Koordinatensystemen y, z und η, ζ mit Ursprung im Schwerpunkt S besteht der Zusammenhang aus Bild B002bieZ:

$$\eta = y \cos \varphi + z \sin \varphi \quad (14)$$

$$\zeta = -y \sin \varphi + z \cos \varphi \quad (15)$$

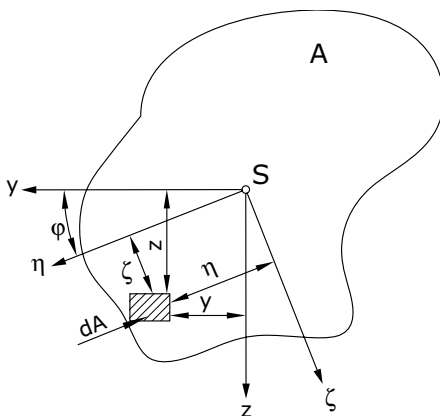


Bild (B002bieZ) Beliebige Querschnittsfläche A mit infinitesimalem Flächenelement dA sowie den um den Winkel φ zueinander verdrehten Koordinatensystemen η, ζ und y, z mit Ursprung im Schwerpunkt S

Die Gleichungen (14), (15) ergeben mit den Gleichungen (8) bis (11):

$$I_{\eta} = \frac{I_y + I_z}{2} + \frac{I_y - I_z}{2} \cos 2\varphi - I_{yz} \sin 2\varphi \quad (16)$$

$$I_{\zeta} = \frac{I_y + I_z}{2} + \frac{I_y - I_z}{2} \cos 2\varphi - I_{yz} \sin 2\varphi \quad (17)$$

$$I_p = I_y + I_z = I_\eta + I_\zeta = \text{konstant} \quad (18)$$

$$I_{\eta\zeta} = -\frac{I_y - I_z}{2} \sin 2\varphi + I_{yz} \cos 2\varphi \quad (19)$$

Nach Gleichung (18) ist das polare Flächenmoment I_p unabhängig von der Drehung des Koordinatenkreuzes im Schwerpunkt S.

Das Koordinatensystem kann um den Winkel φ gedreht werden, so dass $I_{\eta\zeta} = 0$ wird. Die Achsen des so gedrehten Koordinatensystems heissen Hauptachsen und die Flächenmomente entsprechend Hauptflächenmomente zweiter Ordnung (Darstellung als Mohr'scher Trägheitskreis, der identisch mit dem Mohr'schen Spannungskreis ist).

Aus Gleichung (19) folgt für $I_{\eta\zeta} = 0$:

$$\tan 2\varphi = \frac{2I_{yz}}{I_y - I_z} \quad (20)$$

Im Fall symmetrischer Querschnitte sind die Symmetrieachsen durch den Flächenschwerpunkt S die Hauptachsen.

3.2. Verschieben des Koordinatensystems in der y-z-Ebene

Vielfach benötigen wir die Trägheitswerte in einer zum Schwerpunkt verschobenen Achse. Diese Verschiebung soll hier hergeleitet werden:

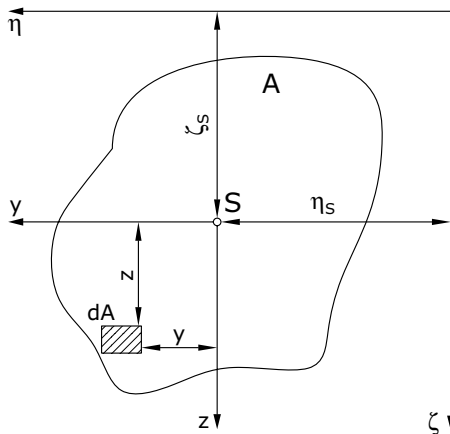


Bild (B003bieZ) Beliebige Querschnittsfläche A mit infinitesimalem Flächenelement dA sowie den parallelen Koordinatensystemen y, z und η, ζ.

Bild B003bieZ zeigt für eine beliebige Querschnittsfläche A die parallelen Koordinatensysteme y, z und η, ζ. Der Ursprung der y-z-Koordinaten befindet sich im Schwerpunkt S. Mit den Beziehungen:

$$\eta = y + \eta_s \quad (21)$$

$$\zeta = z + \zeta_s \quad (22)$$

gilt für die Trägheitsmomente bezüglich des verschobenen Systems:

$$I_\eta = \int \zeta^2 dA = \int z^2 dA + 2\zeta_s \int z dA + \zeta_s^2 \int dA \quad (23)$$

und analog:

$$I_{\zeta} = \int \eta^2 dA = \int y^2 dA + 2\eta_s \int y dA + \eta_s^2 \int dA \quad (24)$$

Da die Flächenmomente erster Ordnung bezüglich der durch den Schwerpunkt S gehenden Achsen y, z verschwinden, ergeben sich mit:

$$\int y dA = 0 \quad (25)$$

$$\int z dA = 0 \quad (26)$$

folgende Beziehungen, die nach Steiner (1796-1863) als *Steiner'scher Satz* bezeichnet werden:

$$I_{\eta} = I_y + \zeta_s^2 A \quad (27)$$

$$I_{\zeta} = I_z + \eta_s^2 A \quad (28)$$

$$I_{\eta\zeta} = I_{yz} - \eta_s \zeta_s A \quad (29)$$

Die Flächenmomente, bezogen auf Achsen ausserhalb des Schwerpunkts S , sind stets grösser als diejenigen durch den Schwerpunkt. Setzt sich ein Querschnitt aus einzelnen Flächen zusammen, so können die auf eine gemeinsame Achse bezogenen Teilflächenmomente addiert werden.

Als Beispiel zeigt Bild B004bieZ einen durch ein Biegemoment M um die x -Achse beanspruchten T-Träger mit dem Biegespannungsverlauf:

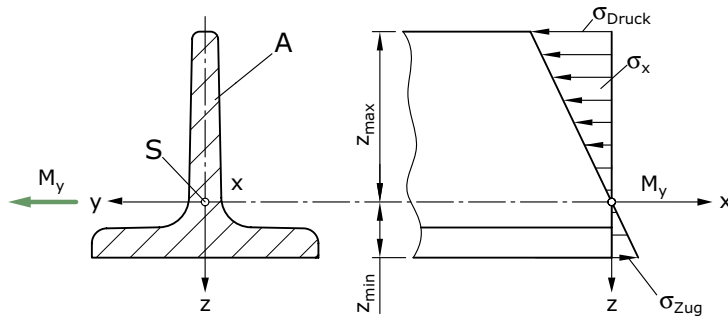


Bild (B004bieZ) Biegespannungen σ_x im Querschnitt mit der Fläche A eines T-Trägerprofils infolge des Biegemomentes M_y um die y -Achse. S: Flächenschwerpunkt; x -, y - und z -Achsen sind Hauptachsen.

$$\sigma_x = \frac{M_y}{I_y} z \quad (30)$$

Die „Fasern“ oberhalb der x -Achse weisen Druckspannungen auf, diejenigen unterhalb Zugspannungen. Für die maximalen Werte der Zug- bzw. Druckbeanspruchung an den Rändern gelten mit Gleichung (19) folgende Beziehungen:

- Druck

$$\sigma_{x\min} = \frac{M_y}{I_y} z_{\max} = \sigma_3 \quad (31)$$

- Zug

$$\sigma_{x\max} = \frac{M_y}{I_y} z_{\min} = \sigma_1 \quad (32)$$

Für diese speziellen T-Trägerprofile erhält man die Lage von S und die Trägheitsmomente aus entsprechenden Tabellen.

In Bild B005bieZ sind für den einachsigen Spannungszustand nach Bild B004bieZ die Mohr'schen Spannungskreise für die Randfasern dargestellt.

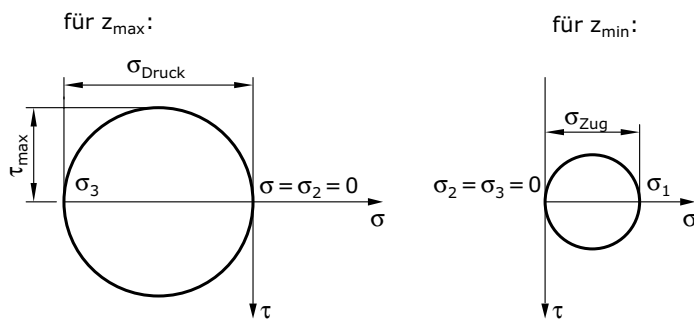


Bild (B005bieZ) Mohr'sche Spannungskreise für die Randfasern des Belastungsfalles nach Bild B004bieZ

Im Dokument „[Biegegerechtigkeit](#)“ sind Empfehlungen für das Konstruieren biegebeanspruchter Teile zusammengefasst.

4. Torsions-Beanspruchung – rotationssymmetrischer Querschnitte

Ähnlich wie bei der Balkenbiegung sind auch bei der Torsion einige Annahmen zu treffen, die für Stäbe mit Kreisquerschnitt weitgehend gelten:

1. Querschnitte senkrecht zur Torsionsachse behalten bei der Torsion ihre Gestalt, d.h. sie verdrehen sich als Ganzes. Punkte eines Querschnittes, die vor der Verformung auf einer Geraden liegen, befinden sich auch nach der Verformung auf einer Geraden.
2. Ebene Querschnitte bleiben eben, es tritt keine Verformung aus der Ebene heraus auf, d.h. der Querschnitt wölbt sich nicht. Geradlinige Mantelflächen werden infolge der Belastung zu schraubenförmig gedrehten Mantelflächen, die aber wegen der kleinen Verformungen als geradlinig angenommen werden.

Das Torsionsmoment M_T beansprucht einen Stab mit dem Kreisquerschnitt A auf Torsion (siehe Bild B001torZ). Mit den Polarkoordinaten x , r und φ gilt für den eingetragenen Schubspannungsverlauf:

$$\tau_{\varphi x} = \frac{M_T}{I_p} r \quad (33)$$

und für die maximale Randspannung:

$$\tau_{\varphi x_{\max}} = \frac{M_T}{I_p} r_{\max} \quad (34)$$

Mit dem Widerstandsmoment gegen Torsion gilt (siehe auch: [Flächenträgheits- und Widerstandsmomente einfacher Querschnittsformen](#)):

$$W_p = \frac{I_p}{r_{\max}} \quad (35)$$

Bemerkung: Das polare Trägheitsmoment I_p kann aus den beiden axialen bestimmt werden:

$$I_p = I_y + I_z = \int (z^2 + y^2) dA = \int r^2 dA \quad (36)$$

$$\tau_{\varphi x_{\max}} = \frac{M_T}{W_p} \quad (37)$$

Die Gleichgewichtsbedingungen erfordern in senkrecht aufeinander stehenden Ebenen gleich grosse zugeordnete Schubspannungen τ . Der Längs- und Querschnitt mit den Spannungslinien nach Bild B001torZ macht dies deutlich.

$$\tau_{\varphi x} = \tau_{x\varphi} \quad (38)$$

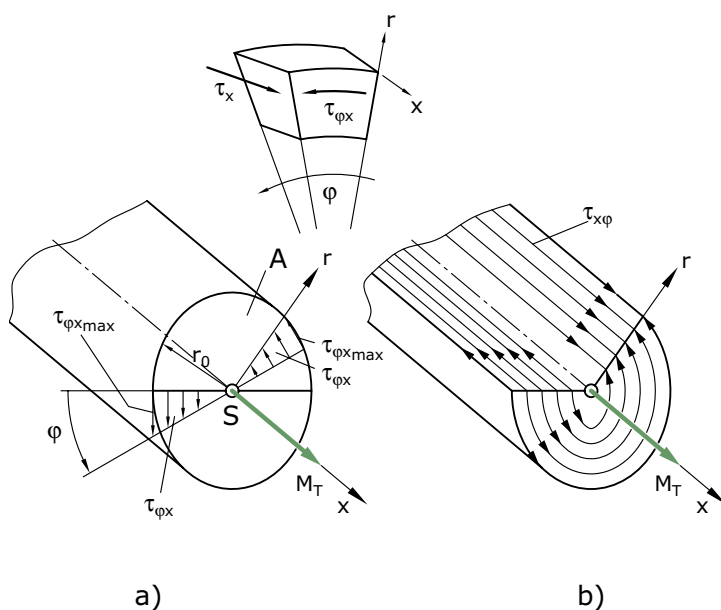


Bild (B001torZ) a) Schubspannungen $\tau_{\varphi x}$ im Kreisquerschnitt mit der Fläche A eines Rundstabes infolge des Drehmomentes M_T um die x-Achse; S Flächenschwerpunkt
 b) Schubspannungslinien im Längs- und Querschnitt des auf Verdrehung beanspruchten Rundstabes a) $\tau_{\varphi x} = \tau_{x\varphi}$

Die Torsion verursacht entsprechend dem Mohr'schen Spannungskreis nach Bild B050torZ einen zweiachsigen Spannungszustand.

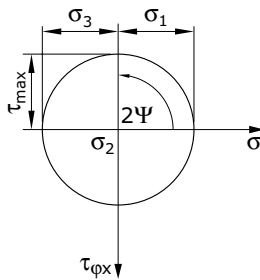


Bild (B050torZ) Mohr'scher Spannungskreis für den Belastungsfall nach Bild B001torZ

Die Hauptspannungen für den Rand betragen:

$$\sigma_1 = \tau_{\phi x_{\max}} \quad (39)$$

$$\sigma_3 = -\sigma_1 = -\tau_{\phi x_{\max}} \quad (40)$$

$$\sigma_2 = 0 \quad (41)$$

Diese Hauptspannungen bilden mit einer geraden Mantellinie einen Winkel von 45° . Die Torsion erzeugt also eine Beanspruchung, die einer Beanspruchung durch eine Zugkraft in einer Richtung (45° zur Momentenrichtung) und einer gleich grossen Druckkraft senkrecht dazu entspricht.

Im Fall der Versagensbrüche liegen die Verhältnisse umgekehrt zum Fall des axialen Zuges. Der Bruch infolge Normalspannungen, wie sie bei spröden Materialien auftreten, liegt demnach im Winkel 45° zur Achse (Bild B051torZ a) und der zähe Bruch in Richtung der maximalen Schubspannungen senkrecht zur Achse (Bild B051torZ b).

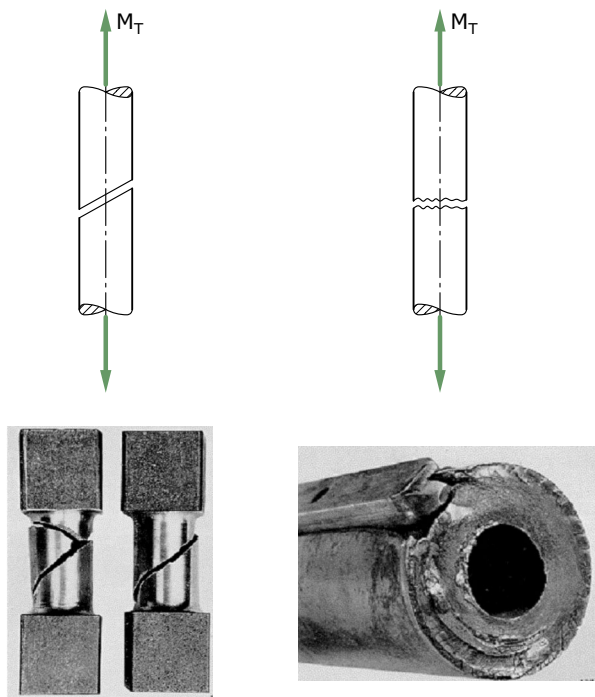


Bild (B051torZ) Typische Bruchausbildungsformen bei Gewaltbruch für unterschiedliche Werkstoffe.

- a) für spröde Werkstoffe unter Torsion, Trennbruch unter 45° ; Normalspannungshypothese
- b) für zähe Werkstoffe unter Torsion, Schubbruch 90° ; Schubspannungshypothese oder Gestaltänderungshypothese

5. Torsion nichtrotations-symmetrischer Querschnitte

Nichtrotationssymmetrische Querschnitte verwölben sich bei der Torsion. Für solche Querschnittformen vermittelt die Membran-Analogie nach L. Prandtl eine recht anschauliche Vorstellung über die Schubspannungsverteilung. Bei dieser Analogie, die die Literatur auch "Seifenhautgleichnis" nennt, wird die Öffnung einer Platte, die dem Querschnitt des Torsionsstabes entspricht, mit einer Membran (Seifenhaut) überzogen. Diese Membran wird durch eine stationäre Druckdifferenz zwischen Membranober- und -unterseite beaufschlagt und wölbt sich.

Prandtl wies nach, dass für dieses Torsionsproblem und den Membranhügel dieselben Differentialgleichungen gültig sind. Deshalb lassen sich die folgenden Analogiebeziehungen formulieren:

1. Das Profil des Torsionsstabes entspricht der Öffnungsform der Platte.
2. Der Rauminhalt des Membranhügels ist proportional zur Grösse des Torsionsmomentes.
3. τ hat die Richtung der Tangente an die Höhenlinie im entsprechenden Punkt des Membranhügels.
4. Der Betrag von τ ist proportional zum Gradienten der Membranfläche der Höhenlinien im entsprechenden Punkt.

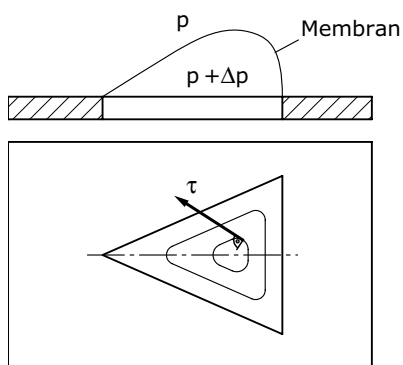


Bild (B002torZ) Membrananalogie nach L. Prandtl

Aus diesen Analogiebeziehungen lassen sich folgende anschauliche Folgerungen ableiten:

1. Die Schubspannungen sind am Profilrand tangential.
2. Ausspringende Ecken werden nur wenig auf Schub beansprucht und leisten keinen Beitrag zur Übertragung des Torsionsmomentes.
3. In einspringenden Ecken treten gefährliche Spannungsspitzen auf.

Daraus ergeben sich für Konstrukteure wertvolle Richtlinien bei der Gestaltung von auf Torsion beanspruchter nichtrotationssymmetrischer Körper.

Erkenntnis

- Ausspringende Ecken übernehmen wenig Anteil an der Torsionsmomentenübertragung und sind schlecht genutzte Materialanteile (Gewicht)
- Einspringende Ecken sind bei Torsionsbelastung gefährlich und müssen ausgerundet werden.

Beispiel: Nuten in Wellen für Passfedern

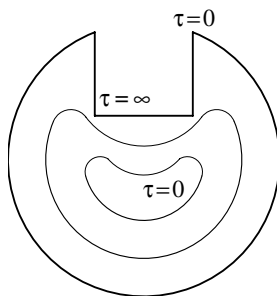


Bild (B003torZ) Beispiel für unterschiedliche Schubspannungen an einer Welle mit Passfeder-Nute: Grösster Gradient an den einspringenden Ecken (Ausrunden), geringster Gradient an den ausspringenden Ecken ($\tau = 0$) und im Membranmaximum (hier nicht Zentrum) Gradient = 0.

5.1. Rechteckprofile

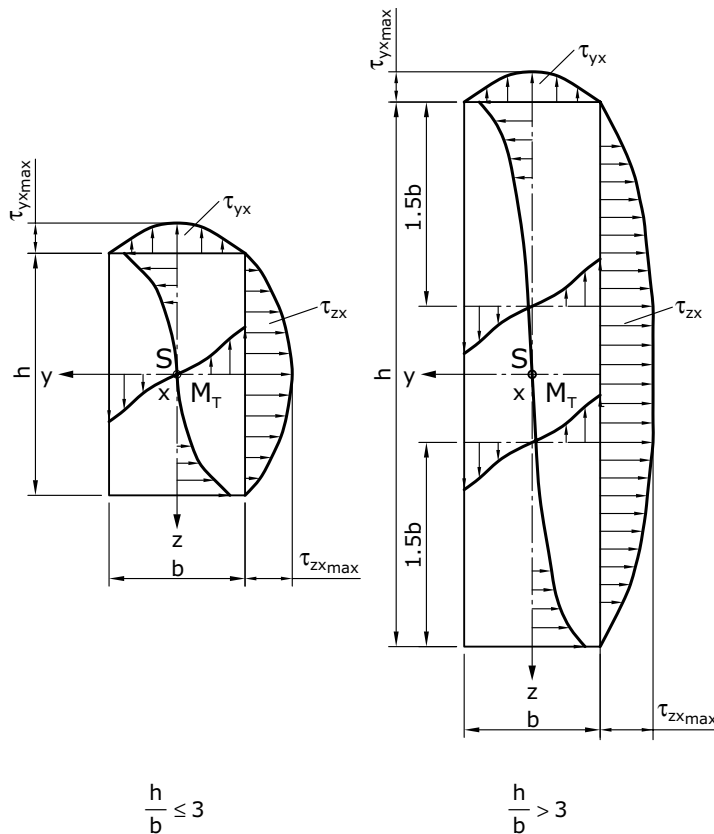


Bild (B004torZ) Schubspannung τ in Rechteckquerschnitten, welche durch ein Drehmoment M_T um die x -Achse beansprucht sind, S Flächenschwerpunkte

Für Rechteckquerschnitte mit der Höhe h und Breite b zeigt Bild B004torZ a) für $h/b \leq 3$ und Bild B004torZ b) für $h/b > 3$ den qualitativen Schubspannungsverlauf τ . In den Ecken ist die Schubspannung $\tau = 0$. Sie nimmt von dort an den Rändern in etwa parabolisch zu. In der Mitte des Höhenrandes erreicht sie die Grösse τ_{zxmax} und in der Mitte des Breitenrandes τ_{yxmax} . Nach Bild B004torZ b) bleibt τ_{zxmax} in der Mitte des Höhenrandes bis jeweils zu einer Entfernung von $1,5b$ zu den Ecken konstant. Die Schubspannungen entlang den Symmetrielinien verdeutlichen die Verteilung über den Querschnitt. Die maximale Schubspannung tritt in der Mitte der Längsseite auf; dort hat die Membranfläche, wie man sich gut vorstellen kann, den grössten Gradienten.

Zur Erfassung der maximalen Schubspannung bei Rechteckprofilen rechnet man wie beim Kreisquerschnitt und führt das polare Ersatzflächenmoment I_p^* , das polare Ersatzwiderstandsmoment W_p^* sowie den maximalen Ersatzrandabstand r^* ein. Somit wird für die Längsseite:

$$\tau_{\max} = \frac{M_T}{I_p^*} r^* = \frac{M_T}{W_p^*} = \tau_{zx\max} \quad (42)$$

mit

$$W_p^* = \frac{I_p^*}{r^*} \quad (43)$$

Mit den von dem Verhältnis ($h/b \geq 1$) abhängigen Beiwerten c_1 , c_2 und c_3 gelten die Beziehungen:

$$I_p^* = c_3 b^3 h \quad (44)$$

$$W_p^* = c_2 b^2 h \quad (45)$$

$$(r^* = \frac{c_3}{c_2} \cdot b) \quad (46)$$

$$\tau_{yx\max} = c_1 \tau_{zx\max} \quad (47)$$

h/b	1	1.5	2	3	4	6	8	10	∞
c1	1.000	0.858	0.796	0.753	0.743	0.743	0.743	0.743	0.743
c2	0.208	0.231	0.246	0.267	0.282	0.299	0.307	0.313	0.333
c3	0.140	0.196	0.229	0.263	0.281	0.299	0.307	0.313	0.333

Tabelle (T001torZ) Beiwerte c_1 , c_2 und c_3 für die Gleichungen (43)–(45)

Die Verdrehung eines rechteckigen Profils gemäss B004torZ und der Länge L sowie dem Schubmodell G ergibt:

$$\gamma = \frac{M_T \cdot L}{c_3 h b^3 G} \quad (48)$$

5.2. Offene, dünnwandige Profile mit konstanter Wandstärke

Die Membrananalogie von Prandtl kann am folgenden Winkelprofil gut illustriert werden.

Mit dem Verständnis dieses Spezialfalles wird auch die Analyse bzw. Berechnung anderer Profile ermöglicht.

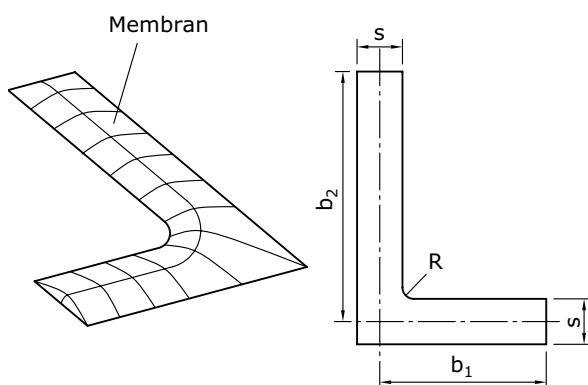


Bild (B052torZ) Geometrie eines Winkelprofils und qualitative Darstellung der Membran

Zur weiteren Analyse wird das Profil in einzelne Abschnitte unterteilt.

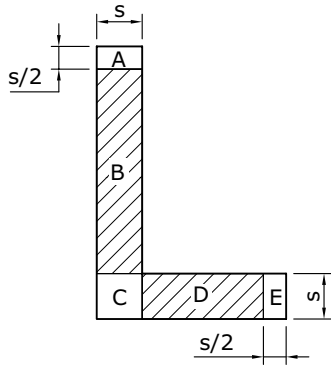


Bild (B053torZ) Aufteilung des Profils

5.2.1. Membranansatz

Man weiss, dass die Membran an den Aussenkanten anschliesst und symmetrisch zur Mitte ist. Vereinfachend modelliert man deshalb für die Zonen B und D eine quadratische Membranparabel über die Breite S . Damit wird die Ableitung $\tau(y)$ eine Gerade:

$$\tau(y) = \tau_{\max} \frac{y}{s/2} \quad (49)$$

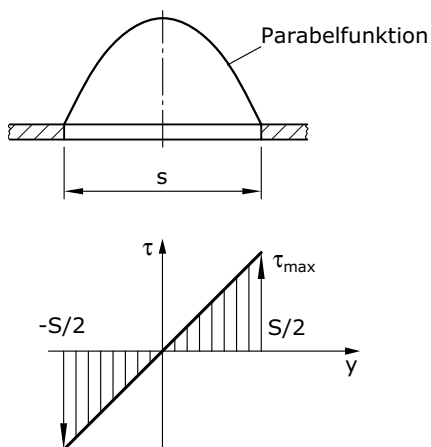


Bild (B005torZ) Membranansatz und daraus resultierende Schubspannungsverteilung über den Querschnitt

Symmetrisch zur Mittelachse des Bereiches B treten positive und negative Schubspannungen auf.

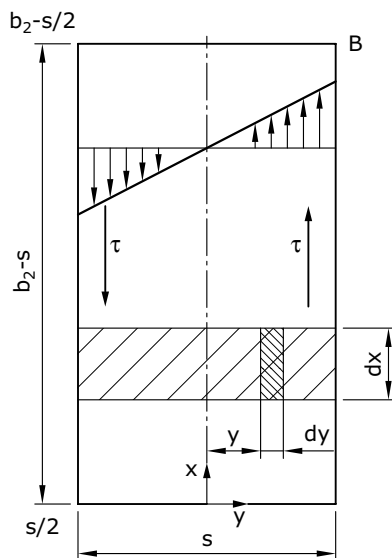


Bild (B006torZ) Moment bezüglich der z-Achse

Das Teiltorsionsmoment, aufgenommen durch ein infinitesimales Element $dx dy$, beträgt:

$$dM_T = \tau(y) y dx dy \quad (50)$$

und integriert:

$$M_T = \int_{-\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}} \int_{\frac{s}{2}}^{b_2-\frac{s}{2}} \tau_{\max} \frac{y^2}{s/2} dx dy \quad (51)$$

Vereinfachend nimmt man an, dass $b_2 \gg s_2$ ist, womit:

$$M_T = \tau_{\max} \frac{s^2}{6} \int_0^{b_2} dx = \tau_{\max} \frac{s^2}{6} b_2 \quad (52)$$

Auf die selbe Weise erfolgt die Berechnung für den Bereich D.

Für die Endzonen schliesst man die Membranen analog mit einem parabolischen Ansatz:

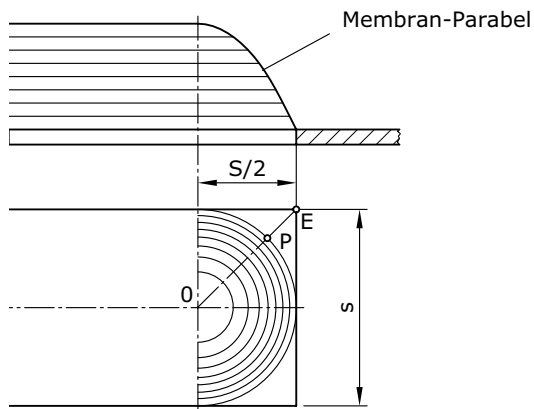


Bild (B007torZ) Schubspannung am Profilende

$$\tau(r) = \tau_{\max} \frac{r}{S/2} \quad (53)$$

Damit wird idealisiert, dass zwischen P und E keine Schubspannungen existieren. In Wirklichkeit nimmt die Schubspannungsverteilung dort sanfter ab. Die Schubspannungen τ_{yz} erzielen in diesem Bereich D eine resultierende Kraft R_0 .

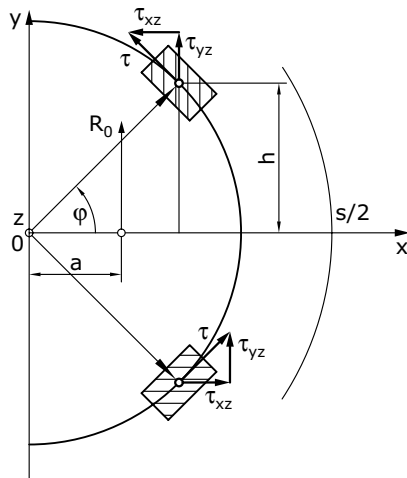


Bild B054torZ) Resultierende der Schubspannungen am Profilende

Die τ_{xz} -Komponenten sind symmetrisch zur x-Achse und heben sich in der Summe auf. Die Schubspannungen erzeugen jedoch eine resultierende Kraft R_0 in Richtung y. R_0 beträgt:

$$R_0 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{s}{2}} \tau_{\max} \frac{r}{s/2} \cos\varphi r d\varphi dr \quad (54)$$

$$R_0 = \tau_{\max} \frac{s^2}{6} \quad (55)$$

τ_{yz} erzeugt auch ein Moment bezüglich des Punktes 0:

$$M_0 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{s}{2}} \tau_{\max} \frac{r}{s/2} r r d\varphi dr \quad (56)$$

$$M_0 = \pi \tau_{\max} \frac{s^3}{32} \quad (57)$$

Man kann dieses Moment mit R_0 zusammenfassen, wenn man R_0 nicht in 0, sondern im Abstand a angreifen lässt:

$$a = \frac{M_0}{R_0} = \frac{3\pi}{16} s \quad (58)$$

In der Ecke C wird in einem 90° -Segment die Verbindung zwischen dem Bereich B und D gebildet.

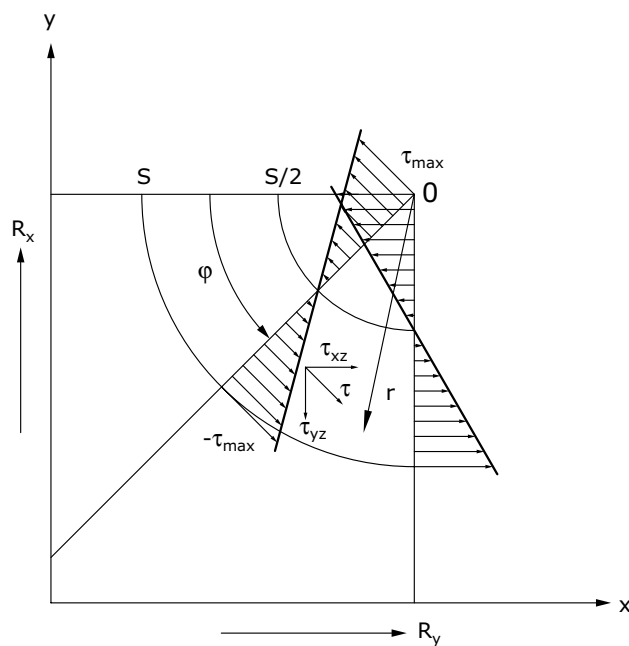


Bild (B008torZ) Resultierende der Schubspannung in der Profillecke c

$$\tau(r) = \tau_{\max} \left(\frac{\frac{s}{2} - r}{\frac{s}{2}} \right) \quad (59)$$

$$\tau_{yz}(r) = \tau(r) \cos \varphi \quad (60)$$

$$\tau_{xz}(r) = \tau(r) \sin \varphi \quad (61)$$

Die Resultierende in y wird dann:

$$R_y = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^s \tau_{\max} \frac{(s/2-r)}{s/2} \cos \varphi r \, d\varphi \, dr \quad (62)$$

$$R_y = -\tau_{\max} \frac{s^2}{6} = R_0 \quad (63)$$

R_x wird:

$$R_x = +\tau_{\max} \frac{s^2}{6} = R_0 \quad (64)$$

Fasst man nun die einzelnen resultierenden Kräfte und Momente der Flächen zusammen, so ergibt sich das folgende Bild:

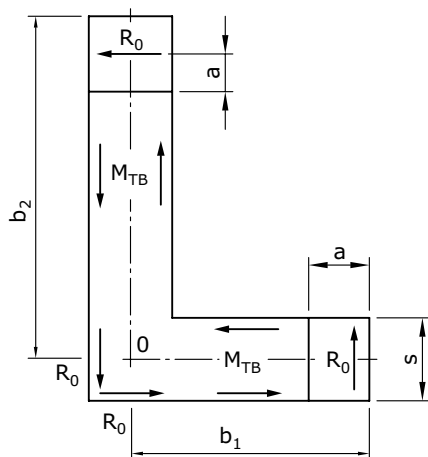


Bild (B009torZ) Verteilung der resultierenden Kräfte und Momente

Das Gesamtmoment bezüglich 0 ergibt mit der genannten Vereinfachung $s \ll b_1, b_2$ und $a \ll b_1, b_2$:

$$\begin{aligned}
 M_{T_0} &= M_{TA} + M_{TB} + M_{TC} + M_{TD} + M_{TE} \\
 &= R_0 b_2 + M_{TB} + 0 + M_{TD} + R_0 b_1 \\
 &= \frac{\tau_{\max}}{6} s^2 b_2 + \tau_{\max} \frac{s^2}{6} b_2 + 0 + \tau_{\max} \frac{s^2}{6} b_1 + \tau_{\max} \frac{s^2}{6} b_1 \quad (65) \\
 &= \frac{\tau_{\max}}{3} s^2 b_2 + \frac{\tau_{\max}}{3} s^2 b_1
 \end{aligned}$$

$$M_{T_0} = \frac{\tau_{\max}}{3} s^2 (b_1 + b_2) \quad (66)$$

Interessant ist die Beobachtung, dass die beiden Enden A und E 50% des Gesamtmomentes übernehmen. Die maximalen Spannungen werden zu:

$$\tau_{\max} = \frac{3M_T}{s^2 (b_1 + b_2)} \quad (67)$$

Allgemeine dünnwandige, offene Profile mit gleicher Wandstärke können nun analog diesem zweiteiligen L-Profil als aneinander gereihete Rechtecke angenommen werden und allgemein wird:

$$\tau_{\max} = \frac{3M_T}{s^2 \sum b_i} \quad (68)$$

Übernimmt man die Formulierung für τ_{\max} des rotationssymmetrischen Querschnittes:

$$\tau_{\max} = \frac{M_T}{W_T} \quad (69)$$

so ist demnach:

$$W_T = \frac{1}{3} s^2 \sum b \quad (70)$$

Die Verdrehung, berechnet nach Castigliano, ergäbe:

$$y = \frac{L}{G} \frac{3M_T}{s^3 \sum b_i} \quad (71)$$

5.2.2. Allgemeines Vorgehen

Offene dünnwandige Querschnitte mit unterschiedlicher Profildicke s , wie in Bild B055torZ dargestellt, zerlegt man in einzelne Rechtecke mit einem möglichst grossen Verhältnis:

$$\frac{b_i}{s_i} \geq 10 \quad (72)$$

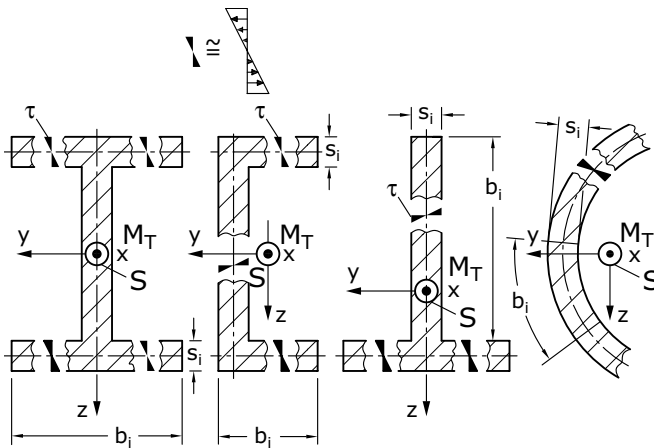


Bild (B055torZ) Beispiel für offene dünnwandige Querschnitte S

In erster Annäherung folgt zur Ermittlung von τ_{\max}

$$I_p^* \approx \frac{1}{3} \sum b_i s_i^3 \quad (73)$$

Die maximale Schubspannung in einem dieser zerlegten Querschnitte i ist dann:

$$\tau_{i \max} = \frac{M_T}{W_{pi}^*} \quad (74)$$

$$W_{Pi}^* = \frac{I_p^*}{s_i} \quad (75)$$

$$\tau_{i\max} = \frac{M_T s_i}{\frac{1}{3} \sum b_i s_i^3} \quad (76)$$

und die maximale Randschubspannung erhält man für das Rechteck mit maximalem s_i :

$$\tau_{\max} = \frac{M_T s_{\max}}{\frac{1}{3} \sum b_i s_i^3} \quad (77)$$

5.3. Geschlossene, allgemeine dünnwandige Profile

Für dünnwandige Profile, welche in sich geschlossen sind, ergeben sich nochmals andere Verhältnisse. Es werden folgende Annahmen getroffen:

1. Profil bleibt in Richtung der Längsachse unverändert.
2. Konstantes Torsionsmoment in allen Querschnitten.
3. Spannungen τ verlaufen an den Querschnittsrändern tangential und sind über die Wanddicke konstant verteilt.

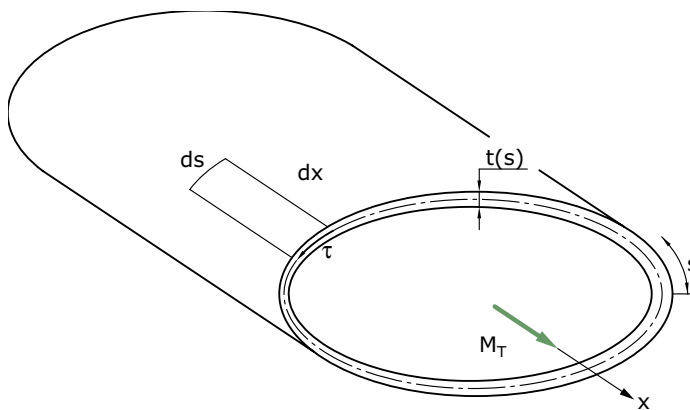


Bild (B010torZ) Geschlossenes dünnwandiges Profil unter Torsionsbeanspruchung

Die dritte Annahme kann wiederum anhand der Prandtl-Analogie gezeigt werden.

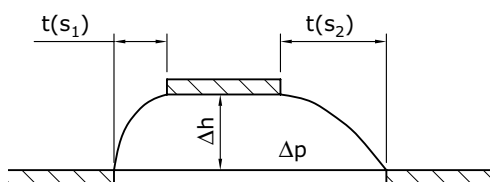


Bild (B011torZ) Dünnwandige Membran unter Schubbeanspruchung

Der mittlere Hohlbereich des geschlossenen Profils wird nun als starre Platte angehoben. Infolge der Einschränkung, dass $t(s)$ in Relation zu den Profildimensionen klein ist, kann die Membran als linear ange-

nommen werden und der Gradient τ ist somit konstant über dem Querschnitt.

$$\tau(r) = \text{konstant} \quad (78)$$

Wenn man die Schubspannung über die Dicke t integriert, erhält man den Schubfluss T :

$$T(s) = \tau(s) t(s) \quad (79)$$

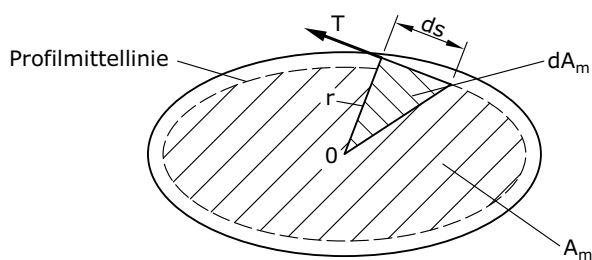


Bild (B012torZ) Visualisierung des Schubflusses

Wenn man nun ein infinitesimales Querschnittelement aus dem Profil ausschneidet B056torZ und in Umfangsrichtung s das Kräftegleichgewicht formuliert, erhält man:

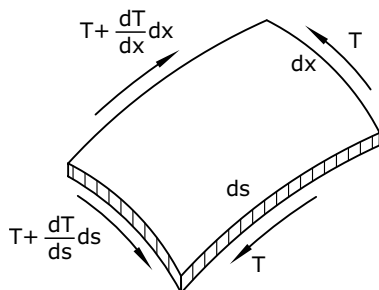


Bild (B056torZ) Kräftegleichgewicht am infinitesimalen Element

$$\left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) ds - T ds = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (80)$$

Dies bedeutet, dass der Schubfluss T in x -Richtung konstant ist. Entsprechend resultiert aus dem Gleichgewicht in x -Richtung:

$$\Rightarrow \frac{\partial T}{\partial s} = 0 \quad (81)$$

Somit ist der Schubfluss für jede Umfangskoordinate konstant und mit der Definition des Schubflusses T erhält man:

$$T(s) = \tau(s) t(s) = \text{konstant} \quad (82)$$

Diese Aussage gilt unter der Voraussetzung, dass:

1. in s -Richtung keine Normalspannungen auftreten (diese müssten ins Gleichgewicht aufgenommen werden) und
2. in x -Richtung keine Normalspannungen wirken (d.h. unbehinderte Verwölbung – Falls die Verwölbung behindert wird, tritt eine Wölbkrafttorsion auf!).

Der Zusammenhang zwischen dem Torsionsmoment und dem Schubfluss wird beschrieben durch:

$$dM_T = rT ds \quad (83)$$

Für das gesamte durch den Schubfluss T übertragene Moment M_T bedeutet dies:

$$M_T = \oint dM_T = T \oint r ds \quad (84)$$

Diese Gleichung verwendet das Umlaufsintegral längs der Umfangskoordinate s .

Weiterhin gilt aus Bild B012torZ:

$$r \, ds = 2dA_m \quad (85)$$

(wobei A_m die von der Profilmittellinie umschlossene Fläche ist) wodurch das Umfangsintegral der doppelten mittleren umschlossenen Fläche entspricht.

$$\oint r \, ds = 2A_m \quad (86)$$

Nach dem Einsetzen dieser Beziehung in (49) ergibt sich das Torsionsmoment und die Schubspannung zu:

$$M_T = 2A_m T \quad (87)$$

$$\tau = \frac{T}{t} = \frac{M_T}{2A_m t} \quad (88)$$

Der angegebene Zusammenhang wird als die erste Bredt'sche Formel bezeichnet.

Die maximale Schubspannung tritt infolge des konstanten Schubflusses generell am Ort der kleinsten Wandstärke auf, wie in Bild B013torZ gezeigt wird:

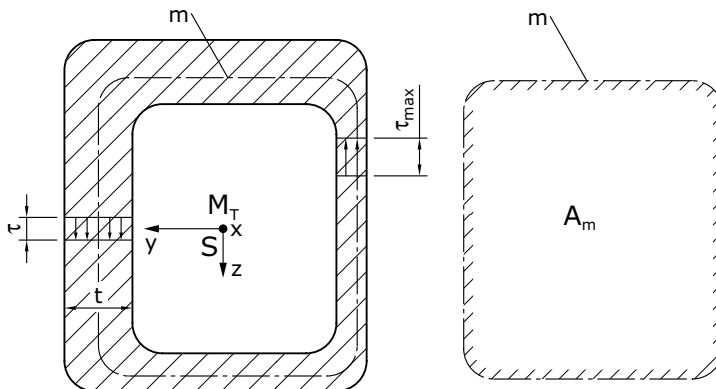


Bild (B013torZ) Umfangsmittellinie und verschiedenen Wandstärken s ; S Flächenschwerpunkt

$$\tau_{\max} = \frac{M_T}{W_T} \quad \text{mit } W_T = 2A_m t_{\min} \quad (89)$$

Aus der Behandlung offener dünnwandiger Profile und dem aktuellen Kapitel der geschlossenen Profile ergeben sich für den Konstrukteur wertvolle Richtlinien.

5.4. Vergleich offener und geschlossener Rohre

Es soll die Torsion zweier geometrisch identischer Rohre aus demselben Material verglichen werden, von denen eines geschlossen (a) und das andere geschlitzt (b) ist. Dabei gelte die Annahme, dass beide die maximale Schubspannung τ_{zul} ertragen.

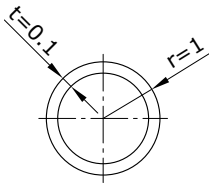


Bild (B014torZ) (a) geschlossenes Rohr

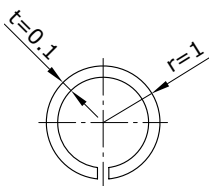


Bild (B015torZ) (b) geschlitztes Rohr

Die übertragbaren Torsionsmomente berechnen sich wie folgt:

(a) Geschlossenes Rohr:

$$M_{T(a)} = 2A_m t \tau_{\text{zul}} = 2\pi r^2 t \tau_{\text{zul}} \quad (90)$$

(b) Geschlitztes Rohr:

$$M_{T(b)} = W_p^* \tau = \frac{1}{3} u t^2 \tau_{zul} = \frac{2\pi}{3} r t^2 \tau_{zul} \quad (91)$$

wobei u : Umfang der Mittellinie

Vergleicht man die übertragbaren Momente zwischen dem offenen und geschlossenen Rohr, so ergibt sich:

$$\frac{M_{T(a)}}{M_{T(b)}} = \frac{2\pi r^2 t \tau_{zul}}{\frac{2}{3} \pi r t^2 \tau_{zul}} = \frac{3r}{t} \quad (92)$$

Das geschlossene Rohr mit den beispielhaft gegebenen Dimensionen $t = 0,1r$ kann 30 mal grössere Momente als das geschlitzte übertragen. Umgekehrt formuliert bedeutet dies, dass bei gleichem Torsionsmoment M_t im geschlossenen Profil eine um 30 mal kleinere Schubspannung entsteht:

$$\frac{\tau_{\max\text{geschlossen}}}{\tau_{\max\text{offen}}} = \frac{t}{3r} \quad (93)$$

Der Vergleich der Verdrehung γ beider Profile unter gleicher Belastung ergebe das Verhältnis 1/300 für diese zwei Rohrtypen.

$$\frac{\gamma_{\text{geschlossen}}}{\gamma_{\text{offen}}} = \frac{1}{3} \left(\frac{t}{r} \right)^2 \quad (94)$$

Noch zu beachten ist eine starke Verwölbung der Querschnitte, die sich bei offenen Profilen ergibt:

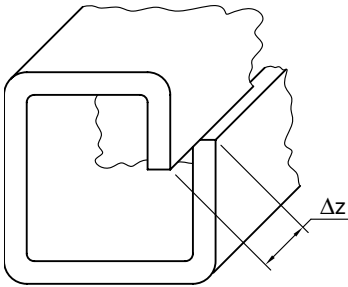


Bild (B057torZ) Verwölbung von offenen Profilen

Erkenntnis

Bei Belastungen durch Torsion sollten generell geschlossene Profile verwendet werden. Damit kann um Faktoren leichter gebaut werden (vor allem im Leichtbau wichtig).

6. Schub-Beanspruchung

Die Beanspruchung auf Abscheren gegenüber äusseren Schubkräften F_z löst einen komplizierten Spannungszustand im betroffenen Querschnitt A aus. Im Falle $l \ll d$ sind die dabei auftretenden Biegespannungen gegenüber den Schubspannungen vernachlässigbar.

Umgekehrt kann bei schlanken Trägern $l \gg d$ gezeigt werden, dass die erzeugte Schubspannung gegenüber der Normalspannung infolge Biegung vernachlässigt werden kann.

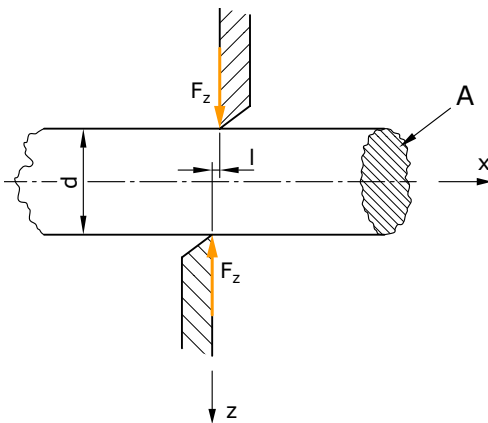


Bild (B001shuZ) Querschnitt durch die Querkräfte F_z auf Abscheren beansprucht

In erster Annäherung bzw. zur ersten Überschlagsrechnung wird häufig angenommen, dass die Schubspannung τ_{zx} konstant über dem Querschnitt ist, mit:

$$\tau_{zx} = \frac{F_z}{A} \quad (95)$$

wobei A = Querschnitt des Trägers.

Dass es sich dabei nur um die mittlere Spannung handeln kann wird klar, wenn man sich die Randbedingung der senkrecht zu τ_{zx} stehenden zugeordneten Schubspannung τ_{xz} an der Oberfläche vor Augen hält. Dort gilt $\tau_{xz} = 0$ und infolge $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ muss auch die Randschubspannung $\tau_{zx} = 0$ sein.

Bei nicht schlanken Trägern $l \approx d$ oder bei dünnwandigen Profilen erzeugen jedoch die Querkräfte Schubspannungen, die nicht vernachlässigt werden dürfen.

Im Folgenden soll nun jedoch die exaktere Schubspannungsverteilung $\tau_{zx}(z)$ hergeleitet werden. Vereinfachend wird vorausgesetzt, dass die Schubspannungen in y -Richtung vernachlässigt werden können.

In den Abbildungen B002shuZ und B003shuZ ist ein Stab mit symmetrischem Querschnitt dargestellt, der infolge F_z durch ein in x veränderliches Biegemoment M_x belastet wird. Man schneidet im gegebenen Querschnitt einen Querschnitt A^* aus, ausgehend von der freien Oberfläche unten bis zur Koordinate z . Innerhalb dieses Teilquerschnittes A^* wird das infinitesimale Element dA mit der Höhe dz betrachtet:

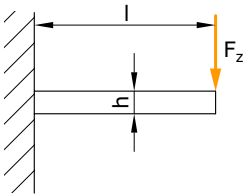


Bild (B002shuZ) Schubspannung infolge Querkraft

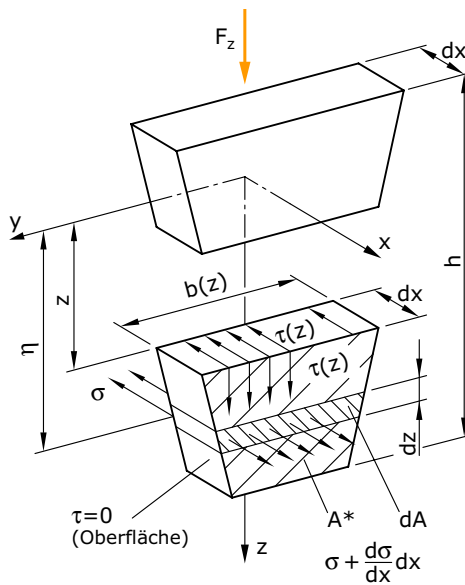


Bild (B003shuZ) Schubspannung infolge Querkraft

Nun lässt sich das Kräftegleichgewicht in x-Richtung für das Element A^* formulieren:

$$-\tau(z) b(z) dx - \int_{A^*} \sigma(\eta) dA + \int_{A^*} \left(\sigma(\eta) + \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx \right) dA = 0 \quad (96)$$

wobei η die laufende Koordinate zwischen h und z darstellt.

Man erhält nun:

$$\tau(z) b(z) = \int_{A^*} \frac{\partial \sigma}{\partial x} dA \quad (97)$$

Aus den aus der Mechanik bekannten Beziehungen (98) und (99) erhält man die Gleichung (100):

$$\sigma(\eta) = \frac{M_y}{I_y} \eta \quad (98)$$

$$\frac{dM_y}{dx} = F_z \quad (99)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{F_z}{I_y} \eta \quad (100)$$

Und man erhält:

$$\Rightarrow \tau(z) b(z) = \frac{F_z}{I_y} \int_{A^*} \eta dA \quad (101)$$

Dieser Integralausdruck ist bereits bekannt. Es handelt sich um das statische Moment der Teilfläche A^* .

$$H_y(z) = \int_{A^*} \eta \, dA \quad (102)$$

Bemerkung: Um die Schubspannung an der Koordinate z zu bestimmen, benötigt man das Trägheitsmoment 1. Ordnung der abgeschnittenen Teilfläche bis zu dieser Koordinate z ; Diese Schubspannung lässt sich dann einfach bestimmen, wenn man das Trägheitsmoment als formale Beziehung für diese Teilfläche kennt. Dann kann man auf das Integrieren verzichten und direkt die Beziehung für das statische Moment H einsetzen.

Man erhält die gesuchte Funktion für die Schubspannungsverteilung in z :

$$\tau(z) = \frac{F_z H_y(z)}{I_y b(z)} \quad (103)$$

6.1. Rechteckquerschnitt

Diese allgemeine Beziehung (105) soll auf einfache Querschnitte angewendet werden. In Bild B004shuZ ist der Verlauf der Schubspannung infolge Querkraft für einen Rechteckquerschnitt dargestellt. Für diesen Querschnitt lautet das Flächenträgheitsmoment:

$$I_y = \frac{b h^3}{12} \quad (104)$$

und das statische Moment für die Teilfläche A^* :

$$H_y(z) = \int_z^{\frac{h}{2}} \eta \, dA = \int_z^{\frac{h}{2}} \eta b \, d\eta = \frac{1}{2} b \eta^2 \Big|_z^{\frac{h}{2}} = \frac{b h^2}{8} \left(1 - \frac{4 z^2}{h^2} \right) \quad (105)$$

Bemerkung: Man könnte hier das Trägheitsmoment 1. Ordnung direkt aus dem Teilrechteck berechnen:

$$H_y = A \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2} + z \right) = b \left(\frac{h}{2} - z \right) \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2} + z \right) \quad (106)$$

Somit lautet die Schubspannungsverteilung:

$$\tau(z) = \frac{F_z H_y(z)}{I_y b(z)} = \frac{F_z}{8} \frac{b h^2 12}{b h^3 b} \left(1 - \frac{4 z^2}{h^2} \right) \quad (107)$$

$$\tau(z) = \frac{3 F_z}{2 A} \left(1 - \frac{4 z^2}{h^2} \right) \quad (108)$$

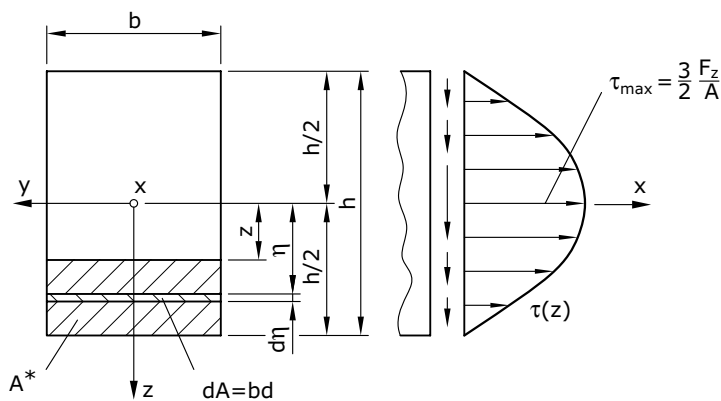


Bild (B004shuZ) Berechnung des statischen Momentes H_y und des Schubspannungsverlaufs infolge Querkraft

Diskussion: Man sieht, dass die Schubspannungsverteilung nicht konstant in z ist, sondern eine parabelförmige Verteilung aufweist. Das Maximum tritt bei $z=0$ auf – mit $3/2$ mal dem Wert aus der konstanten Verteilungsberechnung. Bei der Berechnung der Vergleichsspannung infolge Biegung interessiert meist die Stelle $z = h/2$, wo die Normalspannung maximal ist. Dort beträgt die Schubspannung

jedoch Null. Man bewegt sich demnach auf der sicheren Seite, wenn dort eine konstante Spannungskomponente angesetzt wird.

6.2. Kreisrunde Querschnitte

Für kreisrunde Querschnitte folgt:

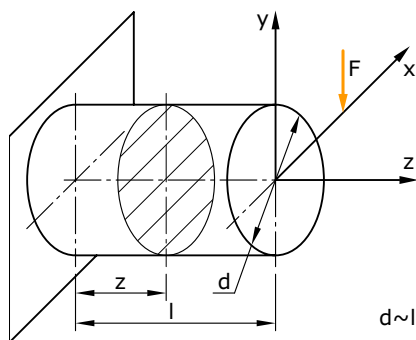


Bild (B015shuZ) kreisrunder Querschnitt

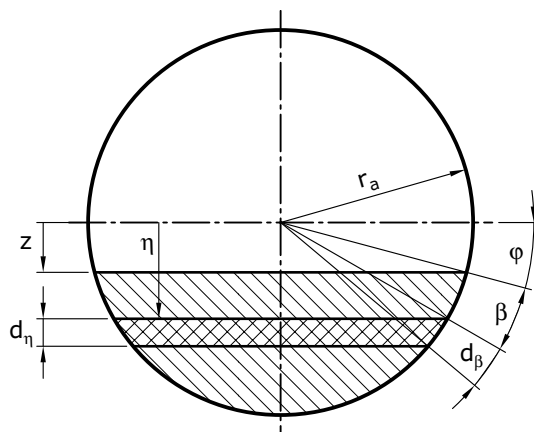


Bild (B026shuZ) kreisrunder Querschnitt. A*: Integrationsgrenzen: $\pi/2$ bis ϕ

$$\tau(z) = \frac{F_z \int_{A^*} b(\eta) \eta d\eta}{I_y b(\eta)} \quad (109)$$

Zur einfachen Integration werden hier Zylinderkoordinaten eingeführt:

$$I_p = I_y + I_z = \int (z^2 + y^2) dA \quad (110)$$

$$\eta = r_a \sin\varphi \quad (111)$$

$$d\eta = r_a \cos\varphi d\varphi \quad (112)$$

womit man integriert von φ bis $\pi/2$ erhält:

$$\tau_{zx}(\varphi) = \frac{F_z}{\frac{\pi}{4} r_a^4} \frac{2r_a^3}{2r_a} \frac{\cos^3\varphi}{3\cos\varphi} = \frac{4}{3} \frac{F_z}{A} \cos^2\varphi \quad (113)$$

und entsprechend in Funktion von z :

$$\tau_{zx} = \frac{4}{3} \frac{F_z}{A} \left(1 - \left(\frac{z}{r_a} \right)^2 \right) \quad (114)$$

Infolge der Randbedingung $\tau_{rx}(r_a) = \text{tangential}$ darf bei diesem Querschnitt die Schubspannung τ_{yx} nicht vernachlässigt werden. Es gilt:

$$\tau_{rx} = \frac{\tau_{zx}}{\cos\varphi} \quad (115)$$

und damit wird:

$$\tau_{rx} = \frac{4}{3} \frac{F_z}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{z}{r_a} \right)^2} \quad (116)$$

Die grösste resultierende Spannung ergibt sich somit bei $z=0$ mit

$$\tau_{rx\max} = \tau_{zx\max} = \frac{4}{3} \frac{F_z}{A} \quad (117)$$

In Bild B005shuZ sind die entsprechenden Schubspannungen dargestellt:

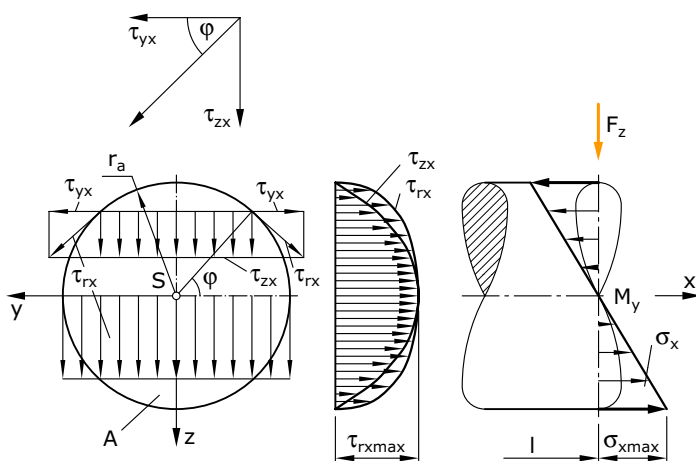


Bild (B005shuZ) Schubspannung τ_{zx} , τ_{yx} und τ_{rx} sowie Biegespannungen σ_x im Kreisquerschnitt mit der Fläche A eines Stabes infolge des mit x veränderlichen Biegemomentes um die y -Achse; S Flächenschwerpunkt

Die maximalen Biege- und Schubspannungen berechnen sich zu:

$$\sigma_{x\max} = \frac{M_b}{W} = \frac{F_z l}{\pi \frac{d^3}{32}} \quad (118)$$

$$\tau_{rx\max} = \tau_{zx\max} = \frac{4}{3} \frac{F_z}{d^2 \frac{\pi}{4}} \quad (119)$$

Der Vergleich dieser maximalen Biege- und Schubspannungen ergibt:

$$\frac{\tau_{rx\max}}{\sigma_{x\max}} = \frac{1}{6} \frac{d}{l} \quad (120)$$

Bei rechteckigen Querschnitten gilt:

$$\frac{\tau_{zx\max}}{\sigma_{x\max}} = \frac{1}{4} \frac{h}{l} \quad (121)$$

Die Beziehung zeigt, wie dies am Anfang des Kapitels angedeutet wurde, dass die Schubspannungen erst bei extrem kurzen Baulängen in die Grössenordnung der Biege-Normalspannungen kommen, d.h. bei:

$$l < d \text{ bzw. } l < h \quad (122)$$

6.3. Offene dünnwandige Querschnitte

Bei offenen dünnwandigen Querschnitten können die Schubspannungen über die jeweilige Wandstärke als konstant angenommen werden. Für einen Steg beispielsweise, ist τ_{zx} in Richtung von y konstant.

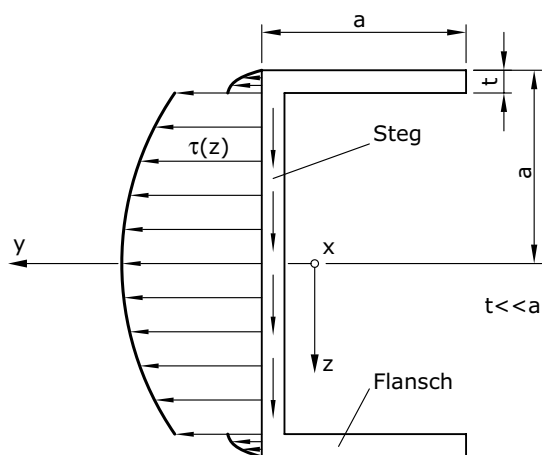


Bild (B006shuZ) Schubspannung infolge Querkraftbeanspruchung ohne Schubspannungen infolge Torsion

Mit der Beziehung (103) kann nun die Schubspannungsverteilung entlang dem Profil berechnet werden. Nehmen wir beispielhaft das gekippte U-Profil, so kann für den unteren Flansch die Schubspannung wie folgt berechnet werden:

$$\tau_{zx} = \frac{F_z}{I_y} \frac{\int \eta dA}{b(z)} = \frac{F_z a^2}{2I_y} \left(1 - \frac{z^2}{a^2} \right) \quad (123)$$

Diskussion: Zur Berechnung der Schubspannung im unteren Flansch wurde im Flächenträgheitsmoment von $z=a$ bis z integriert, unbeachtet dessen, dass bei $z=a-t$ schon wieder eine Berandung auftritt. Deshalb kann man das erhaltene Resultat nur ansatzweise für den Flanschbereich verwenden.

Für den Steg gilt:

$$\tau_{zx} = \frac{F_z}{I_y} \frac{\int \eta dA}{b(z)} = \frac{F_z}{I_y} \frac{\left[aA_{\text{Flansch}} + \int \eta dA \right]}{b(z)} \quad (124)$$

In (120) wird das Flächenträgheitsmoment des Flansches aus dem Gesamtintegral ausgeklammert. Unter Beibehaltung von Termen gleicher Grössenordnung ($t \ll a$) verbleibt:

$$\tau_{zx} = \frac{F_z a^2}{2I_y} \left(3 - \frac{z^2}{a^2} \right) \quad (125)$$

Beim Übergang vom Steg zum Flansch, bei $z \approx a$ ergibt sich somit (für dieses Beispiel) ein Sprung der Schubspannungen:

$$\frac{\tau_{zx \text{ Steg}}}{\tau_{zx \text{ Flansch}}} = \frac{3 - \frac{z^2}{a^2}}{1 - \frac{z^2}{a^2}} \cong 3 \quad (126)$$

Der Flansch überträgt, wie man sieht, viel kleinere Schubspannungen als der Steg. Dass diese Schubspannungen des Flansches nur auf der Achse des Steges vorliegen kann, ist leicht nachvollziehbar, denn in den beiden Flanschbereichen, wo oben und unten freie Ränder vorliegen, müssen die Randspannungen auf Null abfallen und da t sehr klein ist, kann dort generell $\tau_{zx} = 0$ angesetzt werden.

Zusammenfassend gilt, dass die Querkräfte von den Stegen aufgenommen werden. Die Schubspannungen in den Flanschen in Richtung der Querkraft sind verschwindend klein. Lediglich direkt unter dem Steg baut sich eine um Faktor 3 kleinere Schubspannung in Querkraftrichtung auf.

In diesem Flanschbereich existieren jedoch, wie im Folgenden gezeigt werden soll, noch Schubspannungen in y -Richtung: Dem infinitesimalen Element $(d\sigma_x/dx) dA$ im Flansch muss auch das Gleichgewicht geboten werden.

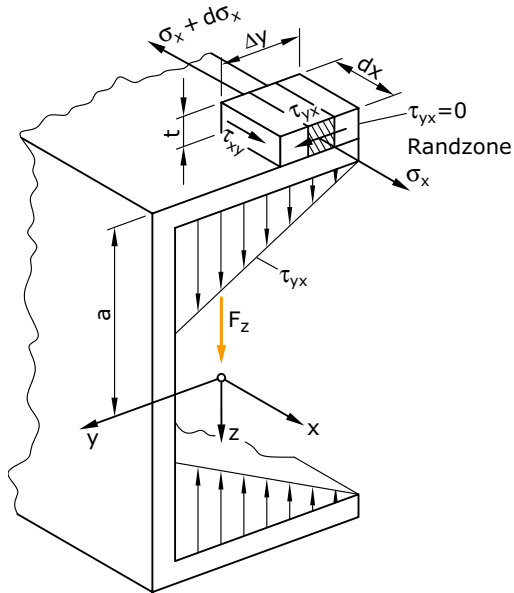


Bild (B007shuZ) Kräftegleichgewicht am infinitesimalen Flanschelement

In diesem Bereich kann das Gleichgewicht nur mit τ_{xy} aufgebracht werden. Formuliert man das Gleichgewicht

$$\tau_{xy} t dx - d\sigma_x t \Delta y = 0 \quad (127)$$

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{\tau_{xy}}{\Delta y} \quad (128)$$

und mit:

$$\eta = z_{\max} = a \quad (129)$$

folgt:

$$\tau_{xy} = \frac{F_z a}{I_y} \Delta y = \tau_{yx} \quad (130)$$

$$\tau_{yx \max} = \frac{F_z a^2}{I_y} = \frac{3 F_z}{8 a t} \quad (131)$$

In diesem speziellen Beispiel mit Steglänge = 2 · Flanschlänge werden die Werte für die Ecken $\tau_{zy} = \tau_x$:

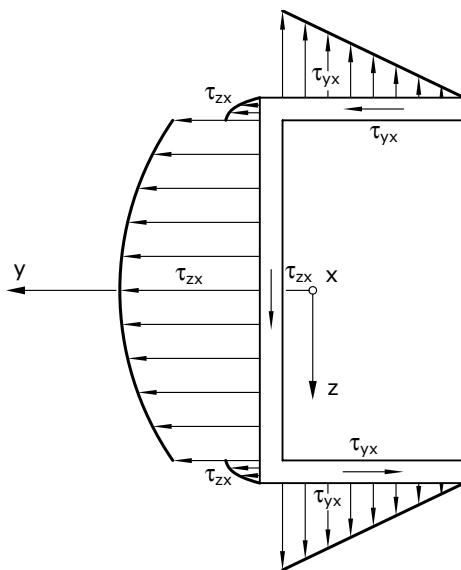


Bild (B008shuZ) Schubspannungsverteilung infolge Querkraft

Wie man in Bild B008shuZ sieht, bewirken diese Schubspannungen bei unsymmetrischen Profilen zusätzlich zur Biegung eine Torsion. Diese Torsion bewirkt ein Verdrehen des Profils, obschon die Kraft im Flächenschwerpunkt angreift.

Dies kann nur verhindert werden, indem man die Kraft um einen Wert aus dem Schwerpunkt verschiebt und damit ein Gegenmoment einleitet. Dieser Kräfteinleitungspunkt, bei welchem das Profil sich nicht verdreht, nennt man Schubmittelpunkt. Die Lage des Schubmittelpunktes (SMP) wird mit Hilfe der resultierenden Kräfte aus den Schubspannungen berechnet. Die resultierenden Kräfte in den Flanschen (für dieses Beispiel) lauten (siehe Bild B009shuZ):

$$P_o = P_u = \frac{1}{2} \left(\frac{3 F_z}{8 t a} \right) a t = \frac{3}{16} F_z \quad (132)$$

und im Steg:

$$P_{st} = F_z \quad (133)$$

Aus der Äquivalenz der Momente um den Schwerpunkt folgt:

$$y_{\bar{S}} F_z = a \frac{3}{16} F_z + \frac{a}{4} F_z + a \frac{3}{16} F_z; \rightarrow y_{\bar{S}} = \frac{5}{8} a \quad (134)$$

wobei \bar{S} = SMP = Schubmittelpunkt

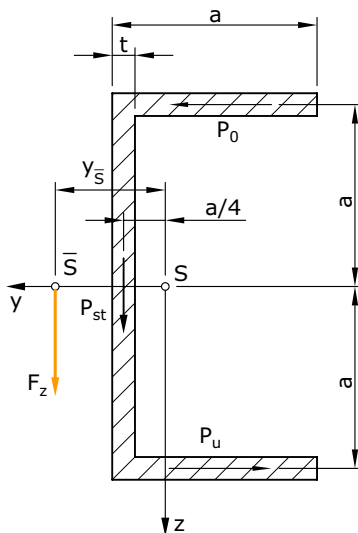


Bild (B009shuZ) Berechnung des Schubmittelpunktes

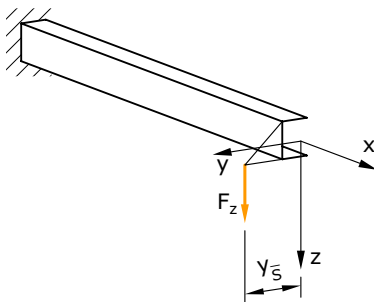


Bild (B010shuZ) Berechnung des Schubmittelpunktes

Zusammenfassend sieht man: Für eine verdrehfreie Konstruktion muss die Querkraft demnach durch den Schubmittelpunkt geführt werden.

Der Schubmittelpunkt fällt im Allgemeinen nicht mit dem Schwerpunkt des Profils zusammen. Seine Lage wird nicht von der Querkraft bestimmt, sondern hängt nur vom Querschnitt ab. Bei symmetrischen Profilen heben sich die Schubflüsse auf, so dass keine Verdrehung eintritt.

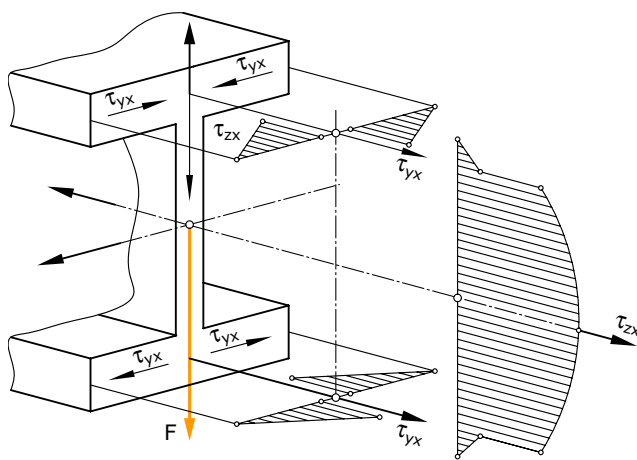


Bild (B011shuZ) Schubspannungsverteilung und Lage des Schubmittelpunktes bei einem symmetrischen Profil

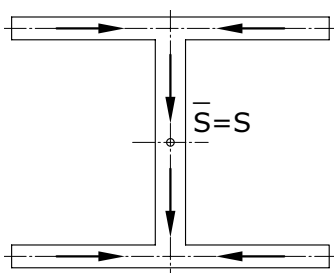


Bild (B012shuZ) Schubspannungsverteilung und Lage des Schubmittelpunktes bei einem symmetrischen Profil

Die Vergleichsspannung wird durch die Biegespannung und die Schubspannung für verschiedene Punkte M gebildet:

- Flansch

$$\sigma_V = f(\sigma_x, \tau_{yx}) \quad (135)$$

- Steg

$$\sigma_V = f(\sigma_x, \tau_{zx}) \quad (136)$$

Diskussion: Beim Leichtbau werden häufig Bleche gekantet. Dann muss der Schubmittelpunkt berücksichtigt werden. Allgemein lässt sich das Problem des Verdrehens lösen, indem man zwei unsymmetrische Profile durch Schweißen, Nieten, Schrauben oder Kleben steif zu einem symmetrischen Profil zusammensetzt.

6.4. Weitere Aspekte der Schubspannungsverteilung – Auftrennung von Querschnitten

Falls ein Profil innerhalb seines Querschnittes eine Auftrennung, z. B. ein Schlitz oder eine Bohrung, aufweist, muss an dieser Trennstelle die Oberflächenbedingung $\tau_{zx}=0$ wieder erfüllt werden. Das Gesamtintegral muss jedoch F_z entsprechen, so dass in anderen Zonen eine entsprechende Überhöhung der Schubspannung eintreten muss. Aus diesem Grund sind Schlitz und Bohrung vor allem in der Symmetriestelle (wo τ_z maximal wäre) zu vermeiden.

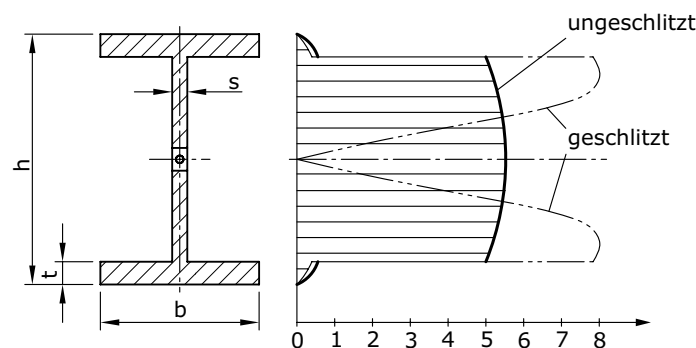


Bild (B013shuZ) Schubspannungsüberhöhung bei unterbrochenen Profilen

6.5. Weitere Aspekte der Schubspannungsverteilung – Einspannstelle

Die berechnete Schubspannungsverteilung gilt an einer freien Querschnittsstelle des Trägers. Für die Einspannstelle ist die Schubspannungsverteilung komplexer und entspricht eher der konstanten Verteilungsfunktion.

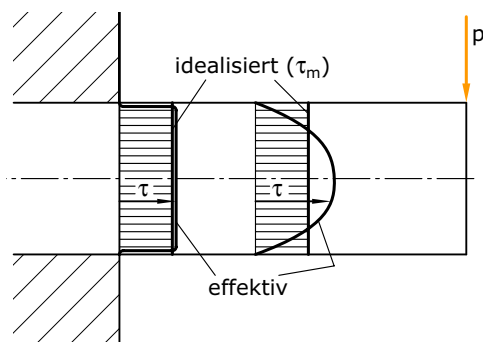


Bild (B014shuZ) Schubspannungsverteilung bei starren Einspannungen

7. Zusammenfassung

Um bei einer Konstruktion eine erste Grobdimensionierung durchzuführen, kann die bestehende Geometrie auf einfacher zu berechnende Bauformen reduziert werden. Es muss dabei aber darauf geachtet werden, die auftretenden Kraftflüsse nicht wesentlich zu verändern.

Als einfache Bauformen können beispielsweise Stäbe, Rohre, Platten oder (Hohl-) Profile gewählt werden. Unter Anwendung der Methoden zur Berechnung von elementaren Beanspruchungsfällen können solche vereinfachten Geometrien anschliessend grobdimensioniert werden.

Eine Berechnung von elementaren Belastungsfällen an vereinfachter Geometrie steht nicht in Konkurrenz zu komplizierteren, computergestützten Berechnungsmethoden, vielmehr dient sie dazu, erste Bauteildimensionen zu finden, um eine Konstruktion mit CAD zu ermöglichen. Genauere Finite Elemente Methoden werden erst in späteren Phasen der Entwicklung angewandt. Dabei können die gewonnenen Erkenntnisse aus der Grobdimensionierung eine gute Grundlage bieten, um die neuen Ergebnisse zu interpretieren und zu vergleichen.

Teil 1 der Sektion „elementare Beanspruchungsfälle“ umfasst:

- Zug- / Druck-Beanspruchung
Stichworte: Hauptspannung, maximale Schubspannung, Mohr'scher Spannungskreis für Zug- und Druckspannungen
- Biegebeanspruchung
Stichworte: Normalspannungsverteilung, Widerstandsmoment, axiales Flächenmoment, polares Flächenmoment, gemischtes Flächenträgheitsmoment, Hauptachsen, Hauptflächenmomente, Steiner'scher Verschiebungssatz
- Torsions-Beanspruchung
Stichworte: Schubspannungsverlauf, Flächenträgheits- und Widerstandsmomente, Mohr'scher Spannungskreis, Membranalogie, Schubspannungsgradient
- Schub-Beanspruchung
Stichworte: Schubspannungsverteilung, maximale Biege- und Schubspannungen, Schubmittelpunkt

Teil 2 behandelt:

- Flächenpressung
- Druck-Beanspruchung von rotationssymmetrischen Körpern

Verständnisfrage 1

Wie wird ein Stab aus zähem Material auf Zugbeanspruchung versagen; wie sieht der Bruchquerschnitt aus?

Verständnisfrage 2

Ordnen Sie die folgenden Trägheitsmomente in der Reihenfolge aufsteigender Grösse:

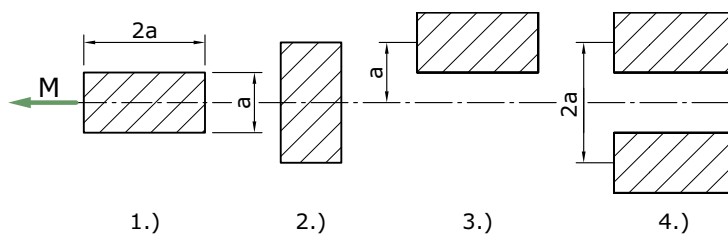


Bild (B006bieZ) Trägheitsmomente

Verständnisfrage 3

Ein T-Profil sei auf Biegung belastet; Sie müssen sich entscheiden, ob die Zugbelastung im Steg oder Flansch aufgenommen werden soll.

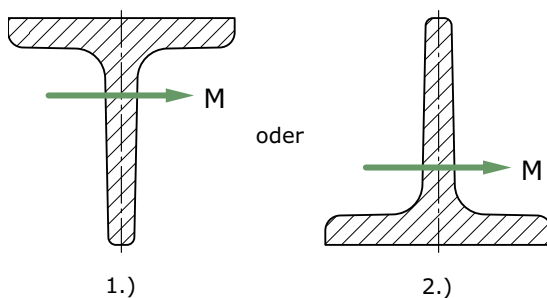


Bild (B007bieZ) Zugbelastung in Steg und Flansch

Verständnisfrage 4

Wie wird ein zäher Stab auf Torsion versagen; wie sieht der Bruchquerschnitt aus?

Verständnisfrage 5

Ein Profil wird auf Torsion beansprucht.

Zeigen Sie qualitativ die Schubbeanspruchung an verschiedenen Stellen des Profils (Membranbetrachtung).

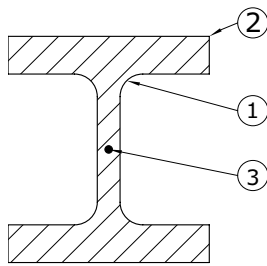


Bild (B027shuZ) Profil

Verständnisfrage 6

Vergleichen Sie die übertragbaren Torsionsmomente der folgenden zwei Profile ($d = 10$, $s = 1$):

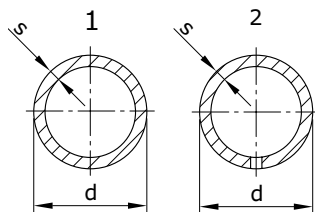


Bild (B019torZ) Profile

Verständnisfrage 7

Wie gross ist das übertragbare Torsionsmoment eines nicht gleich dicken Doppel-T-Profils (S235; $h = 100$, $b = 55$, $s = 4.1$, $t = 5.7$)? Wo ist die maximale Schubspannung anzutreffen?

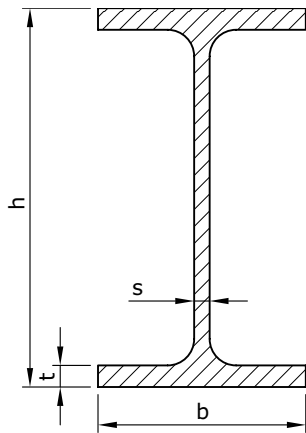


Bild (B021torZ) Doppel-T-Profil

Verständnisfrage 8

Berechnen Sie für das folgende Profil (Material: S235, $h = 100\text{ mm}$, $b = 55\text{ mm}$, $s = 5\text{ mm}$) das polare Widerstandsmoment und das maximal übertragbare Torsionsmoment. Vergleichen Sie das Resultat mit dem übertragbaren Moment des Doppel-T-Profiles!

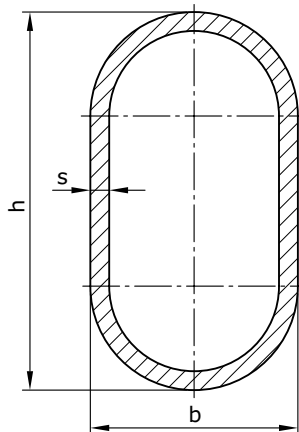


Bild (B020torZ) Profil

Verständnisfrage 9

Berechnen Sie das polare Widerstandsmoment des folgenden U-Profiles (S235; $h=60$, $b=30$, $t=4$)! Wie gross ist das maximal übertragbare Torsionsmoment?

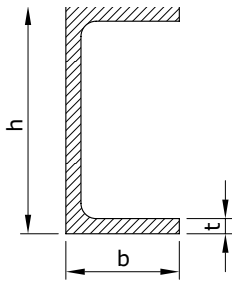


Bild (B023torZ) U-Profil

Verständnisfrage 10

Ordnen Sie die folgenden Profile quantitativ nach dem übertragbaren Torsionsmoment, bezogen zum Gewicht.

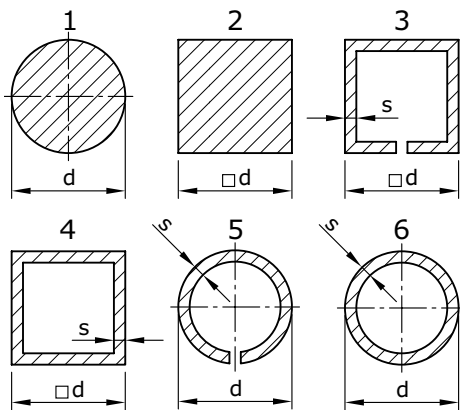


Bild (B024torZ) Profile

$$d = 10$$

$$s = 1$$

Verständnisfrage 11

Ein kurzer Rundstab ist auf Torsion und Querkraft ruhend belastet. Welche Schubspannungen treten qualitativ in den Punkten 1–9 im Querschnitt auf?

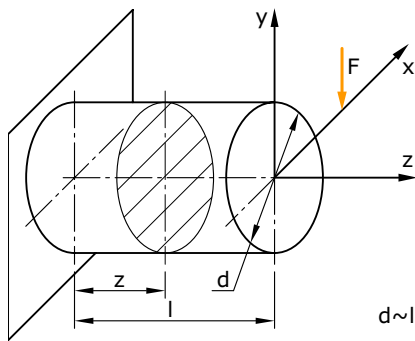


Bild (B015shuZ) Rundstab

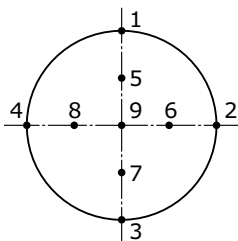


Bild (B016shuZ) Querschnitt

Verständnisfrage 12

Wo erwarten Sie in diesem Träger die grössten Schubspannungen?

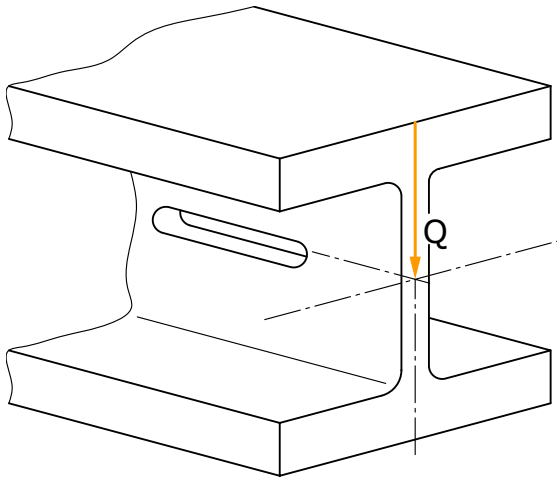


Bild (B020shuZ) Träger

Antwort 1

Der Stab versagt auf maximale Schubbeanspruchung, welche 45° zur Zugrichtung geneigt ist.

Antwort 2

$$I = (I + A \cdot s^2) = \frac{b \cdot h^3}{12} + A \cdot s^2 \quad (225)$$

$$I_1 = \frac{1}{6} a^4 \quad (226)$$

$$I_2 = \frac{4}{6} a^4 \quad (227)$$

$$I_3 = \frac{13}{6} a^4 \quad (228)$$

$$I_4 = \frac{26}{6} a^4 \quad (229)$$

Antwort 3

Aus Sicht der Vergleichsspannung ist dies identisch. Eine einschränkende Grösse könnte aber die Druckbelastung im Steg auf Knickung darstellen. Die Einbauvariante 2 ist stabiler.

Antwort 4

Der Stab versagt auf maximale Schubbeanspruchung in der Querschnittebene, welche um 90° zur Richtung des Torsionsmoments gedreht ist.

Antwort 5

$$\begin{aligned}\tau &\approx \infty \\ \tau &= 0 \\ \tau &= 0\end{aligned}\tag{230}$$

Antwort 6

Profil 1: geschlossenes Profil, Bredt'sche Formel:

$$\sigma_V = 2\tau = 2 \frac{M_T}{2A_m t} \leq \sigma_{zul}\tag{231}$$

$$M_T \leq \sigma_{zul} \cdot A_m t\tag{232}$$

Profil 2: offenes Profil

$$\sigma_V = 2\tau = 2 \frac{M_T}{W_T} \leq \sigma_{zul}\tag{233}$$

$$M_T \leq \frac{\sigma_{zul} \cdot W_T}{2}\tag{234}$$

Verhältnis:

$$\begin{aligned}\kappa &= \frac{M_{T1}}{M_{T2}} = \frac{A_m t}{\frac{W_T}{2}} = \frac{(d-s)^2 \frac{\pi}{4} \cdot s}{\frac{1}{3} \cdot (d-s)\pi \cdot \frac{s^2}{2}} \\ &= \frac{3}{2} \cdot \frac{d-s}{s} = \frac{3}{2} \cdot 9 = 13.5\end{aligned}\tag{235}$$

Antwort 7

$$\sigma_v = 2\tau_{\max} = 2 \cdot \frac{M_T \cdot s_{\max}}{\frac{1}{3} \sum b_i s_i^3} < \sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma_F}{S_F} \quad (236)$$

$$M_T < \frac{\sigma_F \cdot \frac{1}{3} \sum b_i s_i^3}{2 \cdot s_{\max} \cdot S_F} = \frac{235 \cdot \frac{1}{3} (2 \cdot 55 \cdot 5.7^3 + 88.6 \cdot 4.1^3)}{2 \cdot 5.7 \cdot 1.5} \quad (237)$$

$$= 121.3 \text{ Nm}$$

Die maximale Schubspannung liegt in der Mitte des Profils oben und unten:

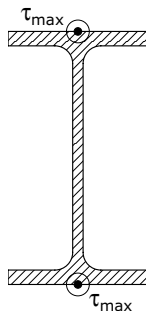


Bild (B022torZ) Schubspannung

Bemerkung: Das maximale Biegemoment ist rund 20 mal grösser!

Antwort 8

Man wendet die Bredt'sche Formel an:

$$W_T = 2A_m \cdot t_{\min}$$

$$W_T = 2 \cdot \left[(b-s) \cdot (h-b) + \frac{(b-s)^2 \pi}{4} \right] \cdot 5 \quad (238)$$

$$W_T = 2 \cdot [2250 + 1962] \cdot 5 = 42'120 \text{ mm}^3$$

$$M_T < \frac{\sigma_F \cdot W_T}{2 \cdot S_F} = \frac{235 \cdot 42 \cdot 120}{2 \cdot 1.5} = 3299 \text{ Nm} \quad (239)$$

Im Vergleich mit dem Doppel-T-Träger gleicher geometrischer Grösse kann ein 27 mal grösseres Torsionsmoment übertragen werden.

Antwort 9

$$W_T = \frac{1}{3} s^2 \cdot \sum b_i = \frac{1}{3} \cdot 4^2 \cdot \sum 60 + 2 \cdot 26 = 597 \text{ mm}^2 \quad (240)$$

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_F}{S_F} = \frac{235}{1.5} = 157 \text{ N/mm}^2 \quad (241)$$

$$\sigma_v = 2\tau_{max} = 2 \frac{M_T}{W_T} < \sigma_{zul} \quad (242)$$

$$M_T < \frac{\sigma_{zul} \cdot W_T}{2} = \frac{157 \cdot 597}{2} = 47 \text{ Nm} \quad (243)$$

Die maximale Schubspannung ist an der Oberfläche und bei gleich dicken Profilen überall identisch.

Antwort 10

	W_T	W_T	Fläche A	Verhältnis	Rang
1	$\frac{d^3\pi}{6}$	$\frac{10^3\pi}{6} = 196\text{mm}^3$	78.5	2.5	3
2	$0.208 \cdot d^3$	$0.208 \cdot 10^3 = 208 \text{mm}^3$	100	2.08	4
3	$\frac{1}{3}s^2 \sum b_i$	$\frac{1}{3}1^2 [2 \cdot (10 + 8)] = 12\text{mm}^3$	36	0.33	6
4	$2 A_m \cdot s$	$2 \cdot 9^2 \cdot 1 = 162 \text{mm}^3$	36	4.50	2
5	$\frac{1}{3}s^2 \cdot U$	$\frac{1}{3}1^2 \cdot 9\pi$	28	0.33	5
6	$2 A_m \cdot t$	$2 \cdot \frac{9^2\pi}{4} \cdot 1 = 127\text{mm}^3$	28	4.53	1

Tabelle (T002ebsZ)

Antwort 11

Schubspannung aus der Torsion:

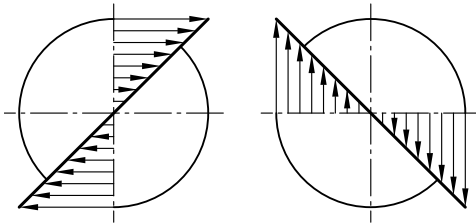


Bild (B017shuZ) Schubspannung aus der Torsion

Schubspannung aus der Querkraft:

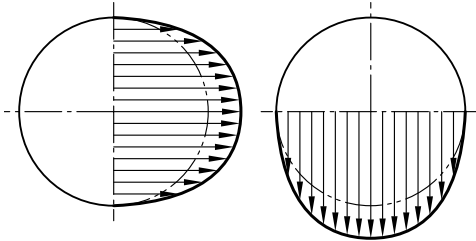


Bild (B018shuZ) Schubspannung aus der Querkraft

Superposition:

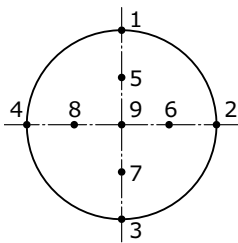


Bild (B016shuZ) Superposition

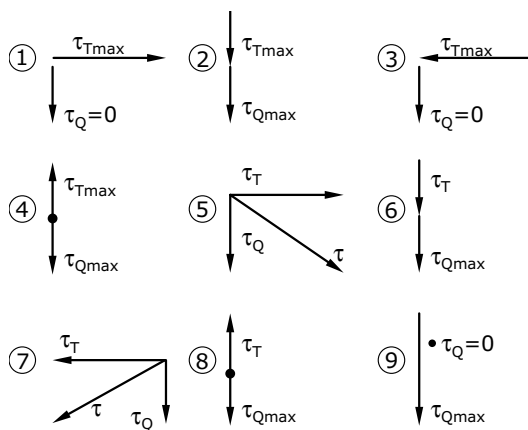


Bild (B019shuZ) Superposition

Antwort 12

Prinzipiell in der Mitte des Steges (1):

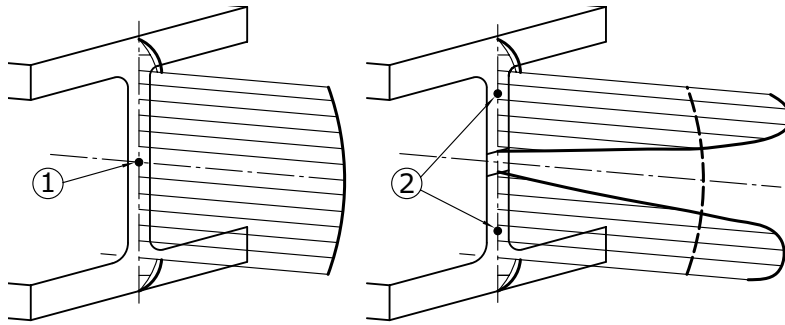


Bild (B021shuZ) Schubspannungen

Dadurch, dass er geschlitzt ist, werden die Schubspannungen dort nochmals überhöht.

Relevante Cases

- [Riementrieb](#)
- [Radaufhängung](#)
- [T-Profil](#)

Die Tabelle (T001ebsZ) zeigt, wie die Fallstudien mit den einzelnen Beanspruchungsfällen zusammenhängen.

Case	Kapitel der Sektion „Elementare Beanspruchungsfälle“					
	Zug	Biegung	Torsion	Schub	Flächen- pressung	Druck (rot.symm.)
T-Profil	x	x				
Radachse		x			x	
Riementrieb		x	x	x		
Panorama- Restaurant					x	
Stahlbram- men-Trans- port					x	
Wasserstoff- flasche						x
Radaufhän- gung		x		x		

Tabelle (T001ebsZ) Engineering-Cases