

Grundlagen der Ökologie I

Skript für den Bachelor-Studiengang in Architektur
an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in
Zürich

Educational Material

Author(s):

Schierz, Christoph

Publication date:

2005

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005705395>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Skript für den Bachelor-Studiengang in Architektur
an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich
Departement Architektur

Grundlagen der Ökologie I

Dr. sc. nat. Ch. Schierz

*Eidgenössische Technische Hochschule (ETH)
Zentrum für Organisations- und Arbeitswissenschaften (ZOA)
Fachbereich Umweltergonomie
Leonhardstrasse 27 / ETH-Zentrum, LEO B9.1
CH-8092 Zürich*

E-Mail: cschierz@ethz.ch

© Zürich, 24. Oktober 2005

Grundlagen der Ökologie I

D-ARCH (Bachelor)
HIL E4

Winter 2005/06
Do: 8⁰⁰ – 9⁴⁵ Uhr

<i>Datum</i>	<i>Inhalt</i>	<i>Referent</i>
27.10.	Einführung / Umweltwahrnehmung	Ch. Schierz
3.11.	Praxisbezug: Beleuchtung in der Innenarchitektur	Sylvia Hubalek
10.11.	Sehen / Photometrie / Chronobiologie	Ch. Schierz
17.11.	Klima / Thermoregulation	Ch. Schierz
24.11.	Der klimatische Raum	Ch. Schierz
1.12.	(Seminarwoche)	(keine Vorlesung)
8.12.	Praxisbezug: Schadstoffe im Innenraum	Roger Waeber
15.12.	Hören / Akustik	Ch. Schierz
22.12.	Der akustische Raum	Ch. Schierz
12.1.	Anthropometrie / Gestaltungskonzepte für Büroräume	Ch. Schierz
19.1.	Ergonomie in der Planung von Raum und Einrichtung	Jürgen Held
26.1.	Test als Prüfungsvorbereitung Testbesprechung	Ch. Schierz
2.2.	(Entwurfsarbeiten)	(keine Vorlesung)
9.2.	(Entwurfsarbeiten)	(keine Vorlesung)

Thema: Die Umwelt im Gebäude: Arbeits- und Wohnraumhygiene

Ziel: Kennen lernen der Grundvoraussetzungen des menschlichen Lebens und der daraus abzuleitenden Anforderungen an die Gestaltung von Umwelt und Technik.

Start der Vorlesung: 27. Okt. 2005

Bescheinigung: Elektronisch oder wenn gewünscht, im Verlaufe der Testbesprechung vom 26. Jan. 2006

(Ch. Schierz / 24.10.2005 / cschierz@ethz.ch)

0.1	Inhalt		
0 Übersicht	0-2		
0.1 Inhalt	0-3		
1 Umweltwahrnehmung	1-1		
1.1 Einleitung	1-1		
1.2 Wahrnehmungsmodell	1-1		
Perzeption	1-1		
Stimmungssystem, affektive Bewertung	1-1		
Attribuierung	1-2		
1.3 Gestalttheorie	1-2		
Einleitende Gedanken zur Gestaltpsychologie	1-2		
Gruppierung	1-3		
Konstanz	1-4		
Strukturierung	1-4		
Kontext	1-5		
Vorgeschichte, Seherfahrung	1-6		
1.4 Mentale Konzepte	1-7		
Die Sicht des Architekten	1-8		
Die Sicht des Lichttechnikers	1-9		
Konsequenzen bei der Planung	1-9		
2 Sehen	2-1		
2.1 Einleitung	2-1		
Aufbau des Auges	2-1		
Aufbau der Netzhaut	2-1		
Funktionsweise der Netzhaut	2-2		
2.2 Hell und Dunkel	2-3		
Adaptation	2-3		
Eigengrau	2-4		
Schwarzschwelle	2-4		
Unterschiedsschwelle	2-4		
Psychometrische Gesetze	2-5		
Luminanzschwelle	2-5		
Helligkeitskonstanz	2-5		
2.3 Kontrast	2-6		
Infeld-Umfeld-Antagonismus	2-6		
Physiologische Blendung	2-7		
2.4 Sehschärfe	2-7		
Definition von Sehschärfe und Visus	2-7		
Sehschärfe und Alter	2-7		
Sehschärfe und Netzhautort	2-8		
Sehschärfe und Leuchtdichte	2-8		
Sehschärfe und Kontrast	2-9		
Sehschärfe und Farbe	2-9		
2.5 Farbsehen	2-10		
Farbraum	2-10		
Farbverarbeitung	2-11		
„Metaeffekte“	2-12		
2.6 Biologische Lichtwirkungen	2-13		
Stabilisieren der inneren Uhr	2-13		
Steigerung des Wachheitsgrads	2-13		
Lichttherapie gegen saisonale Depressionen	2-14		
Dosis-Wirkungsbeziehung	2-14		
Aspekte einer Photometrie biologischer Lichtwirkungen	2-15		
Leben wir in der „biologischen Dunkelheit“?	2-18		
3 Beleuchtung	3-1		
3.1 Einleitung	3-1		
3.2 Photometrie	3-2		
Lichtstrom und Lichtausbeute	3-2		
Lichtstärke	3-2		
Beleuchtungsstärke	3-3		
Leuchtdichte	3-3		
3.3 Nutzen des Lichts	3-4		
Sehen mit Licht	3-4		
Aktivieren mit Licht	3-7		
Wohlfühlen mit Licht	3-8		
Schützen mit Licht	3-9		
3.4 Lichtquellen	3-11		
Lampen	3-11		
Leuchten	3-13		
Tageslicht	3-14		
3.5 Güte Merkmale der Beleuchtung	3-15		
Beleuchtungsstärke	3-16		
Blendung	3-16		
Modelling	3-17		
Lichtfarbe	3-17		
Farbwiedergabe	3-18		
Flimmern	3-18		

4 Klima	4-1	6 Arbeitsplatz-Ergonomie	6-1
4.1 Klimamessung	4-1	6.1 Einleitung	6-1
Lufttemperatur	4-1	Konzipierende Ergonomie	6-4
Strahlungstemperatur	4-1	Korrigierende Ergonomie	6-4
Luftgeschwindigkeit	4-2	Unfallverhütung	6-4
Luftfeuchte	4-3	6.2 Anthropometrie	6-5
4.2 Thermophysiology	4-5	Statische Anthropometrie	6-5
Thermosensoren	4-5	Funktionelle Anthropometrie	6-7
Wärmebilanz	4-6	Anthropometrische Daten	6-11
Thermoregulation	4-10	6.3 Arbeitsplatzgestaltung	6-17
Hitzearbeit	4-11	Arbeitshaltung	6-17
Kältearbeit	4-12	Der Sehraum	6-18
4.3 Globaler thermischer Komfort	4-13	Der Greifraum	6-21
Behaglichkeit	4-13	Beispiel Bildschirm-Arbeitsplatz	6-22
Komfortbedingungen	4-13	Auswirkungen der Arbeitsgestaltung	6-22
Komfortklima	4-16		
4.4 Lokaler thermischer Komfort	4-18	7 Büroraumkonzepte	7-1
Zugluft	4-18	7.1 Einführung	7-1
Asymmetrie der Strahlung	4-18	7.2 Büroanforderungen	7-2
Gefälle der Raumtemperatur	4-19	7.3 Kombi-Büro	7-4
4.5 Adaptive Komfortmodelle	4-19	7.4 Wirtschaftlichkeit	7-6
Verhaltensanpassung	4-19	7.5 Business-Club	7-7
Habituation und Aussenklima	4-20	7.6 Das Büro der Zukunft	7-7
Erwartetes Raumklima	4-20	Build-It	7-8
		Ambiente	7-8
		Office 21	7-10
5 Hören	5-1	8 Literatur	8-1
5.1 Physikalische Grundlagen	5-1		
Schallwellen	5-1		
Frequenz	5-1		
Schallpegel	5-1		
Energie und Distanz	5-2		
Zeitlicher Verlauf	5-3		
Geräuschbeispiele	5-4		
Schallmessung	5-5		
5.2 Hören	5-6		
Anatomische Grundlagen	5-6		
Physiologie	5-8		
Schallbewertung	5-9		
5.3 Wirkung von Lärm	5-13		
Gehörschädigung	5-14		
Kommunikationsstörungen	5-15		
Lärmbelästigung	5-17		
Extraaurale, unspezifische Lärmwirkungen	5-17		
5.4 Lärmschutz	5-18		
Schutzmassnahmen	5-18		
Grenzwerte	5-20		

Weitere verteilte Unterlagen:

- Praxisbezug Beleuchtung
von S. Hubalek (Zumtobel Staff AG)
- Praxisbezug Innenraumbelastungen
von R. Waeber (Bundesamt für Gesundheit)

1

Umweltwahrnehmung

1.1

Einleitung

Die visuelle Wahrnehmung wird hier als Beispiel für psychologische Wahrnehmungsprozesse dargestellt. Im Prinzip wäre eine analoge Darstellung auch für die anderen Sinne – insbesondere auch für das Gehör – möglich. Ziel ist zu zeigen, dass die Übertragung von Information aus der äusseren Umwelt in die innere subjektive Welt nicht als eins-zu-eins Prozess erfolgt. Der bewusste Informationsfluss ist sehr klein. Dadurch, dass aber ganze Informationseinheiten im Laufe des Lernens gebildet werden können, ist der Informationsprozess dennoch sehr effizient.

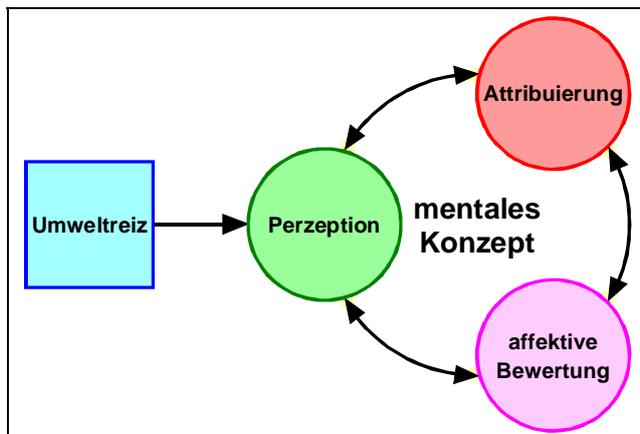


Abb. 1-1: Kugelmodell der Wahrnehmung von Umweltreizen und deren Bewertung. Perzeption, affektive Bewertung und Attribuierung bestimmen das mentale Konzept der wahrgenommenen Umwelt.

Eine wesentliche Eigenschaft der Verarbeitung der sensorischen Information im Nervensystem ist die Reduktion auf Merkmale bzw. Kodierungseinheiten. Elemente verschiedener Merkmale können parallel, Elemente eines Merkmals nur nacheinander aufgenommen werden. Zu den Merkmalen gehören angeborene und erlernte Synthesestrategien, die dann die ein-

zelnen Elemente zu dem gesehenen „Bild“ bzw. mentalen Konzept im Kopf zusammenführen.

1.2

Wahrnehmungsmodell

In Abb. 1-1 wird ein vereinfachtes Modell der Umweltwahrnehmung präsentiert. Dieses soll im folgenden diskutiert werden.

Perzeption

Will man die Wirkungen von Licht auf den Menschen untersuchen, müssen verschiedene Wirkmechanismen berücksichtigt werden. Über einen spezifischen, das heisst die sensorische Information erhaltenden Pfad gelangt das Bild vom Auge zu einem Perzeptionssystem. Hier ist die visuelle Struktur der gesehenen Umwelt codiert und abgespeichert. Dieser Prozess wird in Kap. 1.3 anhand der Methoden der Gestaltpsychologie ausführlicher erläutert. Ein unspezifischer Pfad folgt der sogenannten retinohypothalamischen Bahn. Diese Bahn dient beispielsweise der Anpassung der circadianen Rhythmik an den Tageslichtverlauf (siehe Kap. 2.6).

Stimmungssystem, affektive Bewertung

Die momentane Gefühlslage veranlasst die emotionale Färbung, bzw. eine affektive Bewertung des Gesehenen. Beispiele sind übergeordnete Gefühle der Wut, der Angst, der Freude, der Trauer oder der Neugier, welche die Art der Wahrnehmung eines visuellen Raums und seiner Beleuchtung beeinflussen. Der visuelle Raum wiederum wirkt auf das Stimmungssystem über den spezifischen Pfad und das Per-

zeptionssystem beruhigend, aggressiv, anregend, festlich stimmend etc.

Es ist allgemein bekannt, dass die Farbgebung die Stimmungslage eines Menschen beeinflussen kann. Diese Wirkung gelangt mit grosser Wahrscheinlichkeit aus den perzeptiven Farbzentren neuronal zum Stimmungssystem und dürfte bei gesättigten Farben stärker zum Ausdruck kommen. Die wahrgenommene Farbe führt zu affektiven Bewertungen wie „kalt“ (für Blau), „erhaben“ (für Purpur), „leicht“ (für Gelb) etc. (vgl. auch Abb. 2-25).

Affektive Bewertungen sind für jede Person Ausdruck ihrer persönlichen Geschichte, ihres Wissens, ihrer Erwartungen und mithin ihrer aktuellen kulturellen Zugehörigkeit.

Attribuierung

Die im Wahrnehmungssystem entstehenden subjektiven mentalen Konzepte über die Umwelt stossen mit bereits vorhandenen Wertvorstellungen und Haltungen der Person gegenüber dem Gesehenen zusammen: Es findet eine Bewertung im Sinne einer Attribuierung statt, welche sich positiv oder negativ auf die Gesundheit des Betroffenen auswirken kann. Diese Bewertung ist eine subjektive Realität und braucht nicht mit der erkannten naturwissenschaftlichen, der photometrisch gemessenen Realität übereinzustimmen.

Ein Beispiel sind Beschwerden, welche direkt mit der Beleuchtung durch Leuchtstofflampen in Zusammenhang gebracht werden. Aussagen wie „diese Lampen geben ein kaltes Licht“ auch bei warmweisser Lichtfarbe oder „diese Lampen machen krank“ sind Ausdruck einer negativen Attribuierung. Wiederholt erschienene Arbeiten, die eine belastende Wirkung von Leuchtstofflampen belegen sollten, wurden ebenso häufig widerlegt. Zusätzlich existieren weitere Arbeiten zur Unbedenklichkeit von

Leuchtstofflampenlicht. Diese Unbedenklichkeit wird für Anlagen behauptet, welche korrekt nach den Güte Merkmalen für Beleuchtung installiert sind (siehe Kap. 3.5). Trotz dieser wissenschaftlich belegten Unbedenklichkeit kann die negative Attribuierung einer Person gegenüber Leuchtstofflampen zu gesundheitlichen Störungen führen. Die Attribuierung beeinflusst auch die Perzeption sowie das Stimmungssystem. So zieht die von einer Person negativ attribuierte Leuchtstofflampe ständig die Aufmerksamkeit auf sich und erzeugt negative Gefühle.

1.3

Gestalttheorie

Einleitende Gedanken zur Gestaltpsychologie

Gedanken sind mehr als die Summe der Aktivitäten der einzelnen Nervenzellen; sie sind das kollektive Verhalten vieler Nervenzellen. Durch Erprobung und Erfahrung ist Anfangs des 20. Jahrhunderts die Gestaltpsychologie auf Konzepte der Wahrnehmungsorganisation gestossen. Auch wenn Teile der Gestaltpsychologie im Laufe der Zeit umstritten waren, hat sie sich doch auf einer die Phänomene beschreibenden Ebene innerhalb der Kognitionspsychologie einen Platz erhalten können. Inzwischen gibt es sogar Ansätze, welche die neuro- und die gestaltpsychologischen Vorstellungen als zwei Seiten einer Medaille in einem umfassenden Modell zu kombinieren versuchen.

Was ist nun eine „Gestalt“? Es ist ein von der Umgebung abgehobener Wahrnehmungsinhalt, dessen Einzelheiten als zusammengehörig aufgefasst werden. Gestalttheoretische Konzepte werden im folgenden unter den Begriffen Gruppierung, Strukturierung, Konstanz, Kontext und Vorgeschichte bzw. Erfahrung einzeln beschrieben.

Gruppierung

Wahrnehmung unterliegt einer spontanen Tendenz zur gestalthaften Organisation. Wir können unmöglich alles gleichzeitig sehen. Diese Schwierigkeit ist zu meistern, wenn nicht die vollständigen Bilder übertragen werden. Es müssen nur die im Zusammenhang wichtigen Merkmale und Muster, sowie deren Verknüpfung gespeichert werden. Beispiele archetypischer Muster sind Linien, Kreuzungspunkte, Winkel, Endpunkte von Linien, Kontraste und Farben.

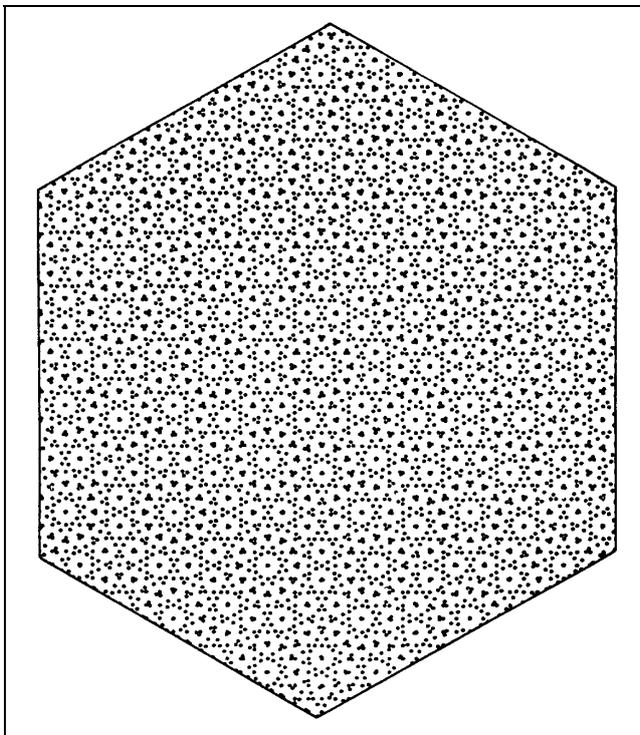


Abb. 1-2: Gruppierung: Mit unwiderstehlicher Kraft werden wir in dieser Figur zur Wahrnehmung von Kreisen gezwungen.

Das heisst, der erste Schritt der Informationsverarbeitung besteht in einer Zerlegung des Bildes in Muster, welche weniger Platz im Gedächtnis benötigen. Mit angeborenen und vor allen Dingen erlernten Synthesestrategien gelingt es uns unbewusst, aus den Mustern das mentale Konzept einer konsistenten „objektiven“ Welt zu konstruieren und letztendlich bewusst wahrzunehmen. Die Muster werden „gruppiert“. Abb. 1-2 zeigt, wie der Synthese-

prozess ein Punktemuster zu Kreisen gruppiert. Die durch Gruppierung entstandenen Muster bilden wiederum die Basis für weitere Synthesen im nächsten Schritt. Mit zunehmender Seherfahrung können die Konzepte direkt abgerufen werden, ohne dass noch Konstruktionschritte notwendig sind.

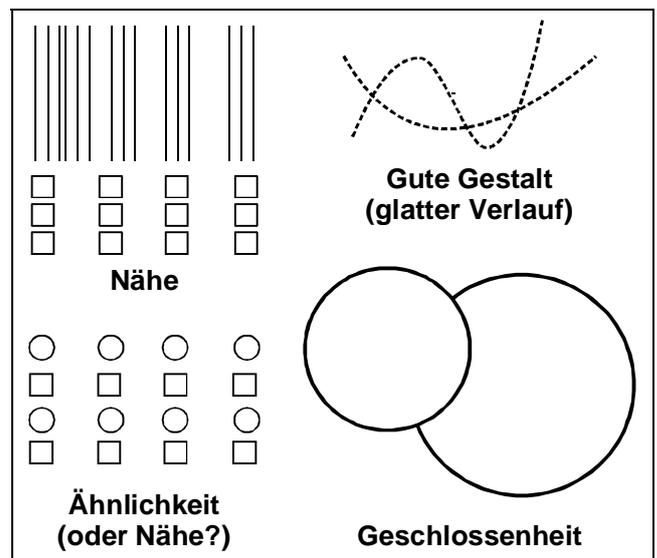


Abb. 1-3: Gruppierungsprinzipien

Die Gestaltpsychologie hat verschiedene Gesetze herausgearbeitet, die anhand konkreter Beispiele demonstrieren, wie sich „Gestalt“ ausbildet und zeigt (Abb. 1-3). So werden etwa Muster zusammengefasst, welche nahe beieinander sind, welche ähnlich sind, welche einen glatten Verlauf (= „gute Gestalt“) ergeben, welche miteinander verbunden sind oder welche übereinstimmendes Verhalten zeigen („gemeinsames Schicksal“). Verallgemeinert können diese Gesetze als „Prägnanztendenz“ zusammengefasst werden.

Beispiele, wie in der Architektur Gruppierung als Mittel der Gestaltung Verwendung findet, sind an Fassaden zu erkennen, die dem Gebäude je nach Anordnung und Form der Fenster eine horizontale, vertikale oder auch eine gewollt undefinierte Struktur geben (Abb. 1-4).



Abb. 1-4: Gruppierungsprinzipien der Ähnlichkeit und der Nähe, demonstriert an architektonischen Fassaden.

Konstanz

„Gute“ Gestalten erhalten ihre Gestalt-Qualitäten der Form oder Farbe trotz Veränderung der Darbietungs-Bedingungen. Das Zentrum unserer Netzhaut sieht viel genauer als die Peripherie. Würde das Bild im Auge 1:1 umgesetzt, würde eine stabile Umwelt sofort instabil, wenn wir die Blickrichtung nur ein wenig ändern. Ständig ändernde Bildverzerrungen würden uns verwirren. Niemand hat solche Verzerrungen wirklich gesehen, obwohl sie vorhanden sind. Wir haben offensichtlich gelernt, sie zu unterdrücken und uns ein „richtiges“ subjektives Bild der objektiven Welt zu erstellen.

Diese vorgegebenen und erlernten „Korrekturprozesse“, heissen Konstanzmechanismen. Als Beispiele zu erwähnen sind die Konstanz von Winkeln, die Konstanz von Farben, die Konstanz von Grössen und die Helligkeitskonstanz. Letztere wird in Kap. 2.2 behandelt.

Eine grosse Bedeutung kommt der Konstanz der Grösse zu. Wir lernen Objekte in der ihnen zukommenden Grösse und nicht in der Grösse des Netzhautbildes zu sehen. Die eigene Hand

bei zwei verschiedenen Entfernungen nach ihrer Grösse beurteilt, wird im allgemeinen als gleich gross wahrgenommen (Abb. 1-5). Die Konstanz der gesehenen Grösse wird stark von der Umgebung beeinflusst, denn Objekte sehen wir üblicherweise in der Geometrie eines dreidimensionalen Raumes. So ist eine Schätzung der Grösse auch nur dann einigermassen sicher möglich, wenn die Umgebung unserer Erfahrung entspricht. Für ein richtiges Raumerlebnis sind daher Sehwinkel wichtig, wie wir sie gewohnt sind. Es bedarf vieler Seherfahrung, um beim Betrachten eines Raumes auf einer zweidimensionalen Photographie oder auf einem Bildschirm Realität zu erleben.

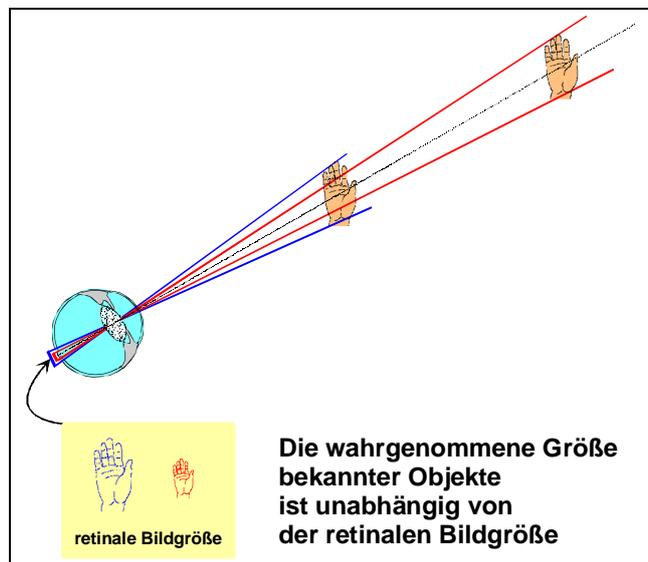


Abb. 1-5: Zur Grössenkonstanz. Ändert sich die Distanz der Hand zum Auge, entsteht nicht der Eindruck, sie würde aufgeblasen oder geschrumpft, obwohl dies – geometrisch gesehen – mit dem Bild auf der Netzhaut (Retina) geschieht.

Strukturierung

Gestalten heben sich als abgesonderte, umgrenzte, gegliederte, möglichst einheitliche geschlossene Figuren von einem unstrukturierten Grund ab. Dies ist, wie Vexier- und Suchbilder erkennen lassen, nicht immer einfach. Es hängt z.B. davon ab, was wir als Vorder- und was als Hintergrund ansehen bzw. worauf wir unsere Aufmerksamkeit richten. Der Prozess einer Un-

terscheidung zwischen Figur und Grund wurde von E. Rubin 1921 beschrieben (Abb. 1-6).

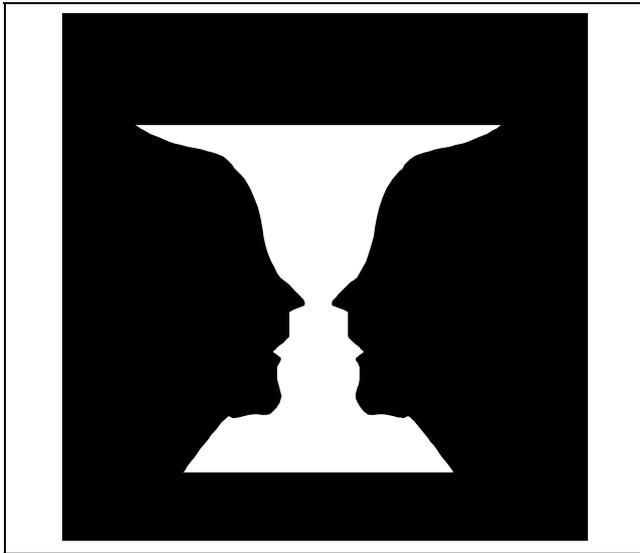


Abb. 1-6: Rubinsche Vase: Je nach dem, was wir als Vordergrund und was als Hintergrund wahrnehmen, sehen wir unterschiedliche Objekte.

Er drückt jedoch nur einen Teilaspekt der Strukturierung aus. Ausschlaggebend für die Formwahrnehmung sind die Grenzlinien zwischen Flächen. Wir müssen entscheiden, welchem durch sie begrenzten Teil wir sie zuordnen müssen. Bei Bildern wie der Rubinschen Vase findet die Zuordnung ähnlich oft zur einen wie zur anderen Seite statt. Oft begünstigen aber geschlossene Linien, Symmetrien und Orientierungen oder aber die Seherfahrung die eine der beiden Zuordnungen.

In einer neuen Umgebung müssen wir uns ein „Bild vom Raum“ – ein mentales Raumkonzept machen, indem wir den Raum Punkt für Punkt abtasten. Im Laufe der Zeit lernen wir allerdings, welche Punkte von Bedeutung sind. Der Architekt erfasst sehr schnell Konzept und Detail seiner gebauten Umwelt, während der Laie angestrengt nach Kriterien einer Bewertung sucht und diese oft mit solchen ihrer persönlichen Tätigkeiten oder Absichten vermischt. Suchstrategien sind von uns nur bedingt frei wählbar. So sind bewegte Objekte, helle oder

gar blinkende Lichter sehr auffällig und bestimmen daher mit, wie wir den wahrgenommenen Raum strukturieren. Eine ungünstige visuelle Struktur kann besonders bei Sehbehinderten zu Irritationen und Fehlverhalten führen (Abb. 1-7).



Abb. 1-7: Hauptbahnhof Zürich: Durch verwirrende Linien-Strukturen werden Sehbehinderte dazu geleitet, nach rechts zu gehen und in die Schaufenster zu stossen.

Kontext

Jede Wahrnehmung ist in den Gesamtzusammenhang des Erlebens des wahrnehmenden Subjekts eingebunden. Die in Abb. 1-8 dargestellten mittleren Zeichen bekommen im vertikalen und im horizontalen Kontext eine andere Bedeutung.

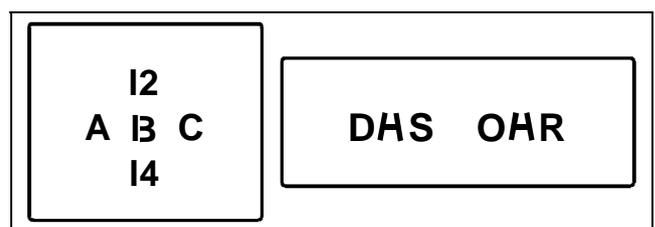


Abb. 1-8: Kontext: Die Zeichen in der Mitte können nur auf Grund der umgebenden Zeichen erkannt werden. Dazu ist auch Seherfahrung notwendig.

Wenn Information aus dem Kontext oder aus allgemeinem Wissen die Wahrnehmung steuert, wird sie konzeptgesteuerte „Top-down-Information“ genannt. Dies, weil allgemeines Wissen oder die mentalen Konzepte auf einer hohen Ebene bestimmen, wie auf einer niedrigeren Ebene interpretiert werden soll. Es ist ei-

ne der Hauptfragen der Wahrnehmungsforschung, wie „Top-down-Informationen“ mit datengesteuerten „Bottom-Up-Informationen“, welche von den Sinnesorganen kommen, kombiniert werden (Abb. 1-9).

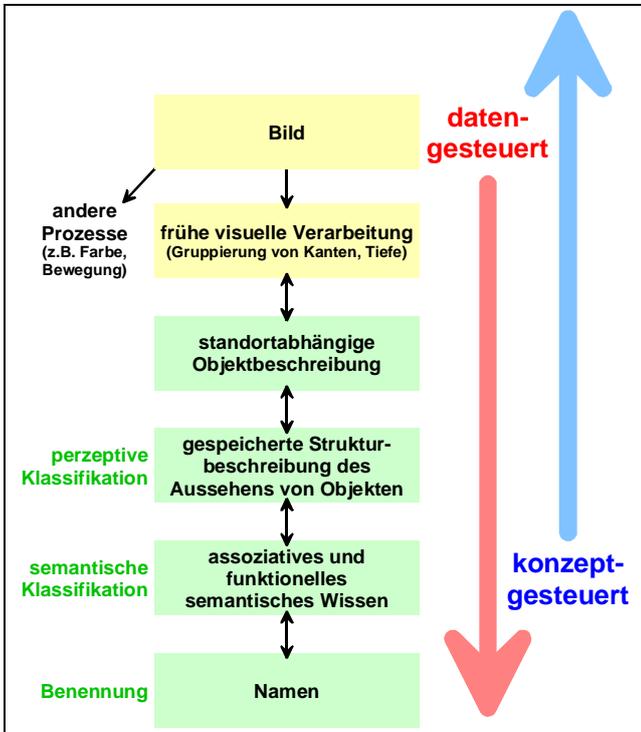


Abb. 1-9: Modell zur Objekterkennung (nach Humphreys & Bruce, 1989). Vom Bild auf der Netzhaut bis zum Erkennen, Identifizieren und Benennen eines Objekts finden mehrere Abstraktionsschritte statt (datengesteuert). Wesentlich dabei ist, dass die Seherfahrung dafür unabdingbar ist (konzeptgesteuert). In der Abbildung sind daher meistens Doppelpfeile eingetragen.

Vorgeschichte, Seherfahrung

Welche Gestalten wir wahrnehmen und als bedeutungsvoll empfinden, hängt davon ab, was wir unmittelbar zuvor erlebt haben und welche mentalen Konzepte über unsere Umwelt wir uns in unserem Kulturkreis im Laufe der Evolution und der Entwicklung nach der Geburt angeeignet haben. «So wie die äussere Welt der Objekte mit Licht beleuchtet wird, so wird die innere Welt mit Konzepten beleuchtet: Konzepte, welche durch die Bilder auf der Netzhaut

des Auges ausgewählt werden». Mit diesem Satz beginnt ein Artikel von Richard L. Gregory, in welchem er zwei Theorien der visuellen Wahrnehmung diskutiert¹. Er beschreibt die ingenieurwissenschaftliche Sicht mit einem Reiz-Antwort-System, die psychologische Sicht hingegen als „Look-Up“-Wahrnehmung.



Abb. 1-10: Doppeldeutigkeit von Bildern: Je nach Standpunkt ist einmal eine alte Frau und zum andern ein junges Mädchen zu sehen

Einem Reiz-Antwort-System liegt die Vorstellung der Verarbeitung von „Bottom-Up-Information“ zugrunde. Es arbeitet im wesentlichen dadurch, dass ein äusserer Reiz über ein Netz „innerer Schalter“ direkt eine Antwort steuert oder kontrolliert: Die Verkehrsampel wechselt von rot nach grün, als Antwort wech-

¹ Gregory R.L.: Seeing in the light of experience. Trotter-Paterson Memorial Lecture. Lighting Res. and Technology V3 N4 (1971) P246-250.

selt der Autofahrer seinen Fuss vom Brems- zum Gaspedal. Typisch für solche Systeme sind die damit verbundenen Reaktionszeiten. Nach der Theorie der „Look-Up“-Wahrnehmung hingegen, liegen mentale Konzepte möglicher Umweltgestaltungen bereits als Seherfahrung, als mentale Konzepte vor. So beinhaltet das mentale Konzept, welches wir von einem Schlagschatten haben, sowohl die dafür notwendige Anordnung von Objekt und Lichtquelle als auch die Tatsache, dass der Hell-Dunkel-Wechsel keine Eigenschaft der beschatteten Fläche ist (siehe auch Abb. 2-8). Durch Information vom Auge wird das passendste oder das wahrscheinlichste Konzept ausgewählt und zur Wahrnehmung gebracht. Wie Abb. 1-10 zeigt, sind dabei unterschiedliche Interpretationen möglich.

Im Gegensatz zu Reiz-Antwort-Systemen besitzt eine „Look-Up“-Wahrnehmung die folgenden drei, auf den ersten Blick überraschenden, jedoch überlebenswichtigen Vorteile:

- a) Die „Look-Up“-Wahrnehmung kann ohne Zeitverzögerung arbeiten. Es sind nicht nur mentale Konzepte über das Aussehen von Objekten abrufbar, sondern auch solche über die Veränderungen der Umwelt mit der Zeit. Die „Look-Up“-Wahrnehmung schliesst aus dem abgespeicherten Bekannten mit einer gewissen Fehlerwahrscheinlichkeit auf das Zukünftige.
- b) Die „Look-Up“-Wahrnehmung kann auf Eigenschaften schliessen, welche nicht direkt durch die Sinne wahrnehmbar sind. So ist man etwa in der Lage, durch Anschauen eines Tisches seine Kratzfestigkeit zu beurteilen. Dies erfolgt natürlich nicht durch eine Eigenschaft des Lichts, welche „Härte“ signalisiert. Vielmehr wird durch die Sehinformation das mentale Konzept eines ähnlichen Tisches aktiviert, welches dann die Information über den Härtegrad liefert.

- c) Die „Look-Up“-Wahrnehmung kann Informationslücken füllen. Sei es, wenn die Information kurzzeitig ausfällt – etwa während eines Lidschlags –, oder wenn diese den Sinnen nicht zugänglich oder sogar objektiv nicht vorhanden ist. Wie Abb. 1-11 zeigt, werden die Lücken im Sinne der „guten Gestalt“ ausgefüllt: einfach, kontinuierlich, mit innerer Stimmigkeit.

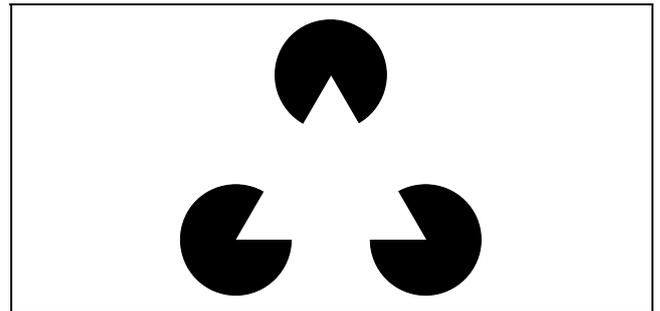


Abb. 1-11: Kanizsa-Dreieck: Die fehlende Information von den Dreiecksseiten wird in der Wahrnehmung ergänzt.

Aufgrund dieser Eigenschaften ist es mit der „Look-Up“-Wahrnehmung – im Gegensatz zum Reiz-Antwort-System – möglich, dass der Mensch auf einen fehlenden Reiz reagiert. Zum Beispiel kann das Fehlen von sonst üblichen Geräuschen aus dem Kinderzimmer zu einer Alarmreaktion bei den Eltern führen.

1.4 Mentale Konzepte

Für Lichtplaner und Arbeitswissenschaftler stellt sich immer wieder das Problem, die Beleuchtungswünsche der Architekten und die Anforderungen an eine arbeitsgerechte Beleuchtung unter einen Hut zu bringen. Dies liegt daran, dass Architekten und Lichttechniker einen unterschiedlichen Zugang zum Thema haben: Der Architekt berücksichtigt eher künstlerisch-psychologische Aspekte einer Beleuchtungsanlage und arbeitet häufig mit Blickfängen, während der Lichttechniker mehr eine ingenieurwissenschaftliche Anschauung vertritt und sich an Sehleistungskriterien orientiert (Abb. 1-12).

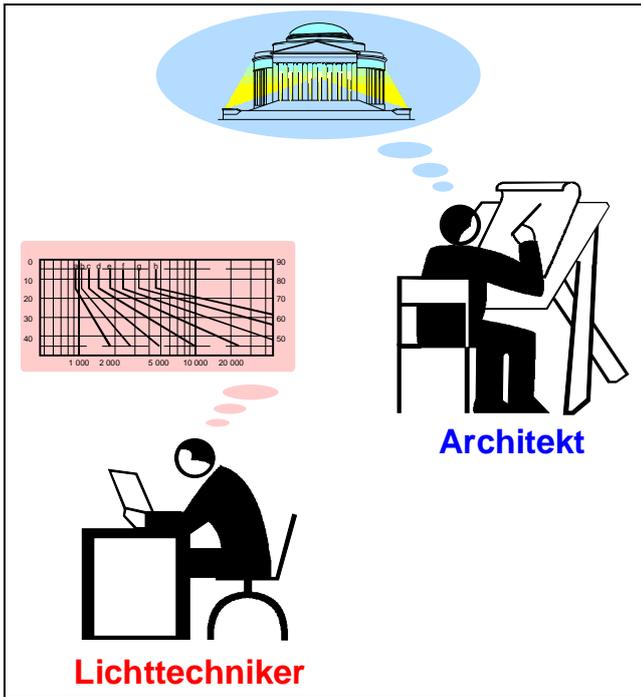


Abb. 1-12: Lichttechniker und Architekt wenden sich den Rücken zu: Ihre mentalen Konzepte, über Beleuchtung unterscheiden sich stark.

Die Sicht des Architekten

Die unterschiedliche Sichtweise sei an zwei Textzitate zur Beleuchtung von Museen illustriert. Hier die Sichtweise des Architekten:

«Man spürt, wie das Gebäude das Tageslicht aufnimmt, man ahnt den Sonnenstand, die Himmelsrichtungen und erlebt Lichtmodulationen, verursacht durch die unsichtbare und doch spürbare Umgebung draussen. Und im Inneren der Säle wird das Licht von den drei Wandscheiben moduliert, welche die Säle tragen.
Die Konstellation dieser Scheiben im Raum gibt dem Lichteinfall unterschiedliche Richtungen, bewirkt verschiedenartig Abschattungen und Reflexionen. Die Lichtstimmung ist temperiert. Der Raum gewinnt Tiefe. Der ständig wechselnde Lichteinfall erzeugt den Eindruck, als ob das Gebäude atme. Alles erscheint durchlässig, durchlässig für das Licht, aber auch für den Wind und für das Wetter, als käme das Gebäude hier oben ohne luftdichte Hülle aus.»

Es ist verständlich, dass ein Lichttechniker mit dieser Beschreibung des Architekten Peter Zumthor zum Kunsthaus Bregenz Schwierigkeiten hat. Was ist eine „temperierte Lichtstimmung“, was ein Gebäude, das „atmet“? Die Schwierigkeit entsteht dadurch, dass er sich

Beleuchtungen als technische Systeme vorstellt, die man allenfalls messen kann.

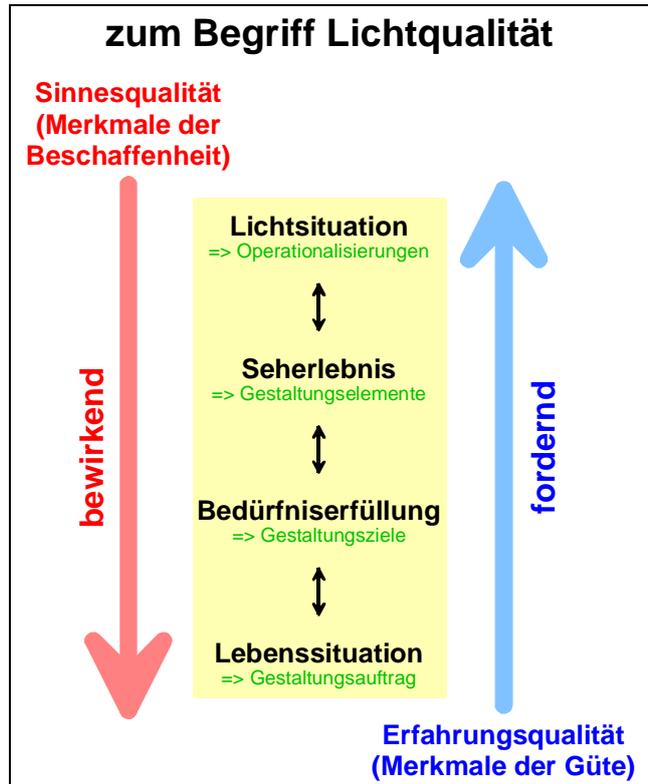


Abb. 1-13: Verschiedene mentale Konzepte zur Lichtqualität. Der Architekt oder die Architektin starten ihre Überlegungen beim Gestaltungsauftrag. Der Lichttechniker oder die Lichttechnikerin denken zuerst an die technisch realisierte Lichtsituation und beurteilen diese mit Messgeräten (z.B. Luxmetern). Die Lichtqualität wird damit durch physikalisch-photometrische Größen operationalisiert.

Die Vertreter einer gestalterisch-architektonischen Sichtweise sind einem Zweck-Anforderungs-Denken verpflichtet. Sie gehen aus von der jeweiligen Lebenssituation des Menschen und fordern daraus die Erfüllung zugehöriger Bedürfnisse (Abb. 1-13). Beispiele für Faktoren der Lebenssituation sind: Bauauftrag, momentane Tätigkeit und Stimmung, momentaner Aufmerksamkeitsfokus und Kontext, Geschichte und Status einer Person. Beispiele für Bedürfnisse sind: Erkennen von Objekten, Orientierung in Raum und Zeit, physische Sicherheit kombiniert mit einem Sicherheitsgefühl, Erholung von Körper und Geist, Kontakt mit der Na-

tur, mit der Sonne, mit anderen Lebewesen, Definition einer Privatsphäre, eines persönlichen Territoriums.

Die Sicht des Lichttechnikers

Entsprechend anders lautet ein Text über Museumsbeleuchtung in einem lichttechnischen Handbuch:

«Bilder Skulpturen und andere museale Gegenstände müssen so beleuchtet werden, dass sie gut erkannt werden können, aber die Strahlung keine Schädigung der Exponate bewirkt (Vergilben, Ausbleichen u. ä.). Deshalb sind die Beleuchtungsstärken und die Einschaltdauer der Beleuchtung auf das Notwendigste zu begrenzen. Ein Hauptproblem bei der Beleuchtung von Museen und Galerien ist die Reflexbildung an Bildern, Vitrinen und anderen glänzenden Strukturen. Für flexible Ausstellungen ist deshalb ein System mit Beleuchtungsschienen, auf denen die Leuchten (Spotleuchten) dem Bedarf nach eingestellt werden können, anzuraten.»

Das sind zwar Aspekte, die einen Architekten als Randbedingung manchmal auch interessieren. Sie sind für ihn aber nicht das Essentielle für eine Beschreibung von Licht und Raum. Wie das Guggenheim-Museum des Architekten Frank Lloyd Wright in New York zeigt, kann dies so weit gehen, dass das Gebäude interessanter und berühmter wird als die Ausstellung, die darin zu sehen ist.

Die Vertreter der naturwissenschaftlich-technischen Richtung sind einem Ursache-Wirkungs-Denken verpflichtet. Sie gehen aus von der Lichtsituation und versuchen deren bewirktes Seherlebnis vorauszusagen (Abb. 1-13). Bisherige Untersuchungen konzentrierten sich hauptsächlich auf die Elemente „müheloses Erkennen schwieriger Sehobjekte“ und „keine Ablenkung durch periphere Reize“. Es gibt aber weitere Elemente, welche ein Seherlebnis mitbestimmen: Wie hell, wie gross, wie klar, wie glänzend, wie komplex, wie beständig etc. wirkt ein beleuchteter Raum? Und auf einer höheren, individuelleren mentalen Ebene: Welche affek-

tiven Bewertungen und welche Attribuierungen werden durch die Situation ausgelöst (siehe Abb. 1-1)?

Konsequenzen bei der Planung

In einer konkreten Lichtenwendung gibt es nur eine Lichtlösung, nicht zwei je für den Architekten und den Lichttechniker. Sowohl Lichttechniker als auch Architekt tragen wertvolles Know-how zu einer guten Lösung bei. Wird dies vernachlässigt entstehen später Probleme bei der Nutzung der Anlage.

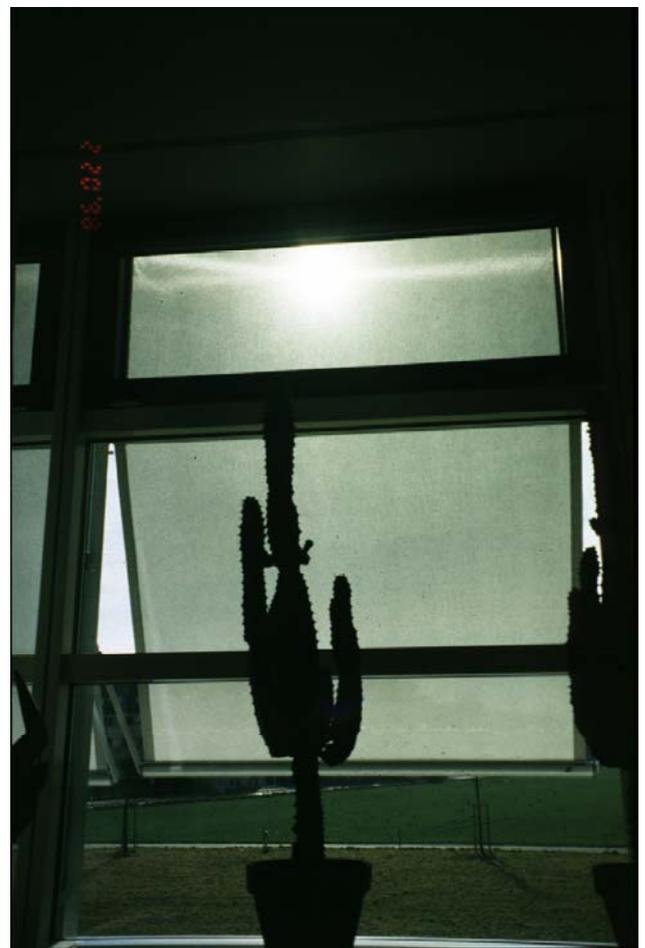


Abb. 1-14: Gitterstoffstoren durch welche die Sonne als Scheibe noch zu erkennen ist, sind als alleiniger Sonnenschutz ungenügend. Sie führen zu starker Blendung.

Beispiele sind ungenügende Sonnenschutzsysteme die zu Blendung durch die direkte Sonne führen, weil der Architekt die visuellen Bedürfnisse nicht berücksichtigt hat (Abb. 1-14) oder

eine unakzeptable Höhlenwirkung, weil der Lichttechniker sich nur auf die spiegelungsfreie Beleuchtung mit tiefstrahlenden Leuchten konzentriert hat, ohne die Gesamtwirkung des Raumes zu berücksichtigen (Abb. 1-15).



Abb. 1-15: Stark tief nach unten strahlende Leuchten lassen die Decke dunkel. Sie führen zwar zu weniger Spiegelungen im Bildschirm, resultieren aber in einer Raumstimmung, die in den 1980er-Jahren als „Höhleffekt“ bekannt wurde. Solche Räume haben eine geringe Akzeptanz.

Jeder Versuch, Aussagen der einen Betrachtungsweise mit der anderen Betrachtungsweise zu beurteilen, führt zu Konfusion und Verständnisschwierigkeiten. Entsprechend der beiden Sichtweisen müssen Definitionen für Lichtqualität unterschiedlich ausfallen. Es ist daher erforderlich, dafür auch zwei unterschiedliche Begriffe zu verwenden: Merkmale der Beschaffenheit, die Sinnesqualität von Licht, und Merkmale der Güte, die Erfahrungsqualität von Licht. Das

Schema in Abb. 1-13 verknüpft die beiden Sichtweisen.

Konzepte lassen sich nur schlecht in einem sequentiellen Planungsprozess vermitteln, wie die Praxis zeigt. Der Prozess, soll er denn gelingen, benötigt dann von Stufe zu Stufe praktisch ähnlich viel Zeit wie die erste Entwicklung bis alle Details auch für das „Gefühl“ vermittelt sind. Es empfiehlt sich deshalb für die Phase der Konzeptentwicklung ein vernetzter Prozess (Abb. 1-16) oder/und ein ständiges Feedback, z.B. vom Benutzer oder der Ergonomin zur Architektin.

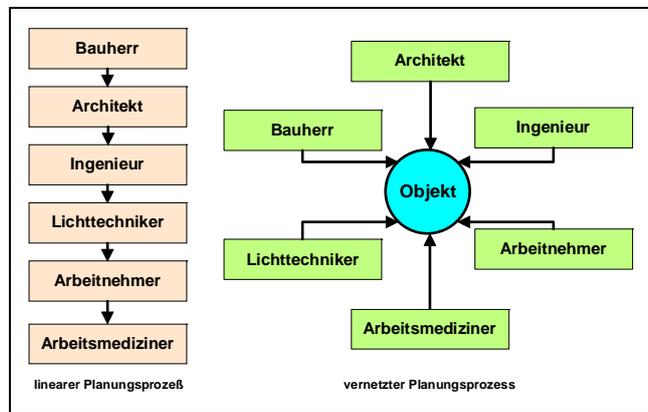


Abb. 1-16: Die Konzeptentwicklung (hier für Arbeitsstätten) ist nur in einem vernetzten aber nicht in einem linearen Planungsprozess effizient.

2

Sehen

2.1

Einleitung

Aufbau des Auges

Treffen Lichtstrahlen, die von einem Gegenstand ausgehen, auf das Auge, so werden sie hauptsächlich von der Hornhaut (Cornea) gebrochen, bevor sie gebündelt auf die lichtempfindliche Netzhaut (Retina) fallen (Abb. 2-1). Die Fovea ist die Stelle der Netzhaut auf welche das Objekt abgebildet wird, das man mit dem Auge fixiert.

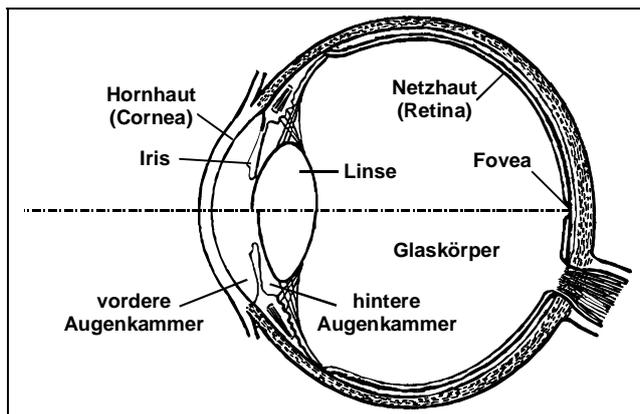


Abb. 2-1: Aufbau des Auges.

Die vordere Augenkammer wird von der Hornhaut und der vorderen Linsenfläche nebst Pupille begrenzt. Die Kammer ist mit dem Kammerwasser gefüllt. Dieses wird ständig in der hinteren Augenkammer produziert und im vorderen Kammerwinkel resorbiert. Ein zu starke Produktion bzw. eine verminderte Resorption führt zu Augenhochdruck (Folge: grüner Star, Glaukom). Der gallertartige Glaskörper dient der Formgebung des Auges und als mechanischer Schutzpuffer gegen Erschütterungen.

Die Linse besitzt einen zwiebelschalenförmigen Aufbau. Im Laufe des Lebens verändert sich ihre Durchlässigkeit, sie wird trübe (grauer Star,

Katarakt). Die Linse ist mit einer elastischen Kapsel und einem weichen Kern in der Lage, ihre Form und damit die Brechkraft zu ändern. dadurch kann das Bild auf der Netzhaut scharf gestellt werden (= Akkommodation).

Aufbau der Netzhaut

Die Netzhaut (Retina) wird aus mehreren Zellschichten aufgebaut: Ausser den lichtempfindlichen Rezeptoren sind noch lichtunempfindliche Schichten aus Horizontalzellen, Bipolarzellen, Amakrinzellen und Ganglienzellen vorhanden (Abb. 2-2). Das Licht durchläuft erst diese oberen Netzhautschichten bevor es auf die Rezeptoren (Zapfen, Stäbchen) trifft (inverser Aufbau der Netzhaut).

Die Zapfen sind an der Stelle des schärfsten Sehens, der Fovea, am kleinsten und am dichtesten gepackt. Beim blinden Fleck (Papille) verlässt der Sehnerv das Auge. Es ist dort für Licht unempfindlich.

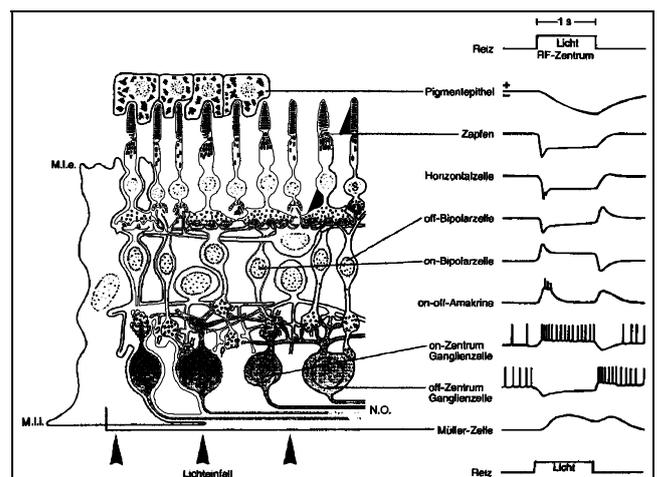


Abb. 2-2: Schichten der Netzhaut (Retina): Rechts sind die Aktionspotentiale (elektrische Spannungsänderungen) der verschiedenen Zellen dargestellt.

Zapfen und Stäbchen

Es gibt zwei Arten von Rezeptorzellen: die Zapfen (nicht Zäpfchen!) und die Stäbchen. Die Stäbchen können keine Farbe übermitteln, sind aber sehr lichtempfindlich. Sie sind für das Dämmerungssehen (skotopisches Sehen) verantwortlich. Bei grösserer Lichtintensität (Tagsehen, photopisches Sehen) werden sie übersättigt und tragen nicht mehr zum Sehvorgang bei. Die Stäbchen sind beim Menschen nur ausserhalb der Fovea zu finden (Abb. 2-14). Die Zapfen können Farbe übermitteln und sind für das Tagsehen geeignet, da sie erst auf grössere Lichtintensitäten ansprechen.

Funktionsweise der Netzhaut

Informationsübertragung

Die Rezeptorzellen geben die optischen Signale in Form von elektrischen Spannungsänderungen über die synaptischen Endigungen an die Bipolar- und Horizontalzellen weiter, welche die eintreffenden Signale verarbeiten und an benachbarte und weiterführende Zellen weiterleiten. Die Signale der Bipolarzellen werden direkt oder über die Amakrinen an die Ganglienzellen weitergegeben.

Das elektrische Potential der Rezeptorzelle sinkt mit zunehmender Reizstärke (Abb. 2-2, rechts oben). Wenn eine Schwelle überschritten wird, löst es am wegführenden Nerven ein Aktionspotential (Spannungsimpuls) aus. Je stärker der Reiz auf den Rezeptor wirkt, desto grösser wird auch die Häufigkeit, d.h., die Frequenz der Aktionspotentiale die vom Rezeptor ausgelöst und über die Ganglienzellen weitergeleitet werden. Es erfolgt somit eine Umwandlung von einer Amplitudenmodulation in eine Impulsmodulation (neuronal Entladungsrate).

Viele Sinnes- und Nervenzellen können Reizintensitäten von mehreren Zehnerpotenzen Intensitätsunterschied verarbeiten. Zwischen

Sensorpotential und physikalischer Reizintensität besteht in einem mittleren Intensitätsbereich eine logarithmisch-lineare Beziehung (→ Weber-Fechner-Gesetz, Kap. 2.2). Dasselbe gilt auch für das pulskodierte Signal der Ganglienzellen (Abb. 2-3).

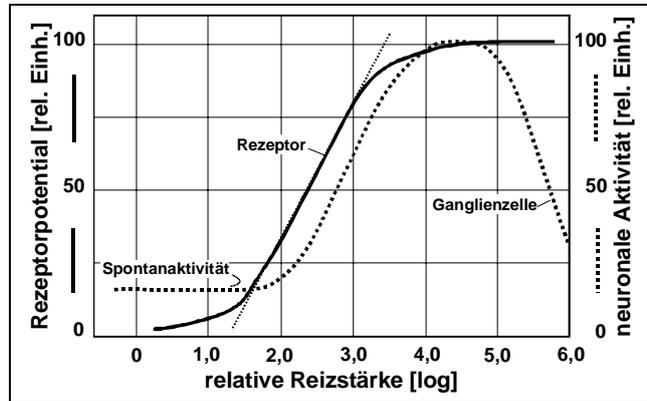


Abb. 2-3: Abhängigkeit des Rezeptorpotentials (ausgezogen) und der Aktivität einer retinalen Ganglienzelle (punktiert) von der Reizstärke.

Die Fortsätze der Ganglienzellen (Nervenfasern) lagern sich zum Sehnerv (Nervus Opticus) zusammen. Dieser Strang aus Nervenfasern überträgt schliesslich die Information an das Gehirn. Der blinde Fleck ist die Stelle, an der die Netzhaut unterbrochen wird, da hier der Sehnerv seine Durchtrittsstelle hat.

Eine Rezeptorzelle gibt ihre Information nicht nur an eine Zelle, sondern an mehrere Horizontal- und Bipolarzelle und somit an mehrere Ganglienzellen weiter (Divergenz). Eine Ganglienzelle erhält die verarbeitete Information von mehreren Horizontal-, Bipolar- und Amakrinzellen und somit von mehreren Rezeptoren (Konvergenz). Die Fläche der Netzhaut von der die Ganglienzelle Information erhält heisst ihr rezeptives Feld (→ Infeld-Umfeld-Antagonismus, Kap. 2.3).

Spektrale Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit des Auges ist von der Wellenlänge des Lichts abhängig (Abb. 2-4). Da

sich die Empfindlichkeit im Dunkelsehen (scotopisch) von dem bei Tagsehen (photopisch) deutlich unterscheidet arbeitet man im allgemeinen mit zwei verschiedenen spektralen Empfindlichkeitskurven. Grundsätzlich müssen für den Übergangsbereich des Dämmersehens (mesopisch) eigene Kurven definiert werden. Physikalische Grössen der Lichtleistung (z.B. W/m^2) werden mittels der spektralen Empfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ in physiologisch bewertete photometrische Einheiten umgerechnet (z.B. Helligkeit: cd/m^2 ; Beleuchtungsstärke: Lux. Siehe Kap. 3.2).

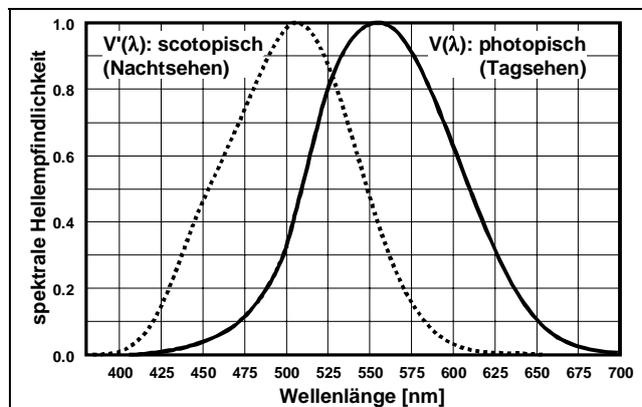


Abb. 2-4: Spektrale Hellempfindlichkeit des Auges innerhalb eines 2° grossen Seh winkels am Tag (photopisch) und in der Nacht (scotopisch). Wellenlängen im Spektrum um 400 nm erscheinen blau, diejenigen um 600 nm rot.

Gesichtsfeld

Das Gesichtsfeld ist jenes Gebiet des Arbeitsbereichs, welches mit einem Blick, ohne Kopf- und Augenbewegung, mehr oder weniger scharf wahrgenommen wird (Abb. 2-5). Je weiter aussen sich ein Sehobjekt befindet (in der Peripherie) desto unschärfer wird es, desto weniger Farben können identifiziert werden und desto eher kann es nur noch mit einem Auge (monokular) und damit nicht mehr stereoskopisch betrachtet werden.

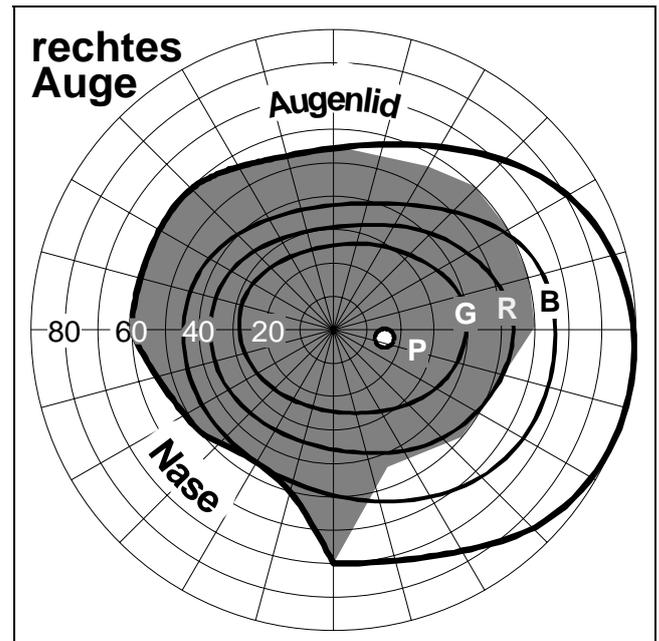


Abb. 2-5: Gesichtsfeld des rechten Auges (Zahlen sind Winkelgrade Richtung Peripherie). Zentrum: Blickrichtung bzw. Fovea. Grau: binokulares Deckfeld; P: blinder Fleck; Aussengrenzen der Grünwahrnehmung (G), der Rotwahrnehmung (R), der Blauwahrnehmung (B) und der Helligkeitswahrnehmung (äusserste Kurve). Weiter aussen sind noch Rezeptoren, welche der Bewegungsdetektion sowie der Aufmerksamkeitserregung dienen.

2.2

Hell und Dunkel

Adaptation

Das Auge muss sehr flexibel sein, will es sowohl die visuellen Informationen bei hellem Tageslicht als auch in der Dunkelheit aufnehmen und verarbeiten. Die Pupille kann die Menge des einfallenden Lichtes nur um den Faktor 16 verändern. Es reicht auch nicht aus, zwei Rezeptorsysteme (Stäbchen und Zapfen) zu haben. Auch die Rezeptoren selbst müssen sich an die jeweilige Leuchtdichte anpassen, d.h., adaptieren können. Dies erfolgt, indem sich in den Rezeptoren die Konzentration des Sehfärbstoffes (Sehpigmente) mit der Beleuchtungsstärke ändert.

Chemische Adaptation

Die chemische Adaptation dauert lange, da sich die Sehpigmente nur sehr langsam wieder auf-frischen: Es dauert bei der Dunkeladaptation (= Adaptation von hell nach dunkel) eine bis mehrere Minuten, bis man Gegenstände überhaupt erkennt und ca. 40 Minuten, bis die voll-ständige Adaptation eintritt (Abb. 2-6). Die Hell-adaptation (= Adaptation von dunkel nach hell) hingegen braucht nur ca. 5 Sekunden.

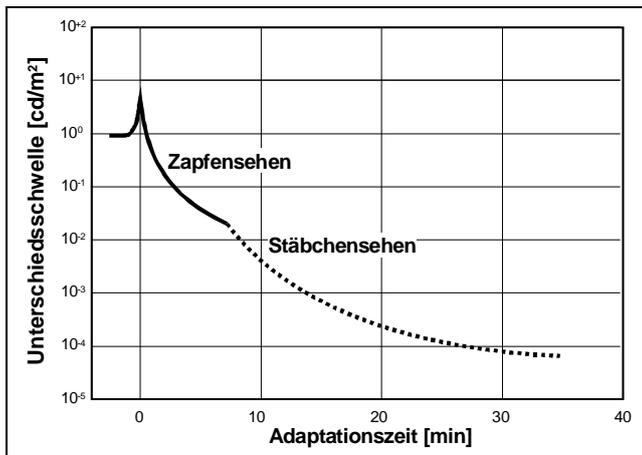


Abb. 2-6: Änderung der Unterschiedsschwelle eines Sehobjekts während der Dunkeladaptation: Je länger die Zeit dauert, ein desto kleinerer Leuchtdichteunterschied ist gerade noch wahrnehmbar.

Die mittlere Leuchtdichte, auf welche sich die Rezeptoren nach längerer Zeit eingestellt haben heisst Adaptationsleuchtdichte. Zur Definition der Leuchtdichte (in cd/m²) und anderer photometrischer Einheiten siehe Kapitel 3.2!

Neuronale Adaptation

Die neuronale Verarbeitung des Bildes in der Netzhaut ermöglicht einen weiteren schnellen Adaptationsmechanismus: Wenn es dunkler wird, schalten sich einzelne benachbarte Rezeptoren zu einem grösseren rezeptiven Feld zusammen (siehe Kap. 2.3). Dadurch wird das Auge zwar lichtempfindlicher, aber dafür wird das Auflösungsvermögen und damit die Seh-schärfe reduziert. Umgekehrt nimmt die Seh-schärfe mit der Leuchtdichte zu (siehe Kap.

2.4). Zu grosse Intensitäten hingegen verursachen eine Blendung des Auges, womit die Seh-schärfe wieder abnimmt.

Eigengrau

Hält sich eine Person längere Zeit in einem völ-lig dunklen Raum auf, so erscheint ihr das Ge-sichtsfeld nicht schwarz, sondern in einem mitt-leren, zeitlich veränderlichen Grau. Dieses so-genannte Eigengrau ist auf die spontane Aktivi-tät der Nervenzellen und des visuellen Systems zurückzuführen.

Schwarzschwelle

Ist das Auge auf eine bestimmte Helligkeit adaptiert, lässt sich für ein dunkles Sehobjekt die sogenannte Schwarzschwelle festlegen. Sie ist diejenige Leuchtdichte, die als „gerade licht-los, ohne Helligkeit“ empfunden wird. Wird die Leuchtdichte weiter reduziert, erscheint das Ob-jekt unverändert schwarz. Die Schwarzschwelle liegt beim Tagsehen für grössere Sehobjekte (> 2° Sehwinkel) bei ca. 1 bis 2% der Adaptati-onsleuchtdichte. Bei kleineren Sehobjekten oder beim Dämmerungs- und Nachtsehen ist sie grösser.

Unterschiedsschwelle

Wie gross muss eine Leuchtdichte sein, damit sie das menschliche Auge gerade noch er-kennt? Ist das Auge vollständig dunkeladaptiert, genügen einige wenige Photonen für eine De-tektion. Bei grösseren Adaptationsleuchtdichten stellt sich die Frage nach dem kleinsten wahr-nehmbaren Leuchtdichteunterschied, der so-genannten Unterschiedsschwelle. Als Faustregel kann gelten, dass für sicheres Erkennen von nicht zu kleinen Objekten am Tag diese etwa 1% heller oder dunkler sein müssen als ihre Umgebung. Diese Proportionalität zur Umge-bungsleuchtdichte heisst Gesetz von Weber.

Psychometrische Gesetze

Erweitert man das Webersche Gesetz von den Unterschiedsschwellen auf grössere Leuchtdichteunterschiede, ergibt sich das Gesetz von Fechner:

$$S = k \cdot \log\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

S ist die subjektive Helligkeitswahrnehmung, L die Objektleuchtdichte, L₀ die Leuchtdichte der Schwarzschwelle und k eine wählbare Konstante. Es hat sich allerdings gezeigt, dass dieses Gesetz nur im Bereich mittlerer Intensitäten gültig ist. Eine ähnliche Beziehung gibt die Potenzfunktion nach Stevens wieder:

$$S = k \cdot (L - L_0)^{1/3}$$

Sie gilt eher für grosse Intensitäten. Ist L = L₀, wird S bei beiden psychometrischen Gesetzen gleich Null. Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge siehe die Abb. 2-7.

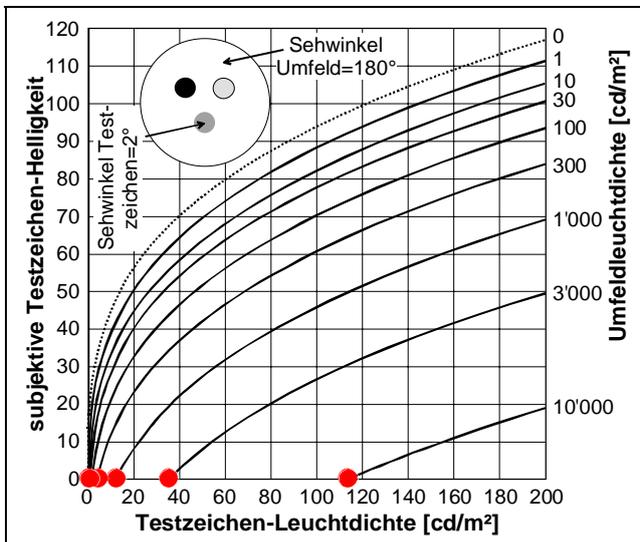


Abb. 2-7: Subjektiv wahrgenommene Helligkeit des unteren Testzeichens in Abhängigkeit von der Testzeichen-Leuchtdichte und der Umfeldleuchtdichte, die auch der Adaptationsleuchtdichte entspricht (nach Messungen von P. Haubner 1977). Die Punkte auf der x-Achse stellen die Schwarzschwelle dar.

Luminanzschwelle

Wird ein schwarzes Sehobjekt von innen heraus immer heller gemacht, erscheint es – bei konstanter Adaptation – erst als hellgrau und dann als weiss und übersteigt danach die sogenannte Luminanzschwelle. D.h., das Objekt wird dann nicht mehr als beleuchtet, sondern als selbstleuchtend wahrgenommen. Solche hellen Objekte ziehen die Aufmerksamkeit auf sich und finden oft als Gestaltungselement Verwendung.

Helligkeitskonstanz

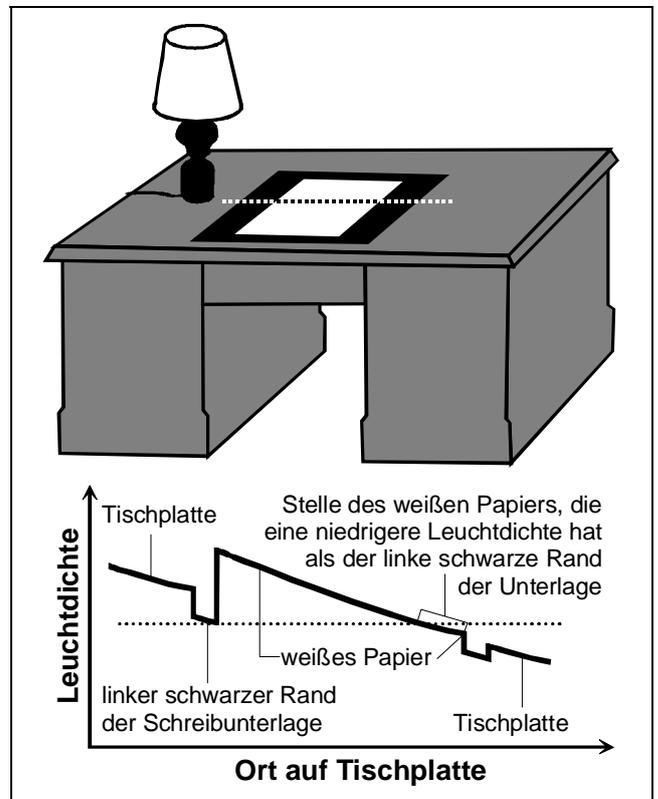


Abb. 2-8: Zur Helligkeitskonstanz: Leuchtdichteverteilung auf einer Tischplatte mit Schreibunterlage und weissem Papier.

In einer wissenschaftlichen Arbeit mit dem Titel „Wahrnehmung von Grauton und Beleuchtungsstärke in einer Welt mit nur einem Reflexionsgrad“² wurde das Phänomen der sogenann-

² A. Gilchrist, A. Jacobsen: Perception of lightness and illumination in a world of one reflectance. Perception V13 (1984) P5-19.

ten Helligkeitskonstanz untersucht. Es ist bekannt und auch aus der Anschauung einsichtig, dass ein ungleichmässig beleuchtetes weisses Papier als überall weiss wahrgenommen wird und nicht als unterschiedlich grau getönt. Dies, obwohl sich die für das visuelle System relevante Leuchtdichte ändert (Abb. 2-8).

Es wird also unterschieden zwischen der Helligkeit, die ein Objekt aufgrund seiner Färbung hat (Grauton, „Lightness“) und der Helligkeit die aufgrund der Leuchtdichte des Objekts wahrgenommen wird („Brightness“). Durch die Seherfahrung ist man offenbar in der Lage die verlorengegangene Information über den Reflexionsgrad wieder zu rekonstruieren. Wie dies genau geschieht wird auch heute noch nicht ganz verstanden.

2.3 Kontrast

Der Kontrast beschreibt den Leuchtdichteunterschied zweier benachbarter Orte. Zum Beispiel die Leuchtdichte eines Bildschirmzeichens L_z und die Leuchtdichte seines Umfelds L_u . Es gibt mehrere Kontrastdefinitionen:

$$K = L_z / L_u$$

$$K' = (L_z - L_u) / L_u$$

$$K'' = (L_z - L_u) / (L_z + L_u)$$

Bei Bildschirmen mit dunklen Zeichen auf hellem Hintergrund spricht man von positiver Polarität da sie der üblichen von Text auf Papier entspricht (K' und K'' sind jedoch negativ); bei hellen Zeichen auf dunklem Grund spricht man von negativer Polarität (K' und K'' sind positiv).

Infeld-Umfeld-Antagonismus

Die vielfältigen Verknüpfungen in der Netzhaut bilden die Voraussetzung für die rezeptiven Felder retinaler Ganglienzellen. Die rezeptiven Felder mehrerer Ganglienzellen können sich

gegenseitig überlappen und sind verschieden gross: In der Fovea sind die Felder sehr klein, zur Peripherie hin werden sie immer grösser.

Die Wirkung der Rezeptoren im rezeptiven Feld einer Ganglienzelle ist unterschiedlich: So kann Licht im Zentrum des Feldes erregend (Excitation), im Umfeld jedoch hemmend (Inhibition) auf die neuronale Entladungsrate der Ganglienzelle wirken (Abb. 2-9). Bei anderen Ganglienzellen kann es gerade umgekehrt sein.

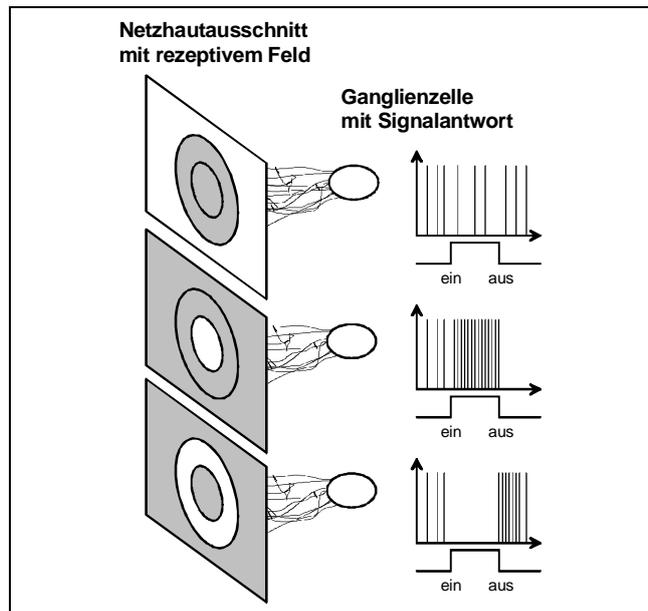


Abb. 2-9: Zellantwort einer On-Off-Ganglienzelle auf unterschiedliche Beleuchtungen ihres rezeptiven Feldes.

Diese Struktur der rezeptiven Felder ist die Voraussetzung für die simultane Kontrastverstärkung. Darunter versteht man folgendes Phänomen: Betrachtet man eine Figur, so wird keine absolute Helligkeit, sondern Helligkeit in Abhängigkeit vom Umfeld und den Kantenübergängen gesehen. Die Deutlichkeit der Kanten von kontrastierenden Flächen wird dabei verstärkt (die hellere Fläche wird an der Kante noch heller gesehen, die dunkle Fläche an der Kante noch dunkler). Die Funktionsweise der rezeptiven Verschaltung erklärt auch visuelle Erscheinungen wie z.B. die Hermannsche Gittertäuschung (Abb. 2-10).

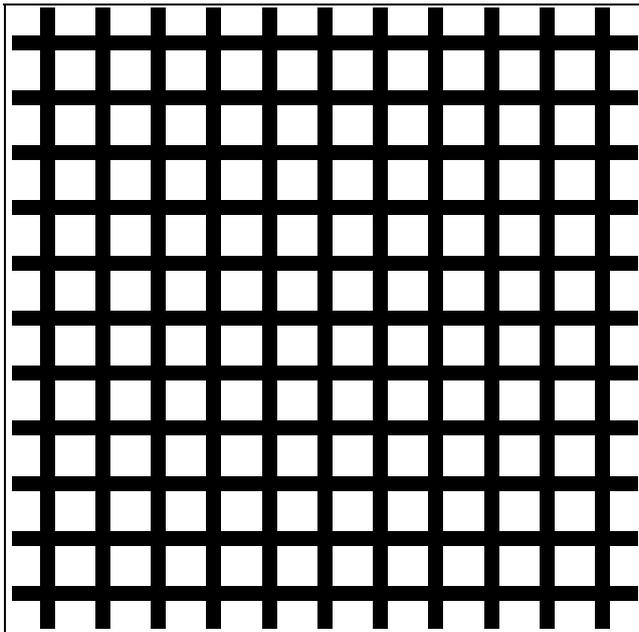


Abb. 2-10: Hermannsche Gittertäuschung: An den Kreuzungspunkten erscheinen graue Flecken. Diese können mit der Verschaltung der Nervenzellen in der Netzhaut erklärt werden.

Physiologische Blendung

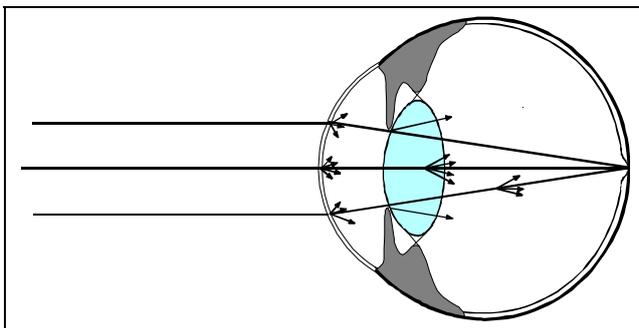


Abb. 2-11: Streuzentren in der Augenoptik

Die Augenlinse ist aus Proteinlamellen aufgebaut. Kleine Unregelmässigkeiten im Aufbau bewirken eine Streuung des Lichtes, die sich bei starkem Lichteinfall bemerkbar macht (Abb. 2-11). Denselben Effekt bewirken kolloidal gelöste Makromoleküle, die sich im Glaskörper befinden. Das Streulicht überlagert sich dem Netzhautbild, man spricht von Kontrastminderung durch physiologische Blendung. Die Trübungen des dioptrischen Apparates nehmen durch Einwanderung von roten Blutkörperchen (=Erythrozyten) und die Anzahl der Streuzentren im Alter zu.

2.4

Sehschärfe

Definition von Sehschärfe und Visus

Unter der Sehschärfe versteht man das Vermögen des Auges, zwei Punkte in einer bestimmten Entfernung noch getrennt wahrnehmen zu können. Dieses Auflösungsvermögen wird aus dem Sehwinkel (Abb. 2-12), bei dem das prüfende Auge zwei Punkte gerade noch getrennt wahrnimmt, errechnet und heisst Visus:

$$\text{Visus} = 1 / [\text{Sehwinkel in Bogenminuten}]$$

Ein normalsichtiges Auge kann zwei Punkte unter dem Winkel von einer Bogenminute ($1'$) bei guten Sehverhältnissen noch unterscheiden ($\text{Visus} = 1$). Ein Visus von 0.8 gilt gerade noch als gutes Auflösungsvermögen; ein $\text{Visus} \leq 0.5$ gilt als schwachsichtig.

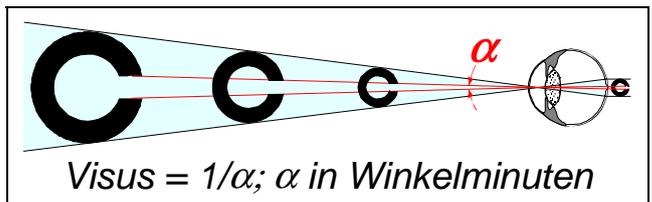


Abb. 2-12: Zur Definition des Sehwinkels α . Zur Bestimmung des Visus wird der Sehwinkel der Ring-Öffnung verwendet.

Zur Bestimmung des Visus werden in der Praxis als Testzeichen nicht zwei Punkte vorgegeben, sondern in unterschiedliche Richtungen orientierte, standardisierte Sehobjekte (Optotypen). Beispiele sind der Landolt-Ring (**C**) oder der Snellen-Haken (**E**), bei welchen die Richtung der Öffnungen bestimmt werden muss. Die Sehschärfe wird sowohl von individuellen als auch von Umgebungsfaktoren beeinflusst und kann als operationales Belastungsmass dienen.

Sehschärfe und Alter

Die Sehschärfe nimmt mit zunehmendem Alter ab (Abb. 2-13): Zum einen wird die Akkommodationsbreite durch die Alterssichtigkeit gerin-

ger. Zum anderen fallen im Laufe des Lebens Rezeptoren der Netzhaut aus, wodurch die Rezeptordichte und mit ihr die Sehschärfe abnimmt. Ausserdem nehmen die Trübungen in der Optik des Auges im Alter zu.

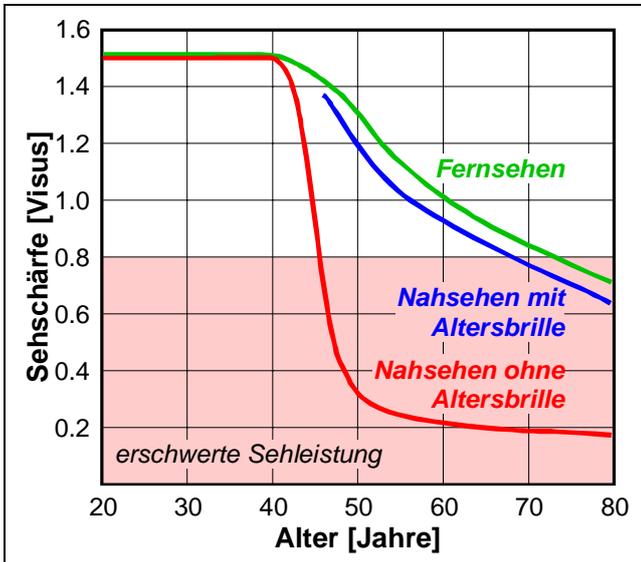


Abb. 2-13: Abnahme der Sehschärfe mit dem Alter mit und ohne Brillenkorrekturen. Das Nahsehen wird ohne Altersbrille nach dem 45. Lebensjahr zunehmend schlechter. Mit einer Sehschärfe unter 0,8 (punktiertier Bereich) ist das Sehen erschwert.

Die Wirkung dieser nachteiligen Faktoren, wird durch die Abnahme des durchschnittlichen Pupillendurchmessers mit zunehmendem Alter und der damit zunehmenden Schärfentiefe etwas abgeschwächt.

Sehschärfe und Netzhautort

Die Sehschärfe hängt aus folgenden Gründen vom Netzhautort ab:

- Die Rezeptordichte ist unterschiedlich: In der Fovea sind die Rezeptoren am dichtesten gepackt (gute Sehschärfe), zur Peripherie der Netzhaut hin nimmt die Anzahl Rezeptoren pro Fläche (Abb. 2-14) und damit die Sehschärfe ab.
- Die rezeptiven Felder sind unterschiedlich gross: In der Fovea sind die Felder klein (gute Sehschärfe), zur Peripherie hin werden sie grösser (schlechtere Sehschärfe).

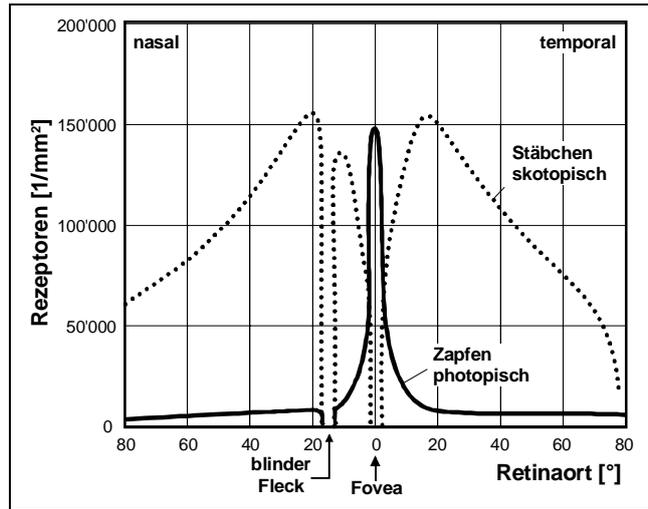


Abb. 2-14: Rezeptordichte in der Netzhaut.

Beide Effekte führen dazu, dass ein fixierter Gegenstand scharf zu sehen ist, da er auf der Fovea abgebildet wird. Je entfernter das Bild von der Fovea ist, desto unschärfer erscheint ein Gegenstand (Abb. 2-15).

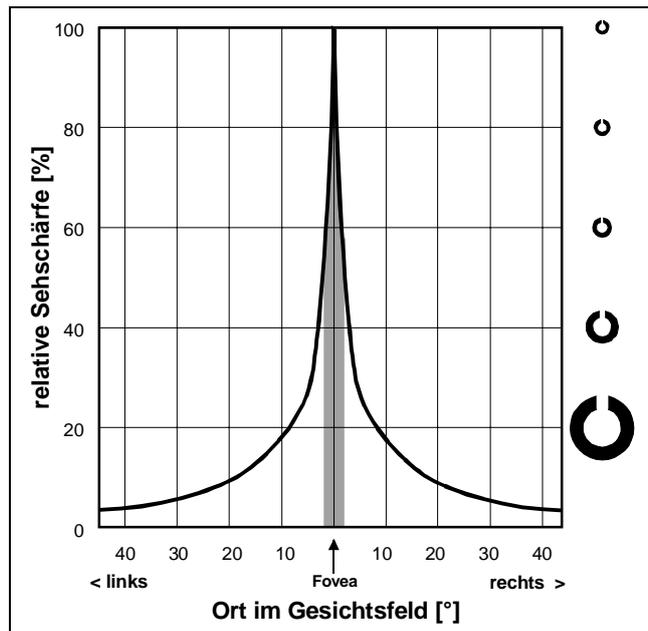


Abb. 2-15: Sehschärfe in Abhängigkeit von der Lage im Gesichtsfeld.

Sehschärfe und Leuchtdichte

Der erregende Teil der Netzhautfläche, bzw. das Zentrum des rezeptiven Feldes einer Ganglienzelle, verkleinert sich mit zunehmender Helligkeit (Abb. 2-17). Der Vorteil dabei ist die sich vergrössernde Sehschärfe (Abb. 2-16). Bei

grosser Dunkelheit hingegen ist der erregende Teil der rezeptiven Felder gross. Neben der schlechteren Sehschärfe wird so eine grössere Empfindlichkeit der Ganglienzellen ermöglicht.

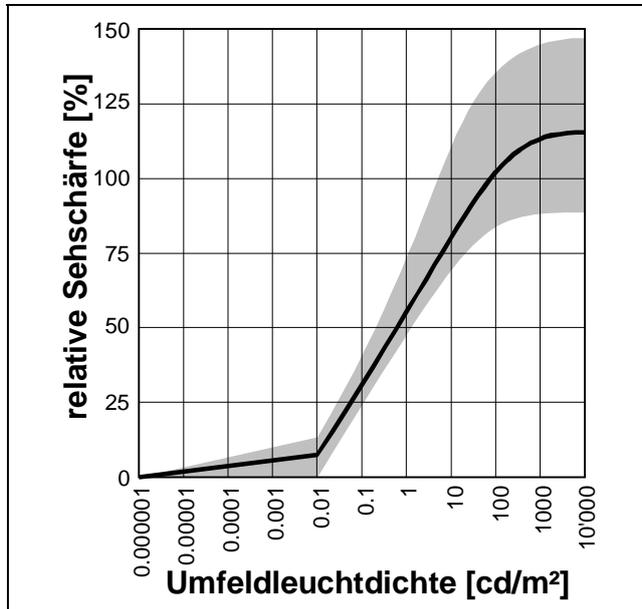


Abb. 2-16: Einfluss der Leuchtdichte auf die Sehschärfe für einen Kontrast $K''=0,95$ und Beobachter im Alter zwischen 25 und 50 Jahren. Grau: Streubereich.

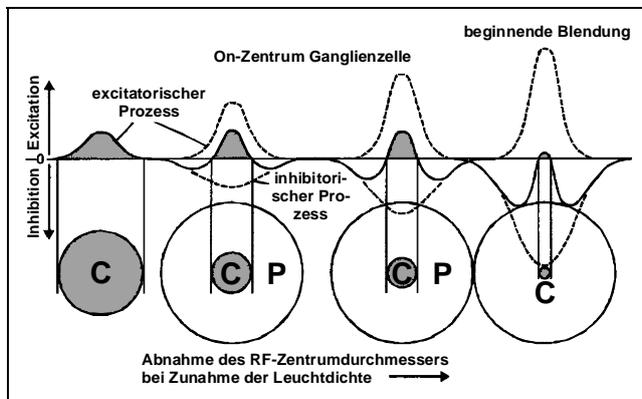


Abb. 2-17: Änderung der Organisation der rezeptiven Felder bei Änderung der Leuchtdichte.

Sehschärfe und Kontrast

Wie die Wirkungsweise der rezeptiven Felder zeigt, ist das Sehsystem darauf spezialisiert, Kontraste und nicht einfache Helligkeiten wahrzunehmen. Gute Kontraste steigern die Sehfähigkeit und mithin auch die Sehschärfe (Abb. 2-18).

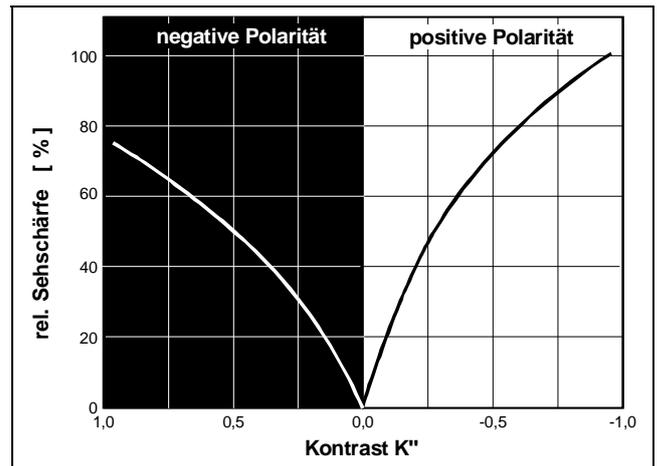


Abb. 2-18: Abhängigkeit der Sehschärfe vom Kontrast bei positiver und negativer Polarität.

Sehschärfe und Farbe

Im Vergleich zu weissem Licht ist die Sehschärfe im Blauen auf bis zu 70% reduziert, im Roten auf ca. 90%. Dass die Sehschärfe von der Farbe abhängt, hat mehrere Ursachen:

- Die Wellenlängen werden von der Hornhaut unterschiedlich gebrochen und daher (bei mehrfarbigen Gegenständen) z.T. unscharf abgebildet (chromatische Aberration).
- Sieht man einen Gegenstand bei monochromatischem Licht, so sprechen nur die Rezeptortypen an, die diese Wellenlänge vorwiegend als Reiz verarbeiten können. Die Dichte der aktivierten Rezeptoren wird damit geringer und mit ihr die Sehschärfe.
- Der Aufbau der rezeptiven Felder bedingt, dass die Sehschärfe für reine Farbkontraste welche keine Leuchtdichtekontraste aufweisen, bis auf 30% (rot-grün oder blau-gelb) reduziert sein kann. Andere Farbkombinationen reduzieren die Sehschärfe noch stärker (z.B. gelb-weiss) (→ Farbkontrast).

2.5 Farbsehen

Farbraum

Drei Farbrezeptoren (Theorie von Young und Helmholtz)

Der Mensch kann (v.a. bei direktem Farbvergleich) viele Farben unterscheiden. Dies ist aber nicht in jedem Bereich des Gesichtsfeldes gleich gut möglich (Abb. 2-5). Es stellt sich die Frage, mit wie vielen verschiedenen Rezeptorarten der Mensch auskommt, um diese Anzahl von Farbabstufungen unterscheiden zu können.

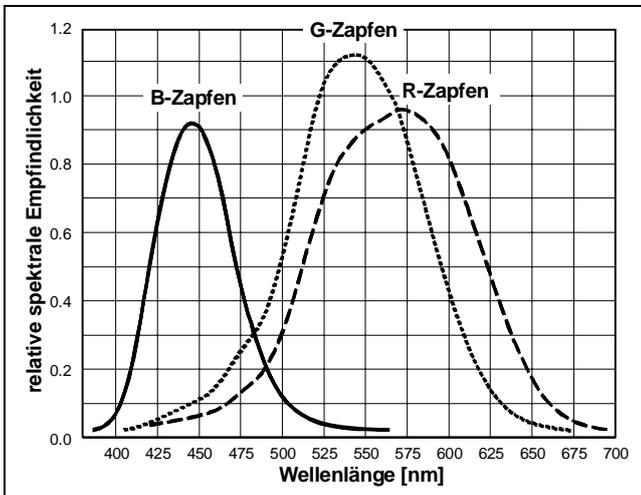


Abb. 2-19: Lichtabsorption der drei Zapfentypen.

Wie T. Young 1802 vermutete und H. v. Helmholtz 1866 aufgrund psychophysischer Experimente voraussagte, findet man in der Netzhaut drei Farbrezeptoren, die Licht über einen begrenzten Wellenlängenbereich absorbieren (Abb. 2-19):

- Rot-empfindliche Zapfen (Absorptionsmaximum: 570 nm, Absorptionsbereich: ca. 430-720 nm),
- Grün-empfindliche Zapfen (Max.: 535 nm, Bereich: ca. 400-630 nm),
- Blau-empfindliche Zapfen (Max.: 445 nm, Bereich: ca. 380-530 nm).

Im Vergleich dazu absorbieren die Stäbchen im gesamten Wellenlängenbereich des sichtbaren Spektrums (Absorptionsmaximum: 505 nm, Ab-

sorptionsbereich: ca. 380-650 nm, siehe $V'(\lambda)$ in Abb. 2-4).

Farbtafel, Farbkoordinaten, Farbdreieck

Durch die Tatsache, dass drei Rezeptortypen für die Farbwarnnehmung zuständig sind, wird die Vielfalt der Lichtspektren reduziert: Jede Farbe lässt sich in einem 3-dimensionalen Raum darstellen, dem sogenannten Farbraum. Es gibt verschiedene mathematische Systeme, die diesen Farbraum mit Farbkoordinaten beschreiben. Oft wird eine der drei Koordinaten als die Helligkeit (Leuchtdichte) definiert und die anderen beiden beschreiben eine 2-dimensionale Farbtafel mit Farbton (z.B. Grün, Rot) und Sättigung (z.B. Rot, Rosa). Sichtbare Farben sind in der Farbtafel im sogenannten „Farbdreieck“ angeordnet (Abb. 2-20 und Abb. 2-21).

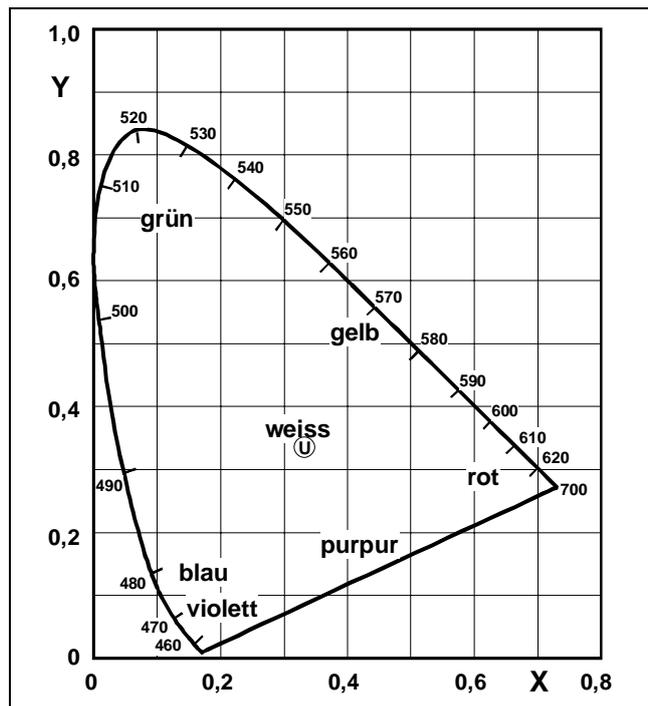


Abb. 2-20: CIE 1931 xy-Normfarbtafel. Bei (0.33, 0.33) liegt der Unbuntpunkt.

Aus dem Farbdreieck kann man ablesen, welcher Farbton entsteht, wenn man zwei oder mehr Wellenlängen mischt. Die Werte am Kurvenzug entsprechen den Wellenlängen von Farben, welche nur aus dieser einen Wellenlänge bestehen (= monochromatische Farben).

Ist ein Gemisch von zwei Wellenlängen vorhanden, so verbindet man die beiden durch eine Gerade. Der Farbeindruck liegt auf dieser Geraden. Der genaue Wert hängt von den relativen Intensitäten der beiden Wellenlängen ab. Die Verbindungsgerade zwischen Rot und Violett heisst Purpurgerade.

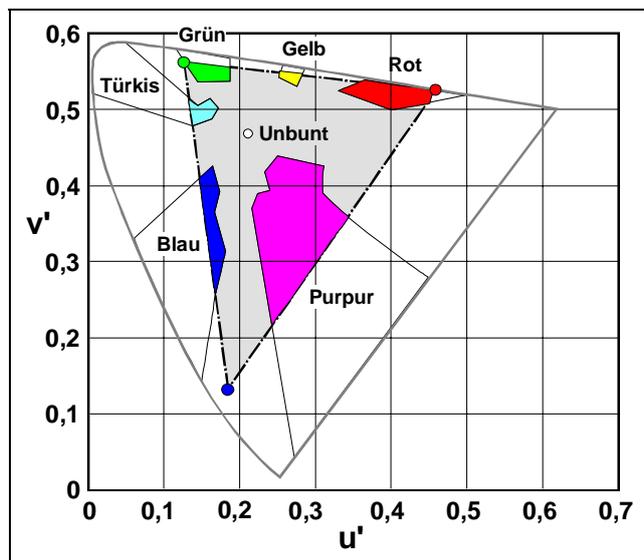


Abb. 2-21: CIE 1976 $u'v'$ -Normfarbtafel mit Dreieck der am Bildschirm darstellbaren Farben (innen) und Farbdreieck der sichtbaren Farben (äussere Randkurve).

Farbfehlsichtigkeit

Ist im Auge ein Rezeptortyp spektral abnormal empfindlich oder fehlt er, so spricht man von Farbsehschwäche (Farbanomalie) bzw. von Farbenblindheit (Farbanopie). Bei der Farbfehlsichtigkeit unterscheidet man zwischen dem Mangel am:

- rot-empfindlichen Rezeptor (protanomal, protanop),
- grün-empfindlichen Rezeptor (deutanomal, deutanop),
- blau-empfindlichen Rezeptor (tritanomal, tritanop) sehr selten.

Von den ersten beiden Typen sind ca. 8% der männlichen Bevölkerung betroffen. Sie können zwischen rot, gelb und grün gar nicht oder schlecht unterscheiden. In Abb. 2-22 sind Verwechslungsgeraden im Farbdreieck für Rot-

Grün-Fehlsichtigkeiten dargestellt. Die zentrale Fovea ist auch bei farbtüchtigen Personen ohne Blaurezeptoren.

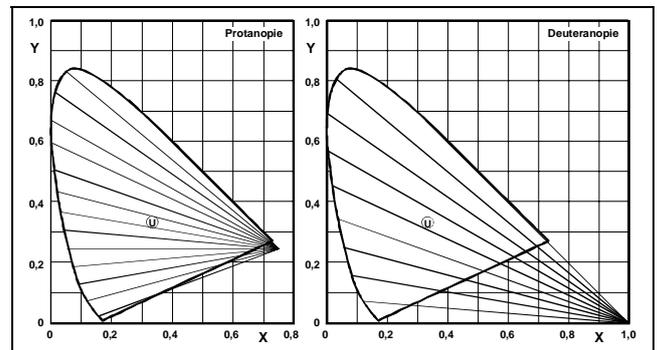


Abb. 2-22: Verwechslungsgeraden für Rot-Grün-Farbenblinde. Farben auf einer Verwechslungsgeraden können von Farbenblinden nicht unterschieden werden.

Metamerie

Verschiedene Spektren von Lichtquellen oder reflektierenden Gegenständen können zu ein und derselben empfundenen Farbe führen. Man spricht dann von bedingt-gleichen oder metameren Farben. So gibt es z.B. bei monochromen bernsteinfarbigen Bildschirmen Energiespektren mit nur einem Maximum bei einer Lichtwellenlänge von 580 nm, während dieselbe empfundene Farbe bei einem Farbbildschirm aus einem Energiespektrum mit drei Maxima bei Wellenlängen von 540 nm, 624 nm und 707 nm erzeugt werden kann.

Farbverarbeitung

Gegenfarbentheorie (Hering)

Die Wahrnehmung von Farbe unterliegt vielfältigen Einflüssen. Mit dem Einfluss der Feldgrösse auf die Farbsättigung, der Farbintensität auf den Farbton, der Farbkonstanz, der Farbumstimmung, den farbigen Nachbildern und dem farbigen Simultankontrast seien nur einige genannt.

Hering postulierte 1878, dass es zum Farbsehen drei Zelltypen gibt: Einen für rot-grün Gegensätze, einen für blau-gelb Gegensätze und

einen für hell-dunkel Gegensätze. Diese Theorie der Komplementärfarben widerspricht auf den ersten Blick derjenigen mit den drei Zapfentypen, die von Helmholtz vertreten wurde. Die Heringsche Annahme wurde jedoch durch elektrophysiologische Versuche bestätigt, nämlich als Eigenschaft der retinalen Ganglienzellen. Diese weisen also mit ihren rezeptiven Feldern nicht nur aktivierend und hemmende Anteile auf, sondern auch Farbgegensätze (Antagonismus). Mit dem Informationsverarbeitungsmodell nach Abb. 2-23 lassen sich die Heringsche und die Helmholtzsche Anschauung zusammenführen.

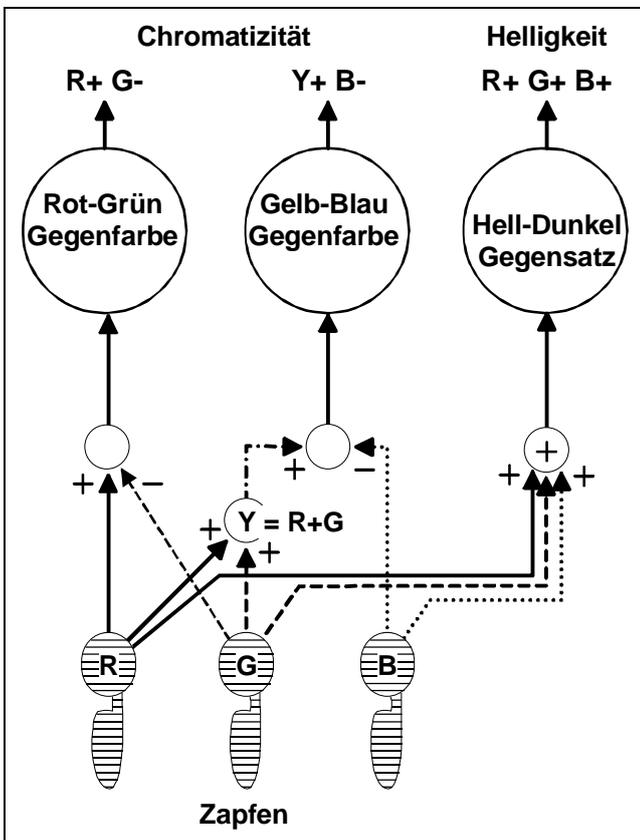


Abb. 2-23: Farbverarbeitung vom Rezeptor (unten) zur Ganglienzelle (oben).

Farbtondiskrimination

Bei den Wellenlängen um 480 nm und 575 nm ist das Auge für das Unterscheiden von Farben am empfindlichsten (Abb. 2-24). An diesen Stellen werden die Ganglienzellen wegen des Farbantagonismus am wenigsten stark gereizt

und sind daher gemäss der Beziehung von Weber empfindlich gegenüber Abweichungen vom antagonistischen Gleichgewicht. Die Sicherheit der Farberkennung vergrössert sich mit der Helligkeit und der Grösse der farbigen Objekte.

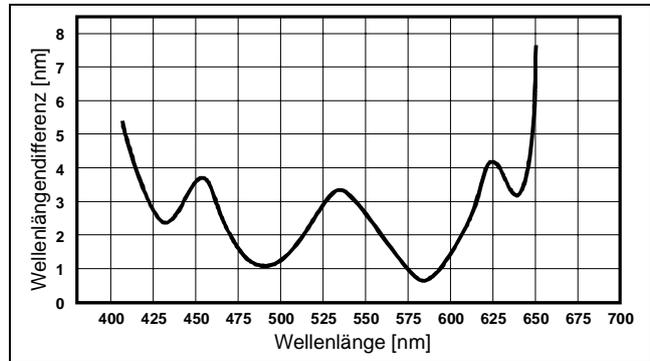


Abb. 2-24: Farbtondiskrimination ($\lambda - \Delta\lambda$ - Kurve).

Farbkontrast

Farbige Zeichen sind auf farbigem Grund nur dann gut erkennbar, wenn auch ein ausreichender Leuchtdichtekontrast vorhanden ist. Bei ungeeigneter Wahl kann in ungünstigen Fällen an der Grenze beider Farben die Mischfarbe auftreten, z.B. ein weisser Rand bei Blau auf Gelb. Bei kleinen Flächen kann sich die wahrgenommene Farbe in Richtung des Untergrunds verändern (Assimilation), bei grossen Flächen in Richtung seiner Komplementärfarbe (Simultankontrast).

Farbe soll sparsam und für grössere Flächen eingesetzt werden. In der Farbbenennung ungeübte Personen können nicht mehr als sechs Farben sowie Unbunt (schwarz-grau-weiss) unterscheiden.

„Metaeffekte“

Beim Betrachten von Farben werden zusätzliche Effekte wahrgenommen (Abb. 2-25). Neben der reinen Farbwahrnehmung signalisieren Farben Distanzen, Temperaturen und beeinflussen die psychische Grundstimmung.

Farbe	Distanz-wirkung	Temperatur-wirkung	Psychische Stimmung
Blau	Entfernung	kalt	beruhigend
Grün	Entfernung	sehr kalt bis neutral	sehr beruhigend
Rot	Nähe	warm	sehr aufreizend, beunruhigend
Orange	sehr nahe	sehr warm	anregend
Gelb	Nähe	sehr warm	anregend
Braun	sehr nahe, einengend	neutral	anregend
Violett	sehr nahe	kalt	anregend, aggressiv, beunruhigend, entmutigend

Abb. 2-25: Zusätzliche Effekte verschiedener Farben.

2.6 Biologische Lichtwirkungen

In den letzten Jahren werden in zunehmendem Mass auch in der Lichttechnik unspezifische biologische Lichtwirkungen diskutiert. Diese werden nicht durch den für das Sehen verantwortlichen spezifischen neuronalen Pfad übertragen. So erlangt die in den 50er Jahren entdeckte retino-hypothalamische Bahn derzeit erneut die Aufmerksamkeit von Lichtplanern und Arbeitswissenschaftlern. Es zeigte sich, dass unspezifische Lichtwirkungen wichtige biologische Vorgänge im Menschen vermitteln. Namentlich genannt seien:

- Die Unterdrückung der Melatonin-Produktion in der Nacht. Diese Wirkung ist für die Beleuchtungspraxis weniger von Interesse.
- Die zeitliche Stabilisierung der biologischen Uhr.
- Die Steigerung des Wachheitsgrades.
- Die erfolgreiche Behandlung saisonaler Depressionen (SAD) mit Lichttherapie.

Stabilisieren der inneren Uhr

Licht ist der wichtigste Faktor zur zeitlichen Synchronisation der biologischen Uhr (circadiane Rhythmik) mit dem Tag-Nacht-Rhythmus (siehe Abb. 2-26).

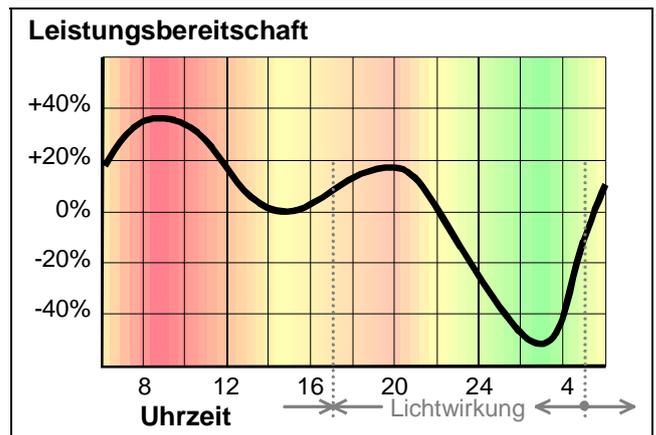


Abb. 2-26: Die menschliche Leistung ist von der Tageszeit abhängig. Am meisten Fehler und Unfälle geschehen während der Leistungsminima. Licht zwischen ca. 17 und 5 Uhr verschiebt diese Kurve in den Morgen hinein (Verzögerung), Licht zwischen ca. 5 und 17 Uhr schiebt sie zurück (Beschleunigung). Der genaue Zeitpunkt des Richtungswechsels ist individuell verschieden und hängt u.a. davon ab, ob jemand eher ein Morgentyp (Lerche) oder ein Abendtyp (Eule) ist.

Diese chronobiologische Lichtwirkung konnte bereits mit einer nächtlichen, 6,5-stündigen Lichtexposition von 100 lx am Auge nachgewiesen werden. Licht am frühen Morgen beschleunigt die Uhr, Licht am späten Abend verzögert sie; auch tagsüber hat Licht eine schwache, beschleunigende Wirkung. Genügend Licht am Tag – insbesondere am Morgen – ist für eine stabile Einstellung der Uhr wichtig. Welche Werte empfohlen werden sollen, ist aber noch Gegenstand von Untersuchungen. Möglicherweise reicht bereits das Überschreiten einer Wirkungsschwelle von 30 lx am Auge aus, wenn das Licht über mehrere Tage kumulativ wirkt. Dabei spielen wohl auch individuelle Faktoren und das Freizeitverhalten eine bedeutende Rolle.

Steigerung des Wachheitsgrads

Ab etwa 100 lx Beleuchtungsstärke am Auge sinkt die subjektive Ermüdung bzw. steigt die subjektive Munterkeit. Solche Lichtwirkungen konnten auch objektiv an physiologischen

Größen nachgewiesen werden. Tagsüber, in Fensternähe wird dieser Wert im Büro normalerweise überschritten. In fensterfernen Zonen, im Winter oder in Tagesrandstunden kann es je nach Abstrahlcharakteristik der Leuchten und je nach Helligkeit der Umgebung sein, dass zu wenig Licht zum Auge gelangt. Bei rein künstlicher Beleuchtung sollte das Verhältnis der Beleuchtungsstärke am Auge zur Beleuchtungsstärke auf dem Arbeitsplatz mindestens 1 : 3 betragen. Tiefstrahlende Leuchten mit wenig indirektem Licht unterschreiten dieses Verhältnis oft. Für fensterferne Zonen sind sie daher ungeeignet.

Arbeitsplatzstudien ergaben eine Zunahme der Arbeitsleistung mit zunehmender Beleuchtungsstärke (Abb. 3-13). Allerdings ist es schwierig, mögliche Lichtwirkungen von ebenfalls veränderten Faktoren der Motivation zu trennen. Laborstudien lassen dennoch den Schluss zu, dass die mit intensivem Licht erhöhte Aktivierung der Personen sowie die weniger beanspruchte Aufmerksamkeit nicht nur die Sehleistung, sondern generell die Arbeitsleistung verbessert. Dies äusserte sich etwa in einer Abnahme gemachter Fehler sowie in einer Zunahme der Mengenleistung oder der Merkfähigkeit.

Je dunkler ein Verkehrsweg ist, desto stärker muss sich die Aufmerksamkeit auf den Gehweg konzentrieren. Dadurch steigt das Risiko, Gefahren an anderen Stellen zu übersehen. Auch werden Gefahrenstellen wie etwa Treppenstufen immer undeutlicher erkennbar. Mit gezielter Beleuchtung kann auf bekannte Gefahrenstellen aufmerksam gemacht werden. Bei längerem Aufenthalt in schwach beleuchteten Räumen (z.B. in Archiven) kann sich mit der Zeit die Aktivierung bzw. Wachsamkeit der Personen verringern, wodurch sie bei Gefahr nicht rechtzeitig reagieren. In Normen sind für Räume mit Publikumsverkehr und für alle ständig besetzten Ar-

beitsplätze Beleuchtungsstärken von mindestens 200 lx vorgesehen.

Lichttherapie gegen saisonale Depressionen

Die sogenannte Lichttherapie weist gute Erfolge zur Behandlung von Patienten mit saisonal abhängigen Depressionsformen (SAD) auf. Solche Patienten, welche etwa 2% der Bevölkerung ausmachen, haben im Winter ein erhöhtes Schlafbedürfnis, verspüren eine erhöhte Lust nach Kohlehydraten, fühlen sich traurig und besorgt, sind oft unproduktiv und machen vermehrt Fehler, sie versuchen Kontakte zu vermeiden und sind öfter krank. Von Frühjahr bis Herbst fehlen diese Symptome. Etwa 9% der Bevölkerung erleben eine harmlosere Form dieser Saisonfühligkeit (S-SAD). Zur Behandlung von SAD werden Beleuchtungsstärken von über 2500 lx am Auge des Patienten erzeugt. Die Lichtquelle ist auch in der Peripherie des Gesichtsfeldes wirksam, so dass daneben einfache Sehaufgaben durchgeführt werden können. Lichttherapie wird eher als pharmakologischer Eingriff verstanden, der nicht präventiv allen Personen zu verabreichen ist. Daher lassen sich daraus keine Empfehlungen für die Allgemeinbeleuchtung ableiten. Individuelle Lichttherapiegeräte am Arbeitsplatz von Arbeitnehmenden mit SAD-Symptomen könnten sich aber durchaus als sinnvoll erweisen. Solche Personen, wie auch diejenigen mit S-SAD sollten im Winter mit viel Tageslicht arbeiten können und gelegentlich in den Pausen ins Freie gehen.

Dosis-Wirkungsbeziehung

Bisher ging man von hohen Beleuchtungsstärken > 2500 lx für diese Wirkungen aus. Einige Lichtplaner leiteten daraus ab, die derzeitigen Normen zwingen die Lichtbenutzer dazu, in der „biologischen Dunkelheit“ zu leben. Inzwischen ergeben neueste Untersuchungen aber, dass die 50%-Wirkungsschwellen für unspezifische

Lichtwirkungen wie Melatonin-Suppression, Verschiebung der circadianen Rhythmik und Steigerung des subjektiv und physiologisch bestimmten Wachheitsgrads zwischen 90 und 180 lx vertikaler Beleuchtungsstärke am Auge liegen (Abb. 2-27). Sogar mit nur 5.5 lx monochromatischen Lichts (509 nm) konnte der Melatoningehalt im Blut um 37% reduziert werden. Bei der Behandlung von SAD-Patienten mit Lichttherapie werden aber weiterhin mindestens 2500 lx empfohlen. Allerdings wird über vereinzelte Therapie-Erfolge mit dem sogenannten Lichthelm – einer Art lichtspendender Schirmmütze – ab 30 lx berichtet. Eventuell handelt es sich hierbei auch um einen Placebo-Effekt.

Offenbar können auch heutige Lichtgebungen biologisch wirksam sein. Eine abschliessende Beurteilung fällt aber schwer, weil die Labor-Ergebnisse schwer in die Praxis zu übertragen sind. Es fehlen wesentliche Informationen. Die im folgenden diskutierten Aspekte werfen auch die Frage auf, ob die genannten Wirkungen über die selben Rezeptoren und neuronalen Netze vermittelt werden. Nicht im Detail diskutiert wird die noch umstrittene Bedeutung der unspezifischen Lichtwirkungen für Gesundheit und Wohlbefinden.

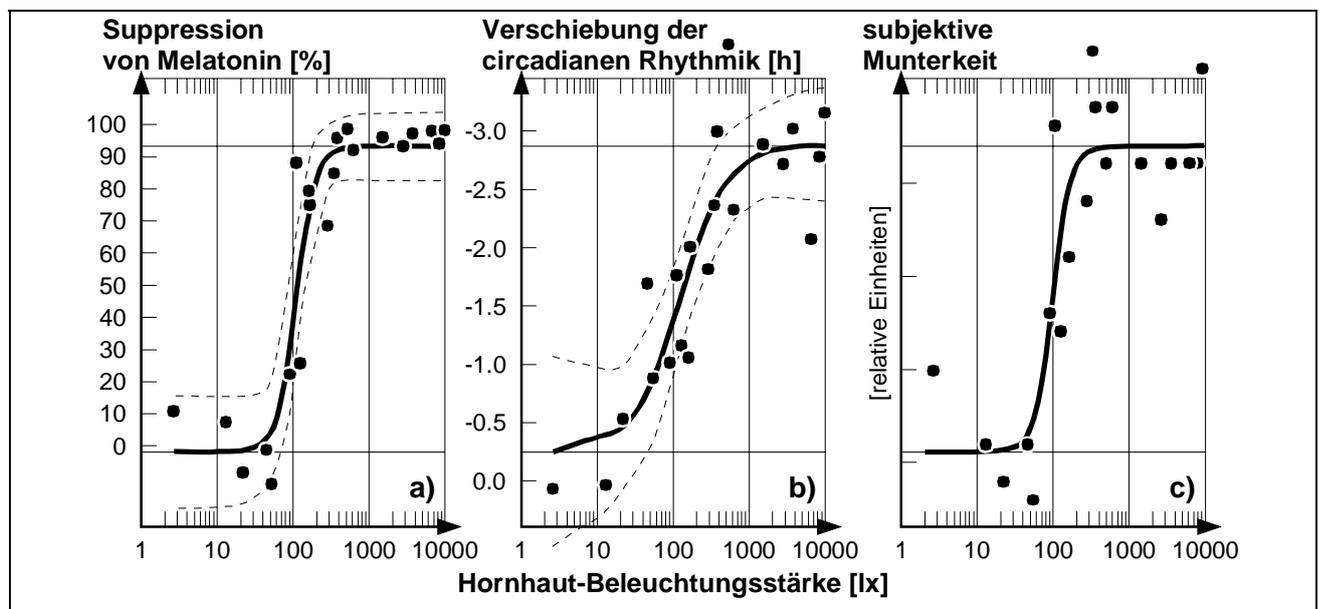


Abb. 2-27: Dosis-Wirkungs-Kurven für drei unspezifische Lichtwirkungen.

a) bis c): Nächtlche, 6.5 Stunden dauernde Expositionen mit weissem Licht. Negative Ordinatenwerte in b) bedeuten eine Verzögerung der circadianen Rhythmik. Auch Beschleunigungen konnten mit 180 lx beobachtet werden.

Aspekte einer Photometrie biologischer Lichtwirkungen

Bisherige Beleuchtungsplanung und -bewertung beruht auf den jahrzehnte alten Erfahrungen der Photometrie. Den Grössen wie Beleuchtungsstärke in Lux oder Leuchtdichte in cd/m^2 liegt die Überlegung zugrunde, dass das Sichtbarmachen von Objekten die Hauptaufga-

be natürlicher oder künstlicher Beleuchtung ist. So simuliert ein Luxmeter die spektrale Empfindlichkeit der Netzhaut für ein 2-Grad-Gesichtsfeld am Ort der Fovea. Ein Leuchtdichte-Photometer simuliert zusätzlich die optischen Eigenschaften des Auges für Abbildungen an diese Stelle.

Unspezifische Lichtwirkungen verlangen offenbar neue photometrische Masse. Evtl. können auch bisherige photometrische Grössen mit Korrekturfaktoren und Zusatzmessungen ergänzt werden. Mögliche Änderungen ergeben sich bei der spektralen, der räumlichen und der zeitlichen Integration des Lichts. Dafür muss bekannt sein, welche spektralen Empfindlichkeiten die zuständigen Rezeptoren besitzen, wie sich deren Signale über die Netzhaut summieren (oder auch hemmen) und welches deren zeitliches Adaptationsverhalten ist. Abgesehen von der Tatsache, dass die Datenlage noch sehr unvollständig ist, stehen der Ermittlung solcher Korrekturfaktoren weitere Schwierigkeiten im Wege.

Zur räumlichen Integration

Eine Schwierigkeit liegt in der Forschungspraxis begründet, für die Lichtintensität die vertikale Beleuchtungsstärke an der Hornhaut (Cornea) des Auges zu verwenden. Eine 5 cm grosse, 50'000 cd/m² helle Glühlampe in 1 m Entfernung erzeugt dieselbe Beleuchtungsstärke von 100 lx auf der Hornhaut, wie eine grossflächige Lichtquelle mit weniger als 50 cd/m². Man setzt also voraus, dass intensives, auf eine Stelle der Netzhaut fokussiertes Licht dieselbe Wirkung hat, wie entsprechend weniger intensives, aber über die ganze Netzhaut verteiltes Licht (siehe Abb. 2-28 und N.B. in Abb. 2-30). Für eine adäquate Beurteilung der Lichtintensität müsste nicht die Hornhaut-Beleuchtungsstärke sondern diejenige auf jeder Netzhautstelle bekannt sein. Letztere ist proportional zur Leuchtdichte des vom Auge abgebildeten Objekts, z.B. der Lichtquelle. Viele Arbeiten erläutern die Lichtbedingungen im Experiment nicht im Detail. Dadurch ist die Leuchtdichteverteilung und die Verteilung der Netzhautbeleuchtungsstärke nicht mehr zu rekonstruieren.

Die optischen Eigenschaften des Auges haben zur Folge, dass Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln, unterschiedlich hohe Beleuchtungsstärken auf der Netzhaut erzeugen (Stichworte dazu sind: Asphärische Hornhaut, Vignettierung durch Pupille, variierende optische Weglängen und damit der Lichtabsorptionen, Krümmung der Netzhaut). Es resultiert eine Schwächung der Beleuchtungsstärke auf der Rezeptorfläche mit zunehmendem Einfallswinkel.

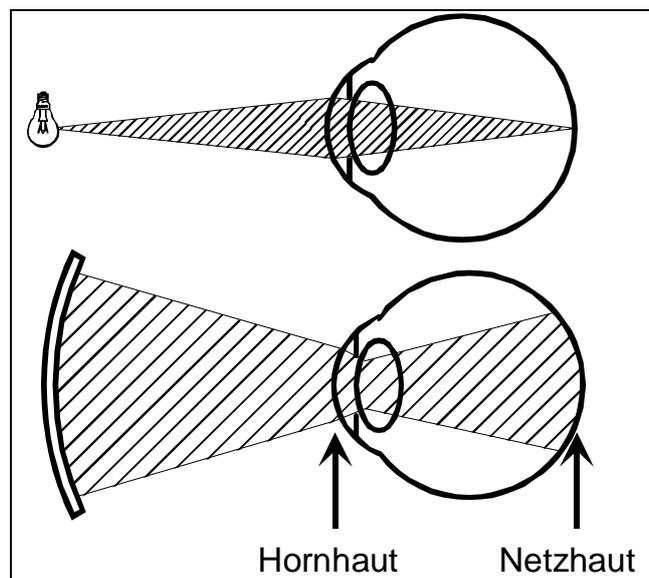


Abb. 2-28: Unterschiedliche Beleuchtungssituationen, welche gleiche Hornhaut-Beleuchtungsstärken, aber unterschiedliche Netzhaut-Beleuchtungsstärken erzeugen.

Selbstverständlich bleibt das Auge unter natürlichen Bedingungen nicht fixiert. Ständige Augenbewegungen „verschmieren“ die Richtcharakteristik. Dabei spielt auch die zeitliche Trägheit der Übertragungskette eine Rolle. Erstaunlicherweise gibt es zur arbeitsplatzbezogenen Häufigkeitsverteilung von Blickrichtungen kaum Literatur. Auch für Blendung und Helligkeitsadaptation wäre die Blickverteilung in vertikaler Richtung und der Einfluss von Fenstern von besonderem Interesse. Weitere moderierende Faktoren für unspezifische Lichtwirkungen sind die mit dem Alter abnehmende Transmission der Augenlinse und die mit der Adaptations-

leuchtdichte variierende Pupillengrösse. Letztere wirkt als Regler für Helligkeitsänderungen kompensierend.

Weitgehend offen sind die Sensitivitäten der Netzhautstellen für unspezifische Lichtwirkungen. Die ganze Netzhaut scheint beteiligt zu sein, wobei die Fovea (die Stelle des schärfsten Sehens) – anders als bei spezifischen Lichtwirkungen – keine hervorragende Rolle spielt. Erste Ergebnisse zeigen, dass Licht, welches von oben ins Auge fällt, die Melatonin-Produktion wirksamer unterdrückt als Licht von unten. Von der Seite einfallendes Licht zeigte sich von der Schläfenseite her kommend als wirksamer als von der Nasenseite her. Hier wirkt aber normalerweise das zweite Auge kompensierend. Für schläfenseitige Einfallswinkel > 55 Grad ist dies aber nicht mehr der Fall, weil die Nase das andere Auge abdeckt.

Für Melatonin-Suppression sind zwei Augen wirksamer als eines allein. Von den spezifischen Lichtwirkungen her gesehen ist dies nicht selbstverständlich: Einäugig erscheint die Umwelt nicht dunkler als zweiäugig.

Lichttherapie von SAD-Patienten wirkt auch dann, wenn nicht direkt auf die Lichtquelle geblickt wird. Die periphere Retina erscheint hier also als bedeutsam. Dass der bereits genannte Lichthelm bei einem hohen Prozentsatz von SAD-Patienten positiv wirkt, könnte auch durch die spezielle geometrische Lichtanordnung mit Licht von oben bedingt sein.

Zur spektralen Integration

Die spektrale Empfindlichkeit der Melatonin-Suppression zeigte sich gegenüber der bekannten spektralen Hellempfindlichkeit V -Lambda ins Blaue verschoben (Abb. 2-29). Es wird diskutiert, wie dies mit Hilfe eines Korrekturfaktors in der Photometrie berücksichtigt werden könnte. V -Lambda ist ein gewichtetes Mittel der

spektralen Empfindlichkeiten von Rot-, Grün- und Blau-Zapfen. Die Gewichte entsprechen der Häufigkeit dieser Rezeptoren. Ob eine solche Mittelung auch für unspezifische Wirkungen möglich ist, oder ob man – wie Tierversuche es nahe legen – von neuen Rezeptoren ausgehen muss, ist noch nicht abschliessend zu beurteilen. Auch in den Tierversuchen wurde bis jetzt nicht ausgeschlossen, dass Zapfen oder Stäbchen einen zusätzlichen Einfluss ausüben können. Wie Abb. 2-29 zeigt, könnten beim Menschen die Blau-Zapfen beteiligt sein. Bei rotgrünblinden Personen (mit intaktem Blau-Rezeptor) konnte keine Veränderung der Melatonin-Suppression beobachtet werden. Hingegen wurde die circadiane Rhythmik mit rotem Licht (95% der Energie oberhalb von 600 nm) gleich gut verschoben, wie mit weissem Licht. Dies unterstützt die Vermutung, dass man bei verschiedenen unspezifischen Lichtwirkungen von verschiedenen Wirkmechanismen ausgehen muss.

Auch andere unspezifische Wirkungen zeigen ein uneinheitliches Bild: Frühe Untersuchungen ergaben ein Ansteigen des Blutdrucks mit blauem Licht und ein Absinken mit rotem Licht; grünes oder gelbes Licht hatte keine signifikante Wirkung. Eigene Untersuchungen bestätigen eine im Vergleich zu warmweissem Licht subjektiv anregende Wirkung von tageslichtweissem Licht. Grünes Licht ist bei der Lichttherapie wirksamer als rotes Licht; weisses Licht ist wirksamer als blaues (!) oder rotes. Vollspektrumlampen sind in der Lichttherapie nicht wirksamer als normale Leuchtstofflampen. Das von gewissen Vollspektrumlampen abgegebene UV-Licht ist für die Lichttherapie nicht notwendig, birgt aber das zusätzliche Risiko einer Augenschädigung.

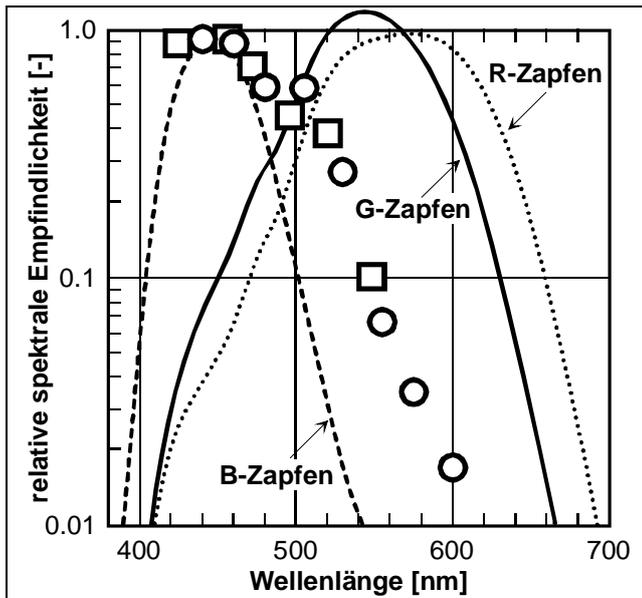


Abb. 2-29: Wirkung monochromatischen Lichts auf die Melatonin-Unterdrückung in der Nacht, im Vergleich zur spektralen Empfindlichkeit von R-, G- und B-Zapfen. Die Kreise bzw. Quadrate stellen Ergebnisse verschiedener Forschungsgruppen dar. Die V-Lambda-Kurve liegt zwischen den Kurven für R- und G-Zapfen.

Zur zeitlichen Integration

Bis jetzt unklar ist, wie stark unspezifische Lichtwirkungen mit der Zeit adaptieren. Gemäss Abb. 2-30 bleibt nach einem exponentiellen Abfall die Melatoninkonzentration mehr oder weniger konstant, was nicht auf eine Adaptation hindeutet (der langsame Abfall hängt wohl mit der Fließdynamik des Blutkreislaufs zusammen). Nicht die Belichtung in Lux-Stunden, sondern die Beleuchtungsstärke bestimmt den Melatoningehalt: Drei Stunden mit 200 lx ergeben nicht den selben Gehalt wie eine Stunde mit 600 lx. Hingegen wird natürlich die Gesamtmenge des erzeugten Melatonins pro Nacht mit der Expositionsdauer geringer.

Intermittierendes Licht verschiebt die circadiane Rhythmik deutlich effektiver als kontinuierliches Licht. Abwechslungsweise wurde für 5.3 min Licht mit 9500 lx ein- und für 19.7 min wieder ausgeschaltet. Dies ergibt für eine Dauer von 5 h eine Belichtung von 11'000 Lux-Stunden.

Das sind 23% gegenüber kontinuierlichem Licht mit 47'500 Lux-Stunden. Die Wirkung betrug aber 71% derjenigen mit Dauerbelichtung. Dies kann als Adaptationseffekt gedeutet werden: Licht zu Beginn der Exposition ist wirksamer als später. Durch zwischenzeitliches Abschalten regeneriert das System und wird wieder empfindlicher. Intermittierendes Licht wirkt auch subjektiv stark aktivierend, sein Nutzen bei der Lichttherapie ist hingegen noch offen. Dort geht man davon aus, dass zwei Stunden mit 2500 lx gleich wirksam sind wie eine Stunde mit 5000 lx oder eine halbe Stunde mit 10'000 lx. Die Belichtung in Lux-Stunden scheint also die therapeutische Wirkung zu bestimmen.

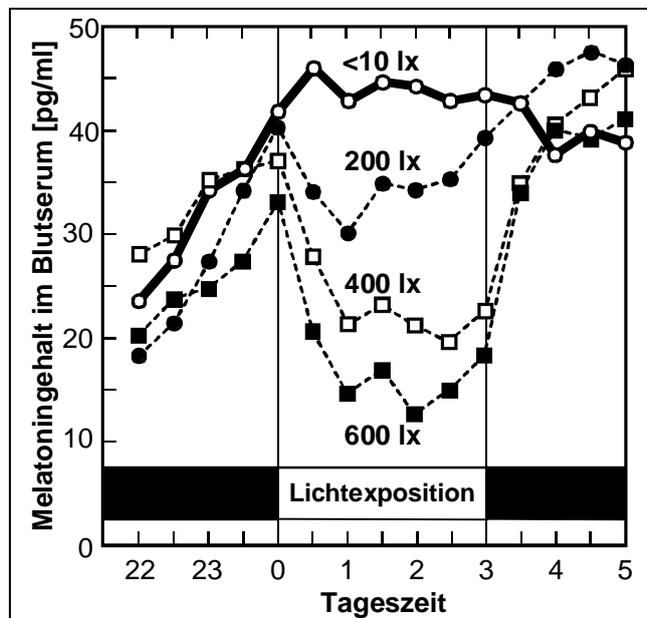


Abb. 2-30: Zeitlicher Verlauf der Melatonin-Suppression während dreistündiger Lichtexposition unterschiedlicher Hornhaut-Beleuchtungsstärke. N.B.: Letztere wurde mit Hilfe der Lichtquellendistanz eingestellt. Die Netzhaut-Beleuchtungsstärke blieb somit konstant, nur die Grösse des Lichtquellenbildes auf der Netzhaut variierte.

Leben wir in der „biologischen Dunkelheit“?

Leben wir in der „biologischen Dunkelheit“? Dazu sind zwei Fragen zu diskutieren:

- a) Wie viel „biologisch“ wirksames Licht ist an Arbeitsplätzen vorhanden?
 b) Welche unspezifischen Lichtwirkungen sollen gefördert werden?

Zu a): Zuerst ist festzuhalten, dass Normen niemanden zwingen, in zu dunklen Räumen zu leben; erst der unsachgemässe Umgang damit zwingt dazu. Normen legen nur Minimalanforderungen fest. Seit jedoch Energiesparen angesagt ist und seit immer öfter auch Lichtexperten die Norm und nicht die Lichtwirkung als Argument verwenden, zeigt sich die Tendenz, den Inhalt von Normen als anzustrebende Optimallösungen zu verstehen.

Bei drei der vier diskutierten unspezifischen Lichtwirkungen wurden Schwellen von rund 100 lx nachgewiesen. Über das Ausmass von Hornhaut-Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz sind kaum Angaben in der Literatur zu finden. Eine Statistik für Nacht- und Tagwächter ist in Abb. 2-32 dargestellt. Je nach Alter der Person kann hier tatsächlich eine Unterversorgung mit Licht vorliegen. Solche Statistiken wären auch für andere Arbeitsplätze eine wertvolle Hilfe. Orientierende Messungen im Büro zeigen ein deutlich günstigeres Bild (Abb. 2-31). Es sind auch grosse Beleuchtungsstärkeunterschiede zu erkennen. Da wir durch fortwährende Augenbewegungen zum Beispiel zwischen Fenster, Raumbegrenzungsflächen und Arbeitsfläche eine ständig sich ändernde Lichtmenge auf der Netzhaut erzeugen, ist das vorgestellte Ergebnis mit intermittierendem Licht bedeutsam für eine zukünftige Leuchtdichte- und Kontrastplanung. Auch Licht von oben – z.B. von einer hellen indirekt beleuchteten Decke – scheint nicht „nur“ von psychologischer Wirkung zu sein. Nicht allein das Beleuchten der Arbeitsfläche ist somit Ziel guter Lichtgebung. Auch mit der Lichtfarbe (nicht aber mit dem Spektrum) lassen sich unspezifische Wirkungen moderieren.

Tageslicht	ja	ja	ja	nein
Sonnenlicht	ja	nein	nein	nein
Kunstlicht	nein	nein	ja	ja
Beleuchtungsstärken am Büroarbeitsplatz [lx]				
auf Tisch, horizontal	500	250	800	530
geradeaus (Wand), vor Auge vertikal	300	90	350	220
90° n. links, (Fenster), vor Auge vertikal	1350	540	730	330
90° n. rechts, (Wand), vor Auge vertikal	130	40	280	260

Abb. 2-31: Messungen von vertikalen Beleuchtungsstärken an Arbeitsplätzen: Orientierende, nicht repräsentative Lux-Werte für einen Büroarbeitsplatz

Zu b): Ergebnisse zur lichtinduzierten Unterdrückung der nächtlichen Melatonin-Produktion sind zur Zeit am einfachsten zu erfassen und werden daher in der Literatur am ausführlichsten beschrieben. Für den Arbeitsplatz spielen sie kaum eine Rolle, da Melatonin nur in der Nacht entsteht. Die Abwesenheit von Melatonin am Tage liegt nicht an der unterdrückenden Lichtwirkung: Auch ohne Licht entsteht dank einer Kopplung an den circadianen Rhythmus am Tage kein Melatonin. Auf andere unspezifische Lichtwirkungen lassen sich die Ergebnisse der Melatonin-Suppression angesichts der zum Teil divergierenden Aussagen wohl nicht ohne weiteres übertragen. Auch die Verschiebung der circadianen Rhythmik findet hauptsächlich mit Licht in der Nacht statt. Ausser für Schicht- und Nachtarbeiter ist eine solche auch nicht erstrebenswert. Morgen- und Abendlicht, wie auch die neu beobachtete Lichtwirkung am Tag können aber helfen, den circadianen Rhythmus zu stabilisieren.

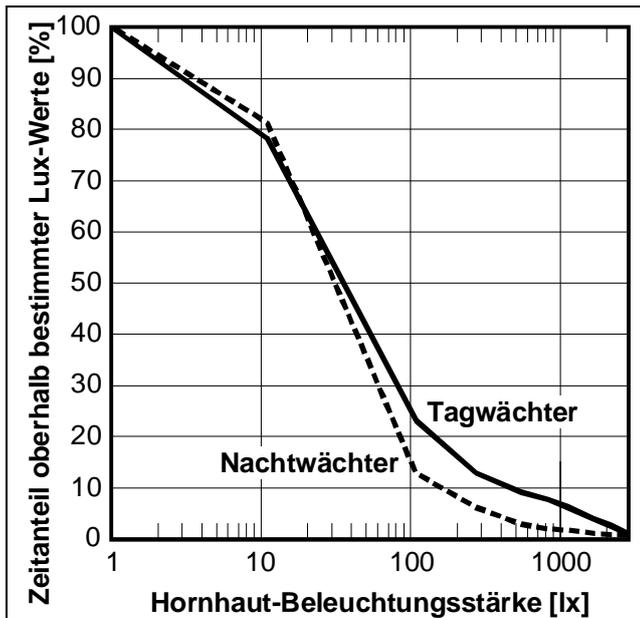


Abb. 2-32: Mit „Brillen-Luxmetern“ bestimmte Häufigkeit von Lux-Werten während der Tätigkeit von Nacht- und Tagwächtern im Innenraum. So sind z. B. Tagwächter zu 23% der Arbeitszeit Beleuchtungsstärken > 100 lx ausgesetzt; Nachtwächter hingegen nur zu 15% (andere Untersucher verwenden für solche Statistiken untaugliche Handgelenk-Messgeräte).

In der aktivierenden Wirkung von Licht scheint grosses Potential für die Beleuchtungspraxis zu stecken. Leider ist dies die am wenigsten untersuchte unspezifische Lichtwirkung. Auch hier sollte daran gedacht werden: Umso mehr ist nicht immer umso besser. Das Wohlbefinden und langfristig auch die Gesundheit stehen in einer umgekehrt U-förmigen Beziehung zur Aktivierung. Zu wenig wie auch zu viel Aktivierung ist beanspruchend.

Die Lichttherapie kann grosse Erfolge bei der Behandlung von SAD-Patienten aufweisen. Ob sie aber für Innenbeleuchtungen massgebend sein und damit auch für gesunde Personen angewandt werden soll ist fraglich. Immerhin klagen manchmal sogar einige Patienten über Nebenwirkungen wie erhöhte Reizbarkeit und Überaktivität. Lichttherapie sollte wohl vorläufig eher wie ein Medikament behandelt werden, das man nicht der gesamten Bevölkerung präventiv verabreicht.

3

Beleuchtung

3.1

Einleitung

In den letzten Jahrzehnten zeichnete sich immer deutlicher eine Wende im Arbeitsleben von manueller zu geistiger Arbeit ab, welche in viel stärkerem Masse visuelle Tätigkeiten verlangt. Dieser Trend verstärkte sich mit der zunehmenden Verbreitung von Bildschirmarbeitsplätzen. Immer grössere Anforderungen an Beleuchtungsanlagen und die visuelle Gestaltung von Arbeitsmitteln begleiten diese Entwicklung. Besonders für langandauernde Arbeiten entstehen visuelle Ermüdung oder asthenopische Beschwerden (Augenbrennen, Kopfschmerz etc.), wenn diese Anforderungen nicht erfüllt werden.

Die Ursachen asthenopischer Beschwerden sind vielfältiger Art. Neben visuellen und nicht-visuellen Wirkungen der Beleuchtung sind beispielsweise auch einer korrekten und zweckmässigen Brillenanpassung und der Anordnung der Arbeitsmittel grosse Aufmerksamkeit zu schenken. Auch der Einfluss der Softwaregestaltung darf nicht vergessen werden.

Das Ziel einer jeden Beleuchtungsbewertung anhand von Güte Merkmalen ist, gute Sehbedingungen ohne störenden Lichteinfall, kombiniert mit einem angenehmen visuellen Ambiente zu ermöglichen; das „visuelle Klima“ soll optimiert werden.

Ist künstliches Licht ungesund?

Oft werden die im Vergleich zwischen künstlicher Beleuchtung und „natürlichem“ Licht festgestellten Unterschiede als belastend hingestellt. Das muss aber nicht notwendigerweise der Fall sein. Sie lassen sich zusammengefasst

als zeitliche, örtliche und spektrale Unterschiede formulieren.

Zeitliche Veränderung des Lichts

Im Jahres- und Tagesverlauf ändert sich die Beleuchtungsstärke zwischen Sonnenaufgang und -untergang im Freien um den Faktor 1000 und mehr. Diese Variation ist an Arbeitsplätzen unerwünscht. Man behilft sich mit Sonnenschutzvorrichtungen und mit automatischer Helligkeitsregelung der künstlichen Tageslicht-Ergänzungsbeleuchtung. Es wird jedoch diskutiert, ob die Regulation der circadianen Rhythmik durch weniger starke, tageszeitabhängige Beleuchtungsstärkeänderungen der künstlichen Beleuchtung günstig beeinflusst werden kann.

Dass auch der Jahresverlauf der Helligkeit einen Einfluss auf den Menschen hat, wird durch die Möglichkeit gezeigt, saisonale Depressionen mit intensivem künstlichem Licht zu behandeln.

Künstliche Beleuchtung mit Entladungslampen weist oft ein mehr oder weniger stark wahrnehmbares 100 Hz-Flimmern (zum Teil mit 50 Hz-Anteilen) auf, welches unter Umständen zu asthenopischen Beschwerden führen kann. Das Problem des Flimmerns wird heute mit elektronischen Hochfrequenz-Vorschaltgeräten EVG technisch gelöst.

Örtliche Verteilung des Lichts

Die wesentliche Tageslichtquelle ist – abgesehen von der direkten Sonneneinstrahlung – das Himmelslicht. Es erzeugt das Gefühl sich „im Freien“ zu befinden dadurch, dass es bereits mit horizontaler Blickrichtung gesehen wird. Dies in Innenräumen zu simulieren, würde

nicht nur eine Aufhellung der Decke bedeuten, wie es bei der reinen Indirektbeleuchtung praktiziert wird, sondern auch eine Aufhellung der Wände.

Dagegen spricht jedoch eine stärkere Störung durch Blendung und Spiegelung. Sie ist daher nur begrenzt möglich. Linienförmige Lichtquellen wie Leuchtstofflampen sind in der Natur unbekannt. Dass die durch sie entstehenden ungewohnten Schatten und Glanzlichter an den Inneneinrichtungen zu Beschwerden führen könnten, wurde zwar vermutet, aber nicht systematisch untersucht.

Spektrale Verteilung des Lichts

Viele Entladungslampen weisen, im Gegensatz zu Tageslicht, ein diskontinuierliches Spektrum auf. Das kann hypothetisch zu Änderungen des Akkommodationserfolgs (Fokussierung der Augenlinse), der Sehschärfe und der Farbwiedergabe führen. Untersuchungen zeigten, dass in der Praxis der Beleuchtung bei konstanter Lichtfarbe nur die Farbwiedergabeeigenschaften des Lichts eine Bedeutung erlangen können.

Die Lichtfarbe des Tageslichts verändert sich im Laufe des Tages, was bei künstlichem Licht (zur Zeit) selten der Fall ist.

3.2 Photometrie

Lichtstrom und Lichtausbeute

Seit Einführung der elektrischen Beleuchtung wird die Entwicklung der Lampen durch die stetige Vergrößerung ihrer Lichtausbeute bestimmt. Das heisst es soll mit möglichst wenig elektrischer Leistung ein möglichst grosser Lichtstrom (Masseinheit: Lumen = lm) erzielt werden. Bei Glühlampen beträgt die Lichtausbeute rund 14 lm/W, bei modernen, energiespa-

renden Leuchtstofflampen bis 104 lm/W. Die gute Lichtausbeute bei Leuchtstofflampen wird durch Anpassen des Lichtspektrums an die Hellempfindlichkeit des Auges bewirkt (Abb. 3-1). Das muss aber teilweise durch reduzierte Farbwiedergabe-Eigenschaften erkauft werden. Das heisst, dass gewisse Farben, wenn sie durch diese Lampen beleuchtet werden, unnatürlich oder verfälscht aussehen.

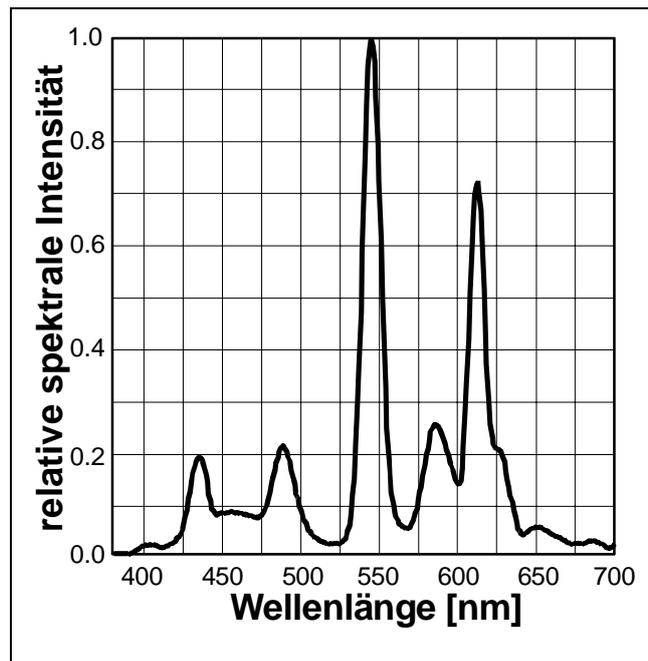


Abb. 3-1: Lichtspektrum einer modernen energiesparenden Leuchtstofflampe. Die intensivste Wellenlänge 550 nm ist etwa da, wo das Auge am empfindlichsten ist (vgl. Abb. 2-4).

Lichtstärke

Das Licht eines Beleuchtungskörpers wird nicht in alle Raumrichtungen gleichmässig abgestrahlt. Die Lichtstärke (Masseinheit: Candela = cd) beschreibt, welcher Lichtstrom in eine bestimmte Richtung des Raumes gestrahlt wird (Abb. 3-2). Die Hersteller von Lampen und Leuchten veranschaulichen diese Abstrahlcharakteristik durch Verteilungskurven, aus welchen ersichtlich ist, ob es sich um direkt, indirekt oder kombiniert strahlende Beleuchtungskörper handelt. Die Abstrahlcharakteristik be-

stimmt damit weitgehend sowohl die Lichtverteilung im Raum als auch die Schattigkeit.

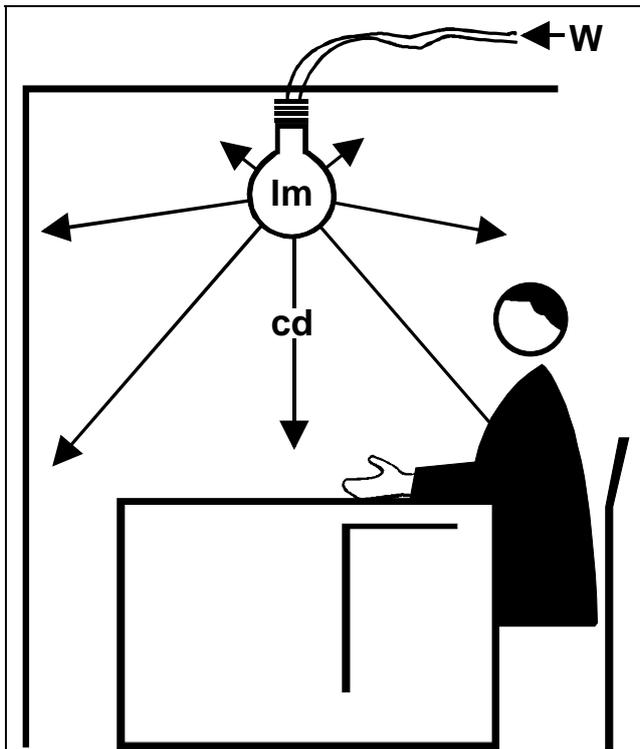


Abb. 3-2: Von der elektrischen Leistung (Watt) über den Lichtstrom (Lumen) zur Lichtstärke (Candela).

Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke (Masseinheit: Lux = lx) beschreibt, welcher Lichtstrom auf einen Quadratmeter Fläche, zum Beispiel die Arbeitsfläche oder eine Wand fällt (Abb. 3-3). Da die Beleuchtungsstärke mit einem Luxmeter einfach zu messen ist, findet man dazu für verschiedenste Sehaufgaben Empfehlungen. Dies obwohl eigentlich nicht von Interesse ist, wie viel Licht auf ein Arbeitsgut fällt, sondern vielmehr wie viel Licht vom Arbeitsgut ins Auge gelangt. Das Luxmeter berücksichtigt die für verschiedene Wellenlängen des Lichtspektrums unterschiedliche Empfindlichkeit des menschlichen Auges ($V(\lambda)$ in Abb. 2-4).

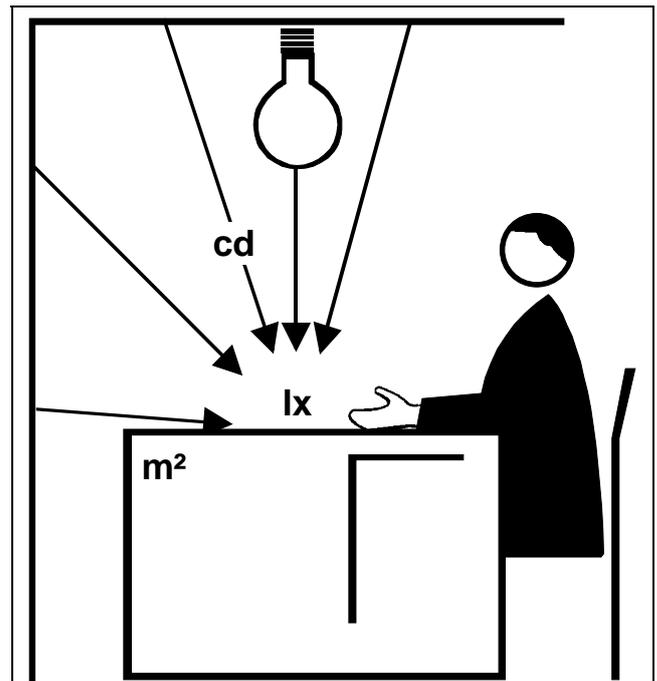


Abb. 3-3: Von der Lichtstärke (Candela) zur Beleuchtungsstärke (Lux).

Leuchtdichte

Die Lichtstärke, die pro Quadratmeter abstrahlende Fläche ins Auge gelangt, heisst Leuchtdichte (Masseinheit: cd/m^2 ; Abb. 3-4). Ein weisses Blatt Papier unter Bürobeleuchtung hat ca. $100 \text{ cd}/\text{m}^2$. Die Leuchtdichte hängt stark von den Reflexions- bzw. bei Beleuchtungskörpern auch von den Transmissionseigenschaften des betrachteten Flächenelements ab. Die Leuchtdichte bedingt direkt die subjektiv empfundene Helligkeit einer Fläche; eine optimale Leuchtdichteverteilung im Raum ist daher eine wesentliche Voraussetzung für ein gutes "visuelles Raumklima". Heutzutage lässt sich die Leuchtdichte mit einem Photometer ebenfalls auf einfache Art erfassen. Da mit diesem Gerät auch Blendquellen, Kontraste und durch Spiegelung verursachte Kontrastminderung quantitativ bestimmt werden können, bieten Leuchtdichtemessungen eine wertvolle Ergänzung im Instrumentarium der Umweltergonomie.

Die Leuchtdichte L von diffus reflektierenden Oberflächen mit dem Reflexionsgrad r , lässt sich aus der Beleuchtungsstärke E berechnen:

$$L = E \cdot r / \pi$$

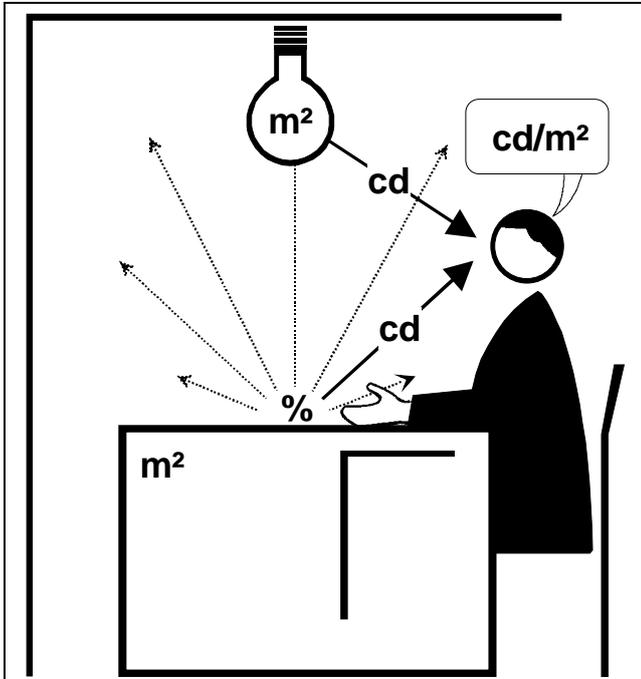


Abb. 3-4: Von der Lichtstärke (Candela) zur Leuchtdichte (Candela / m^2) entweder direkt von einer Lichtquelle oder indirekt über die Reflexion (in %) an einer Fläche.

3.3 Nutzen des Lichts

Der Nutzen des Lichts bei der Arbeit lässt sich in folgende vier Aspekte aufteilen:

- Sehen mit Licht: Licht wird benötigt, um die Arbeitsaufgabe und deren Umgebung sehen zu können. Zugleich darf es aber den Sehvorgang nicht durch Blendung oder Spiegelungen stören.
- Aktivieren mit Licht: Licht wirkt auf den Menschen aktivierend und fördert somit die Leistung.
- Wohlfühlen mit Licht: Eine geeignete Lichtgebung mit Tages- und Kunstlicht fördert das Wohlbefinden und damit längerfristig die Gesundheit am Arbeitsplatz.

- Schützen mit Licht: Gefahrenstellen und Fluchtwege erkennbar machen sowie die Ermüdung verhindern sind wichtige Aufgaben des Lichts am Arbeitsplatz.

Sehen mit Licht

Die traditionelle Lichtplanung beruht überwiegend auf Erfahrungen und Erkenntnissen zur Sehleistung. Bei guter Sehleistung kann man kleine oder undeutliche Sehobjekte genau und schnell erkennen. Ein typisches Beispiel wäre das Erkennen von Fehlstellen in der Textilproduktion (Abb. 3-5) oder das Erkennen von Staub auf einer Prüffläche. Operationale Masse für gute Sehleistung sind die Sehschärfe und die Kontrastempfindlichkeit. Ursachen für eine Reduktion der Sehleistung sind an drei Stellen zu suchen:

- Bei der Beleuchtung: Reduktion der Sehleistung durch zu wenig Licht, durch Blendung, durch Spiegelung und Kontrastminderung.
- Bei der Sehaufgabe: Reduktion der Sehleistung durch zu helle Umgebungsflächen, zu kleine Kontraste, ungünstige Distanzen und zu kleine Objektdetails sowie durch zu grosse Geschwindigkeiten und ungünstige Farbgebung.
- Beim Menschen: Reduktion der Sehleistung durch schlecht angepasste Brillen oder Kontaktlinsen und durch Trübungen im Auge insbesondere beim älteren Menschen sowie durch Farbfehlsichtigkeiten.

Um gut sehen zu können, braucht man eine ausreichend hohe Beleuchtungsstärke. In der Praxis werden in der europäischen Norm EN 12464-1 für verschiedene Räume und Tätigkeiten sogenannte Wartungsbeleuchtungsstärken empfohlen. Am Arbeitsplatz, im Bereich der Sehaufgabe dürfen diese auch von älteren, verschmutzten Anlagen nie unterschritten werden. Sie gelten für Personen mit durchschnittlichem Sehvermögen. Der individuelle Lichtbe-

darf kann jedoch bis zu einem Faktor 2 nach oben oder unten abweichen. Ältere Personen benötigen oft mehr Licht, als in den Empfehlungen angegeben wird (Abb. 3-6). Sie sind aber unter Umständen auch empfindlicher für Blendung (Abb. 3-7). In dieser Situation ist es von Vorteil, die Allgemeinbeleuchtung mit einer beweglichen Einzelplatzbeleuchtung zu ergänzen. Wegen ihrer Flexibilität wird diese aber auch von jüngeren Personen gern genutzt. Vorrang vor einer Erhöhung der Beleuchtungsstärke hat in jedem Fall die optische Korrektur vorhandener individueller Sehfehler.

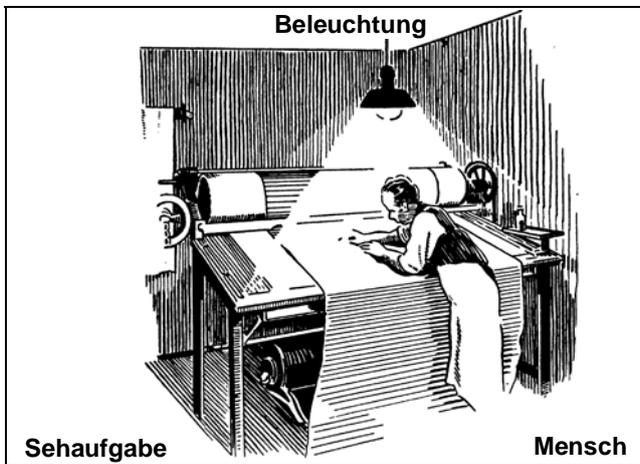


Abb. 3-5: Der Mensch in seiner Arbeitsumgebung. Je grösser die momentane Sehschärfe ist, desto kleinere Details eines Sehobjekts können erkannt werden. Die Sehschärfe kann sowohl durch die Beleuchtung, durch die Sehaufgabe als auch durch den Menschen selbst vermindert werden. (Zeichnung aus der 2. Auflage des „Handbuch für Beleuchtung“ von 1942).

Die Wartungsbeleuchtungsstärke bezieht sich allein auf die Schwierigkeit der Sehaufgaben. Es wird vorausgesetzt, dass keine zusätzlichen Störungen z.B. durch Blendung oder ungeeignete Lichtfarben vorhanden sind. Je kleiner die zu erkennenden Objekte und je geringer deren Kontraste sind, desto schwieriger wird eine Sehaufgabe. Sie verlangen höhere Beleuchtungsstärken. Auch bei Sehobjekten mit geringem Reflexionsgrad sind entsprechend höhere

Beleuchtungsstärken vorzusehen. Die Pupillengrösse der Augen wird mit zunehmender Umgebungshelligkeit kleiner. Ähnlich wie beim Fotoapparat ergibt sich dadurch eine vergrösserte Schärfentiefe. Das heisst, ein grösserer Distanzbereich kann ohne Ändern der muskulär beanspruchenden Augenfokussierung scharf gesehen werden. Auch diese Tatsache spricht dafür, eher zu hohe als zu geringe Beleuchtungsstärken vorzusehen.

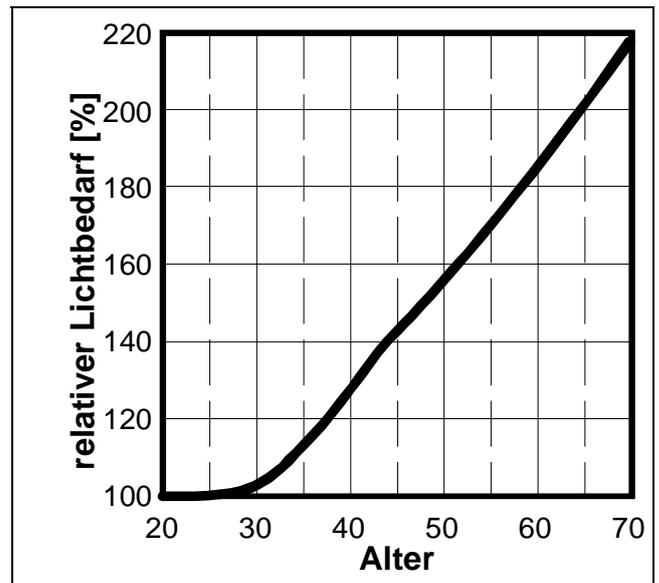


Abb. 3-6: Relativer Lichtbedarf für gleiche nutzbare Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut in Abhängigkeit des Alters .

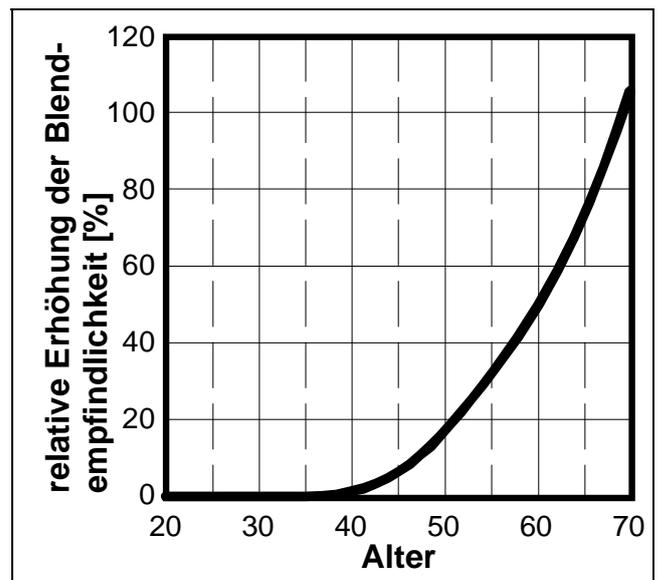


Abb. 3-7: Relative Erhöhung der Blendempfindlichkeit mit dem Alter.

Sogenannte physiologische Blendung liegt vor, wenn eine Person besser sehen kann, indem sie eine mögliche Blendquelle mit der Hand über oder neben den Augen abschirmt. Unabhängig von einer Reduktion der Sehleistung, können Lichtquellen auch störend wirken. Man spricht dann von psychologischer Blendung (siehe unten: „Wohlfühlen mit Licht“). Das Phänomen der Blendung darf nicht mit den ebenfalls störenden Spiegelungen (z.B. auf dem Bildschirm) verwechselt werden. Blendung wird durch Anordnen der

Lichtquellen ausserhalb des Gesichtsfeldes sowie durch Abdecken vermieden. Beispielsweise ist die Intensität von direktem Sonnenlicht zu gross: Sobald die Sonnenscheibe zu sehen ist, sei es direkt, sei es indirekt durch getönte Gläser oder durch Gitterstoffstoren, führt sie zu Blendung.

Ein weiteres Problem von Sonnenlicht ist die auf den Menschen einwirkende Wärmestrahlung. Es kann nicht durch Luftkühlung sondern nur durch aussenliegende dichte Jalousien gelöst werden.

Sehen wird hauptsächlich durch Helligkeitsunterschiede, bzw. Leuchtdichtekontraste ermöglicht. Mit kleiner werdendem Kontrast nimmt auch die Sehschärfe ab, so dass es beispielsweise immer schwieriger wird, Staub auf einer Prüffläche zu erkennen. Farbkontraste wirken zwar unterstützend, genügen aber bei fehlenden Helligkeitsunterschieden nicht. Dies trifft besonders für farbfahlsichtige Personen zu (ca. 8% aller Männern und 0,45% aller Frauen). Leuchtdichtekontraste entstehen durch ungleich helle Tönung oder durch unterschiedliche Reflexion an strukturierten Flächen. Beispiele sind

verschieden raue oder unterschiedlich gewölbte bzw. geneigte Oberflächen welche unterschiedliche Glanz- und Schattenwirkungen verursachen. Für die Entstehung von Glanz und Schatten auf strukturierten Oberflächen spielt die Position der Lichtquelle eine wesentliche Rolle; die Glanzwirkung hängt zudem von der Position des Beobachters ab. Schatten und Glanz wirken störend, wenn sie das Sehobjekt überlagern; sie können aber auch zur Kontrastverstärkung genutzt werden.

		Hintergrund				
		dunkel		hell		
		matt	glänzend	matt	glänzend	
Detail	dunkel	matt	 Strahler seitlich	 flächige Leuchte vorn; dunkle Fläche seitlich, hinten	 flächige Leuchte oben oder Leuchten seitlich	 flächige Leuchte vorn; dunkle Fläche seitlich, hinten
		glänzend	 Strahler vorn, hinten; dunkle Fläche seitlich	 Strahler seitlich, hinten; dunkle Fläche vorn	 Leuchten seitlich; dunkle Fläche vorn, hinten	 Leuchten seitlich; dunkle Fläche vorn, hinten
	hell	matt	 flächige Leuchte oben oder Leuchten seitlich	 Leuchten seitlich; Strahler hinten; dunkle Fläche vorn	 Strahler seitlich	 flächige Leuchte vorn; dunkle Fläche seitlich, hinten
		glänzend	 Strahler vorn, hinten; dunkle Fläche seitlich	 Leuchten seitlich; Strahler hinten; dunkle Fläche vorn	 Strahler vorn, hinten; dunkle Fläche seitlich	 Strahler seitlich, hinten; dunkle Fläche vorn

Abb. 3-8: Startkonfigurationen zur Anordnung von Leuchten und abschirmenden Flächen. Oben links in den Tabellenfeldern ist dargestellt, wie das Sehdetail (Kreis) sich vom Hintergrund (Quadrat) abhebt. Beispiel: Das Tabellenfeld oben rechts bedeutet, dass sich vor dem Arbeitstisch eine flächige Leuchte befindet und seitlich sowie hinter der Person dunkle, abschirmende Flächen. Ein dunkles, mattes Sehdetail hebt sich dann vor dem hellen glänzenden Hintergrund ab.

Für die Kontrastverstärkung sind je nach Prüfobjekt unterschiedliche Anordnungen, Beobachtungsrichtungen sowie Einzelplatzleuchtentypen und -positionen erforderlich (Abb. 3-9). Sie müssen weitgehend durch Versuche ermittelt werden.

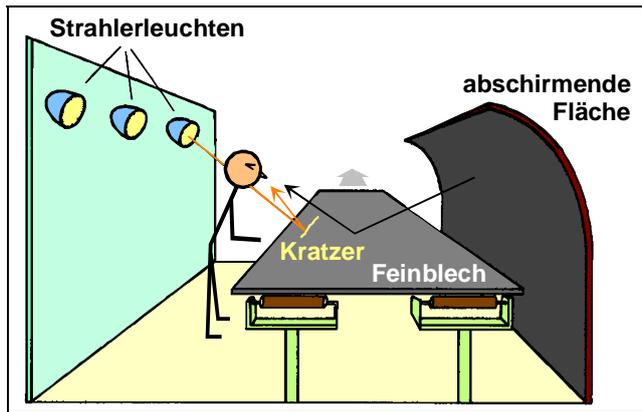


Abb. 3-9: Kontrastverstärkung durch geschickte Anordnung von Lichtquellen und abschirmenden Flächen.

Abb. 3-8 mag als Hinweis für eine Startkonfiguration dienen. Zuerst wird das Prüfobjekt danach beurteilt, ob Details und Hintergrund hell bzw. dunkel sind und welche Glanzwirkungen sie verursachen. Beispiele sind:

- matte Details: Kratzer, Risse in matten Prüfflächen, Gewebefehler, Politurfehler, raue Lackstellen, Verunreinigungen.
- glänzende Details: Körnungen, Anrisse, Kratzer, Gravuren auf glatten Prüfflächen, Bleistiftstriche, Leiterbahnen von gedruckten Schaltungen, Poren.
- matter Hintergrund: Gewebe, Mattglas, Stein, Holz, Sandguss, Platten von gedruckten Schaltungen, mattes Papier.
- glänzender Hintergrund: Lackierungen, Polituren, polierte Platten aus Glas, Metall oder Kunststoff, Kunstdruckpapier.

Strahler (z.B. mit Hochglanzreflektoren) erzeugen stark gerichtetes Licht und besitzen hohe Leuchtdichten. Durch Spiegelung verstärken sie helle glänzende Objekte. Grossflächige Leuchten (z.B. mit diffus-weisser Kunststoffabdeckung, Indirektlicht) haben geringe Leuchtdichten, ermöglichen aber dennoch hohe Beleuchtungsstärken um matte Objekte hervorzuheben. Dunkle Flächen (z.B. mattschwarze Stellwände) helfen störendes Licht vermeiden oder das Schwarz eines spiegelnden dunklen Sehobjekts verstärken. Sind Detail und Hintergrund von

gleicher optischer Beschaffenheit, wird durch flachen Lichteinfall versucht, Schatten zu verstärken. Um Objekte besser sichtbar zu machen, sind oft weitergehende Kunstgriffe erforderlich. So ist z.B. das Erkennen grosser Beulen oder Verwerfungen auf Platten sehr schwierig. Bei glänzendem Material kann das in der Platte gespiegelte Bild eines Gitters betrachtet werden, welches vor eine grossflächige Leuchte montiert wurde.

Zusammenfassend gesehen, zielt „Sehen mit Licht“ nicht nur auf das Vermeiden von Störungen sondern auch auf das Verbessern der Sichtbarkeit von schwierigen Sehobjekten. Licht ist daher ein wertvolles Werkzeug bei der Gestaltung von Industrie- und anderen Arbeitsplätzen (siehe Abb. 3-10 und Abb. 3-11).

Aktivieren mit Licht

Mit dem Argument der Sichtbarkeit wäre es ausreichend, nur das Arbeitsobjekt in einem engen Gesichtsfeld zu beleuchten und das Umfeld im Dunkeln zu lassen. Dies wird für konzentrierte Gedankenarbeit manchmal gewünscht. Im allgemeinen wird jedoch zwischen Tisch und Wand ein Helligkeitsverhältnis von 4 : 3 bevorzugt. Hier erfolgt durch Sichtbarmachen der Umwelt und damit durch Zunahme der visuellen Komplexität eine psychologisch-biologische Aktivierung. Eine psychologisch-biologische Aktivierung ist möglicherweise die wichtigste Lichtwirkung am Arbeitsplatz.

Wie umweltpsychologische Untersuchungen zeigten, erfolgt die Aktivierung oder Erregung des Menschen durch Vergrössern der Lichtintensität und der örtlichen sowie zeitlichen Lichtänderung. Eine Beleuchtungsbeurteilung nur aufgrund von Beleuchtungsstärken, ist daher absolut unzureichend. Es müssen insbesondere auch Helligkeitsverläufe und Kontrastbewertungen durchgeführt werden, welche Leucht-

dichtemessungen erfordern. Leuchtdichte-Photometer sind inzwischen erschwinglich und leicht zu handhaben. Allerdings sind – mit Ausnahme der Blendbewertung – Empfehlungen zur Messung und Bewertung von Leuchtdichten noch spärlich.

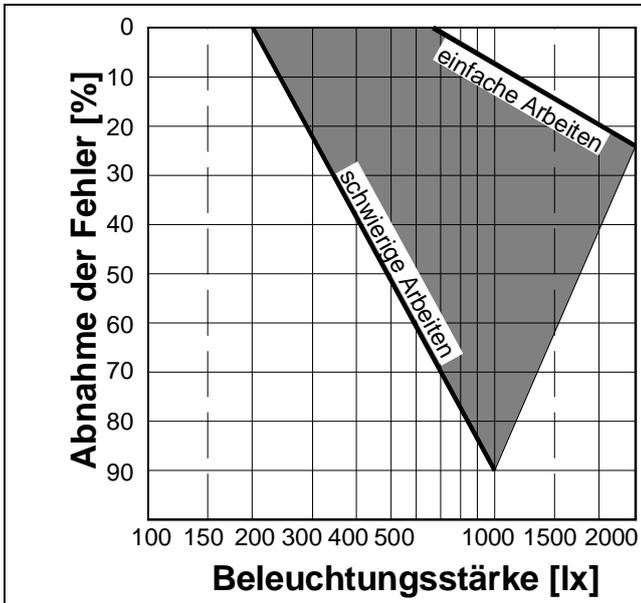


Abb. 3-10: Mit zunehmender Beleuchtungsstärke werden weniger Fehler gemacht; insbesondere bei schwierigen Arbeiten.

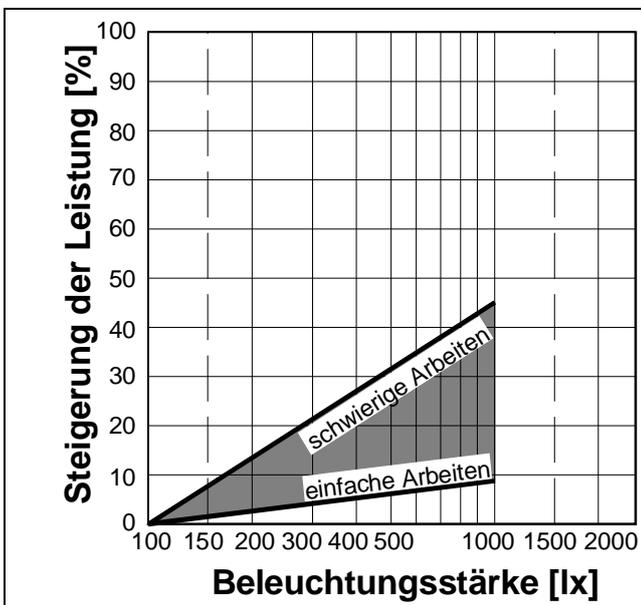


Abb. 3-11: Die Arbeitsleistung steigt mit zunehmender Beleuchtungsstärke. Für schwierige Arbeiten ist die Wirkung grösser.

Nicht für jede Arbeitstätigkeit ist eine maximale starke Aktivierung gefragt. Konzentriertes

Nachdenken, Schreiben, Lesen, Telefonieren und Besprechen, aber auch das variable Tageslicht und individuelle Vorlieben lassen keine einfachen Beleuchtungsrezepte zu. Auf dem Markt seit neuestem erhältlich und Thema aktueller Forschung sind sogenannte Lichtszenarien. Das sind der Situation angemessen wählbare oder sich automatisch anpassende, vorprogrammierte Lichtverteilungen und zeitliche Lichtverläufe.

Wohlfühlen mit Licht

Die aktivierende Wirkung des Lichts wird oft mit Wohlbefinden verwechselt. Ein gesteigertes Wohlbefinden muss sich jedoch nicht leistungsfördernd auswirken: Wir können uns, z.B. nach dem Mittagessen, in einer schläfrigen Stimmung sehr wohl fühlen. Umgekehrt kann eine „Wut im Bauch“ sehr aktivierend wirken und unser Arbeitsziel viel schneller erreichen lassen. Solchen Beispielen akuter Wirkungen müssen jedoch chronische Wirkungen gegenübergestellt werden. Ein andauerndes Unwohlsein führt im Normalfall immer zu Leistungsminderungen, Abwesenheit oder Krankheit.

Die bereits erwähnte psychologische Blendung ist ein Faktor, der das Wohlbefinden beeinträchtigen kann. Psychologische Blendung liegt vor, wenn eine Person sich weniger gestört fühlt, wenn sie eine mögliche Blendquelle mit der Hand über oder neben den Augen abschirmt. Das Ausmass der Störung hängt von der Lage der blendenden Lichtquelle ab (Abb. 3-12). Lichtquellen im oberen Gesichtsfeld stören weniger als seitlich angeordnete (z.B. Fenster). Bei gleicher Beleuchtungsstärke sind flächige Lichtquellen weniger störend als kleine grelle Lichtpunkte.

Wie kann nun maximales Wohlbefinden aus einer Lichtgebung gewonnen werden? Dazu wird oft auf die Natürlichkeit des Tageslichts hinge-

wiesen. In einem gewissen Sinn ist diese Sichtweise gerechtfertigt, hat sich doch der Mensch im Laufe der Jahrtausende an die Dynamik und Harmonie des Tageslichts anpassen können. Es wäre jedoch falsch, Beleuchtungskonzepte, welche für Tätigkeiten im Freien geeignet sind, unbedacht auf den Arbeitsplatz im Innenraum zu übertragen: Ein Büro darf nicht wie ein Rübenacker beleuchtet werden.

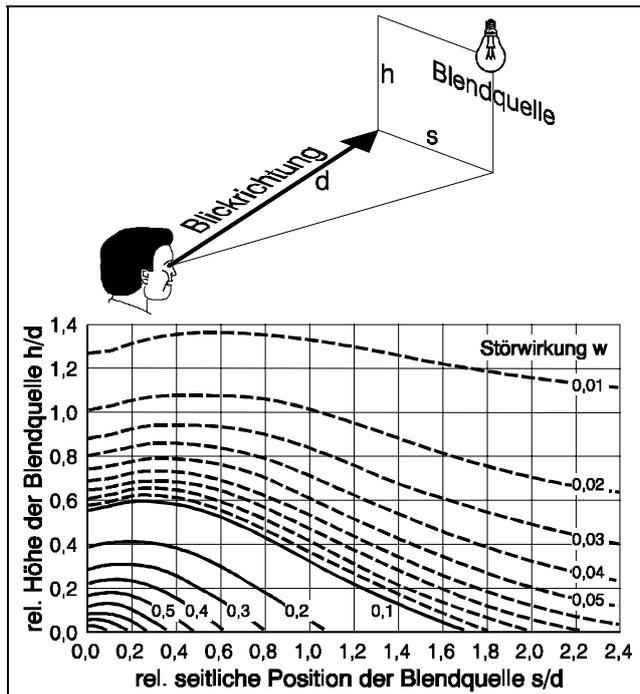


Abb. 3-12: Relative Störwirkung w einer Blendquelle in Abhängigkeit ihrer vertikalen und seitlichen Position zur Blickrichtung. Die Distanzen h , s und d sind der Skizze oben zu entnehmen. (Anmerkung: in der UGR-Formel zur psychologischen Blendung ist $w=1/p^2$).

Durch das diffuse Licht des Himmels werden die von der Sonne erzeugten harten Schattenübergänge weicher. Im Innenraum wird eine völlig diffuse oder eine stark gerichtete Beleuchtung als unangenehm empfunden. Es sollten daher ebenfalls beide Komponenten vorhanden sein. Will man das Tageslicht durch intelligente Gebäudehüllen und Tageslicht-Lenksysteme beeinflussen, besteht die Gefahr, dass man der „Natürlichkeit“ des Tageslichts verlustig geht. Ein kleiner Ausblick ins Freie ist

für das Wohlbefinden mehr wert als viel gräuliches, über Lichtrohre und Spiegel in den Raum gebrachtes Tageslicht.

Es ist eine offene Frage, ob ein auf konstantes Licht geregeltes Beleuchtungssystem das Wohlbefinden und die Arbeitsleistung negativ beeinflusst, da damit die natürliche Lichtdynamik unterdrückt wird. Automatisierte Beleuchtungsanlagen dürfen jedenfalls nicht zu Gefühlen der Bevormundung führen. Lichtänderungen müssen ohne Störung und einigermaßen nachvollziehbar erfolgen.

Schützen mit Licht

Licht wirkt bei schätzungsweise 30 bis 50% aller Unfälle in irgendeiner Form als Einflussfaktor mit. Besondere Risiken bergen Schlagschatten, unerträgliche Blendung, abrupte Helligkeitswechsel oder Licht- und Kontrastmangel an kritischen Stellen wie etwa bei Treppen, gefährlichen Maschinen oder Fahrzeugen. Um einer Gefahr auszuweichen, muss diese nicht nur rechtzeitig wahrgenommen, sondern es muss auch rechtzeitig darauf reagiert werden. Das Unfallgeschehen wird somit einerseits über die momentane Sehfähigkeit und andererseits über die mit der Lichtmenge steigende Aktivierung bzw. Wachsamkeit der Personen beeinflusst (Abb. 3-13). Das Licht kann auch selber eine Gefahr darstellen. So kann beispielsweise flimmerndes Licht die Geschwindigkeit rotierender Werkstücke falsch erscheinen lassen (Stroboskopeffekt) oder die UV- und IR-Strahlung einer Lichtquelle können zu Schädigungen des Auges führen.

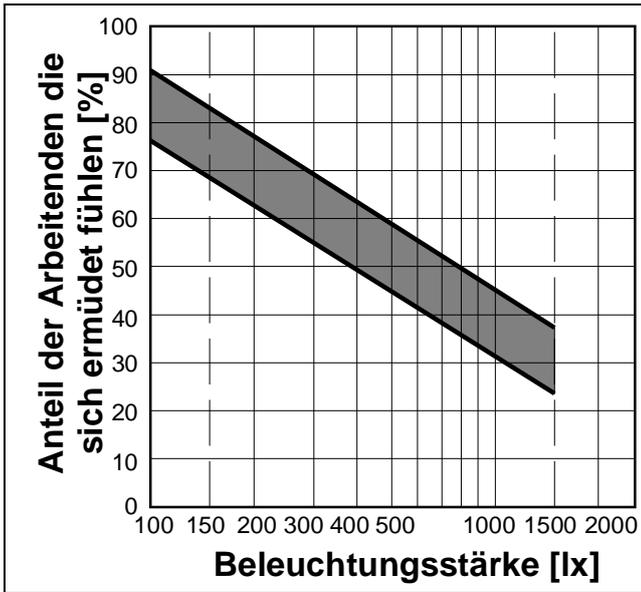


Abb. 3-13: Nach einer Erhöhung der Beleuchtungsstärke fühlen sich weniger Personen ermüdet .

Genügend hohe Beleuchtungsstärken sind eine wesentliche Voraussetzung zur Vermeidung von Unfällen (Abb. 3-14). So sollte an gefährlichen Arbeitsplätzen, wenn das Tageslicht nicht mehr ausreicht, durch organisatorische oder technische Mittel das Einschalten der künstlichen Beleuchtung garantiert sein. Neben der direkt aktivierenden Lichtwirkung unterliegt die Wachsamkeit der Personen auch einer Tagesrhythmik, die sich in der Unfallhäufigkeit ausdrückt (siehe Kap. 2.6). Wie sich bei Nacht- und Schichtarbeit durch künstliches Ändern des Lichts die Wachsamkeit beeinflussen bzw. in der Rhythmik zeitlich verschieben lässt, ist noch Gegenstand der Forschung. Erste Arbeitsplätze mit circadianen Beleuchtungssystemen werden bereits erprobt.

Wenn die Stromversorgung der Beleuchtungsanlage gestört wird, muss rechtzeitig eine automatische Notbeleuchtung wirksam werden. Gemäss der europäischen Norm EN 1838 [4] werden Notbeleuchtungen eingeteilt in Antipanikbeleuchtungen, Ersatzbeleuchtungen und Sicherheitsbeleuchtungen. Ersatzbeleuchtungen dienen der Weiterführung des Betriebs über eine begrenzte Zeit. Sie sollten Beleuch-

tungsstärken von mindestens 10% der für den Arbeitsplatz sonst vorgeschriebenen Beleuchtungsstärken aufweisen. Sicherheitsbeleuchtungen müssen technische Mindestanforderungen erfüllen und periodisch überprüft und gewartet werden. Man unterscheidet Sicherheitsbeleuchtungen für Rettungswege und solche für gefährliche Arbeitsplätze.

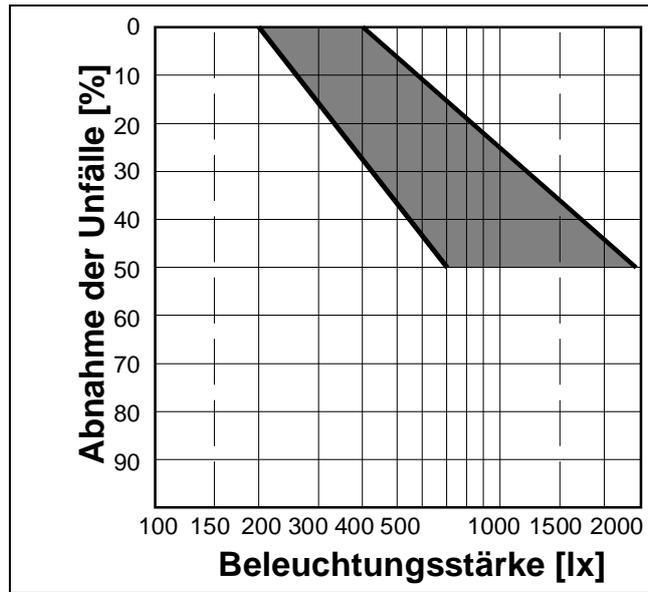


Abb. 3-14: Indem die Beleuchtungsstärke erhöht wird, kann die Zahl der Unfälle merklich reduziert werden.

Sicherheitsbeleuchtungen für Rettungswege

Rettungswege müssen innerhalb einer Minute 20 cm über der Mitte des Rettungswegs für die Dauer von einer Stunde eine Beleuchtungsstärke von mindestens 1 lx erzeugen. Maximum zu Minimum der Beleuchtungsstärke muss kleiner als 40 : 1 sein. Die Sicherheitsleuchten müssen als solche gekennzeichnet sein. Sie sollen bei Ausgängen, Hindernissen (z.B. Treppen) etc. angebracht werden, so dass ein sicheres Begehen der Rettungswege gewährleistet ist. Rettungswege müssen zudem mit dauernd betriebenen Rettungszeichen-Leuchten markiert sein.

Sicherheitsbeleuchtungen für gefährliche Arbeitsplätze

Gefährliche Arbeitsplätze (z.B. begehbare Leitungskanäle, Leitstände mit sicherheitstechnischer Funktion, Arbeitsplätze mit gefährlichen Stoffen oder Bädern, Schleuder- oder Drahtverseilmaschinen etc.) müssen innerhalb von weniger als 1/2 Sekunde eine Beleuchtungsstärke von mehr als 10% der für den Arbeitsplatz sonst vorgeschriebenen Werte, mindestens aber 15 lx erzeugen. Maximum zu Minimum der Beleuchtungsstärke muss kleiner als 10 : 1 sein. Die Betriebsdauer ist auf den Arbeitsplatz abzustimmen, so dass notwendige Tätigkeiten gefahrlos beendet und der Arbeitsplatz verlassen werden kann.

3.4 Lichtquellen

Beleuchtungsanlagen bestehen aus lichterzeugenden Lampen und lichtverteilenden Leuchten, welche die Lampen umgeben. Für Lichtstrom, Lichtfarbe und Flimmern ist im wesentlichen die Lampe, für Lichtstärke- und Leuchtdichte-Verteilung die Leuchte verantwortlich (siehe dazu auch Kap. 3.5).

Lampen

Grundsätzlich lassen sich Lampen in Temperaturstrahler und Lumineszenzstrahler einteilen (Abb. 3-15). Bei den Temperaturstrahlern erfolgt die Energiezufuhr durch Erhitzen. Bei den Lumineszenzstrahlern werden durch optische Strahlung Leuchtstoffe ohne Temperaturerhöhung zum Leuchten gebracht.

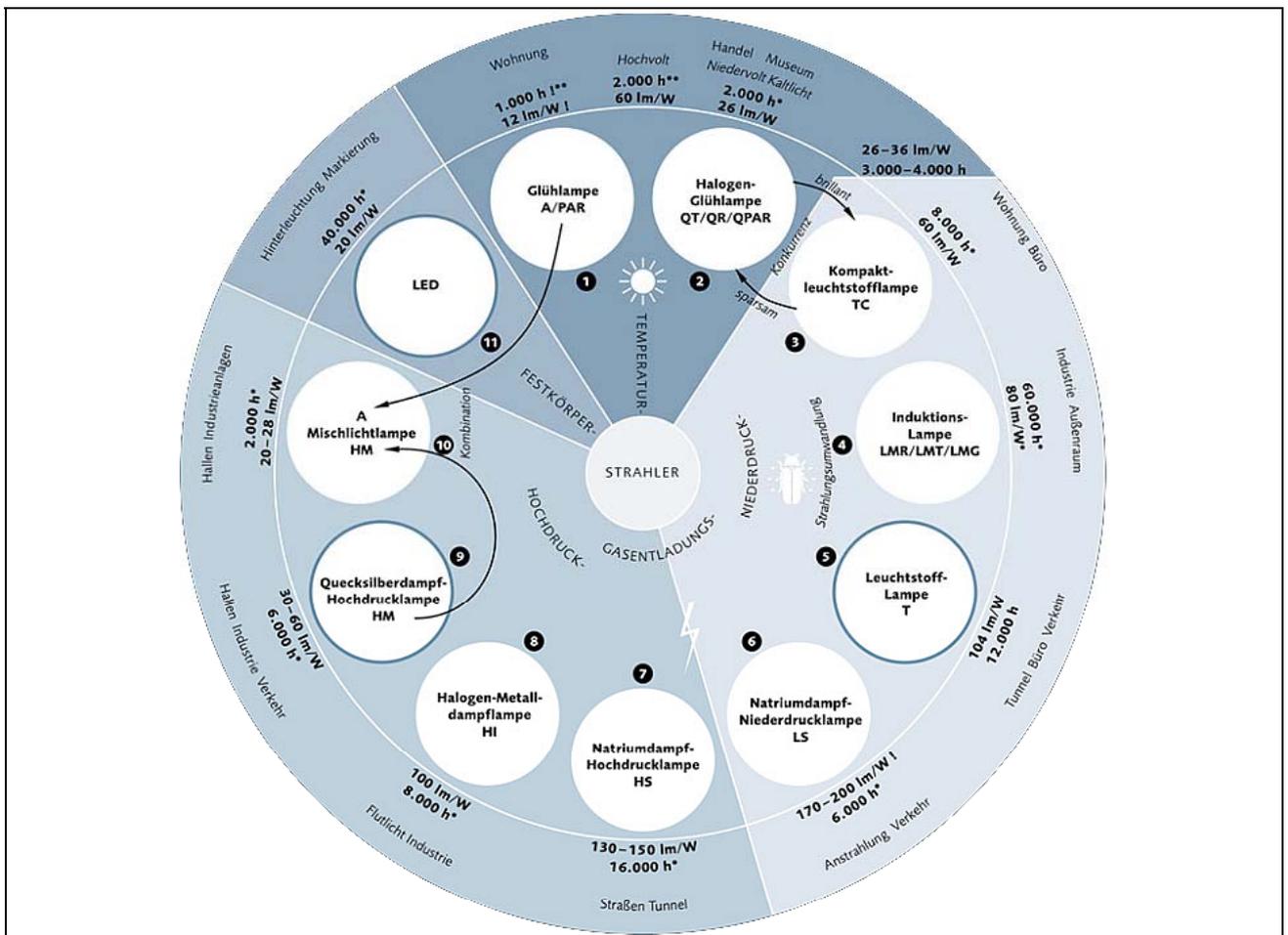


Abb. 3-15: Übersicht über verschiedene Lampentypen, ihre Lichtausbeute, Lebensdauer und Verwendung.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Prinzipien der Lichterzeugung ist das resultierende Lampenspektrum. Die Abb. 3-16 zeigt verschiedene Beispiele.

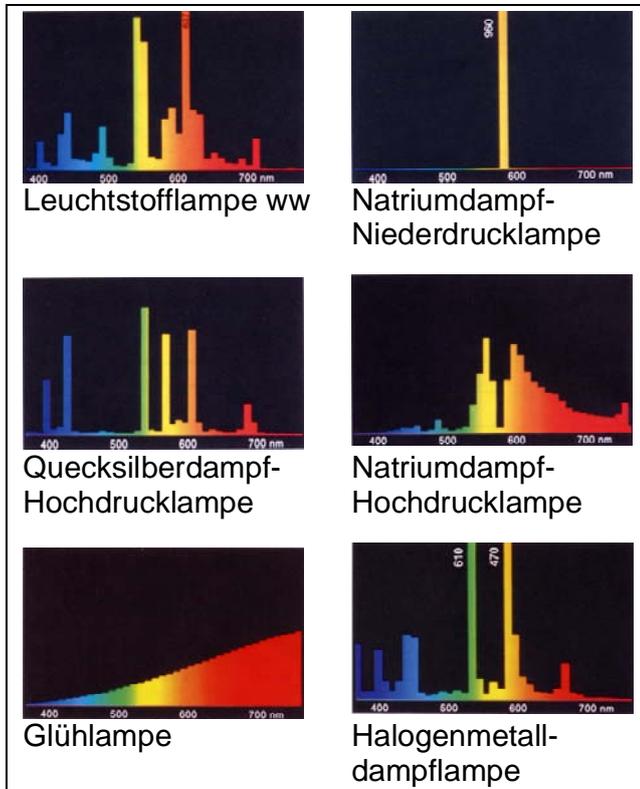


Abb. 3-16: Spektrale Strahlungsverteilungen von Lampen.

Glühlampen, Halogenglühlampen

Glühlampen sind leicht und kostengünstig in der Anschaffung. Nachteilig ist ihre geringe Energieeffizienz (störende Wärmestrahlung). Die Lebensdauer ist ca. 8 bis 12 mal geringer als bei Leuchtstofflampen. Eine Weiterentwicklung der Glühlampe ist die Halogenglühlampe, welche sich durch einen kleineren Kolben aus Quarzglas und eine geringe Halogenbeimischung zum Füllgas auszeichnet. Sie erreicht daher eine etwas höhere Lichtausbeute als die gewöhnliche Glühlampe. Halogenglühlampen, welche in die Nähe des Auges gelangen können (auch unbeabsichtigt z.B. bei Kindern), müssen entweder einen zweiten Glaskolben oder ein Filter als Schutz vor UV-Strahlung aufweisen.

Leuchtstofflampen, Fluoreszenzlampen

Am Arbeitsplatz werden vorwiegend Leuchtstofflampen verwendet, weil diese energieeffizienter arbeiten und eine lange Lebensdauer aufweisen. Bezüglich der UV-Strahlung sind Leuchtstofflampen für die Gesundheit unbedenklich. Bei der Leuchtstoff- oder Fluoreszenzlampe handelt es sich um eine mit Leuchtstoff beschichtete Quecksilberdampf-Niederdrucklampe. Moderne Leuchtstoffe sind der sogenannte 3-Banden-Leuchtstoff und der Mehr-Banden-Leuchtstoff („DeLuxe-Lampen“). Letztere haben sehr gute Farbwiedergeabeeigenschaften (siehe Kap. 3.5). Röhrenförmige Leuchtstofflampen gibt es mit 38, 26, 16 oder 7 mm Durchmesser.

Neben einer Startvorrichtung ist zum Betrieb einer Leuchtstofflampe ein Vorschaltgerät erforderlich, welches den Lampenstrom begrenzt. In der Kompakt-Leuchtstofflampe (= „Energiesparlampe“) sind zum Teil der Starter und auch das Vorschaltgerät eingebaut. Dadurch kann sie als Glühlampenersatz verwendet werden. Bei gleicher Lichtleistung benötigen diese Lampen ca. ein Fünftel der Energie einer Glühlampe aber ca. 1,2 mal soviel wie eine stabförmige Leuchtstofflampe. Beim Ersatz von Glühlampen muss auch Form und Gewicht der Kompaktlampe berücksichtigt werden. Ausserdem sind Abstriche bei der Farbwiedergabe zu machen. Die Weiterentwicklung geht in die Richtung leichter elektronischer Vorschaltgeräte, welche von der Lampe abgetrennt und mehrfach verwendet werden können.

Sind Leuchtstofflampen ausgebrannt, müssen sie wegen des Quecksilbergehalts als Sondermüll entsorgt werden; Glas und Chemikalien einer Lampe ohne integriertes Vorschaltgerät können recycelt werden. Bei Leuchtstofflampen neuerer Bauart konnte der Quecksilbergehalt stark reduziert werden.

Hochdrucklampen

Wegen ihrer grossen Leuchtdichte müssen Hochdrucklampen vor direktem Einblick geschützt sein. In Innenräumen werden sie vorwiegend für Indirektbeleuchtungen verwendet. Ohne spezielle Vorschaltgeräte können sie nach Stromausfällen im heissen Zustand nicht sofort wiedergezündet werden. Kritische Arbeitsplätzen benötigen daher eine Zusatzbeleuchtung mit anderen Lampentypen.

Die Quecksilberdampf-Hochdrucklampe besteht aus einem Quarzrohr mit einem Innendruck von etwa 100'000 Pa. Im Quarzrohr werden durch Elektronenstösse Quecksilberatome ionisiert, was das Aussenden von Lichtstrahlung verursacht. Der Quarzbrenner ist von einem Aussenkolben umgeben, der UV-Strahlung absorbiert. Eine bei gewissen Typen angebrachte Leuchtstoffschicht wandelt zusätzlich das UV-Licht in sichtbares Licht um. Die Quecksilberdampf-Hochdrucklampe zeichnet sich durch weniger gute Farbwiedergabeeigenschaften aus, welche durch die Leuchtstoffe etwas besser werden. Sie ist daher eher für Aussen- und Hallenbeleuchtungen zu verwenden.

Die Halogen-Metaldampflampe ist eine Weiterentwicklung der Quecksilberdampf-Hochdrucklampe. Durch Hinzufügen von Halogen-Metallverbindungen wurden Farbwiedergabe- und Lichtausbeuteverbesserungen erzielt. Dadurch wird diese Lampe auch in der Innenbeleuchtung, zum Beispiel für Indirektbeleuchtungen, nutzbar. Ein Problem bereitet die Konstanz der Lichtfarbe: Je nach Alter, Brenndauer, Brennstellung und Versorgungsspannung kann die Farbe grünlich oder purpurrot wirken. Vorschaltgeräte neuester Bauart vermeiden diese Farbabweichungen weitgehend und verhindern auch ein starkes Flimmern.

Kleine Lampen (mit Stecksockel) haben einen höheren UV-Anteil. Diese Lampen müssen in

abgeschlossenen Leuchten hinter temperatur- und bruchsicheren Silikatglasscheiben betrieben werden.

Leuchten

Leuchten haben den Zweck, das Licht der Lampen, mit denen sie versehen sind, im Raum zu verteilen, in bestimmte gewünschte Richtungen zu lenken, gegen Blendung abzuschirmen und spektral umzuformen. Dazu dienen Spiegel und Streuscheiben in Raster oder Lamellenform, sowie Linsen, Prismen und Filter. Spiegelmaterialien bestehen häufig aus Aluminium. Durch bestimmte Krümmungsformen kann erreicht werden, dass das Licht gebündelt oder zerstreut und nicht wieder auf die Lampe zurückreflektiert wird.

Leuchten lassen sich nach ihrem Verwendungszweck einteilen. So gibt es Zweckleuchten, welche der Beleuchtung bei der Arbeit dienen. Ihr Licht soll die Sichtbarkeit des Arbeitsguts verbessern, ohne die arbeitende Person zu stören. Sie erzeugen daher „Licht zum Sehen“ (siehe dazu Kap. 3.5). „Licht zum Hinsehen“ hingegen wird durch Effektleuchten erzeugt, deren Licht auf ein Sehobjekt hinweist oder ihr Licht übernimmt selbst die Rolle eines Sehobjekts (Abb. 3-17). Beispiele sind das Beleuchten von Bildern oder von architektonischen Besonderheiten.



Abb. 3-17: Licht zum Hinsehen: Die Lichtverteilung im Raum oder spezielle Lichteffekte (Farbe, Blinken etc.) wirken als Gestaltungsmittel.

Einem anderen Verwendungszweck dienen Repräsentativleuchten. Sie sind „Licht zum Ansehen“ (Abb. 3-19). Diese Leuchten sind selbst Sehobjekt und werden z.B. für festliche Räume verwendet. Sie sind vorwiegend künstlerisch gestaltet.

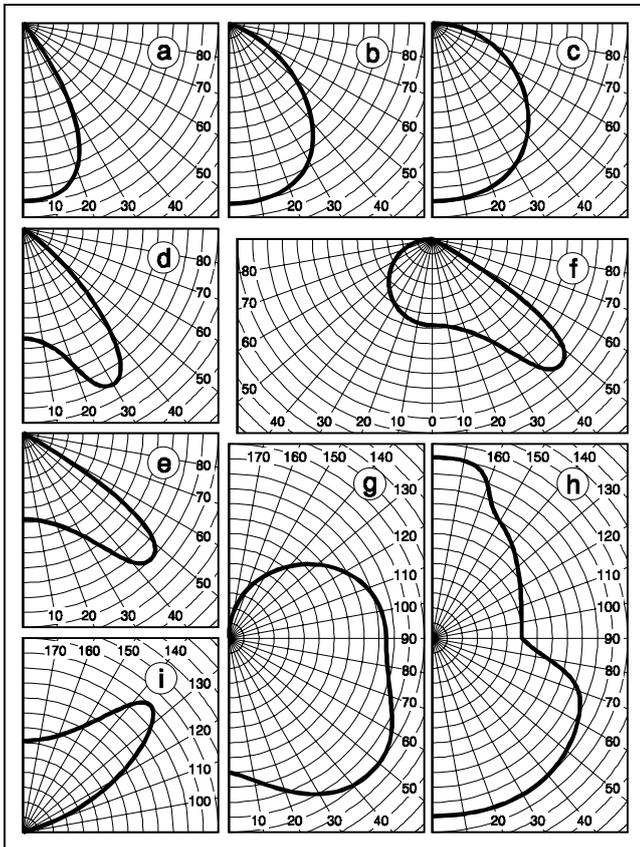


Abb. 3-18: Typische Lichtstärke-Verteilungskurven von Innenleuchten für Leuchtstoff- und Hochdrucklampen. Es sind folgende Bezeichnungen in Gebrauch:

- a tief-engstrahlend (Spiegelreflektorleuchte, Spotleuchte)
- b tiefstrahlend (weisse Grossrasterleuchte)
- c tief-breitstrahlend (Einbaudeckenleuchte mit prismatischer Wanne)
- d tief-breitstrahlend (Ein- und Anbauleuchte mit Spiegelraster „Darklight“)
- e breitstrahlend (Ein- und Anbauleuchte mit Spiegelraster „Batwing“)
- f schrägstrahlend (asymmetrisch strahlende Leuchte mit Spiegelraster)
- g freistrahlernd (Anbauleuchte mit Seitenprismen zur Deckenaufhellung)
- h freistrahlernd (Pendelleuchte mit Raster und Glasseitenteilen)
- i hochstrahlend (Indirektleuchte).

Bei der Auswahl von Leuchten dürfen betriebstechnische Kriterien wie Montage- und Wartungsfreundlichkeit, Wärmebeständigkeit oder Wasser-, Gas- und Stauffestigkeit (d.h. ihre Schutzart) nicht vernachlässigt werden. Lampen sind Wärmequellen, wodurch es erforderlich ist, die klimatischen Einwirkungen der Leuchten zu berücksichtigen.



Abb. 3-19: Licht zum Ansehen: Die Leuchte selbst wirkt als Gestaltungsmittel.

Je nach Form, Anordnung und Ausrichtung der Leuchtenelemente erfolgt ein Lichtstromverlust, der durch den Leuchten-Betriebswirkungsgrad beschrieben wird. Zudem ist eine Einteilung nach Lichtstrom- und Lichtstärkeverteilung erforderlich. Dadurch erhält man einen groben Überblick über die Lichtstromverteilung. Die Angabe der Lichtstärke-Verteilung liefert genauere Informationen (Abb. 3-18).

Tageslicht

Tageslicht in Innenräumen trägt zum allgemeinen Wohlbefinden bei. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn die Möglichkeit einer Sichtverbindung ins Freie besteht. Tageslicht im Innenraum ermöglicht es, sich über Tageszeit und Wetterlage zu informieren. Tageslicht, sinnvoll eingesetzt, erlaubt eine Verminderung des Energieverbrauchs. Andererseits kann Tageslicht, insbesondere bei Anwesenheit von direktem Sonnenlicht, zu erheblichen Störungen wie Blendung und Spiegelungen am Arbeitsplatz

führen. Zudem kann die einfallende Wärmestrahlung (IR-Strahlung) eine starke Beeinträchtigung der klimatischen Bedingungen bewirken.

Eigenschaften des Tageslichts

Tageslicht weist sowohl im Hinblick auf die Intensität als auch die Farbe starke tägliche und jahreszeitliche Schwankungen auf. Die Intensitätsschwankungen, sowie übermässige Wärmestrahlung der Sonne, sind an Arbeitsplätzen unerwünscht. Andererseits soll aus psychologischen Gründen der Blick ins Freie möglich bleiben und aus energetischen Gründen möchte man möglichst viel Kunstlicht durch Tageslicht ersetzen.

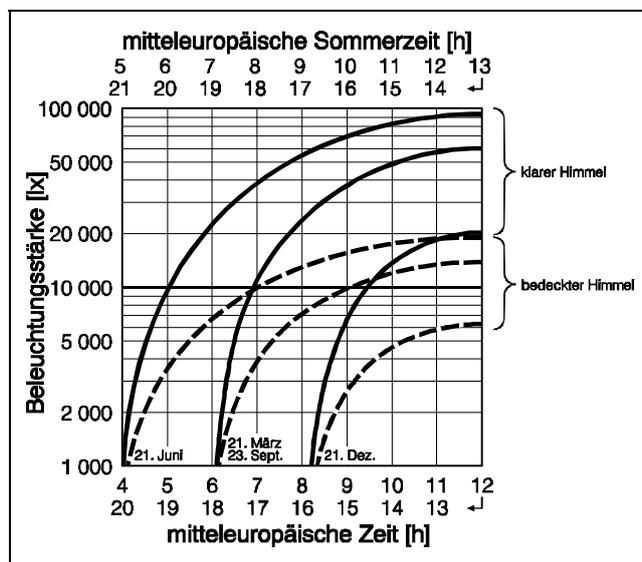


Abb. 3-20: Tagesverlauf der horizontalen Beleuchtungsstärke im Freien, bei freiem Horizont für Frankfurt zu unterschiedlichen Jahreszeiten. Bei gleichmässig bedecktem, weissem Himmel gelten die gestrichelten, bei klarem Himmel die ausgezogenen Linien. Bei klarem Himmel ist die Beleuchtungsstärke eine Kombination aus Sonnen- und Himmelslichtanteil.

Zur Beleuchtungsstärke in mit Tageslicht beleuchteten Innenräumen tragen das direkt von der Sonne kommende Licht sowie das von der Atmosphäre, von der Bewölkung, an Nachbargebäuden und im Rauminnern an Wänden und Mobiliar reflektierte Licht bei. Die Intensität hängt stark von der Jahreszeit, der Tageszeit

und vom Grad der Bedeckung des Himmels ab (Abb. 3-20). Die Leuchtdichte des gleichmässig bedeckten, aber weissen Himmels ist im Zenit rund dreimal grösser als am Horizont.

Tageslichtquotient

Der Tageslichtquotient $D = 100\% \cdot E_i/E_h$ gibt Auskunft über die Stärke des Tageslichteinflusses in einer Innenraumzone und hängt somit stark von der Art der Befensterung ab. Er berücksichtigt nur das Himmelslicht, nicht aber das direkte Sonnenlicht. Es bedeuten: E_i = durch direktes oder indirektes Himmelslicht an einem bestimmten Punkt im Innenraum erzeugte horizontale Beleuchtungsstärke; E_h = Ausserbeleuchtungsstärke bei unverbautem Horizont, in horizontaler Ebene und gleichzeitig mit E_i gemessen. Der Tageslichtquotient nimmt mit zunehmender Distanz zu den Fenstern ab. Raumzonen mit $D > 6\%$ werden als hell empfunden, solche mit $D < 3\%$ als dunkel.

3.5 Gütemerkmale der Beleuchtung

Im Jahr 2003 hat die Norm EN 12464-1 „Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen“ europaweit die nationalen Beleuchtungsnormen abgelöst (z.B. DIN 5035 oder SN 150 912). Sie legt Anforderungen an die Beleuchtung im Hinblick auf Sehleistung und Sehkomfort fest, nicht aber bezüglich des betrieblichen Arbeitsschutzes. Sie legt auch nicht spezielle Lösungen fest und möchte die Freiheit der Planer, neue Techniken zu erkunden und einzusetzen nicht einschränken. Die Norm orientiert sich an den sogenannten Gütemerkmalen der Beleuchtung.

Diese sind:

- Beleuchtungsstärke
- Blendungsbegrenzung
- Modelling
- Lichtfarbe
- Farbwiedergabe
- Vermeiden von Flimmern.

Beleuchtungsstärke

Für bestimmte Raumarten, Aufgaben oder Tätigkeiten werden in der Norm in mehrseitigen Tabellen Wartungswerte der Beleuchtungsstärke in Lux angegeben. Beispiele gibt Tab. 3-1 in der zweiten Spalte. Wenn der Wartungswert unterschritten wird, muss die Beleuchtungsanlage gewartet werden (Reinigung und Lampenersatz). Dadurch wird erreicht, dass trotz Alterungserscheinungen der Anlage (Verschmutzung und Lichtstromabfall der Lampe) immer genügend Licht im sogenannten „Bereich der Sehaufgabe“ und in seinem „Umgebungsbereich“ vorhanden ist.

Tab. 3-1: Beispiele von Tabellenwerten aus der europäischen Norm EN 12464-1.

Art des Raumes, Aufgabe oder Tätigkeit	Wartungswert der Beleuchtungsstärke E_m	Blendungsgrenzwert UGR _L	Farbwiedergabeindex R _a
Viehställe	50 lx	-	40
Parkgaragen: Abstellfläche	75 lx	-	20
Verkehrsflächen, Flure	100 lx	28	40
Vorrats- und Lagerräume	100 lx	25	60
Treppen, Rolltreppen	150 lx	25	40
Waschräume, Toiletten	200 lx	25	80
Giessereihallen	200 lx	25	80
Kantinen, Teeküchen	200 lx	22	80
Verkaufsräume	300 lx	22	80
Parkgaragen: Schalter	300 lx	19	80
Büro: Kopieren, Ablegen	300 lx	19	80
Küchen	500 lx	22	80
Büro: Schreiben, Lesen	500 lx	19	80
Büro: Bildschirmarbeit	500 lx	19	80
Chemische Laboratorien	500 lx	19	80
Unterrichtsräume, Hörsäle	500 lx	19	80
Coiffeure: Haarpflege	500 lx	19	90
Präzisionsmechanik	1000 lx	19	80
Med. Behandlungszimmer	1000 lx	19	90
Lederwaren-Farbprüfung	1000 lx	16	90

Der Umgebungsbereich soll mindestens 60% des Tabellenwerts betragen. Ist die Lage und/oder die Grösse des Bereichs der Sehaufgabe nicht bekannt, muss der Bereich verwendet werden, in dem die Sehaufgabe auftreten könnte. Zusätzlich wird verlangt, dass die Gleichmässigkeit, d.h., das Verhältnis zwischen Minimum und Mittelwert der Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe mehr als 70% betragen soll.

Blendung

Neben der physiologischen Blendung (vgl. Kap. 2.3) gibt es auch die sogenannte psychologische Blendung. Eine solche liegt vor, wenn eine Person sich nach Abdecken einer potentiellen Blendquelle mit der Hand über den Augen weniger gestört fühlt. Blendung wird durch Anordnen der Lichtquellen ausserhalb des Gesichtsfeldes sowie durch Abdecken vermieden. Die Störwirkung ist für Lichtquellen im oberen Gesichtsfeld geringer als für seitlich angeordnete. Psychologische Blendung wird auch reduziert, wenn die Lichtquelle vergrössert und dafür deren Leuchtdichte entsprechend verkleinert wird.

Die psychologische Blendung bezieht sich auf eine durch relativ oder absolut zu hohe Leuchtdichten im Gesichtsfeld hervorgerufene subjektive Störimpfindung. Sie kann für sich oder auch kombiniert mit physiologischer Blendung auftreten und ist stark von den Beobachtungsbedingungen abhängig. Die Stärke der Störimpfindung wird näherungsweise mit dem Blendungsindex UGR (= Unified Glare Rating) ausgedrückt (für die Berechnung vgl. die Norm EN 12464-1). Leuchtenhersteller geben UGR-Werte für typische Raumsituationen in ihren Herstellerunterlagen an. Hinweise über die den UGR-Werten zugeordneten Blendstärken gibt Tab. 3-2, Beispiele für obere Grenzwerte sind der dritten Spalte von Tab. 3-1 zu entnehmen.

Tab. 3-2: Komfortempfinden und Störstärke unterschiedlicher UGR-Blendwerte.

UGR	Komfortempfinden	Störstärke
10	sehr komfortabel	unmerkbar
13	komfortabel	gerade merkbar
16	ziemlich komfortabel	ziemlich merkbar
19	gerade komfortabel	deutlich merkbar
22	Komfortgrenze	gerade störend
25	etwas unkomfortabel	etwas störend
28	unkomfortabel	ziemlich störend
31	untolerierbar	äusserst störend

Modelling

Gerichtetes Licht kann eingesetzt werden, um Objekte hervorzuheben (vgl. Kap. 3.3), Oberflächenstrukturen sichtbar zu machen (Abb. 3-21), sowie das Aussehen der Menschen im Raum zu verbessern (Abb. 3-22). Dies wird mit dem Begriff „Modelling“ beschrieben. Er bezeichnet die Ausgewogenheit zwischen diffuser und gerichteter Beleuchtung. Ist die Beleuchtung stark gerichtet, entstehen zu harte Schatten, ist sie zu diffus, geht der Modellingeffect verloren und ergibt ein unattraktives Lichtklima.



Abb. 3-21: Durch gerichtete Beleuchtung werden Strukturen deutlich sichtbar (links). Diffuse Beleuchtung (rechts) lässt diese verschwinden.



Abb. 3-22: Nur Licht von oben ergibt starke Schatten im Gesicht (links), Licht von mehreren Seiten (rechts) erhellt das Gesicht gleichmässig (= „gnadenlose Beleuchtung“).

Lichtfarbe

Für die zahlenmässige Kennzeichnung der Lichtfarbe von Lichtquellen, wird häufig die Farbtemperatur verwendet. Sie ist diejenige Temperatur (in Kelvin), welche ein Temperaturstrahler mit der zu kennzeichnenden Farbe hat. Da Temperaturstrahler weder eine grüne noch eine purpurne Farbe haben können, kann nicht für jede Farbe eine Farbtemperatur angegeben werden. Farben von Lichtquellen mit einer ähnlichsten Farbtemperatur unter 3300 K heissen Warmweiss (ww), mit Farbtemperaturen zwischen 3300 K und 5300 K Neutralweiss (nw) und mit Farbtemperaturen über 5300 K Tageslichtweiss (tw). Die Norm EN 12464-1 macht keine Vorgaben für die Lichtfarbe mehr. Die Auswahl der Lichtfarbe sei eine Frage der Psychologie, der Ästhetik und dessen, was als natürlich angesehen wird. Die Wahl hängt vom Beleuchtungsniveau, von den Farben des Raums und der Möbel, vom Klima der Umgebung und vom Anwendungsfall ab. Beispielsweise würde man für Metzgereien eher warmweisse, für Glacé-Stände eher tageslichtweisse Lichtfarben verwenden. Umgekehrt wird in warmen Klimazonen allgemein eher Tageslichtweiss bevorzugt, in kaltem Klima eher Warmweiss.

Farbwiedergabe

Es ist wichtig, dass die Farben der Umgebung, der Sehobjekte und der menschlichen Haut natürlich und wirklichkeitsgetreu wiedergegeben werden. Für sehr gute Farbwiedergabe sind Lichtspektrien erforderlich, welche möglichst wenig Lücken aufweisen. Dies ist besonders bei Farbprüfungsplätzen erforderlich. Für die Beleuchtung von Fleischwaren gibt es spezielle Leuchtstofflampen, welche die Röte des Fleisches besonders hervorheben.

Farbwiedergabe darf nicht mit Lichtfarbe verwechselt werden! Die Bewertung erfolgt vom Lampenhersteller mit einer Reihe genormter Testfarben mit genau festgelegten spektralen Reflexionsgraden durch Vergleich im künstlichen Licht und in einem Referenzlicht. Das Verfahren liefert den sogenannten allgemeinen

Farbwiedergabeindex R_a für die jeweilige Lampe, wobei der Wert 100 der bestmöglichen Farbwiedergabe entspricht. In der letzten Spalte von Tab. 3-1 sind Mindestwerte für den Farbwiedergabeindex beispielhaft aufgeführt.

Flimmern

In Leuchtstofflampen findet der Elektronenübergang pro Sekunde 50mal in die eine und 50mal in die andere Richtung statt, wenn sie mit konventionellen Vorschaltgeräten direkt am 50 Hz Stromnetz betrieben werden. Dadurch oszilliert das Licht der Lampen mit 100 Hz. Störendes Flimmern kann mit elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) vermieden werden. Diese arbeiten mit höheren Frequenzen; die Licht-Oszillationen können dadurch nicht mehr entstehen.

4

Klima

4.1 Klimamessung

Für die Beurteilung einer Klimakonstellation gilt es, die vier physikalischen Grössen Raumtemperatur (t_a), Strahlungstemperatur (t_r), Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit zu messen und gemeinsam zu bewerten.

Tab. 4-1: Zusammenstellung wichtiger Klimagrössen.

Grösse	Eigenschaft	Messung	Dimension	Gerät Verfahren
Temperatur	Skalar	skalar	° C	Thermometer
Strahlung	Vektor	skalar	° C	Globethermometer, Radiometer
		vektoriell (Halbraum)		Radiometer
Wind	Vektor	skalar	m s ⁻¹	Anemometer (Hitzdraht, Flügelrad)
		vektoriell (qualitativ)		Rauchröhrchen
rel. Feuchte	Skalar	skalar	% rel. Feuchte	Hygrometer Taupunktmessung Psychrometer

In Tab. 4-1 sind diese Messgrössen-Eigenschaften sowie Messgrössen und Messgeräte zusammengestellt. Da die Messgeräte für die Praxis einfach und preiswert sein sollen, wird in verschiedenen Fällen die eigentliche Grösse indirekt über ihre Wirkung gemessen. Es sind nur operationale Grössen. Dieses gilt für die Strahlungstemperatur und die relative Luftfeuchte. Weiterhin beschränkt man sich im Normalfall auf den skalaren Wert und vernachlässigt die vektorielle Eigenschaft. Dieses ist solange gerechtfertigt, als es sich nur um die thermoregulatorische Wirkung der Grössen handelt und Fragen des Komforts nicht zur Diskussion stehen. Das ist vor allem bei Kälte- und

Hitzearbeit oder auch bei schwerer körperlicher Arbeit mit Schutzkleidung, z.B. bei der Feuerwehr, der Fall.

Lufttemperatur

Die Lufttemperatur t_a ist traditionell die wichtigste Messgrösse, die auch im Denken von Nutzern von Räumen im Vordergrund steht. Sie wird mit einem Thermometer gemessen. Wichtig ist, dass das Thermometer aufgrund seiner Eigenschaften nicht die Strahlung miterfasst. Es gibt traditionelle Quecksilberthermometer und leichter handhabbare elektronische Thermometer (Abb. 4-1).

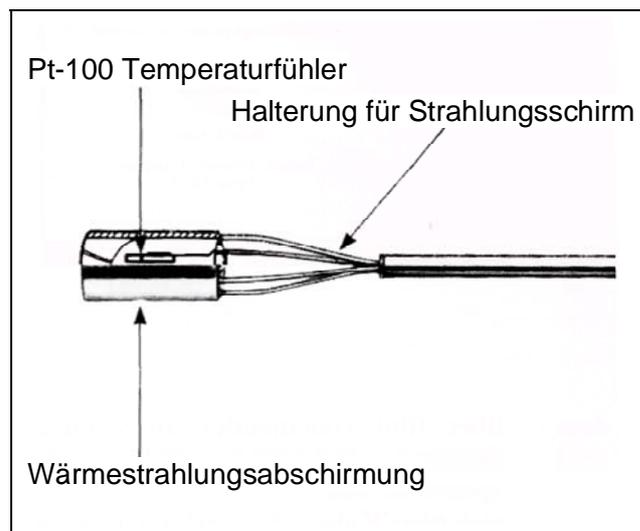


Abb. 4-1: Thermometer zur Beurteilung der Raumtemperatur (t_a).

Strahlungstemperatur

Die Strahlungstemperatur t_r kann mit einem Radiometer (Abb. 4-2) bestimmt werden. Dieses misst die auf eine schwarze Fläche fallende Nettostrahlungsenergie. Solche Radiometer folgen schnell der Messgrösse, die Genauigkeit ist relativ gut.

Indirekt kann die Wirkung der Strahlung mit einem Globethermometer gemessen werden. Es besteht aus einer schwarzen Kugel, die alle Strahlung, die auf sie fällt, absorbiert. Jeder solche Körper, der wärmer als die Umgebung ist, gibt netto Strahlungsenergie ab, und umgekehrt; derjenige, der kälter als die Umgebung ist, nimmt in der Summe Strahlungsenergie auf. Der tatsächliche Energiefluss hängt von den Materialeigenschaften ab. Bei idealer Schwärze ist der „Austausch“ am intensivsten.

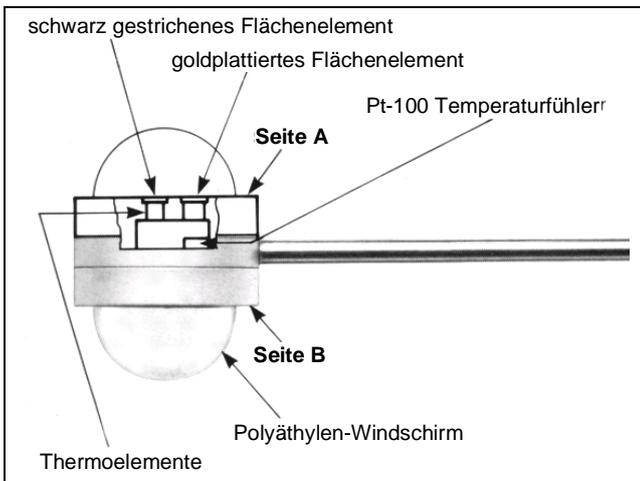


Abb. 4-2: Messgerät (Radiometer) zur Erfassung der Strahlungstemperatur (t_r).

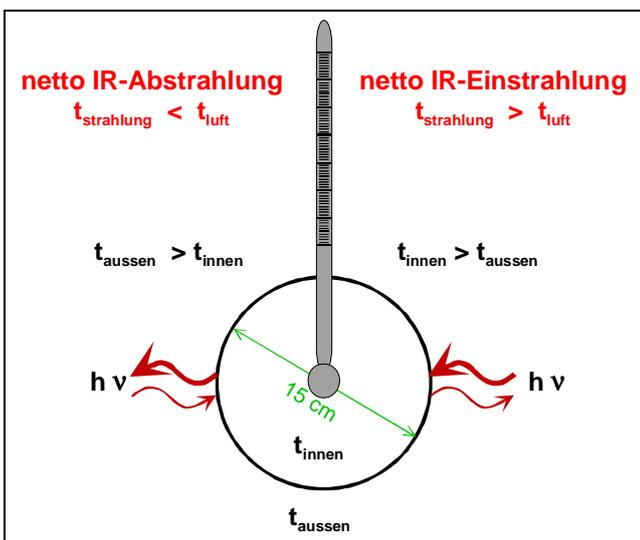


Abb. 4-3: Funktionsweise des Globethermometers zur Beurteilung der Strahlung (t_r).

Das Globethermometer (Abb. 4-3) besteht aus einem normalen Thermometer, dessen Messfühler von einer „ideal“ geschwärzten Kugel

umgeben ist. Die schwarze Kugel nimmt im Nettoenergiefluss Energie auf, wenn die Strahlungstemperatur der Umgebung im Mittel höher als die Raumtemperatur ist. Das Kugellinnere erwärmt sich, und es gilt $t_i > t_a$. Bei Strahlungsdefizit wegen niedrigerer Strahlungstemperatur, z.B. kalte, dicke ausgekühlte Wände, werden die Verhältnisse vertauscht. Es gilt $t_i < t_a$.

Die Globetemperatur verändert sich mit dem Kugeldurchmesser. Will man eine Temperatur haben, die etwa der Wahrnehmung des Menschen entspricht, muss der Durchmesser der Kugel in der richtigen Grösse gewählt werden. Je nach Kugelgrösse beeinflusst die Windgeschwindigkeit die Messgrösse deutlich.

Hinweis: Wichtig ist dieses bei künstlich belüfteten Tunnelbauten.

Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit bzw. Windgeschwindigkeit wird mit einem Anemometer (Abb. 4-4) gemessen. Für genaue und empfindliche Messungen im Büro ist ein Flügelrad-Anemometer zu wenig empfindlich. Es muss beispielsweise zu einem Hitzdraht-Anemometer gegriffen werden. Beide eignen sich nicht für die Messung der Windrichtung.

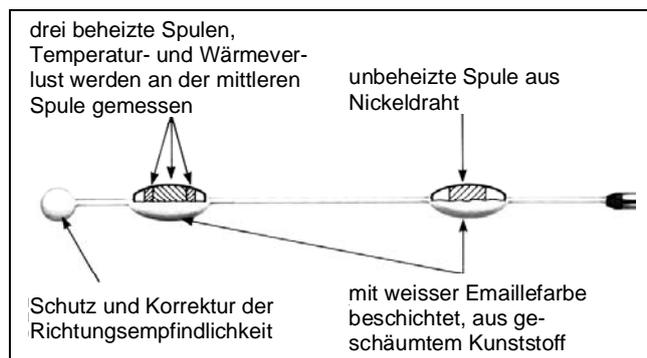


Abb. 4-4: Messgeräte zur Erfassung der Luftgeschwindigkeit (v).

Auch kann nicht zwischen laminarer und turbulenter Luftströmung unterschieden werden. Qualitativ kann die für die Temperaturwahrnehmung wichtige Turbulenz mit Rauch-

röhrchen dargestellt werden. Die Rauchpartikel folgen der Luftströmung und leuchten bei seitlicher Beleuchtung auf (Abb. 4-5).



Abb. 4-5: Rauchröhrchen zur qualitativen Darstellung der Turbulenz von Luftströmungen.

Luftfeuchte

Die Luftfeuchte wird direkt mit einem Hygrometer (Abb. 4-6) gemessen. Die Messgenauigkeit ist begrenzt.

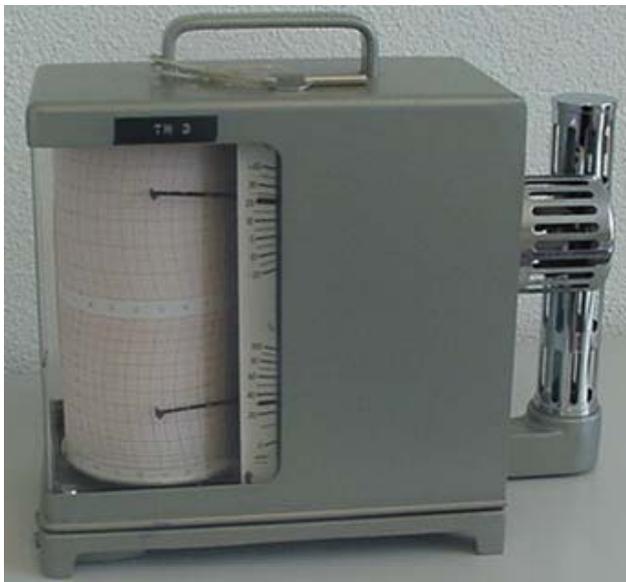


Abb. 4-6: Hygrometer zur Messung der relativen Luftfeuchte RH.

Eine weitere verbreitete Methode ist das Psychrometer (Abb. 4-7). Es wird ein Luftthermometer mit einem feuchten Wattebausch umgeben. Das Wasser verdunstet und kühlt die Umgebung ab. Ein definierter Luftstrom nimmt die Feuchtigkeit auf und führt sie ab. Die Verdun-

stung benötigt Energie, die der Umgebung entzogen wird. Der Prozess ist umso wirksamer, je geringer die Luftfeuchte der vorbeistreichenden Luft ist. Das mit dem Wattebausch umgebene Thermometer misst normalerweise eine niedrigere Temperatur (Feuchttemperatur, t_{feucht}) als das trockene Thermometer (t_{trocken}). Bei 100% rel. Luftfeuchtigkeit ist $t_{\text{feucht}} = t_{\text{trocken}}$, weil am Feuchtthermometer kein Wasser mehr verdunstet kann. Aus den beiden Temperaturen lässt sich mit Hilfe eines psychrometrischen Diagramms (Abb. 4-8) die relative und absolute Feuchte bestimmen.

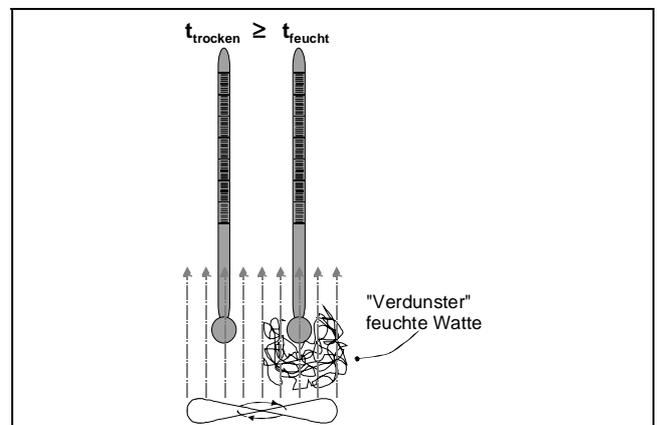


Abb. 4-7: Psychrometer zur indirekten Bestimmung der relativen Luftfeuchte RH.

Hinweis: Die relative Feuchte aufgewärmter Aussenluft sinkt deutlich ab. Beispiele sind Büros im Winter mit hohem Frischluftanteil und Flugzeugkabinen.

Ein weiteres Verfahren beruht auf der Messung des Taupunktes. Kältere Luft kann absolut weniger Wasser aufnehmen als warme. Wird Luft also abgekühlt, steigt die relative Feuchte, und umgekehrt. Diesen Effekt macht sich das Taupunktverfahren zunutze. Die Luft wird bis auf 100% rel. Feuchte heruntergekühlt. Die Differenz zur Ausgangstemperatur ist ein Mass für die relative Feuchte.

Neben den Einzelmessgeräten gibt es Messgeräte, die alle Messfühler in sich vereinen und deshalb auch Klimasummenmasse liefern können oder auch eine Bewertung durchführen.

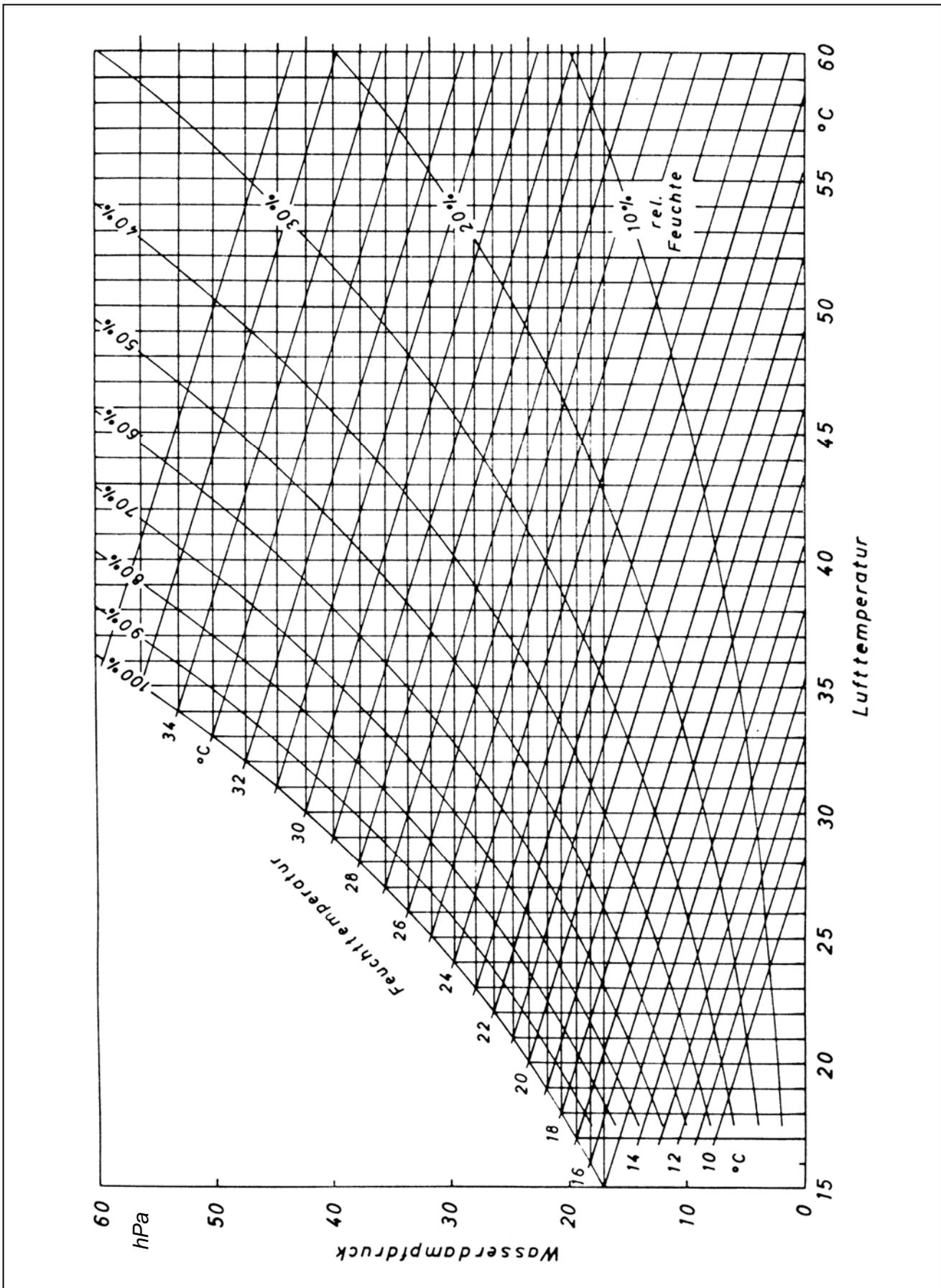


Abb. 4-8: Psychrometrisches Diagramm zur Ermittlung der relativen und absoluten Feuchte.

4.2 Thermophysiology

Thermosensoren

Verschiedene Thermosensoren liefern die Information für Temperaturwahrnehmung und Thermoregulation. Es gibt zentrale Thermosensoren mit grosser Sensitivität im Gehirn (Hypothalamus). Weitere Thermosensoren finden sich im Körperinnern und an der Körperoberfläche. Auf letztere soll ausführlicher eingegangen werden, um die Prinzipien der Temperaturwahrnehmung zu verdeutlichen. Es gibt einmal Kältsensoren und zum anderen sogenannte Wärmesensoren. Abb. 4-9 zeigt die Aktivität beider Sensorarten für eine gleichmässige Umgebungstemperatur.

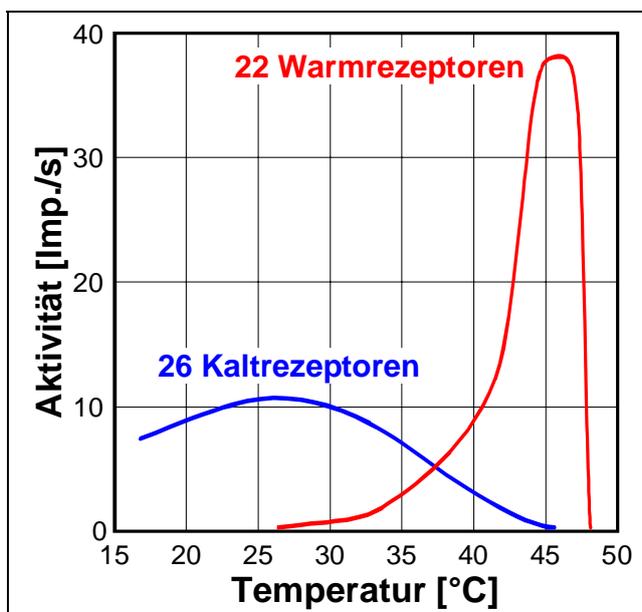


Abb. 4-9: Statische Aktivität von Kältsensoren und Wärmesensoren (n. KENSHALO, 1969).

Da die mittlere Hauttemperatur 36°C nicht wesentlich übersteigt (Abb. 8), sind es offensichtlich die Kältsensoren, über die wir unsere statische Temperaturwahrnehmung beziehen, so nicht die Strahlungstemperatur deutlich über der Raumtemperatur liegt.

Beide Sensorarten zeigen zusätzlich ein dynamisches Verhalten: Kältsensoren steigern ihre Aktivität bei abfallender Temperatur über-

proportional (Differentialempfindlichkeit). Im Gegensatz zur „statischen“ Aktivität melden die Wärmesensoren überproportional „heftig“ einen Temperaturanstieg (Differentialempfindlichkeit).

Hinweis: Wie viele Sensoren reagieren die Thermosensoren überproportional stark auf Temperaturänderungen.

Hinweis: Örtliche Unterschiede der Raumtemperatur und eher noch solche der Strahlungstemperatur können als Zugluft interpretiert werden.

Kältsensoren sind ungleichmässig über die Körperoberfläche verteilt (Abb. 4-10). Die geringste Dichte findet sich in den Extremitäten.

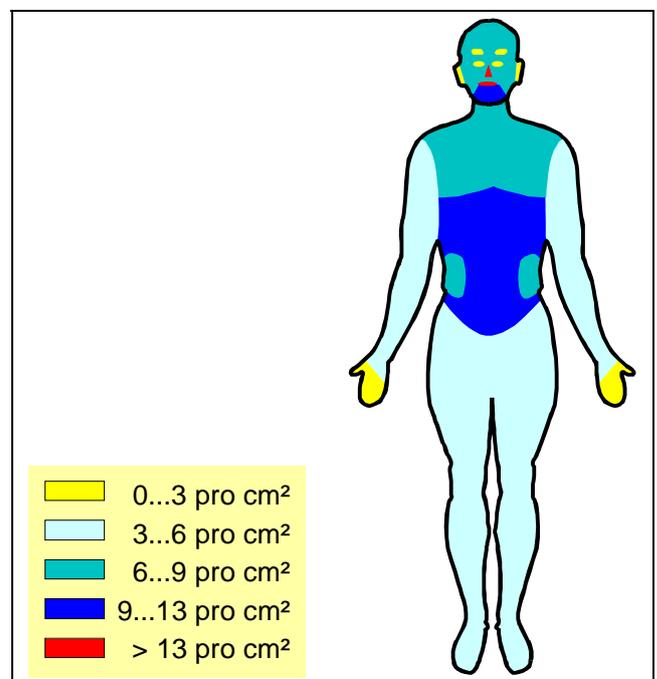


Abb. 4-10: Verteilung der Kältsensoren über die Körperoberfläche.

Hinweis: Kältsensoren an den Füssen geben einen Weckreiz. Mit kalten Füssen schläft es sich schlecht ein. Reizung der Halssensoren führt zur Muskelverspannung (Wärmeproduktion) und zum steifen Hals. Bei Fahrten mit offenem Sportwagen erfüllt der Schal eine wesentliche Funktion mit dem Signal „es ist nicht kalt“.

Die Differentialempfindlichkeit der Sensoren äussert sich deutlich im Verlauf der Temperaturwahrnehmung von Temperaturänderungen (Abb. 4-11). Ein Temperaturanstieg signalisiert

schon bei niedrigen Temperaturen die Wahrnehmung „warm“, umgekehrt ein Temperaturabfall bei sehr viel höheren Temperaturen den Eindruck „kühl“. Ein Zustand, der nach einem Temperaturanstieg als „warm“ eingestuft wurde, ist nach einer gewissen Zeit nur noch „lauwarm“. Es ist also bei Bewertungen des Klimas immer zwischen statischen und dynamischen Systemantworten zu unterscheiden.

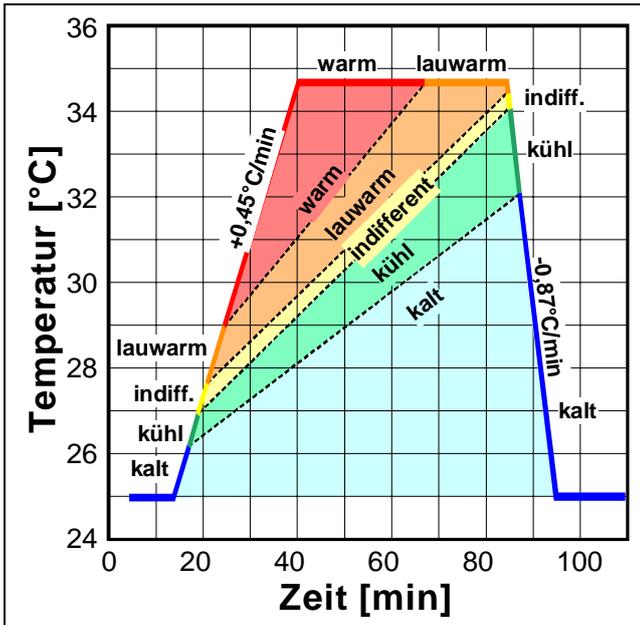


Abb. 4-11: Temperaturbeurteilung bei linear ansteigender bzw. abfallender Temperatur des Fusses (n. Hensel, 1952).

Wärmebilanz

Damit der Mensch als Warmblüter seine Körperkerntemperatur von ca. 37°C in einer sich klimatisch verändernden Umwelt und bei unterschiedlichen Arbeitsleistungen konstant halten kann, muss die aufgenommene und produzierte Wärme im Gleichgewicht zur abgegebenen Wärme stehen. Dieser Ausgleich der Wärmebilanz erfolgt unter anderem durch die Thermoregulation, einem physiologischen Regelkreis, analog zur Temperaturregelung einer Heizung mit einem Thermostaten.

Bei der Einstellung eines thermischen Gleichgewichts, kommt es einmal zum Wärmetransport im Körper über das Blut und die Atemluft

und zum Wärmeübergang zwischen Körperoberfläche und Umgebung (Abb. 4-12). Folgende vier Wärmeübergangsformen werden unterschieden:

- Wärmeleitung (Konduktion)
- Konvektion
- Verdunstung (Evaporation)
- Strahlung (Radiation)

Aufgrund der geringen Kontaktflächen zwischen Körper und festen Stoffen besitzt die Wärmeleitung einen fast vernachlässigbaren Einfluss. Ein weiterer kleiner Teil der Wärmeabgabe erfolgt auch über die ausgeatmete Luft. Die pro Sekunde umgesetzte Energie – der Energieumsatz oder der Wärmefluss – wird in Watt pro m² Körperoberfläche angegeben. Die Körperoberfläche A_{Du} kann nach DuBois [1916] durch folgende Formel geschätzt werden:
 $A_{Du} = 0.202 \cdot m^{0.425} \cdot h^{0.725}$ mit dem Körpergewicht m in kg und der Körperlänge h in m.

Die Wärmebilanz ergibt sich dann zu:
 $M + R + C + E = S$ (in W/m²).

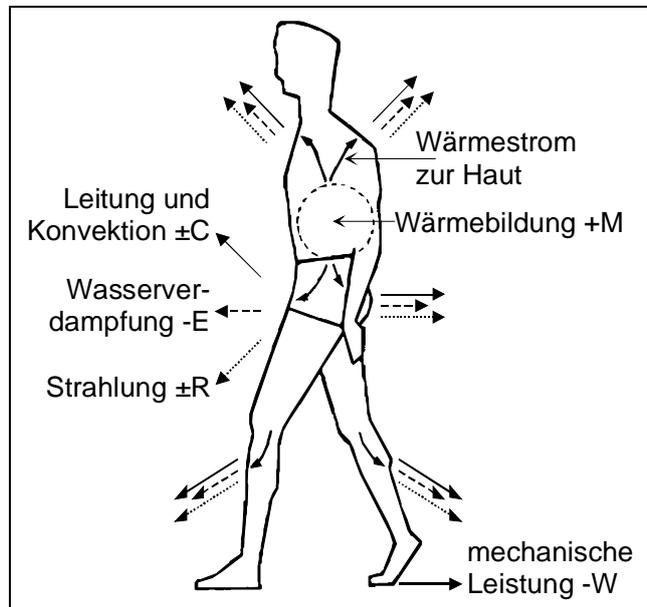


Abb. 4-12: Wege der Wärmeabgabe des Menschen.

Die durch den Stoffwechsel und die Muskelaktivität bedingte metabolische Rate M ist immer positiv. Wärmeabgaben bedeuten nega-

tive, Wärmeaufnahmen positive Werte. Werte für E sind nie positiv. S bezeichnet die Wärmespeicherung im Körper. Für thermischen Komfort muss diese Null sein (siehe Kap. Komfortbedingungen). Dies ist dann der Fall, wenn die physiologische Thermoregulation wirksam ist.

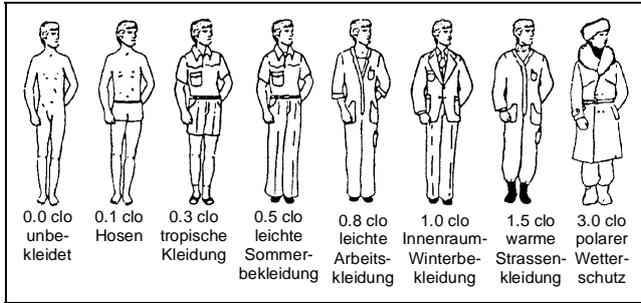
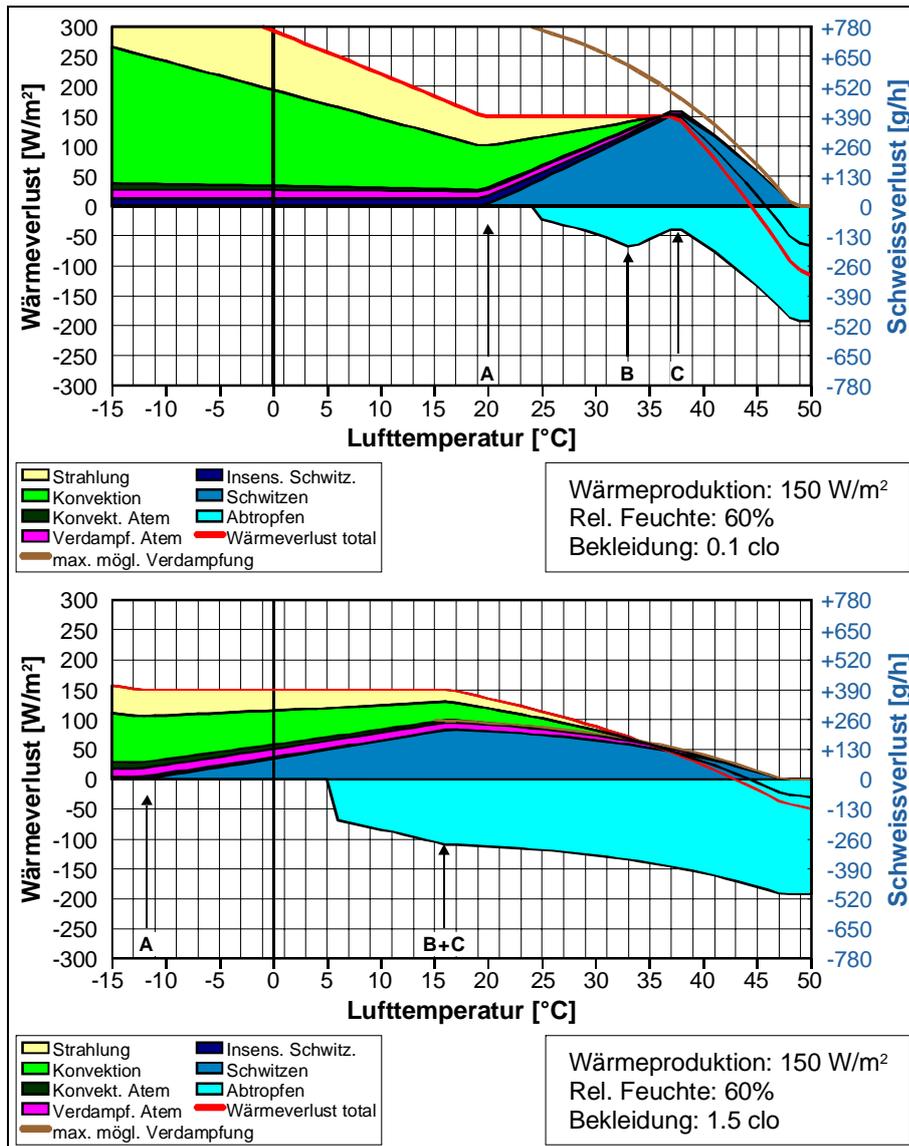


Abb. 4-13: Isolationen unterschiedlicher Bekleidungen in clo.

Bei Hitze arbeitsplätzen etwa, kann S positiv sein. Das bedeutet, dass sich der Körper immer stärker erwärmt und nach einer gewissen Zeit zu Hitzeerkrankungen wie z.B. Hitzschlag führen kann (siehe Kap. Hitzearbeit). Im Gegensatz dazu ist in kalten Umgebungen S negativ (siehe Kap. Kältearbeit). Wie schnell der Wärmeaustausch zwischen der Körperoberfläche und der Umgebung stattfindet, hängt von der Isolationswirkung der Kleidung ab. Die Art der Bekleidung spielt daher beim Wärmeaustausch eine wesentliche Rolle. Der Wärmeaustausch ist abhängig vom Isolationswert R_{cl} der Kleidung. Dieser wird oft mit der Einheit clo angegeben (siehe Abb. 4-13). 1 clo entspricht dem physikalischen Isolationswert von $0.155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$.



Für sitzende Tätigkeit in gepolsterten Stühlen (z.B. im Büro) sollte eine zusätzliche durch die Polsterung bedingte Isolation von 0.15 clo hinzugerechnet werden.

Die Wärmebilanz für zwei verschiedene Bekleidungs-situationen ist in Abb. 4-14 dargestellt.

Abb. 4-14: Wärmebilanz des Menschen für unterschiedliche Lufttemperatur und zwei verschiedene Bekleidungsisolierungen. Thermoregulation findet da statt, wo der Wärmeverlust gleich der Wärmeproduktion von 150 W/m^2 ist. Bei höheren Temperaturen erhitzt und bei tieferen verkühlt sich der Körper kontinuierlich.

Metabolische Rate M

Der Stoffwechsel bzw. der Metabolismus des Körpers und die Tätigkeiten bzw. die Muskelarbeit des Menschen erzeugen im Körper Wärme (=metabolische Rate). Diese pro Sekunde erzeugte Wärmeenergie wird ebenfalls in Watt pro m² auf die Körperoberfläche bezogen. Ein anderes Mass für die Wärmeproduktion ist die metabolische Einheit met. Ein met entspricht der Energieabgabe des ruhig sitzenden Menschen und beträgt 58 W/m² (siehe Abb. 4-15 und Tab. 4-2).

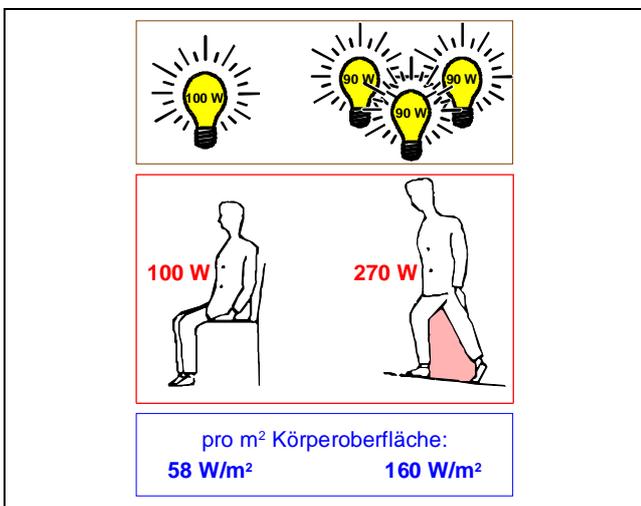


Abb. 4-15: Anschauliche Darstellung zur metabolischen Wärmebildung.

Tab. 4-2: Pro Quadratmeter Körperoberfläche durch Metabolismus und Tätigkeiten erzeugte Wärme (Metabolische Rate).

Tätigkeit	Wärmefluss	
	[met]	[W/m ²]
liegend	0,8	46
ruhig sitzend	1,0	58
sitzend (Büro, Wohnhaus, Labor, Schule)	1,2	70
entlastet, stehend	1,2	70
leicht, stehend (Geschäft, Labor, leichte Industriearbeit)	1,6	93
mittel, stehend (Verkäufer, Hausarbeit, Maschinenarbeit)	2,0	116
schwer, stehend (schwere Maschinenarbeit, Hallenarbeit)	3,0	174

Eine maximale metabolische Energieproduktion findet sich beispielsweise beim Sport (Tab. 4-3).

Tab. 4-3: Geschlechtsabhängige maximale metabolische Energieproduktion bei verschiedenen Sportarten (in W/m²).

Sportart	Männer	Frauen
Ausdauersportarten		
Langlauf	1085	875
Skilanglauf	1070	875
Biathlon	1070	
Mittelstreckenlauf	1015	865
Radsport (Strassenrennen)	1015	810
Orientierungslauf	960	810
Eislauf	960	745
Bahnradfahren	945	745
Rudern	940	805
Schwimmen	910	745
Kanusport	895	680
Gehen	875	745
Spielsportarten		
Handball	805	650
Eishockey	805	
Volleyball	805	650
Fussball	750	
Basketball	735	550
Tennis	700	550
Tischtennis	595	520
Kampfsportarten		
Boxen	875	
Ringern	875	
Judo	805	680
Fechten	665	550

Wird im Arbeitsprozess dynamische Muskelarbeit erbracht (z.B. Drehen einer Kurbel), wird diese teilweise dem Körper als mechanische Leistung W entzogen. Sie muss nicht mehr durch thermische Prozesse abgeführt werden. Für Berechnungen wird im allgemeinen die metabolische Rate M um diesen Betrag vermindert.

Konvektion C

Ist die Temperatur der Körperoberfläche (Kleideroberfläche) t_{cl} grösser als die mittlere Temperatur der umgebenden Luft t_a, wird konvektive Wärme C [W/m²] von der Körperoberfläche an die Luft abgegeben. Im umgekehrten Fall nimmt der Körper konvektive Wärme auf, welche zusätzlich zur metabolischen Wärme durch Schwitzen wieder abgegeben werden muss. Die Konvektion darf nicht mit der Wärmestrahlung verwechselt werden.

lung verwechselt werden. Sie ist abhängig von der Luftgeschwindigkeit, der Temperaturdifferenz zwischen Körper und Luft sowie von der Isolation der Bekleidung.

Wärmestrahlung R

Der Mensch kann aus seiner Umgebung Wärme durch Wärmestrahlung aufnehmen oder abgeben. Es handelt sich um Infrarotstrahlung, welche auch ohne die Luft Wärme übertragen kann. Ebenfalls wie die Konvektion ermöglicht die Wärmestrahlung einen Ausgleich des menschlichen Wärmehaushalts. An Hochöfen jedoch oder im direkten Sonnenlicht erfolgt eine Wärmeaufnahme durch den menschlichen Körper, da deren Strahlungstemperatur höher ist als die der Körper- bzw. Kleideroberfläche.

Der durch die Wärmestrahlung bedingte Wärmestrom wird entweder durch die effektive Bestrahlungsstärke R in W/m^2 oder durch die mittlere Flächenstrahlungstemperatur \bar{t}_r in $^{\circ}C$ gemessen. Die Umrechnung zwischen den beiden Grössen erfolgt mit den üblichen Gesetzen für Strahlungsaustausch oder mit der folgenden vereinfachten Formel, wobei der Mensch als Wärmestraher mit einer Temperatur von $32^{\circ}C$ und einem Emissionsgrad von 0.95 angenommen wird: $R = 0.95 \cdot 4.7 \cdot (32^{\circ}C - \bar{t}_r)$.

Bei grosser Wärmestrahlung (Hochöfen) müssen Schutzbrillen, Abschirmungen und Schutzkleider gegen Verbrennungsschäden verwendet werden.

Verdunstung E

Sobald keine ausreichende Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung mehr möglich ist, um den Körper im thermischen Gleichgewicht zu halten, beginnt der Körper zu schwitzen. Die Schweissverdunstung spielt dann die Hauptrolle bei der Regulierung des menschlichen Wärmehaushalts. 260 Gramm pro Stunde

verdunsteter Schweiss entspricht einer Wärmeabgabe von $100 W/m^2$.

Je grösser der Hautfeuchtigkeitsgrad w , d.h., der Grad der Benetzung der Körperoberfläche ist, desto mehr Energie kann pro Sekunde durch Verdunsten abgegeben werden. Je nachdem, wie schnell die verdunstete Flüssigkeit durch die produzierte Schweissmenge ersetzt wird, nimmt der Hautfeuchtigkeitsgrad zu oder ab und stabilisiert sich auf einen Gleichgewichtswert. Er bestimmt mit, ob ein Klima als behaglich empfunden wird. Wenn zu stark geschwitzt wird, trägt der überschüssige, abtropfende Schweiss nichts zur Wärmeregulation des Körpers bei. Was das z.B. bei einem Marathonlauf bedeutet, kann Abb. 4-16 entnommen werden (siehe auch unten Kap. „Hitzearbeit“).

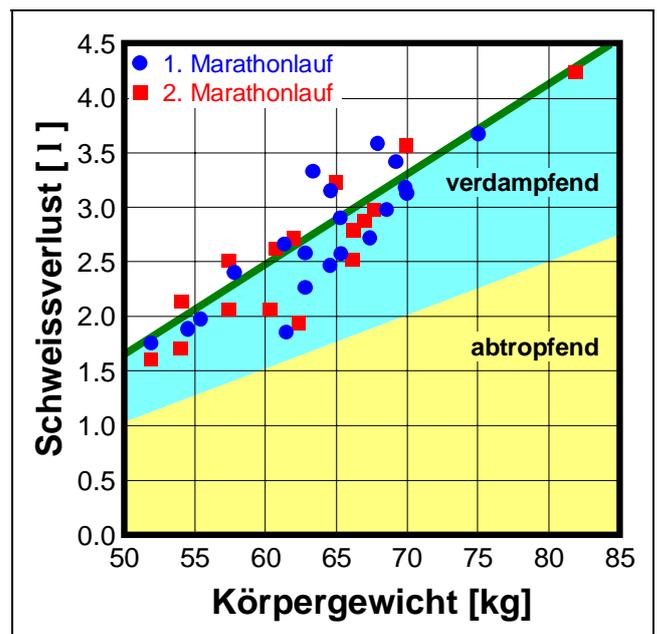


Abb. 4-16: Schweissverlust beim Marathonlauf in Abhängigkeit des Körpergewichts (Messungen aus zwei Marathonläufen). Nur der verdampfende Schweiss trägt zur Kühlung bei. Die Flüssigkeitsverluste müssen durch Trinken wieder ersetzt werden.

Die verdunstete Menge hängt ab, von der Luftgeschwindigkeit, von der Isolation und Wasserdurchlässigkeit der Bekleidung und von der Wasseraufnahmefähigkeit der Luft. Verdamp-

fungswärme kann nur abgegeben werden, wenn der Dampfdruck im Raum geringer ist als derjenige direkt über dem Schweißfilm. Dampfdrücke können mit Hilfe eines psychrometrischen Diagramms (Abb. 4-8) aus der Temperatur und der relativen Feuchte ermittelt werden. Über dem Schweißfilm ist die Luft 100% gesättigt und ihre Temperatur entspricht derjenigen der Körperoberfläche. Beispielsweise kann bei einer Körperoberflächentemperatur von 36°C, in einem Raumklima mit 40°C und 80% Feuchte keine Wärme durch Schwitzen abgegeben werden, weil beide Dampfdrücke gleich gross sind (=59 hPa).

Thermoregulation

Die physiologische (autonome) Thermoregulation erfolgt mittels zweier miteinander verknüpfter Regelkreise (Abb. 4-17). Menschliche Temperaturfühler (Thermorezeptoren) befinden sich auf der Hautoberfläche bzw. im Gehirn (Hypothalamus) und messen die Hauttemperatur (Schalentemperatur) bzw. die Kerntemperatur. Die physiologische Thermoregulation wird unterstützt durch Verhaltensregulation und in Gebäuden durch technische Regulation mittels Heizung und Kühlung (siehe Abb. 4-30).

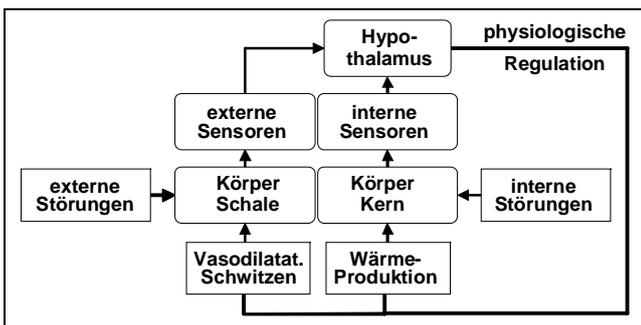


Abb. 4-17: Schema der physiologischen Thermoregulation.

Die beiden Körperbereiche Schale und Kern haben im allgemeinen nicht die gleiche Temperatur. In kalten Umgebungen kann die Hauttemperatur mehr als 10°C unter der Kerntemperatur liegen (Abb. 4-18). Eine maximale Wärme-

isolation liegt vor, wenn die Schalentemperatur 6°C geringer ist als die Kerntemperatur.

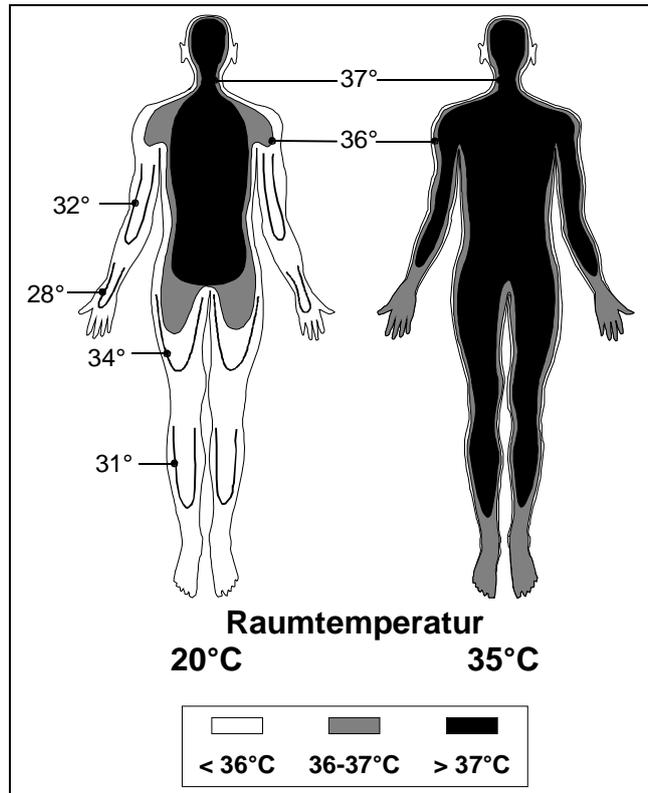


Abb. 4-18: Isothermen der Körperschalen (schematisch). Wenn sich die Extremitäten unter die Indifferenztemperatur abkühlen, findet eine andauernde Kaltwahrnehmung statt (Bsp.: kalte Füße).

Bei Sensorwerten der Thermorezeptoren über dem Sollwert versucht der Organismus durch vermehrtes Schwitzen, durch Erhöhung der Pulsfrequenz und damit durch einen schnelleren Wärmeaustausch zwischen Kern und Oberfläche sowie durch Erweitern der peripheren Gefässe (Vasodilatation, Hautrötung) die Wärmeabgabe zu vergrössern.

Signalisieren die Thermorezeptoren zu geringe Temperaturen, versucht der Körper die Wärmeabgabe durch Aufstellen der Haare (Gänsehaut) und damit durch Bildung eines Luftpolsters sowie durch Verengen der peripheren Blutgefässe (Vasokonstriktion) zu verringern. Ausserdem wird durch Kältezittern (Frösteln) und einer Verstärkung der Verbrennungsprozesse in der Leber die Wärmeproduktion vergrössert.

Hitzearbeit

Schon bei geringen Abweichungen vom thermischen Gleichgewicht kommt es bei Wärmüberschuss zu unbehaglichen Wärmeempfindungen. Während Unbehaglichkeit bereits zu erhöhter Reizbarkeit und Konzentrationsmangel führt, fällt bei noch grösserer Hitze die Leistung für Geschicklichkeit fordernde Arbeiten ab und die Unfälle nehmen zu. In Abb. 4-19 ist die Abnahme der Leistung mit zunehmender Temperatur für drei Luftfeuchtigkeiten dargestellt.

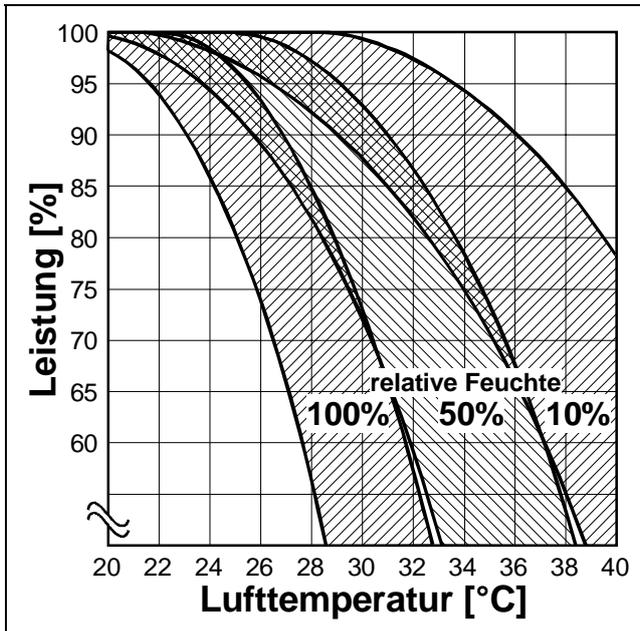


Abb. 4-19: Bereiche körperlicher und geistiger Leistungsminderung durch Hitze für verschiedene Luftfeuchten (stark vereinfacht).

Ein weiterer Anstieg der Wärme führt zu Hitzestau mit Störungen des menschlichen Wasser- und Salzhaushalts und einer starken Belastung von Herz und Kreislauf. Symptome von Hitzeerkrankungen sind neben einer erhöhten Körpertemperatur folgende:

- Übelkeit
- Schwindel
- Müdigkeit
- Schmerzen in Armen und Beinen.
- Kopfschmerzen
- Verwirrtheit
- Krämpfe

Um solche Hitzelerkrankungen zu verhindern, legt die SUVA [1998] Klimagrenzen für Dauerexposition fest (Abb. 4-20).

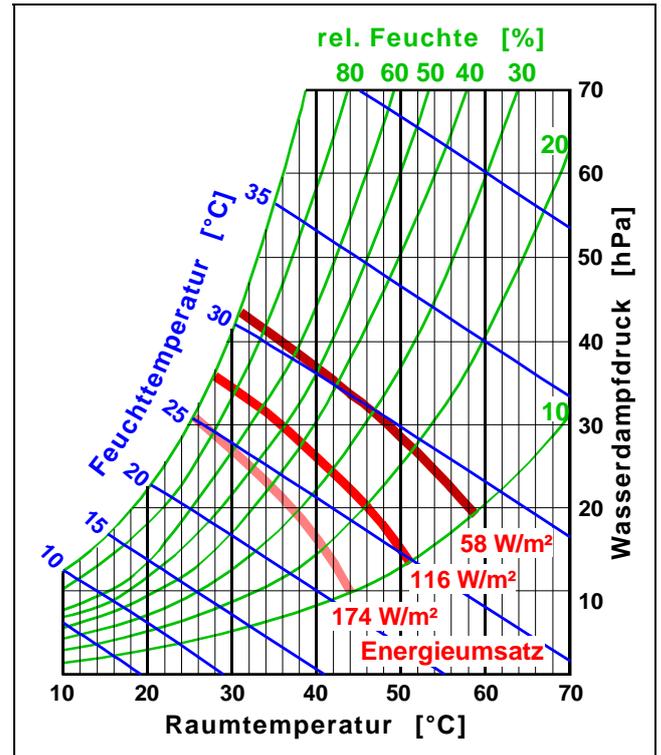


Abb. 4-20: Klimagrenzen für Dauerexposition (für Windgeschwindigkeit $v = 0.9 \text{ m/s}$ und Bekleidung von 0.9 clo).

Tab. 4-4: Maximalwerte für Hitzearbeit von 5 bis 8 Stunden Dauer. Akklimatisierte Personen zeichnen sich durch ihre schnellere und ökonomischere Thermoregulation aus. Beim Alarmwert ist noch kein normalleistungsfähiger Arbeiter in Gefahr, beim Gefahrenwert sind schon einige, obwohl leistungsfähige Menschen gefährdet.

Grenzen:	nicht akklimatisierte Personen		akklimatisierte Personen	
	Alarm	Gefahr	Alarm	Gefahr
maximaler Wasserverlust [g]	2600	3250	3900	5200
maximaler Hautfeuchtigkeitsgrad [%]	85	85	100	100
maximale Schweißrate [g / h]				
ruhend	260	390	520	780
arbeitend	520	650	780	1040
max. Wärmespeicherung im Körper [W h/m ²]	50	60	50	60

Bei schwerer Arbeit in grosser Hitze kommt der Schweissabsonderung die entscheidende Bedeutung für den Ausgleich des Wärmehaushalts zu. Es soll daher alle 10 bis 15 Minuten ein Becher Flüssigkeit (Wasser, Tee, nicht aber Kaffee) getrunken werden. Der Wasserverlust darf ein vorgegebenes Maximum nicht überschreiten (Tab. 4-4). Es sind häufige und längere Pausen vorzusehen.

Gefahr besteht auch, wenn der maximal erlaubte Hautfeuchtigkeitsgrad überschritten wird. Unter Hautfeuchtigkeitsgrad wird der Grad der Benetzung der Körperoberfläche mit Schweiss verstanden. Ist dieser nahe bei 100%, trägt zusätzliches Schwitzen nichts mehr zur Abkühlung bei, da der Schweiss keine zusätzliche Verdunstungsfläche mehr findet und abtropft.

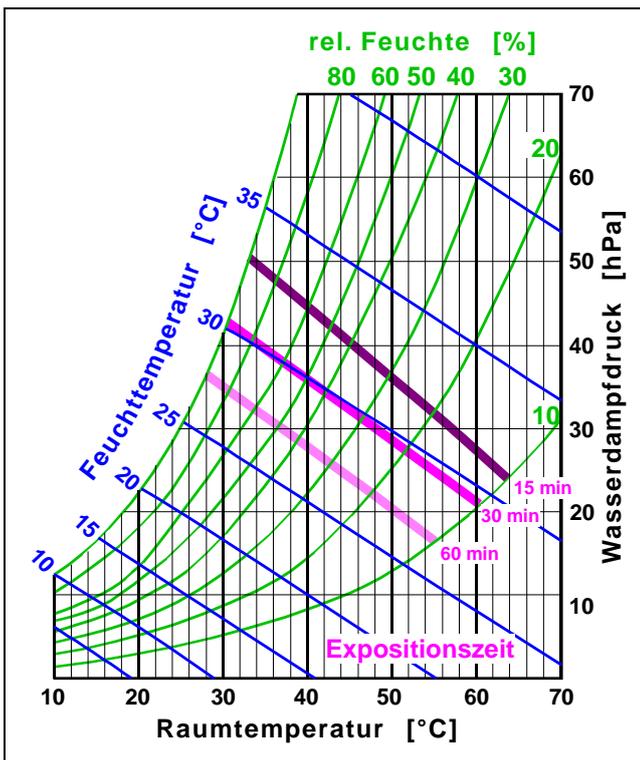


Abb. 4-21: Klimagrenzen für Kurzzeitexposition (Energieumsatz: 232 W/m², Windgeschwindigkeit v = 0.9 m/s und Bekleidung von 0.9 clo).

Falls an einem Arbeitsplatz die Maximalwerte von Tab. 4-4 überschritten werden, muss die Arbeits- bzw. Schichtdauer entsprechend ver-

kürzt werden (Abb. 4-21; vgl. auch SUVA [1998]). Die Beanspruchung der einzelnen Personen während der Hitzearbeit kann mit Hilfe physiologischer Beanspruchungsgrößen beobachtet werden. Es kommen dafür die Rektaltemperatur, die Schweissabgabe, die Herzfrequenz, der Sauerstoffverbrauch und die Messung des Erholungspulses in Frage (siehe auch ISO 8996).

Kältearbeit

Die letale Kerntemperatur liegt zwischen 25 und 27°C. Die Hauttemperatur reagiert wegen eintretender Vasokonstriktion unter Kälte sehr rasch. Es folgt eine periphere Durchblutungsbehinderung, dem aber Muskelzittern durch Kälte (Frösteln) entgegensteht. Diese widersprüchliche Situation bedingt eine Blutdruckreaktion. Sowohl Laboruntersuchungen (2 stündige Exposition bei 5°C, 0.1 clo Bekleidung) als auch Feldstudien in Kühlhäusern (bei -28°C, in Kälteschutzkleidung) ergaben eine Erhöhung des systolischen Blutdrucks um 20, des diastolischen Blutdrucks um 10 mm Hg.

Bei der Arbeit in Kühlhäusern zeigt die Hauttemperatur trotz Kälteschutzkleidung und weitgehend konstanter Rektaltemperatur eine Abnahme an der Hand um 5°C, am Fuss um rund 10°C und an den Zehen um mehr als 15°C. Die Rückkehr der Hauttemperatur in klimaneutraler Umgebung dauert relativ lange. Man muss bis zu einer halben Stunde warten. Dieser Faktor ist bei der Arbeitsgestaltung zu berücksichtigen.

Die Geschicklichkeit und damit die Leistung bei manuellen Tätigkeiten sinkt mit abnehmender Hauttemperatur der Hand. Dies macht sich besonders bei schwierigen Arbeiten bemerkbar (Abb. 4-22). Muss bei noch niedrigeren Temperaturen zur Verhinderung von Hautschädigungen Schutzkleidung getragen werden, kann die

Leistungsfähigkeit wegen mechanischer Behinderung noch weiter abnehmen.

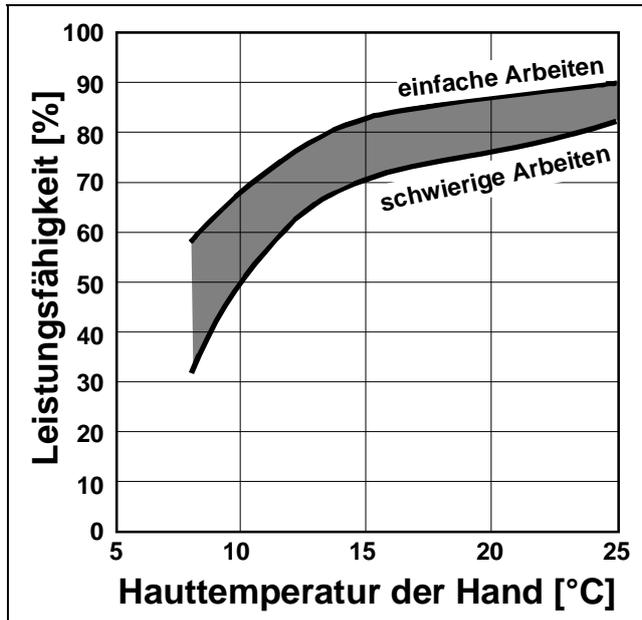


Abb. 4-22: Leistungsfähigkeit für manuelle Tätigkeiten mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad in Abhängigkeit der Handtemperatur.

4.3 Globaler thermischer Komfort

In diesem Kapitel wird der globale, das heisst, der Ganzkörper-Komfort behandelt. Für thermischen Komfort ist es aber auch erforderlich, dass kein lokales Unbehagen am Körper entsteht, wie z.B. Zugluft oder asymmetrische Wärmestrahlung. Sie sind Thema des nächsten Hauptkapitels.

Die Ausführungen über die Wärmebilanz des Menschen haben gezeigt, dass folgende vier Klimagrössen den thermischen Komfort wesentlich beeinflussen:

- Raum- bzw. Lufttemperatur t_a [°C]
- Wärme- bzw. IR-Strahlung t_r [°C]
- Windgeschwindigkeit v [m/s]
- relative Feuchte RH [%]

Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit bzw. der thermische Komfort ist das Gefühl welches Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt. Das bedeutet, dass man einen Klimazustand als thermisch neutral für den ganzen Körper empfindet, d.h., nicht weiss, ob man eine niedrigere oder höhere Temperatur vorziehen würde. Diskomfort bezeichnet einen davon abweichenden unbehaglichen Klimazustand.

Tab. 4-5: Einige mögliche Bewertungsskalen, welche in der Forschung zum thermischen Komfort verwendet wurden. PMV und PPD werden in separaten Kapiteln erklärt.

Beurteilung	Akzeptanz	Präferenz	PMV	PPD
heiss	inakzeptabel	will es kühler	+3	99%
warm			+2	75%
leicht warm	akzeptabel	will keine Änderung	+1	25%
neutral			0	5%
leicht kühl			-1	25%
kühl	inakzeptabel	will es wärmer	-2	75%
kalt			-3	99%

Für die Beurteilung der klimatischen Verhältnisse in einem Grossraum reicht eine Messung der Klimafaktoren im allgemeinen nicht aus. Neben einer Abschätzung der körperlichen Aktivität, welche im Rahmen einer Arbeitsanalyse erfolgt, können auch individuell unterschiedliche Bedürfnisse mit einem Fragebogen erfasst werden. Fragen zu lokalen Klimawirkungen werden ergänzt durch eine Ratingskala bezüglich des globalen thermischen Komforts (Tab. 4-5).

Komfortbedingungen

Die Wärmebilanzgleichung wurde in vielen Studien untersucht, mit dem Ziel einen einzigen Index zu entwickeln, welcher Abweichungen vom thermischen Gleichgewicht signalisiert oder sogar eine subjektive Beurteilung gemäss Tab.

4-5 voraussagt. Der Index soll also den mehrdimensionalen „Klimaraum“ bestehend aus Lufttemperatur, Strahlung, Windgeschwindigkeit und relativer Feuchte zu einem einzigen Klimasummenmass kombinieren. Falls ein Messgerät in der Lage ist, einen solchen Index anzuzeigen, wäre es einfach, eine Klimasituation vor Ort zu beurteilen.

Man kann unterscheiden in Indices, welchen eine Analyse des Wärmeaustauschs am Menschen mit den fundamentalen Gesetzen der Thermodynamik zugrunde liegen und in solche, welche empirisch aus Korrelationen zwischen Klimagrössen und subjektiven Beurteilungen gemäss Tab. 4-5 hervorgegangen sind. Ein Beispiel für die erste Methode sind die Gleichungen in ISO 7933, die unter anderem zur Ermittlung der Wärmeproduktion S im Körper und zur Berechnung der erforderlichen Schweissrate herangezogen werden können. Beispiele für die zweite Methode sind die Effektivtemperatur ET oder die WBGT. Dem PMV-Index nach Fanger [1970] liegt eine Kombination beider Methoden zugrunde.

ET und WBGT werden mit Hilfe der zwei abgeleiteten Grössen Globetemperatur t_g und Feuchttemperatur t_{wn} ermittelt. Das Globethermometer besteht aus einem Thermometer, dessen Fühler von einer geschwärzten Kugel umgeben ist. Es soll den menschlichen IR-Strahlungsaustausch simulieren. Die Feuchttemperatur ist die mit einem Psychrometer bestimmte Temperatur des befeuchteten Thermometers.

ET: Effektivtemperatur

Die Effektivtemperatur ist ein altes Summenmass, welches die Raumtemperatur, die Feuchte und die Luftbewegung miteinander kombiniert [Houghton, Yaglou, 1923]. Es ist auch heute noch weit verbreitet. Man unterscheidet die Normal-Effektivtemperatur NET,

die für Personen mit üblicher Strassenkleidung gilt, und die Basis-Effektivtemperatur BET für Personen mit unbekleidetem Oberkörper. Ihr Wert wird mittels Nomogrammen ermittelt (Abb. 4-23). Ein Raum ohne Luftbewegung mit 25°C und einer Feuchte von 50% hat beispielsweise eine Effektivtemperatur von 22°C. In einem Klima mit 100% Luftfeuchte und 0.1 m/s Windgeschwindigkeit stimmen Raumtemperatur und Effektivtemperatur überein. Falls die Strahlungstemperatur stark von der Raumtemperatur abweicht, sollte bei der Bestimmung der Effektivtemperatur die Globetemperatur statt die Raumtemperatur verwendet werden. Die Effektivtemperatur wurde sukzessive weiterentwickelt. In den USA wird die neue Effektivtemperatur ET^* verwendet. Für weitere Informationen zu ET^* siehe bei Gagge et al. [1986].

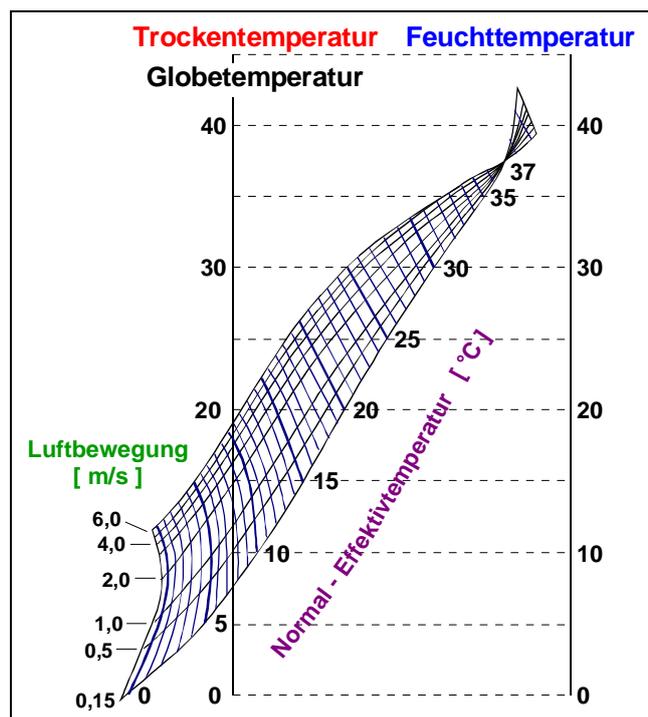


Abb. 4-23: Nomogramm nach Yaglou zur Ermittlung der Normal-Effektivtemperatur NET.

WBGT: Wet Bulb Globe Temperature

Die WBGT ist ein einfaches Summenmass, welches die Feuchte, die Wärmestrahlung und die Raumtemperatur miteinander kombiniert (siehe ISO 7243). Die Bedeutung der WBGT

ergibt sich aus der Tatsache, dass sie als Arbeitsnorm von der ISO empfohlen wurde. Sie berücksichtigt weder den Energieumsatz noch die Bekleidung des Menschen. Es gilt ohne Sonnenbelastung:

$$WBGT = 0.7 \cdot t_{wn} + 0.3 \cdot t_g$$

und mit Sonnenbelastung:

$$WBGT = 0.7 \cdot t_{wn} + 0.2 \cdot t_g + 0.1 \cdot t_a$$

PMV: Diskomfort-Index

Ausführliche Untersuchungen zum Klimakomfort wurden von Fanger [1970] in Klimakammern an über 1300 Testpersonen durchgeführt. Sie zeigten, dass zum Erreichen einer thermischen Behaglichkeit für den ganzen Körper drei Bedingungen erfüllt sein müssen:

- Die vom Körper abgeführte Wärmemenge befindet sich im Gleichgewicht mit seiner Wärmeproduktion. Es findet kein Wärmeverlust und keine Wärmespeicherung im Körper statt: $S = 0 \text{ W/m}^2$.
- Mit zunehmender körperlicher Aktivität M in W/m^2 wird eine tiefere mittlere Hauttemperatur \bar{t}_{sk} in $^{\circ}\text{C}$ bevorzugt. Fangers Untersuchungen ergaben folgenden Zusammenhang: $\bar{t}_{sk} = 35.7^{\circ}\text{C} - 0.0275 \cdot M$. Im Büro mit $M=70 \text{ W/m}^2$ ergibt dies eine mittlere Hauttemperatur von 33.8°C .
- Mit zunehmender körperlicher Aktivität M [W/m^2] wird eine erhöhte Schweissrate und damit eine erhöhte Wärmeabgabe E [W/m^2] durch Verdunstung bevorzugt. Körperlich aktive Personen bevorzugen offenbar keine so stark gekühlte Umgebung, dass sie nicht mehr Schwitzen müssen. Die Untersuchungen ergaben für metabolische Raten M bis 174 W/m^2 ($=3 \text{ met}$) folgendes:
 $E = 0.42 \left(M - 58.15 \text{ W/m}^2 \right)$. Für Bürotätigkeiten ist dies kaum noch von Bedeutung und Schwitzen daher kein Erfordernis für Behaglichkeit.

Die Abgabe von Verdunstungswärme gemäss c) korreliert stark mit dem Hautfeuchtigkeitsgrad w (Benetzungsgrad der Körperoberfläche). Die Behaglichkeit hängt daher auch mit w zusammen (Tab. 4-6).

Tab. 4-6: Die Behaglichkeit der thermischen Belastung bei verschiedenen Hautfeuchtigkeitsgraden (Gagge, 1981).

Hautfeuchtigkeit	Bewertung
$0.0 < w < 0.2$	behaglich
$0.2 < w < 0.5$	leicht behaglich
$0.5 < w < 0.7$	unbehaglich
$0.7 < w < 1.0$	stark unbehaglich

Fanger konnte die drei Komfortbedingungen so umformen, dass ein Diskomfort-Index, das sogenannte PMV berechnet werden kann (siehe Fanger 1970 und ISO 7730). Das vorausgesagte mittlere Urteil PMV (predicted mean vote) ist eine Zahl, die den Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine grosse Personengruppe anhand der 7-stufigen Klimabeurteilungsskala gemäss Tab. 4-5 voraussagt.

PPD: Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener

Das PMV sagt den Durchschnittswert der Klimabeurteilung einer grossen Gruppe dem gleichen Umgebungsklima ausgesetzter Personen voraus. Einzelne Urteile streuen um diesen Durchschnittswert, und es ist nützlich, die Anzahl der Personen vorherzusagen, die das Umgebungsklima wahrscheinlich als zu warm oder zu kalt empfinden werden. Der PPD stellt eine quantitative Voraussage der Anzahl der mit einem bestimmten Klima unzufriedenen Menschen dar (Abb. 4-24 und Tab. 4-5).

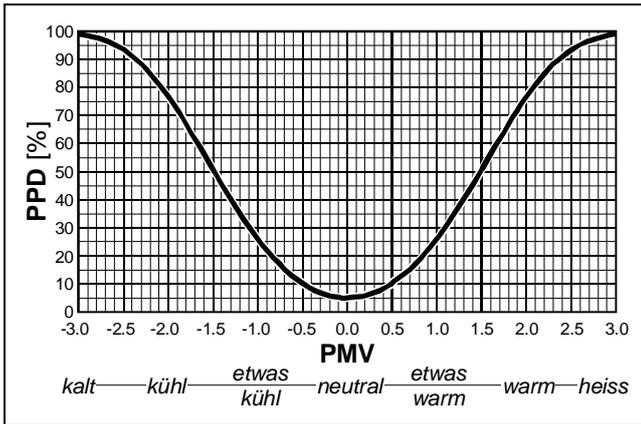


Abb. 4-24: Aus dem vorhergesagten mittleren Urteil PMV ermittelter Prozentsatz thermisch unzufriedener Personen PPD.

Der PPD zeigt, dass für $-0.5 < PMV < +0.5$ das Umgebungsklima von 90% der Personen akzeptiert wird. In der Praxis zeigt sich aber, dass oft eine grössere Unzufriedenheit mit dem Raumklima vorhanden ist. Die PMV/PPD-Methode berücksichtigt nur die physiologische Thermoregulation, nicht aber das Verhalten und die psychologisch erklärbaren Erwartungen der Personen am Arbeitsplatz. Siehe dazu Kap. 4.5.

Komfortklima

Die im folgenden aufgeführten Empfehlungen zu einzelnen Klimaparametern beruhen weitgehend auf dem PMV-Index. Zu beachten ist, dass zusätzlich lokale Klimawirkungen beachtet werden müssen und dass mit den Empfehlungen nicht unbedingt individuellen Bedürfnissen entsprochen wird. Der PMV-Index dient hauptsächlich zur Voraussage der Komfortbeurteilung ganzer Personengruppen.

Lufttemperatur

Die Umgebungstemperatur beeinflusst an vielen Arbeitsplätze massgebend die thermische Belastung. Der Körper gibt abhängig von der Isolationswirkung der getragenen Kleidung ständig Wärme an die Umgebungsluft ab, solange diese kälter als die Oberflächentemperatur des Körpers ist.

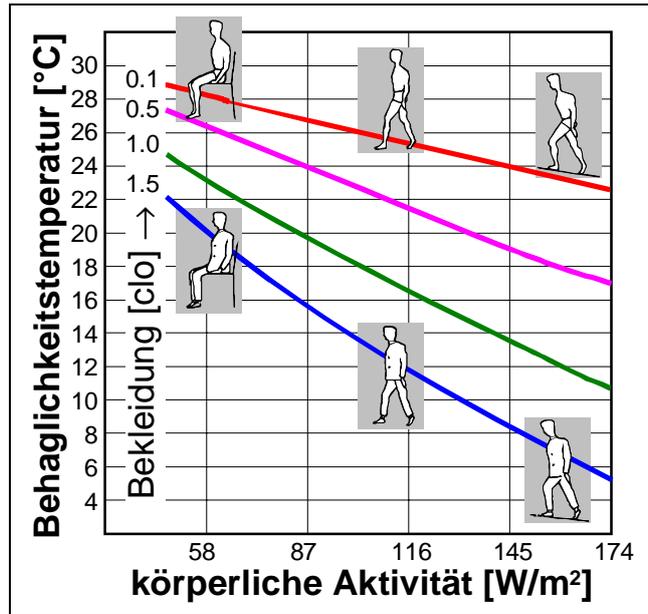


Abb. 4-25: Abhängigkeit der Behaglichkeits- oder Komforttemperatur des Menschen von der körperlichen Arbeit und der Bekleidung.

Je schwerer die körperliche Arbeit ist und je stärker die damit verbundene Stoffwechsellätigkeit, um so kühler muss die Umgebung sein, bei welcher sich der arbeitende Mensch wohl fühlt. In Abb. 4-25 sind Beispiele der Behaglichkeitstemperatur für verschiedene Tätigkeiten und Bekleidungen dargestellt. In Arbeitsräumen mit überwiegend sitzender Tätigkeit soll die Raumtemperatur im Winter zwischen 20°C und 24°C liegen. Im Sommer wird eine Bereich von 23°C bis 26°C empfohlen.

Strahlungstemperatur

Eines der Hauptprobleme an vielen Büroarbeitsplätzen ist der ungenügende Schutz vor Sonneneinstrahlung. Auch wenn der Raum klimatisiert ist, kann es für die Arbeitenden zu übermässiger Wärmeentwicklung kommen. Ein Sonnenschutzsystem sollte in der Lage sein, sowohl klimatisch ausgleichend auf den Wärmeübergang von der Aussenluft nach innen zu wirken, als auch vor der Infrarotstrahlung der Sonne zu schützen. Untersuchungen zeigten, dass sich besonders aussenliegende Lamellenstoren oder Stoffstoren dafür eignen.

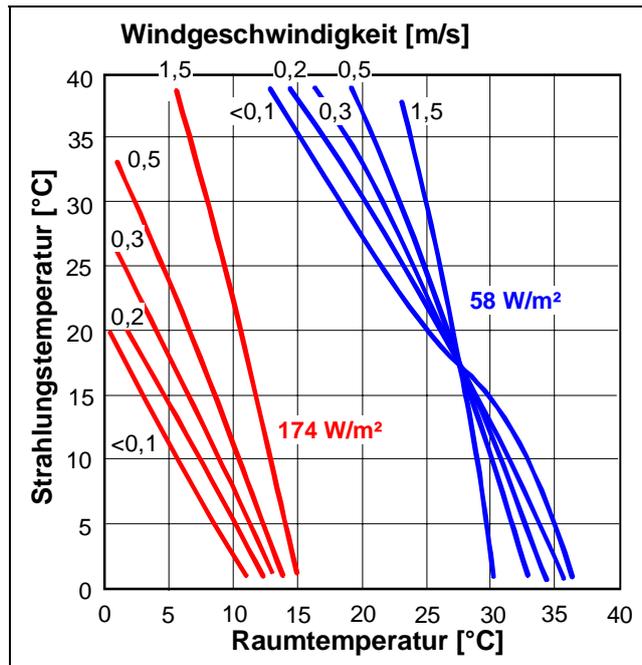


Abb. 4-26: Komfortable Klimakonfiguration für eine Kleidung mit 1 clo Isolationswert.

Die Strahlungstemperatur der Wände kann ungünstige Raumlufttemperaturen zum Teil kompensieren: Abb. 4-26. Als Faustregel gilt, dass die Differenz zwischen Strahlungstemperatur (Wandtemperatur) und Lufttemperatur weniger als 3-4°C betragen muss, wenn Diskomfort vermieden werden soll.

Der Einfluss der Strahlungstemperatur t_r kann für den thermoregulierten Bereich durch die Verwendung der operativen Temperatur t_o berücksichtigt werden: $t_o = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot t_r$. A ist ein Koeffizient, abhängig von der Luftgeschwindigkeit v : $A=0.5$ für $v < 0.2$ m/s, $A=0.6$ für 0.2 m/s $< v < 0.6$ m/s, $A=0.7$ für 0.6 m/s $< v$.

Bei geringen Luftgeschwindigkeiten sind also Strahlungstemperatur und Raumtemperatur t_a gleichwertig. Je grösser v ist, desto wichtiger wird die Raumtemperatur.

Luftbewegung

Die thermische Situation verbessert sich, wenn ein leichter Wind weht. Der Wind entfernt die fest am Körper haftende schweissangereicherte

und vom Körper aufgewärmte Grenzschicht der Luft und beschleunigt damit die Wärmeabgabe, solange ein Temperaturgefälle nach aussen besteht [Krueger, 1991].

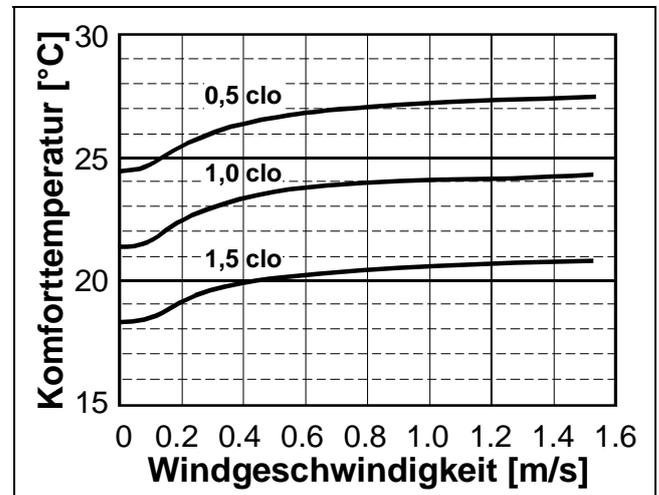


Abb. 4-27: Diagramm zur Bestimmung der Komforttemperatur bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Bekleidungsisolierungen für eine Körperaktivität von 70 W/m².

Die Luftgeschwindigkeit sollte aber nirgends 0.5 m/s überschreiten. Luftgeschwindigkeiten unter 0.1 m/s wirken nicht als unangenehme Zugluft (siehe Abb. 4-28 im Kap. „Zugluft“). Sie spielen für die Thermoregulation des menschlichen Körpers keine wesentliche Rolle mehr. Für den Zusammenhang zwischen Komforttemperatur und Luftbewegung siehe Abb. 4-27.

Relative Feuchte

Luft kann nicht beliebig viel Wasser aufnehmen. Wenn ein Sättigungsgrad von 100% erreicht ist, beginnt es zu „regnen“. Die maximal mögliche absolute Menge ist von der Raumtemperatur abhängig. Die relative Feuchte gibt in Prozent den Grad der Sättigung an. Die relative Feuchte spielt daher für die Thermoregulation eine Rolle, wenn Körperwärme durch Verdunstung abgegeben werden muss (siehe Kap. „Hitzearbeit“). Schwitzen ist deshalb um so wirksamer, je geringer die relative Feuchte der Umgebungsluft ist.

Für leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit in Innenräumen ist dies im allgemeinen nicht von Bedeutung. Es wird jedoch empfohlen, dass die relative Feuchte zwischen 30% und 70% gehalten wird. Die Grenzen sind gesetzt, um das Risiko von unangenehm nasser oder trockener Haut, Augenirritationen, statischer Elektrizität, mikrobiologischem Wachstum und Atemwegs-erkrankungen zu vermeiden.

4.4 Lokaler thermischer Komfort

Abgesehen vom globalen Ganzkörper-Komfort beeinflussen auch lokale thermische Irritationen das Wohlbefinden. Dies betrifft insbesondere die Zugluft (ungewollte lokale Kühlung) und Strahlungskühlung durch kalte Flächen wie Fenster im Winter. Im zweiten Fall wird die Asymmetrie der Strahlung am Körper als Beurteilungskriterium herangezogen. Auch das Gefälle der Raumtemperatur sollte begrenzt werden.

Zugluft

Zugluft wirkt deshalb unangenehm, weil sie zu lokaler Kühlung am Körper führt. Der Kopf-Nacken-Bereich und der Bereich der Fussknöchel sind am empfindlichsten für Diskomfort durch Zugluft. Die Arbeitsgruppe um Fanger hat das Problem der Zugluft mit 150 Personen untersucht und 1987 eine Formel zur Berechnung des Prozentsatzes durch Zugluft beeinträchtigter Personen veröffentlicht (vgl. ISO 7730). Einige Ergebnisse sind in Abb. 4-28 dargestellt.

Der Diskomfort durch Zugluft hängt ab von der Raumtemperatur, der lokalen mittleren Luftgeschwindigkeit und dem sogenannten lokalen Turbulenzgrad Tu . Dieser ist definiert als das Verhältnis der Standardabweichung der lokalen Luftgeschwindigkeit zu der lokalen mittleren Luftgeschwindigkeit mal 100%. Je tiefer der

Turbulenzgrad ist, desto grösser kann die mittlere Luftgeschwindigkeit sein, da laminare Strömungen weniger kühlen als turbulente.

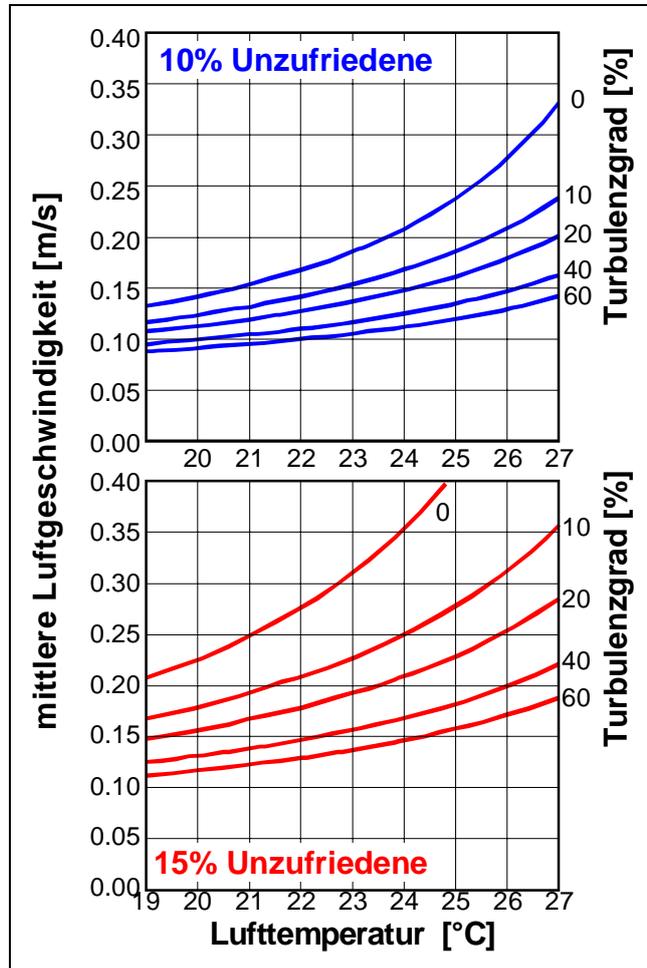


Abb. 4-28: Erlaubte mittlere Luftgeschwindigkeit als eine Funktion der Raumtemperatur und des Turbulenzgrades. Den Kurven liegt die Annahme von 10% (oben) bzw. 15% (unten) unzufriedener Personen zugrunde. Sie sind anwendbar für leichte sitzende Tätigkeit (70 W/m^2).

Asymmetrie der Strahlung

Zur Bewertung der Strahlungsasymmetrie für sitzende Tätigkeit bezieht man die Strahlungstemperatur auf eine kleine Fläche 0.6 m über dem Fussboden. Sie soll zwischen vertikalen Flächen (z.B. Fenster und gegenüberliegende Wand) weniger als 10°C betragen. Auch vertikale Temperaturgradienten z.B. von einer warmen (beheizten) Decke können zu Irritationen führen. Sie sollten weniger als 5°C betra-

gen. Während der Heizperiode muss die Temperatur des Bodens in der Regel zwischen 19°C und 26°C liegen. Fussbodenheizungen dürfen für 29°C ausgelegt sein.

Gefälle der Raumtemperatur

Das höhenmässige Gefälle der Raumtemperatur zwischen 1.1 m und 0.1 m oberhalb des Fussbodens (= Kopf-Fusshöhe beim Sitzen) soll weniger als 3°C betragen.

4.5 Adaptive Komfortmodelle

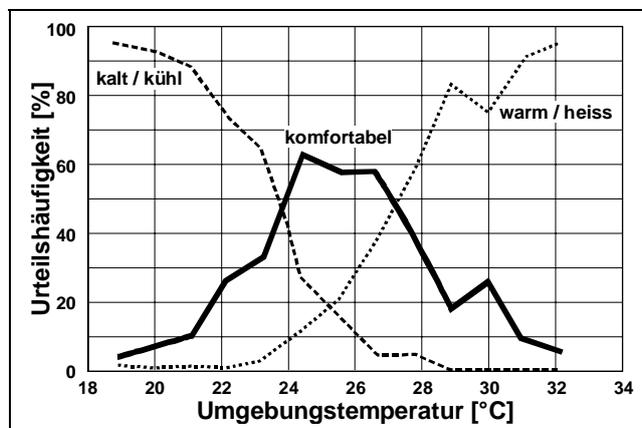


Abb. 4-29: Beurteilung verschiedener Raumtemperaturen durch Personen mit unterschiedlichen, individuellen Bedürfnissen (1296 mit 0,6 clo bekleidete Personen, sitzende Bürotätigkeit; rel. Feuchte: 50%, Windgeschwindigkeit: 0.1 m/s, Lufttemperatur = Strahlungstemperatur).

Die fortschreitende Entwicklung immer ausgefeilterer Klimamasse lässt vermuten, dass sie immer besser mit den Antworten von befragten Personen am Arbeitsplatz korrelieren. Dies ist aber nicht der Fall: Nur 20 bis 40% der Antwortvarianz kann auch mit den neusten physiologisch-physikalisch begründeten Komfortindikatoren erklärt werden [Auliciems et al., 1998] (siehe auch Abb. 4-29). In einigen Untersuchungen korreliert die einfache Raumtemperatur mit der Befindlichkeit sogar besser. Dies muss wohl dadurch erklärt werden, dass noch zusätzliche psychologische inter- und intraindividuell verschiedene Faktoren wie klimati-

sche Verhaltensanpassung, Gewöhnung (Habituation) und Erwartung eine Rolle spielen. Neuere Modelle – sogenannte adaptive Modelle – versuchen diese Faktoren zusätzlich zu berücksichtigen.

Verhaltensanpassung

Die Thermoregulation des menschlichen Körpers kann nicht losgelöst vom Verhalten und der Raumklimatisierung gesehen werden (Abb. 4-30). Die physiologische (autonome) Regulation wird durch das Verhalten gestützt.

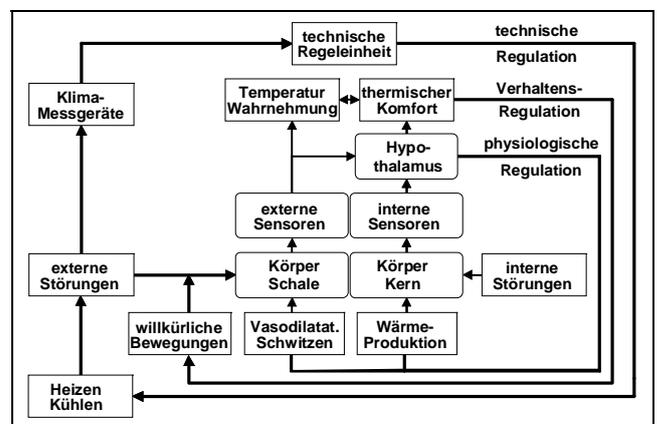


Abb. 4-30: Schematischer Aufbau der Thermoregulation auf technischer, Verhaltens- und physiologischer Ebene.

Der frierende Mensch kann sich zusätzlich bewegen und damit Bewegungswärme erzeugen, er kann sich isolierender bekleiden oder auch einen lokalen Heizofen in Betrieb nehmen. Der schwitzende Mensch entledigt sich der Kleider und sucht gegen die Wärmestrahlung schattige Orte auf oder – zum Abtransport überschüssiger Wärme – Luftbewegung oder kühlendes Wasser. Ein lokaler Ventilator sorgt für zusätzliche Luftturbulenz.

Die Klimaanlage beeinflusst über Lufttemperatur, Strahlung, Windgeschwindigkeit und relativer Feuchte die Thermoregulation. Die Vorgaben von Klimaanlagen beruhen auf den physiologischen Klimamodellen und führen nicht immer zu optimalen Lösungen. So werden Luftströmungen <0.2 m/s vorgesehen, um das

Risiko von Zugluft zu vermindern. Untersuchungen zeigten jedoch, dass Personen bereit sind, höhere Raumtemperaturen durch grössere Windgeschwindigkeit zu kompensieren und nicht notwendigerweise durch zusätzliche Kühlung (Abb. 4-31). Dieser Aspekt ist auch im Hinblick auf den Energieverbrauch von Klimaanlage von Bedeutung.

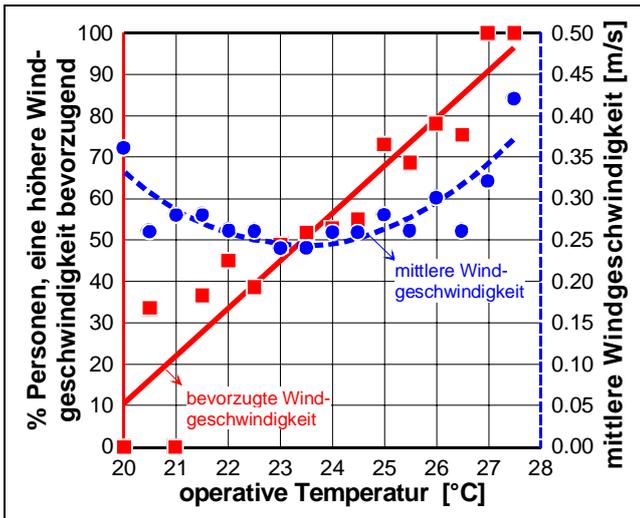


Abb. 4-31: Bevorzugte Luftbewegung in klimatisierten Gebäuden in den Tropen. Kreise kennzeichnen die erzeugte Windgeschwindigkeit (Skala rechts). Der Prozentsatz Personen, die eine höhere Windgeschwindigkeit bevorzugen, ist durch Quadrate dargestellt (Skala links) (AULICIEMS ET AL., 1998).

Habituation und Aussenklima

Nach Unterschieden in der thermischen Wahrnehmung von Personen unterschiedlicher Gruppen wird schon lange geforscht. So wird vermutet, dass Personen in heissen Klimata (z.B. in den Tropen oder im Sommer) besser an wärmere Umgebungen adaptiert sind und eher bevorzugen als an Kälte gewohnte Leute. Untersucht wurde die sogenannte Neutraltemperatur t_{ψ} , diejenige Temperatur, welche mit „neutral“- und „komfortabel“-Bewertungen korrespondiert. Sie entspricht etwa der bereits besprochenen Behaglichkeitstemperatur. Diese zeigte sich von der mittleren Aussentemperatur

t_m und der mittleren, in der Gegend typischen Innentemperatur t_i wie folgt abhängig:

$$t_{\psi} = 0.48 \cdot t_i + 0.14 \cdot t_m + 9.22.$$

Dieser Zusammenhang ergab sich als Zusammenfassung von Studien, die sowohl in klimatisierten wie unklimatisierten Räumen stattfanden. Es deutet vieles darauf hin, dass dieses Ergebnis nicht nur durch unterschiedliche Kleidungsgewohnheiten oder andere durch thermophysiologisch erfassbare Gründe zustande kommt.

Erwartetes Raumklima

Studien ergaben auch, dass Erwartungen an das Raumklima eine wesentliche Rolle bei der Beurteilung spielen. So wurde in klimatisierten Räumen eine viel grössere Empfindlichkeit für Abweichungen von der mittleren Temperatur nachgewiesen, als es gemäss dem PMV-Index zu erwarten gewesen wäre (Abb. 4-32). Personen erwarten von einer Klimaanlage, dass sie präzise arbeitet und sind gegenüber Abweichungen weniger tolerant.

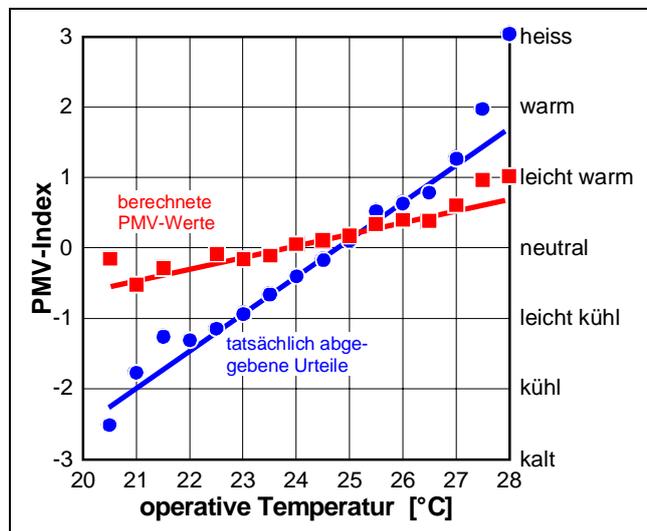


Abb. 4-32: Thermische Bewertung eines klimatisierten Raumes in den Tropen gemäss PMV-Index (Quadrate, Skala links) und von den Personen abgegebene Urteile (Kreise, Skala rechts) [Auliciems et al., 1998].

5

Hören

(überarbeitetes Skript von Prof. H. Krueger)

5.1 Physikalische Grundlagen

Schallwellen

Schallwellen sind im Gegensatz zu transversalen Lichtwellen an Materie gebundene longitudinale Wellen (Abb. 5-1). In Ausbreitungsrichtung folgen periodisch „Verdichtungen“ und „Verdünnungen“, die sich mit der dem Material eigenen Geschwindigkeit ausbreiten. Die Geschwindigkeit ist danach eine Folge der elastischen Eigenschaften des Materials. Im luftleeren Raum gibt es demnach keine Schallausbreitung.

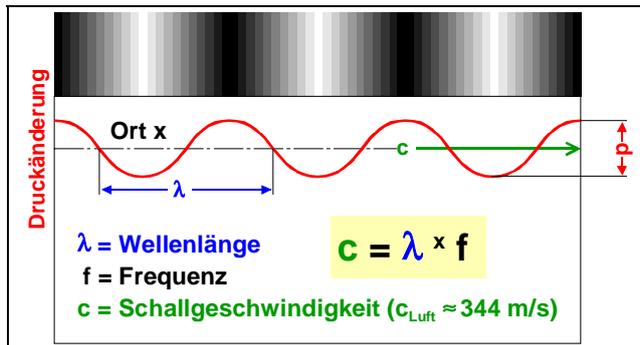


Abb. 5-1: Schallwellen sind an Materie gebunden und bestehen aus periodischer Verdichtung bzw. Verdünnung der Träger-substanz, wie z.B. Luft oder Metall. Aus dem Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge folgt z.B., für
 $f = 20 \text{ Hz}, 50 \text{ Hz}, 1 \text{ kHz}, 20 \text{ kHz}$:
 $\lambda = 17.2 \text{ m}, 6.9 \text{ m}, 34 \text{ cm}, 17.2 \text{ mm}$.

Frequenz

Der hörbare Wellenbereich reicht von etwa 30 Hz bis annähernd 20 kHz. Dem entsprechen Wellenlängen von ungefähr 9 m bis hin zu weniger als 20 cm. Die Dimensionen liegen in der Größenordnung von Innenräumen. Schall kann sich deshalb in Räumen nicht frei ausbreiten.

Es gibt also raumspezifische Verteilungen der akustischen Energie. Das macht sich bei tiefen Tönen dadurch bemerkbar, dass der Schallpegel je nach Position im Raum unterschiedlich gross ist (siehe Abb. 5-2). In Gaststätten mit Tonnengewölbe kann eine weit entfernte Person plötzlich deutlicher hörbar werden als die gegenüberstehende.

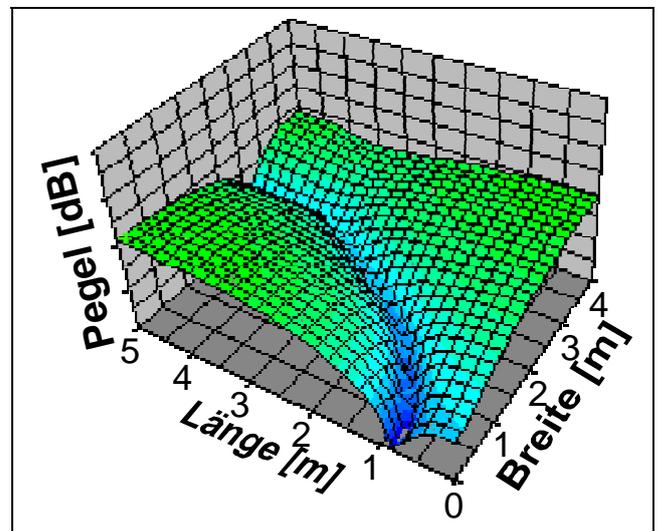


Abb. 5-2: Berechnete Verteilung des Schallpegels in einem Innenraum mit $4 \times 5 \text{ m}^2$ Grundfläche, für einen Sinuston der Frequenz 39.5 Hz.

Schallpegel

Die Empfindlichkeit des Ohrs reicht über einen weiten Amplituden- bzw. Energiebereich. Auch bietet sich nach FECHNER ein logarithmisches Mass an, welches das Gesetz von WEBER berücksichtigt. Dieses besagt, dass die gerade wahrnehmbare Intensitätsänderung (Wahrnehmungsschwelle) zur Intensität proportional ist. Das gilt aber nur für einen mittleren Intensitätsbereich. Bezieht man alle Werte auf einen Referenzdruck p_0 bzw. eine Referenzintensität I_0 , führen diese Überlegungen zur Definition eines

Schallpegels L gemäss Abb. 5-3. In Tab. 5-1 sind Beispiele von Schallpegeln in unterschiedlichen Räumlichkeiten angegeben.

Tab. 5-1: Schallpegel in dB(A) verschiedener Schallquellen und Räumlichkeiten.

Schmerzschwelle (= 20 Pa bzw. 1 W/m ²)	120
U-Bahn-Station (mit Expresszug)	100
Fabriken und Werkstätten	50-75
grosses Büro	60-65
Bahnhofs-, Flughafenhalle, Stadion	55-65
Ladengeschäft	45-60
kleines Ladengeschäft	45-55
Speiserestaurant	45-55
mittelgrosses Büro	45-55
Autowerkstatt	55
Hotel, Zimmer	42
Wohnung in der Grossstadt	40
Wohnung auf dem Land	30
leerer Hörsaal / Konzertsaal	25-35
voller Hörsaal / Konzertsaal	30-50
Aufnahmestudio	20-30
Blätterrascheln	20
Hörschwelle (= 20 µPa bzw. 10 ⁻¹² W/m ²)	0-5

Die Logarithmierung erlaubt zwar die kompakte Darstellung von 12 und mehr 10er Potenzen, erschwert aber das Rechnen und die Anschaulichkeit sehr. Für jede Zusammenfassung verschiedener Pegel muss aus den einzelnen Pegelwerten durch Delogarithmieren die originale Druckintensität bestimmt werden. Mit diesen Werten kann die Addition mehrerer Quellen (Abb. 5-4 oben) oder eine Mittelung über die Zeit (Abb. 5-4 unten) durchgeführt werden. Anschliessende Logarithmierung führt in den „Einheitenraum“ der Pegel zurück. Die Addition zweier Quellen gleich hohen Pegels ergibt eine Erhöhung um 3 dB.

Bei einer Addition zweier Pegel, die sich um mehr als 10 dB unterscheiden, d.h. um mehr als den Faktor 10, kann der kleinere Pegel praktisch vernachlässigt werden. Der höhere Pegel ist allein ausschlaggebend.

$$L = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ dB}; \quad L = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{ dB}$$

Herleitung mit $I \sim p^2$:

$$L = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

Abb. 5-3: Oben links: Definition des Schallintensitätspegels und oben rechts des Schalldruckpegels. Schallintensität I in W/m²; Schalldruck p in Pa (Pascal); Schallpegel L in dB (Dezibel). Die Referenzintensität I₀ beträgt per Definition 10⁻¹² W/m², der Referenzdruck p₀ ist 20 µPa. Unten: Die eine Pegeldefinition kann aus der anderen hergeleitet werden, da die Intensität I proportional zum Quadrat der Druckänderung p ist.

Pegeladdition (örtlich):

$$L = 10 \cdot \lg \sum_{n=1}^N 10^{0.1 \cdot L_n}; \quad L_n: \text{Pegel der Schallquelle } n$$

Pegelmittelung (zeitlich):

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg \frac{1}{T} \int_{t=0}^T 10^{0.1 \cdot L(t)} dt; \quad L(t): \text{Pegel zur Zeit } t$$

Abb. 5-4: Oben: Pegeladditionen über mehrere Schallquellen. Unten: zeitliche Mittelung über die Zeit T (z.B. 8h Arbeitstag). Der Wert L_{eq} nennt sich dann „energieäquivalenter Dauerschallpegel“.

Energie und Distanz

Mit zunehmender Distanz zur Schallquelle sinkt die Energie. Je nach Art der Quelle nimmt die Amplitude mit dem Quadrat der Entfernung (Punktquelle, Abb. 5-5), oder linear mit der Distanz („Linien“-Quelle, Abb. 5-6), oder überhaupt nicht ab (Flächenquelle, Abb. 5-7). Da zusätzlich immer eine frequenzabhängige Dämpfung vorliegt, ist die gesamthaft resultierende Abnahme auch eine Funktion der Frequenz: Tiefe Frequenzen werden weniger stark gedämpft als hohe und haben damit eine grössere Reichweite.

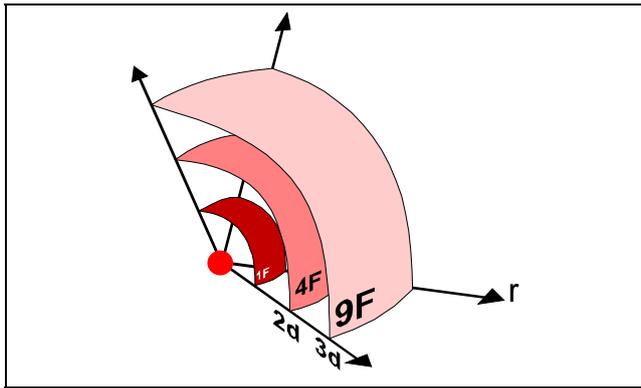


Abb. 5-5: Punktförmige Schallquelle. Fläche proportional r^2 ; I proportional $1/r^2$. Bei Verdoppelung des Abstandes r viertelt sich die Schallintensität I und der Schallpegel L nimmt um 6 dB ab.

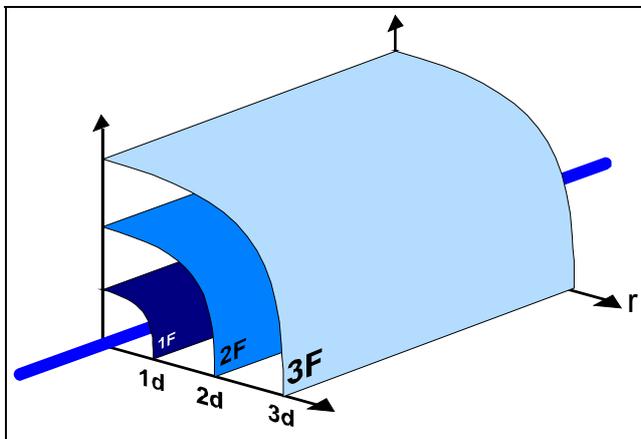


Abb. 5-6: Linienförmige Schallquelle. Fläche proportional dem Abstand r ; I proportional $1/r$. Bei Verdoppelung des Abstandes r halbiert sich die Schallintensität I und der Schallpegel L nimmt um 3 dB ab.

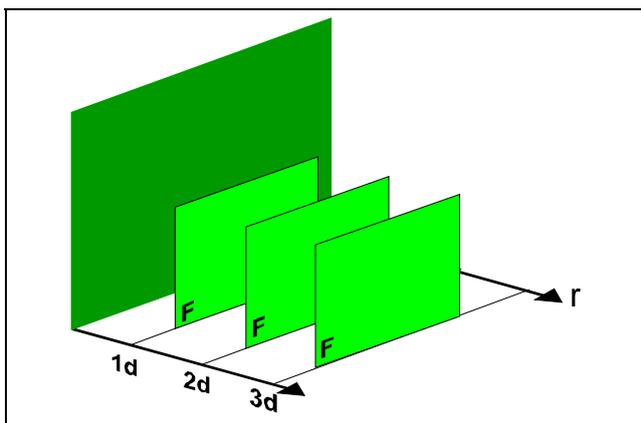


Abb. 5-7: Flächenförmige Schallquelle. Fläche unabhängig von r ; Intensität I und Pegel L bleiben konstant.

Zeitlicher Verlauf

Der zeitliche Verlauf des Schalldruckes ist in Abb. 5-8 auf der linken Seite dargestellt. Oben ist es ein einfacher sinusförmiger Druckverlauf eines reinen Sinustons. In der Mitte ist ein Klang dargestellt. Dieser hat ebenfalls eine periodische Struktur. Ein Geräusch, wie es unten zu sehen ist, lässt praktisch keine periodische Struktur erkennen. Neben dieser Druck-Zeit-Darstellung lassen sich Schallquellen auch in der sogenannten Frequenzebene beschreiben. Die Frequenzbetrachtung hat oftmals Vorteile, wenn Übertragungseigenschaften von Medien mit frequenzabhängiger Dämpfung beschrieben werden sollen oder auch der frequenzabhängige Verlauf eines Hörverlustes bei einer Lärmschwerhörigkeit. In der Frequenzebene können frequenzvariable Dämpfung und Verstärkung einfach als Multiplikation mit der sogenannten Übertragungsfunktion realisiert werden. Abb. 5-8 zeigt auf der rechten Seite die zur linken Seite gehörigen Frequenzspektren.

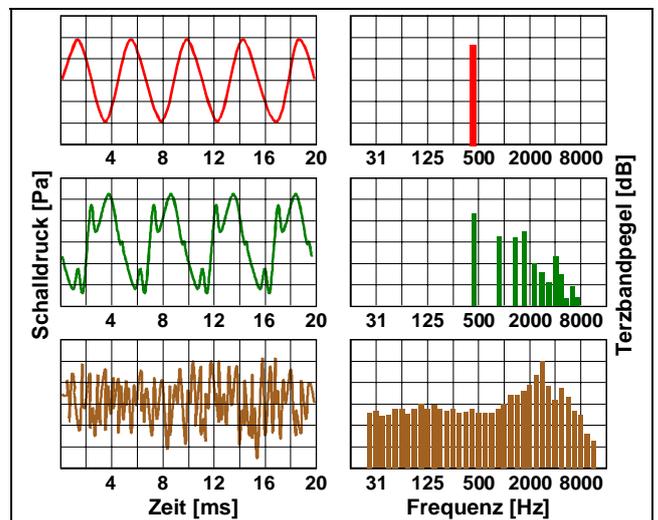


Abb. 5-8: Zeitlicher Verlauf des Schalldruckes (links) und des zugehörigen Frequenzspektrums (rechts). Oben: Sinuston; Mitte: Klang; unten: Geräusch.

Für den reinen Ton ist es eine einzige Frequenz (f), für den Klang ist es der sogenannte Grundton (f_0) und die zugehörigen Obertöne deren Frequenz ein ganzzahliges natürliches Vielfa-

ches ($n \times f_0$) des Grundtons ist. Das Geräusch enthält ein Gemisch sehr vieler Frequenzen, ohne dass eine Ordnung erkennbar wäre.

Geräuschbeispiele

Im Folgenden sind einige typische Beispiele der Praxis dargestellt. Es beginnt mit einem Dieselmotor in Abb. 5-9. Das Signal zeigt relative Frequenzmaxima bei etwa 30 Hz. Es folgen weitere für etwa 600 Hz und 1,8 kHz. Die sehr niedrige Grundfrequenz von etwa 30 Hz taucht als „Infraschall“ in der Frequenzebene nicht auf.

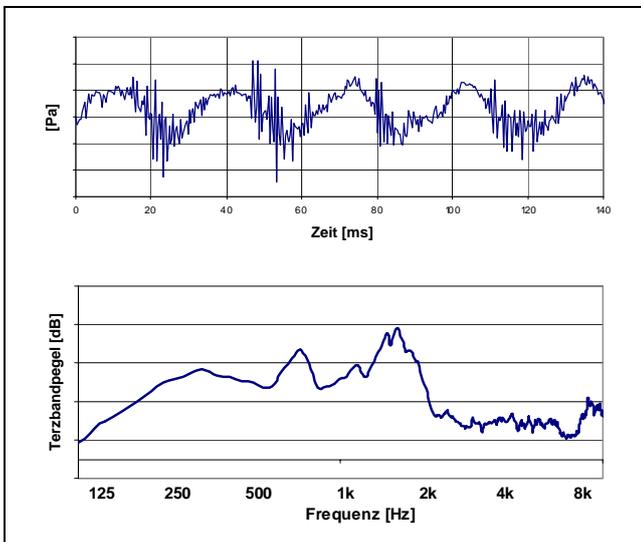


Abb. 5-9: Beispiel für ein reales Signal: Dieselmotor. Oben: Zeitlicher Verlauf; unten: Frequenzspektrum.

Eine Ramme in Abb. 5-10 weist erfahrungsgemäss periodische Schläge auf, die in der Zeitebene im Abstand von ca. 550 ms aufeinander folgen. Es zeigt sich ein rasch abklingendes, impulsartiges Geräusch, dessen Amplitude exponentiell absinkt. Ein typisches Merkmal dieser impulsartigen Geräusche ist ein Frequenzspektrum, das breit über alle hörbaren Frequenzen reicht.

Das letzte Beispiel zeigt das Frequenzspektrum für einen Schuss (Abb. 5-11). Es sind wieder viele Frequenzen enthalten, doch gibt es für Kleinkaliber ein Maximum bei 1 kHz.

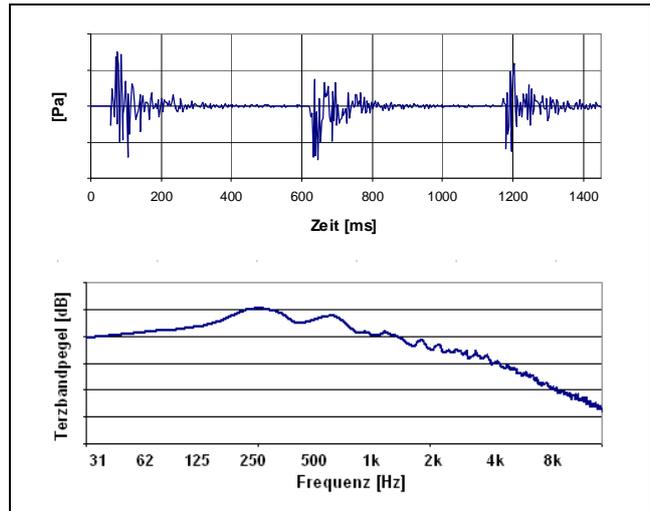


Abb. 5-10: Beispiel für ein reales impulsartiges, periodisches Signal: Ramme. Oben: Zeitlicher Verlauf. Unten: Frequenzspektrum.

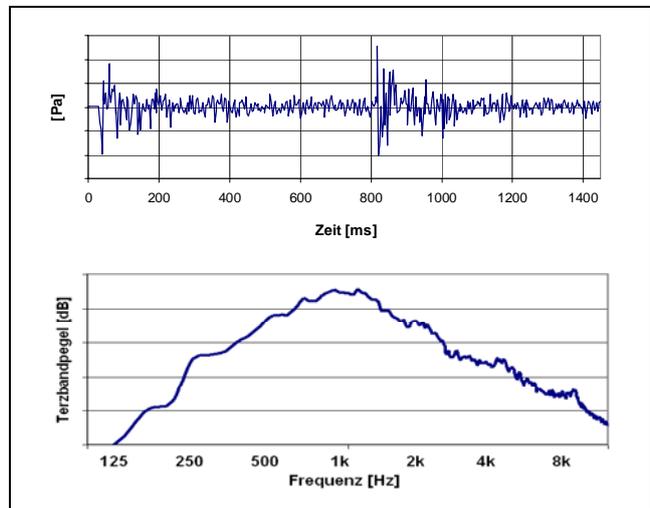


Abb. 5-11: Beispiel für ein reales Impulssignal: Schuss (Kleinkaliber). Oben: Zeitlicher Verlauf; unten: Frequenzspektrum.

Schallwellen werden an harten Materialien (Glas, Beton etc.) reflektiert. Für die Raumgestaltung ist es deshalb wichtig, ein ausgewogenes Mass an Reflexion und Absorption zu treffen. Ein Ausdruck zu starker Reflexion ist die Halligkeit (Nachhallfaktor) von Räumen, die im allgemeinen negativ beurteilt wird. Ein Vortragssaal mit zu starker Schallabsorption der Wände hingegen verschluckt Gesang oder Rede der Vortragenden. Die Stimme „trägt“ nicht bis in die hinteren Raunteile. Für die Messung der Schallemissionen von Geräten bedarf es spezieller Schallabsorptionsmassnahmen, da-

mit die Absorption praktisch total ist und ein freies Schallfeld entsteht.

Hinweis: Neben dem Luftschall muss immer der Körperschall berücksichtigt werden. Bei reinem Luftschall ist die Kapselung eine mögliche Massnahme. Bei Körperschall muss die Übertragung des Schalls auf die Umgebung mit Dämpfungselementen unterbrochen werden.

Schallmessung

Für die Messung bewerteter Schallpegel werden die Mikrophone der Schallpegelmessers der menschlichen Empfindlichkeitskurve für reine Sinustöne angepasst. Hierfür müssen die hohen und vor allem die niedrigen Frequenzen deutlich abgeschwächt werden. Das Ohr ist dort weniger empfindlich als zwischen 3-5 kHz (s. Kap. Hören). In Abb. 5-12 sind die standardisierten Dämpfungskurven für verschiedene Lautstärken der Signale dargestellt. Die Abschwächung im niederen Frequenzbereich fällt umso stärker aus, je leiser die Töne sind (A-Kurve). Wenn also für Messungen grundsätzlich das A-Filter eingesetzt wird, muss berücksichtigt werden, dass speziell im Bereich der tiefen Frequenzen für grössere Lautstärken deutliche Fehler gemacht werden: Der Bereich wird unterbewertet.

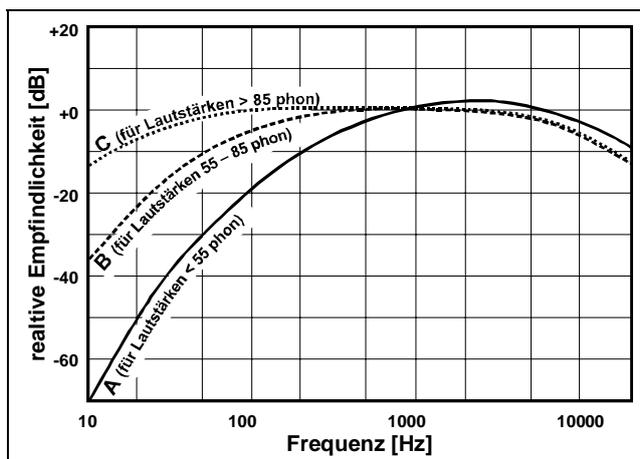


Abb. 5-12: Standardisierte Dämpfungskurven für Schallpegelmessers als Näherung der Kurven gleicher Lautstärke.

Während also der Schalldruck und Schalldruckpegel allein ein Mass für den physikalischen Pegel sind, wird der mit der Dämpfungskurve A bewertete physikalische Pegel als Lautstärke durch ein in Klammern gesetztes A gekennzeichnet (Abb. 5-13). Die auf der relativen Unterschiedsschwelle von WEBER aufgebaute Lautstärke macht keine Aussage über die tatsächlich wahrgenommene Lautheit. Die hörgerechte Lautheit wird mit einer Transformation der Messwerte in sone angestrebt (s. Kap. Hören). Auch die Sone-Skala wird nicht allen Bedingungen gerecht. So entzieht sich die menschliche Sprache mit ihren zahlreichen Zisch- und Explosivlauten der Lautheitsbewertung mit den angesprochenen Massen.

Schalldruck p:	Pa	
Schalldruckpegel L:	dB	SPL
Lautstärke L:	phon bzw. dB(A)	
Lautheit:	sones	

Abb. 5-13: Schallbewertungsmasse. Hinweis: Im englischen Sprachraum wird der Schalldruckpegel auch mit SPL (sound pressure level) abgekürzt.

In Räumen aufgestellte Schallquellen (Geräte) interagieren mit dem erzeugten Schall. Der Raum kann über Wandreflexionen punktuell wie über ein Hörrohr verstärken. Besonders kritisch sind solche Raumeinflüsse, wenn in Konzertsälen bestimmte Instrumente für den Hörer verstärkt und andere abgeschwächt werden und damit das Klangbild verändert wird. So ist es also ausserordentlich wichtig, die Messbedingungen zu standardisieren.

Auch einfache Messgeräte (Abb. 5-14) erleichtern heute die rein technische Seite der Messung. Es lassen sich verschiedene Messgrößen wie L_{eq} , L_{max} für verschiedene Bewertungskurven (A, B, C) und Zeitkonstanten (slow, fast, peak) einstellen.

5.2 Hören

Anatomische Grundlagen

Die Kenntnis der funktionellen Anatomie des Ohres lässt eine Reihe von Rückschlüssen auf die Funktion des Hörsinns zu, die für die Wertung einfacher akustischer Masse von Bedeutung sind. Auch eine nur oberflächliche Kenntnis kann den Zugang zu den Phänomenen der Bewertung akustischer Signale erleichtern.

Der Luftschall erreicht über zwei verschiedene Wege das Innenohr, in dem die Umsetzung der Schallenergie in nervöse Erregung geschieht. Es sind die Luftleitung und die Knochenleitung (Abb. 5-16). Unter normalen Bedingungen ist nur die Luftleitung bedeutungsvoll. Wird diese allerdings durch Hörschutz vermindert, gewinnt die Knochenleitung unter Umgehung des Mittelohres an Bedeutung. Sie ist etwa 25-30 dB schwächer als die Luftleitung.



Abb. 5-14: Schallpegelmesser.

Eine körpergerechte stereophone Aufzeichnung von Schallereignissen erfordert einen Kunstkopf (Abb. 5-15). Diese Aufnahmemethode erfasst weitere Parameter der Schallübertragung in das menschliche Ohr, nämlich v.a. die Verdeckungen zwischen linkem und rechtem Ohr mit ihrer Auswirkung auf die einzelnen Frequenzen, den Einfluss des äusseren Ohres (Ohrenmuschel) sowie die Reflexionen am Thorax. Mit solchen hörgerechten stereophonen Aufnahmen ist im Gegensatz zur marktgängigen Stereophonie ein wirkliches Raumhören mit vorn/hinten bzw. oben/unten möglich, was letztere nicht kann.



Abb. 5-15: Kunstkopf zur hörgerechten stereophonen Aufzeichnung von Schallereignissen.

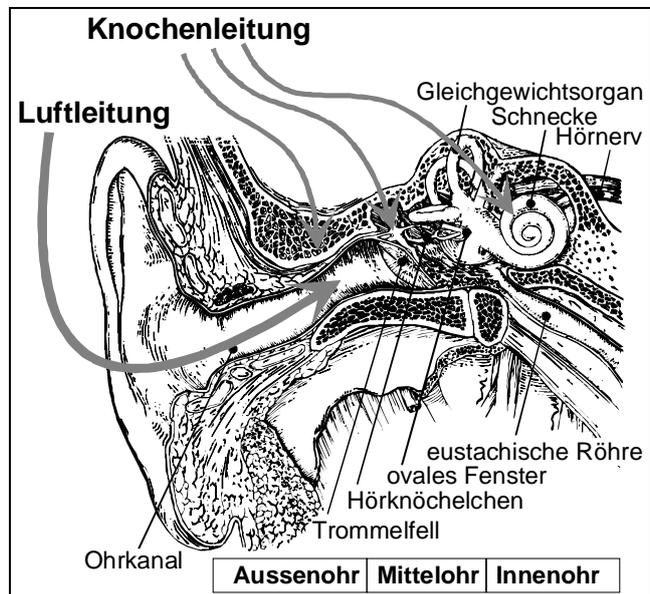


Abb. 5-16: Leitung von Luftschall und Knochenschall im menschlichen Ohr.

Der Luftschall trifft auf das Trommelfell, das den äusseren Gehörgang abschliesst. Es überträgt die Schallenergie auf die Gehörknöchelchen des Mittelohrs (Abb. 5-17: Hammer, Amboss und Steigbügel). Die Fussplatte des Steigbü-

gels nimmt am ovalen Fenster Kontakt mit dem Innenohr auf. Die Flüssigkeit im Innenohr wird bei Bewegung des Steigbügels in Schwingungen versetzt. Das runde Fenster garantiert einen Druckausgleich in der Cochlea (Schnecke).

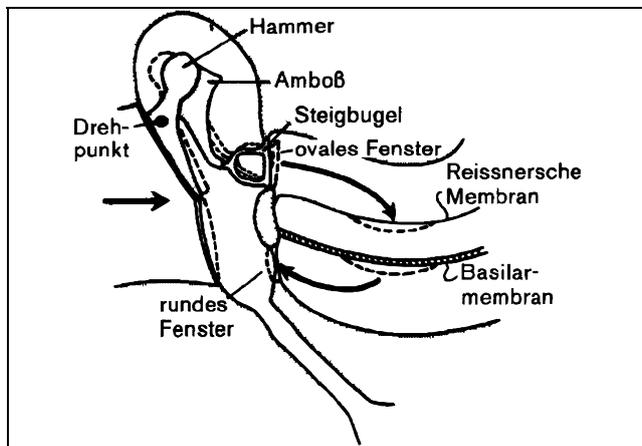


Abb. 5-17: Aufbau des Mittelohrs.

Die komplizierte Übertragung gewährleistet eine Anpassung der unterschiedlichen akustischen Eigenschaften von Luft und Flüssigkeit (Impedanzanpassung). Funktioniert diese bei einer Erkältung (Tubenkatarrh) nicht, werden Geräusche deutlich leiser wahrgenommen. Bei Höhenwechsel wird der unterschiedliche Luftdruck im Mittelohr und im Nasen-Rachen-Raum über die eustachische Röhre ausgeglichen, dies sich bei Schluckbewegungen öffnet.

Hinweis: Am Steigbügel greift ein winziger glatter Muskel an (Musculus stapedius). Er kann die Bewegung des Steigbügels einschränken und so bei grosser Lautstärke die Übertragung dämpfen. Mit einer Ansprechzeit von etwa 3 ms kommt seine Wirkung für Knallereignisse, wie Kleinkaliberschüsse, allerdings zu spät. Die Schutzwirkung ist also auf Dauergeräusche beschränkt.

Die Schwingung der Flüssigkeitssäule im Innenohr versetzt die Deckmembran (Tektorialmembran) in Bewegung (Abb. 5-18). Dadurch werden die Haare der Haarzellen, der eigentlichen Sensoren des Ohres, elektrisch aktiv. Je stärker die Bewegung ist, umso grösser ist das Generatorpotential.

Die Sensoren sind in einer inneren und drei äusseren Reihen auf der Basilarmembran angeordnet. Während die innere Einzelreihe vorwiegend für die Wahrnehmung verantwortlich ist, können die drei äusseren aktiv die Empfindlichkeit des Ohres verstellen.

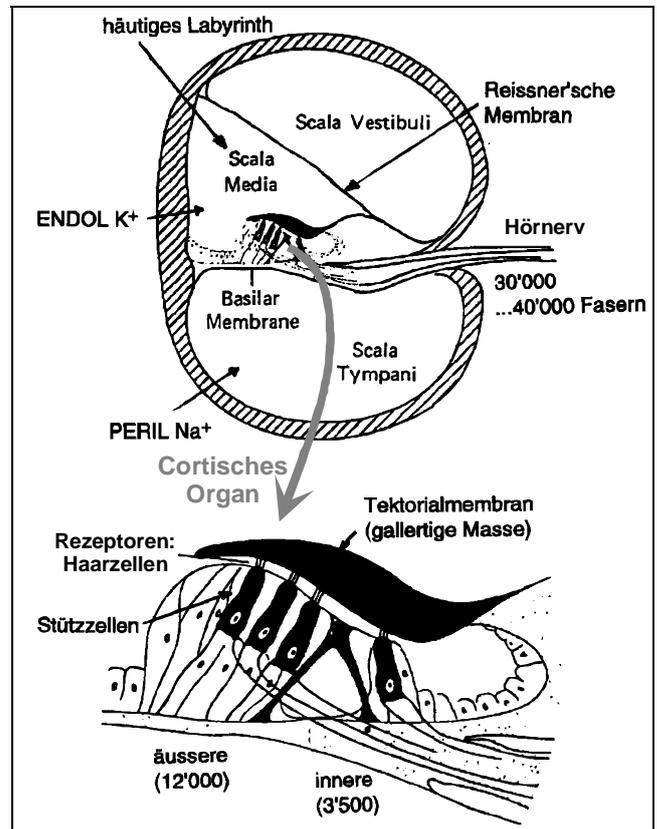


Abb. 5-18: Anatomischer Aufbau des Innenohrs.

Hinweis: Die Aktivität der äusseren Haarzellen kann mit geeigneten Mikrofonen im äusseren Gehörgang als otoakustische Emission (OAE) gemessen werden.

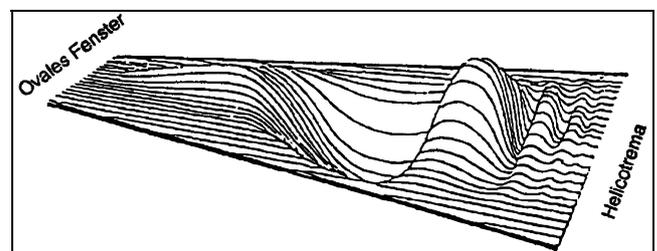


Abb. 5-19: Biomechanik der Basilarmembran des Innenohrs: Dreidimensionale Darstellung. Die Länge der Basilarmembran beträgt 35 mm.

Die Schwingung der Flüssigkeitssäule führt auch zu einer Schwingung der Basilarmembran. Abb. 5-19 zeigt ein Momentanbild der Auslenkung für eine mittlere Frequenz. Die Membran ist an den Seiten befestigt. Ihre Breite nimmt ausgehend vom ovalen Fenster mit dem Steigbügel (Abb. 5-19 links) zum Ende, dem Helicotrema, zu, bei dem die Scala vestibuli mit der Scala tympani verbunden ist.

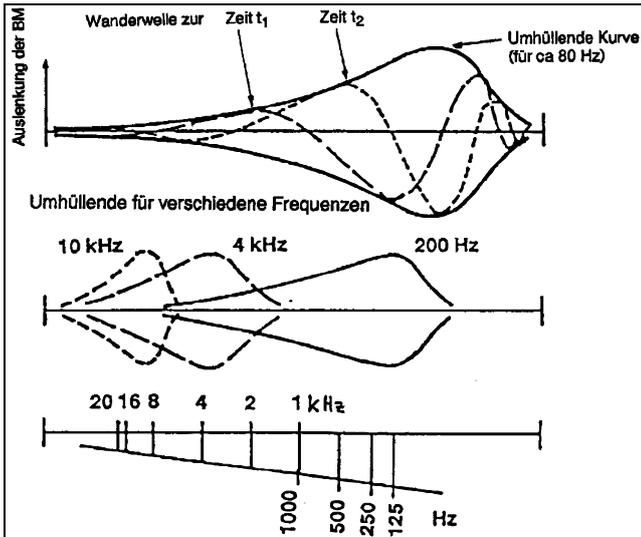


Abb. 5-20: Biomechanik der Basilarmembran des Innenohrs:
Oben: Aufeinanderfolgende Schwingungsbilder der Basilarmembran im senkrechten Schnitt für eine feste Sinusfrequenz.
Mitte: Umhüllende Kurven entsprechend dem oberen Bild für verschiedene Sinusfrequenzen.
Unten: Entfernung der Maxima der Auslenkung vom Steigbügel.

Abb. 5-20 oben zeigt einen Querschnitt der schwingenden Membran für einen Sinuston von etwa 200 Hz. Dargestellt ist die Auslenkung der Membran zu zwei verschiedenen Zeitpunkten (strichlierte Kurven). Die sogenannte Wanderwelle läuft von links (ovales Fenster) nach rechts (Helicotrema). Die ausgezogene Kurve ist die Umhüllende aller Maxima. Sie stellt das Ausmass der Bewegung der Sensor-Härchen dar. Ein einzelner Sinuston regt also nicht nur wie beim Klavier ein schmales Gebiet an, sondern ein sehr breites. Nach dem Wanderwel-

lenmodell von Békésy werden Bereiche, die für höhere Frequenzen empfindlich sind, stärker miterregt als solche, die für niedrigere empfindlich sind. Es besteht eine deutliche Asymmetrie der Miterregung. Es lässt sich daraus ableiten, dass ein Ton die Empfindlichkeit der Membran und damit der Sensoren für andere Frequenzen verändert, also ein asymmetrischer Effekt der Verdeckung besteht (siehe Kap. „Verdeckung und Mithörschwelle“).

Der Ort des Maximums der Auslenkung verschiebt sich mit abnehmender Frequenz vom ovalen Fenster fort Richtung Helicotrema (Abb. 5-20 Mitte). Damit kommt es zu einer örtlichen Abbildung der Frequenzen auf der Basilarmembran. Somit können auch mit Sensoren geringer zeitlicher Auflösung hohe Frequenzen identifiziert werden. Trägt man die Reizschwellen einer Zelle in Abhängigkeit der Frequenz auf, so ergibt sich die sogenannte Tuningkurve der betreffenden Zelle (vgl. Abb. 5-21 oben).

Die Maxima sind etwa logarithmisch auf der Basilarmembran verteilt (Abb. 5-20 unten). Damit ergibt sich bereits eine gewisse Plausibilität für die Wahl einer logarithmischen Frequenzskala in der Akustik.

Hinweis: Das passive biomechanische Modell gibt nach neueren Erkenntnissen nur bedingt die Realität wieder. Die aktive Rolle der äusseren Haarzellen verschärft die Maxima der Auslenkung.

Hinweis: Die Asymmetrie der Auslenkung (Tuningkurven) ist ein Hinweis, dass das menschliche Ohr kein Fourieranalysator im technischen Sinne ist. Die technische Methode der Fourieranalyse stösst also an ihre Grenzen, wenn akustische Signale hörgerecht beurteilt werden sollen.

Physiologie

Die breiten mechanischen Tuningkurven der Basilarmembran finden sich auch auf dem nervösen Weg vom Hörnerven (Nervus cochlearis) bis zum mittleren Kniehöcker (Corpus genicula-

tum mediale) im Gehirn wieder (Abb. 5-21). Die Frequenzselektivität steigt von Verarbeitungsstufe zu Verarbeitungsstufe. Erhalten bleibt die Asymmetrie der Miterregung.

Schallbewertung

Die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs ändert sich mit der Frequenz angebotener Sinustöne. Die strichpunktierte Kurve in Abb. 5-22 gibt den Verlauf der Hörschwelle als Funktion der Frequenz wieder. Je niedriger die Frequenz ist, umso mehr Intensität bzw. Schalldruck braucht es. Dasselbe gilt für den Bereich hoher Frequenzen.

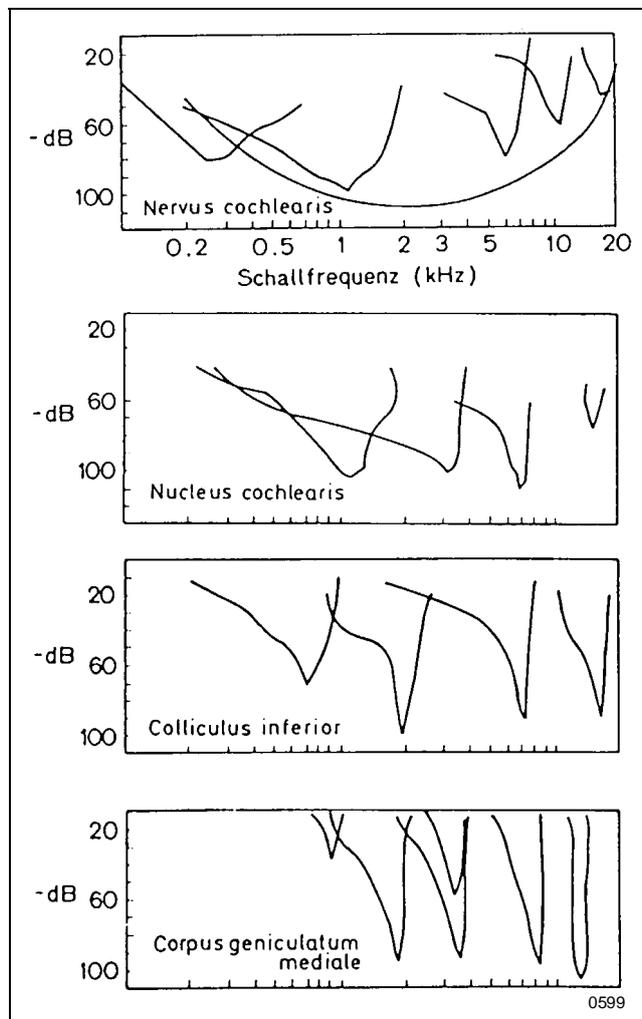


Abb. 5-21: Sensorische Tuningkurven auf verschiedenen Ebenen der Verarbeitung. Oben: peripher; unten: zentral.

Hinweis: Die Hörschwelle gilt für Ohren mittlerer Empfindlichkeit. Im individuellen Einzelfall und je

nach Untersuchungsmethode, sowie zwischen 2 und 5 kHz können auch negative dB(A)-Werte gehört werden. Der Schalldruck ist dann kleiner als der Referenzdruck von 20 μ Pa.

Neben der Hörschwellenkurve interessiert der Verlauf von Kurven gleicher Lautstärke. Im Diagramm der Abb. 5-22, dem Hörfeld, sind solche Kurven gleicher Lautstärke, d.h., gleichen Phon-Wertes eingetragen. Sie gelten nur für Sinustöne. Die Kurven geben an, wie gross der physikalische Schalldruckpegel sein muss, damit ein Sinuston beliebiger Frequenz gleich lautstark wie ein solcher von 1kHz wahrgenommen wird. Bei 1 kHz stimmt der Phon-Wert per Definition mit dem physikalischen Schalldruckpegel L (dem SPL) überein.

Die Kurven gleicher Lautstärke flachen sich mit zunehmender Lautstärke ab. Diese gilt vor allem für den niederfrequenten Bereich. Bei 2 – 5 kHz weisen die Kurven ihre grösste Empfindlichkeit auf. Die punktierten, mit den Buchstaben A, B, C bezeichneten Kurven entsprechen den Dämpfungskurven der Schallpegelmesser (s. Kap. „Schallmessung“).

Der nierenförmige, schattierte Bereich zwischen 200 Hz und 5 kHz einerseits und 50 phon und 70 phon andererseits kennzeichnet den Bereich der menschlichen Sprache.

Hinweis: Dem Hörfeld liegen Sinustöne zu Grunde und es gilt streng genommen nur für diese. Für zusammengesetzte akustische Signale werden teilweise deutliche Abweichungen wahrgenommen. Auch werden Sprünge der Lautstärke (Transienten), die besonders wahrgenommen werden, nicht berücksichtigt. Die menschliche Sprache ist durch schnelle Änderungen der Lautstärke gekennzeichnet.

Die aus dem Hörfeld der Abb. 5-22 abgeleiteten dB(A) Werte erlauben unabhängig von den angeführten Einschränkungen einen qualitativen Überblick über das akustische Geschehen. In Tab. 5-2 sind Anzahl dB(A) Änderungen im Vergleich zur Wahrnehmung zusammenge-

stellt. Sie gelten für „langsame“ Pegeländerungen. Es wurde bereits darauf hingewiesen,

dass das Ohr auf schnelle Pegeländerungen deutlich empfindlicher reagiert.

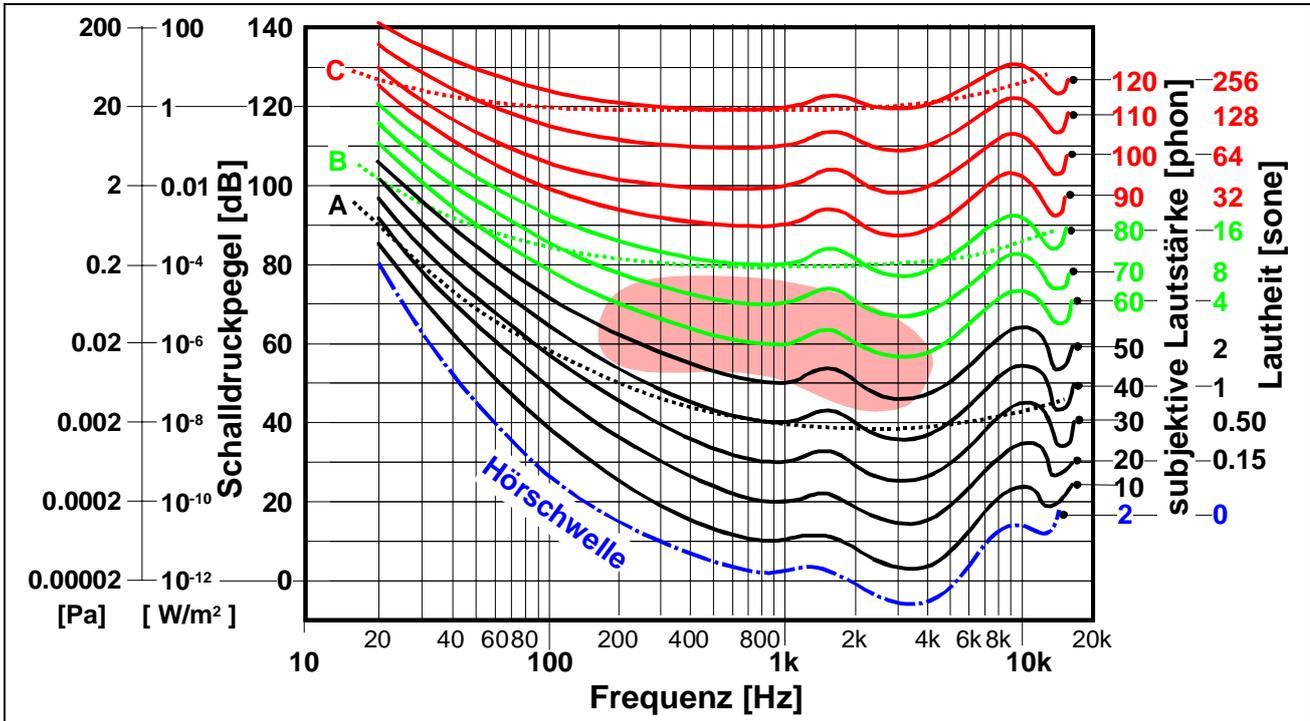


Abb. 5-22: Schallfeld mit Kurven gleicher Lautstärke für reine Sinustöne im freien Feld, die von vorn zur Person gelangen (nach ISO 226). Die Kurven gelten für mit beiden Ohren (binaural) hörende Personen ohne Gehörschädigung im Alter zwischen 18 und 25 Jahren. Strichpunktirt: Hörschwelle; punktiert: Bewertungskurven für dB(A), dB(B), dB(C); schattiert: Sprachbereich.

Hinweis: Mehrheitlich wird bei Pegeländerungen nur die Einheit dB verwendet und auf das umständliche dB(A) verzichtet. Solange nur mit dB(A) gearbeitet wird, sind beide Werte identisch.

bestimmt wird. Im unteren und im oberen Pegelbereich ist die Verständlichkeit meistens eingeschränkt.

Tab. 5-2: Qualitative Wahrnehmung langsamer Pegeländerungen.

Schallpegeländerung	Wahrnehmung
0-2 dB	nicht wahrnehmbare Änderung
2-5 dB	gerade wahrnehmbare Änderung
5-10 dB	deutlich wahrnehmbare Änderung
10-20 dB	grosse, überzeugende Änderung
> 20 dB	überaus grosse Änderung

Tab. 5-3: Qualitative Anhaltspunkte für Sprachpegel.

Lautstärke	[dB(A)]
Flüstern	36
leises Sprechen	42
entspanntes Sprechen	48
normales Sprechen	60
lautes Sprechen	66
sehr lautes Sprechen	78
Schreien	84

Die Tab. 5-3 gibt einen qualitativen Anhaltspunkt über die Lautstärke menschlicher Sprache, wie sie mit einem Schallpegelmess

Tab. 5-4: Liste verschiedener Schallquellen und ihrer typischen Lautstärke.

Situation	Lautstärke L	Lautheit S
Wohnviertel nachts	40 phon	1 sone
Konversation normal	60 phon	4 sone
Staubsauger	80 phon	16 sone
Donner	120 phon	256 sone

Hinweis: Bei bekannten akustischen Signalen sollte der Signal-Rausch-Abstand wenigstens 10 dB betragen.

Zur Verdeutlichung der Lautstärke ist in Tab. 5-4 eine Liste der Lautstärkepegel bekannter Schallquellen zusammengestellt.

Lautheit

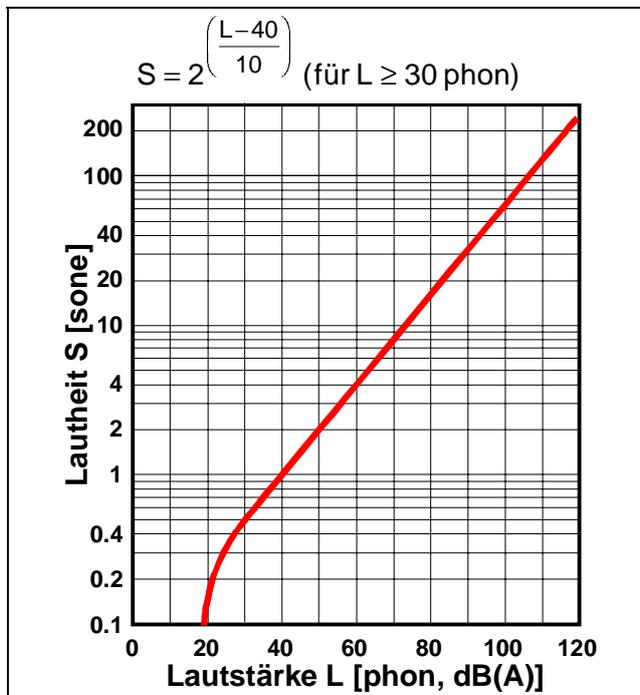


Abb. 5-23: Umrechnung der Lautstärke L (phon) in wahrgenommene Lautheit S (sone). Bei einem 1 kHz Sinuston kann als Lautstärkemass auch dB(A) verwendet werden.

Die Kurven gleicher Lautstärke wurden aus einem Abgleich zweier Sinustöne auf gleiche Lautstärke abgeleitet. Weiterhin wurde bei 1 kHz eine Anbindung an die physikalische Energie vorgenommen. Offen bleibt die Frage, um wie viel lauter nun ein Signal von 50 phon bzw. 50 dB(A) ist als ein solches von 40 phon

bzw. 40 dB(A). Die Beobachtung zeigt sehr deutlich, dass Lautheit etwas anderes ist als Lautstärke. Es muss demnach ein weiteres Mass eingeführt werden, die Lautheit, welche die Dimension Sone erhalten hat. Zwischen Lautheit und Lautstärke gilt die Beziehung der Abb. 5-23 (vgl. auch in Abb. 5-22 die Skala ganz rechts).

Da 40 phon entsprechend Tab. 5-3 einer leisen Umgangssprache entsprechen, wird einer Lautstärke von 40 phon eine Lautheit von 1 sone zugeordnet. Eine Zunahme der Lautstärke um 10 phon bzw. dB(A) entspricht dann ungefähr einer Verdoppelung des Sone-Wertes. Dieses entspricht einer weiteren Logarithmierung.

Hinweis: Analog wie bei der Masseinheit Meter wird Phon und Sone als Masskennzeichen hinter einer Zahl klein geschrieben.

Verdeckung und Mithörschwelle

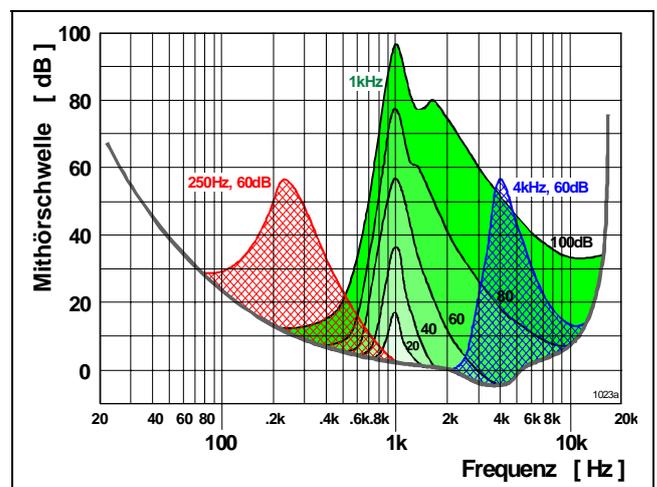


Abb. 5-24: Hörschwelle bei Verdeckung mit Schmalbandrauschen. Schmalbandrauschen in der Breite einer Frequenzgruppe mit verschiedenen Mittenfrequenzen (250 Hz, 1kHz, 4kHz) und verschiedenen Pegeln des Rauschens (20, 40, 60, 80 bzw. 100 dB); Hinterlegung: vom Grundrauschen verdeckter Bereich des Hörfeldes; fette Kurve: Hörschwelle bei absoluter Ruhe (n. ZWICKER, E. (1982) Psychoakustik. Springer-Verlag, S. 38-41).

In der Realität finden sich nur selten sinusförmige akustische Signale. D.h. die Grundan-

nahme, die bei der Ableitung des Hörfeldes gemacht wurde, mag zwar für energetische Betrachtungen ausreichen, für eine hörgerechte Beurteilung im Bereich der Kommunikation müssen die nichtlinearen Übertragungseigenschaften des Ohres (Tuningkurven) besser berücksichtigt werden. Dies geschieht mit dem von Zwicker entwickelten hörgerechten Bewertungsverfahren. Die Grundlagen sind in Abb. 5-24 und Abb. 5-25 für verschiedene Versuchsbedingungen qualitativ zusammengestellt.

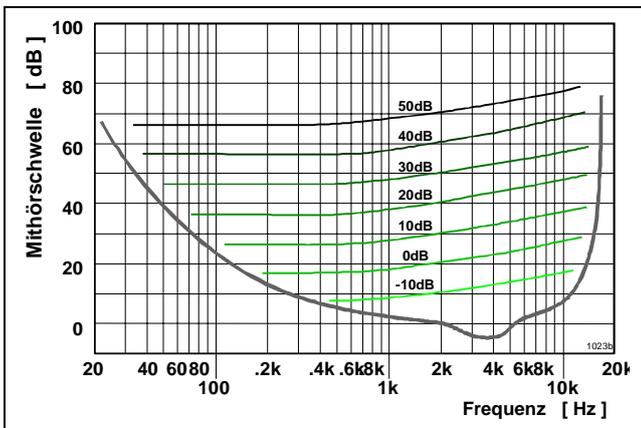


Abb. 5-25: Hörschwelle bei Verdeckung mit Breitbandrauschen. Weisses Rauschen mit verschiedenen Dichtepegeln des Rauschens (-10, 0, 10, 20, 30, 40, 50dB); Bereich unter den Kurven: Vom Grundrauschen verdeckter, nicht hörbarer Bereich des Hörfeldes; dicke Kurve: Hörschwelle bei absoluter Ruhe.

Die Ausgangskurve in den beiden Abb. 5-24 und Abb. 5-25 ist jeweils die Hörschwellenkurve. Der Versuchsperson wird in Abb. 5-24 beispielsweise ein Sinuston von 1 kHz mit einer Lautstärke von 40 phon angeboten. Dieser bringt die Basilarmembran asymmetrisch zum Schwingen. Nun wird gleichzeitig die „Hörschwelle“ für einen zusätzlichen Sinuston anderer oder gleicher Frequenz dargeboten. Aus der Tab. 5-2 kann abgeleitet werden, dass dieser zweite Ton ebenfalls 40 phon haben muss, wenn er gerade gut wahrgenommen werden soll, denn dann ergibt sich eine Lautstärkenänderung um 3 dB. Weicht die Frequenz des zweiten Testtones stark vom Basiston ab, so

wird keine Änderung der Hörschwelle (Mithörschwelle) festzustellen sein. Es ergibt sich eine neue Hörschwellenkurve, die Mithörschwelle, die in der Abb. 5-24 mit der Zahl 40 indiziert ist. Diese ist erwartungsgemäss schiefsymmetrisch. Töne, die unterhalb dieser Kurve liegen, werden nicht gehört. Sie werden verdeckt. Deshalb wird sie auch Verdeckungskurve genannt. Je lauter der Basiston ist, umso grösser ist der verdeckte Bereich, umso schlechter wird auch das Frequenzauflösungsvermögen des Ohres sein. Die Verdeckung betrifft vor allem Töne oberhalb des Basistones.

Hinweis: Das vereinfachte Bewertungsmodell nach Zwicker berücksichtigt nur die höheren Frequenzen.

Die Gleichzeitigkeit zweier Sinustöne ist selbstverständlich nur ein Sonderfall. Ein anderer Sonderfall ist in Abb. 5-25 dargestellt. Es liegt nicht ein Basiston vor wie in Abb. 5-24, sondern ein breitbandiges weisses Rauschen. Die Verdeckungskurven sind in diesem Fall bis zu etwa 500 Hz achsenparallele Geraden, die oberhalb dieses Frequenzbereiches linear ansteigen. Sie weichen damit völlig von den dB(A) Bewertungskurven ab. In einem solchen Fall wird die Lautstärke also besser ohne Bewertungsfilter gemessen.

Das Bewertungsverfahren von Zwicker (Abb. 5-26) berücksichtigt hörgerecht die Verdeckung verschiedener Frequenzen, die sich aus den Eigenschaften der Basilarmembran ergeben. Für die Berechnung wird die Schallenergie in 21 Frequenzbändern gemessen. Ausserdem wird nicht die Lautstärke, sondern die Lautheit von Schallsignalen berechnet. Die hörgerechte Bewertung nach dem Zwickerverfahren erklärt die Tatsache, dass die subjektive Lautheit verschiedener Schallquellen sich bei gleicher gemessener Lautstärke in dB(A) bis zu einem Faktor 3.5 unterscheiden kann.

Da für die Bewertung die Schallenergie in 21 Frequenzbändern ermittelt werden muss, ist der messtechnische Aufwand deutlich grösser als bei einfachen Messungen des Schallpegels.

Hinweis: Aus gleicher gemessener Lautstärke kann nur bei Signalen ähnlicher Frequenzzusammensetzung auf gleiche Lautheit für das menschliche Ohr rückgeschlossen werden.

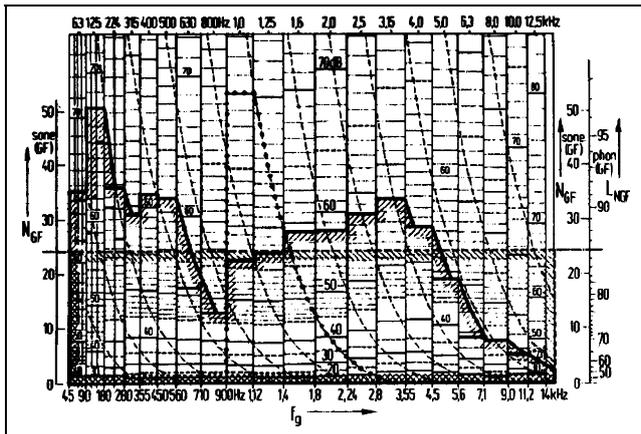


Abb. 5-26: Beispiel für die Lautheitsbewertung nach Zwicker (bzw. ISO 532).

5.3 Wirkung von Lärm

Lärm ist unerwünschter Schall. Er kann in ganz verschiedener Weise auf den Menschen wirken (Abb. 5-27) und sein Leben beeinflussen. Tab. 5-5 zeigt vier Bewertungsmöglichkeiten.

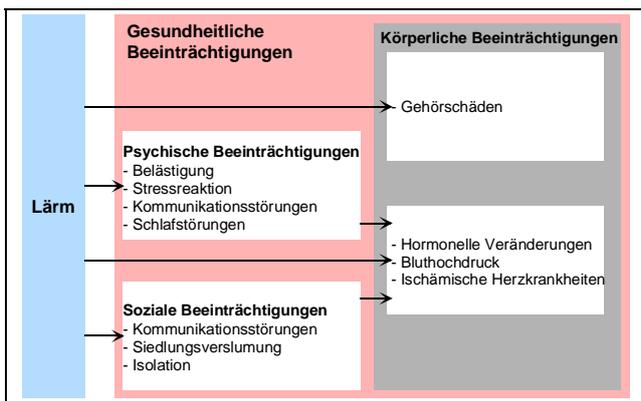


Abb. 5-27: Übersicht der gesundheitlichen Beeinträchtigungen durch Lärm (abgeändert nach BUWAL 2002).

Ist die Energie des Schalls hoch genug, werden die Haarzellen des Innenohrs geschädigt. In erster Näherung sollte daher eine frequenzbe-

wertete Messung der Energie für die praktische Handhabung vernünftig sein. Der bewertete Schalldruckpegel dB(A) leistet dieses. Die Bewertungskurve A scheint einigermaßen die mechanischen Eigenschaften des Ohres abzubilden.

Tab. 5-5: Stufen der Lärmbewertung.

Beurteilungsebene	Bewertungsgrößen
Schädigung (spezifisch, auditiv)	Energie (dB(A))
Psychophysische Funktionen	Energie (dB(A), sone)
	Frequenzspektrum
Lästigkeit	Energie (dB(A))
	Frequenzspektrum
	Information
gesundheitliche Beeinträchtigung (unspezifisch, vegetativ, extraural)	Energie (dB(A))
	Frequenzspektrum
	Information

Bereits auf der nächsten Ebene der Schallbewertung, nämlich derjenigen der Kommunikationsstörung muss zusätzlich eine differenzierte Frequenzbewertung vorgenommen werden. Störende Geräusche, deren Frequenzspektrum ausserhalb des Sprachgebietes liegt, stören weniger als solche im Sprachgebiet.

Für die Beurteilung der Lästigkeit im weitesten Sinnen reicht selbst eine solche aufwendige Messung nicht aus. Selbstverständlich gibt es eine gewisse Assoziation mit den physikalischen Massen, wichtiger wird in diesem Bereich, der beispielsweise die Arbeitsfähigkeit und das Wohlbefinden massiv stören kann, die Information, die jede Geräuschquelle vermittelt. Information ist aber etwas sehr subjektives. Mentale Konzepte der Informationsverarbeitung, die affektive Bewertung und Attribuierung beeinflussen und bestimmen die Qualität und Quantität der Lästigkeit. In diesem Wirkungsbereich muss mit standardisierten, auf Konzepten basierenden Fragebögen gearbeitet werden. Eine zusammenfassende Information bietet das sogenannte Lärmthermometer, ein zehnstufige Beurteilungsskala.

Gehörschädigung

Energiereicher Lärm schädigt die Haarzellen des Innenohres unwiederbringlich. Die Lärmschwerhörigkeit ist weltweit eine der häufigsten beruflichen Beeinträchtigungen. Heute tritt an die Stelle beruflicher Lärmexposition der Disco-schall hinzu.

Nach jeder merkbareren energetischen Belastung des Ohres mit lauten Geräuschen, kommt es zu einer zeitweiligen Verschiebung der Hörschwelle, einer „temporary threshold shift“ (TTS). Das Ohr ist vertäubt. Die Vertäubung hält umso länger an, je stärker die Belastung war.

Hinweis: Die Dauer der TTS folgt nicht der energetischen Mittelungsregel der physikalischen Akustik. Das Produkt aus Expositionszeit und Schalldruck ist nicht konstant. Kurze, aber laute Schallereignisse schädigen stärker.

Epidemiologie

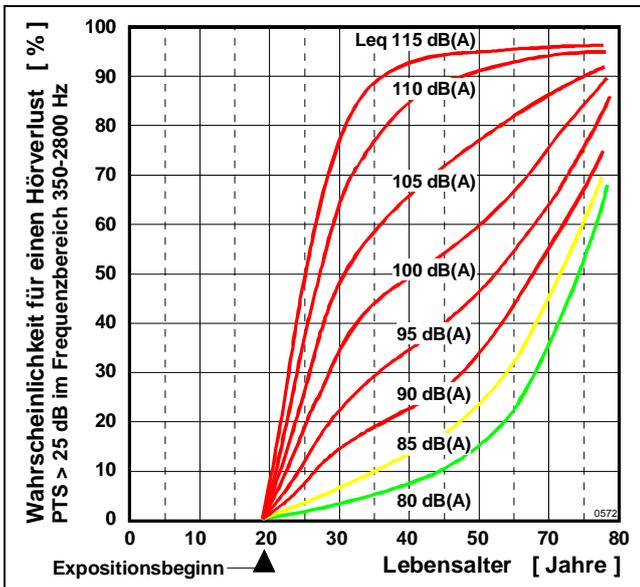


Abb. 5-28: Das Mass für einen Hörverlust ist eine permanente Verschiebung Schwellen der Hörschwelle (PTS) im Frequenzbereich zwischen 350 Hz und 2,8 kHz. Als Belastung sind verschiedene äquivalente Dauerschallpegel Leq bei 40 Wochenstunden und 50 Wochen im Jahr angenommen (n. ISO DIS 1999.2: Acoustics - Determination of occupational noise exposure and estimation of noise induced hearing impairment (1985)).

Die Epidemiologie ist die Lehre von der Untersuchung der Verteilung von Krankheiten, physiologischen Variablen und sozialen Krankheitsfolgen in menschlichen Bevölkerungsgruppen sowie der Faktoren, die diese Verteilung beeinflussen (WHO-Definition). In Abb. 5-28 sind schematisch Ergebnisse der Epidemiologie zu Hörverlusten zusammengefasst. Mit zunehmender Expositionsdauer nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, einen Hörverlust von mehr als 25 dB Verschiebung der Hörschwelle zu erleiden. Es tritt eine merklich permanente Verschiebung der Schwelle auf, eine „permanent threshold shift“ (PTS). Diese Verschiebung erscheint umso früher, je höher der Lärmpegel ist. Heute gilt in der Arbeitshygiene ein Pegel (SPL „sound pressure level“) von 85 dB(A) als Grenzwert für den Arbeitsplatz.

Hinweis: Ein Grenzwert von 85 dB(A) bedeutet nicht ein Null-Risiko für eine Lärmschwerhörigkeit.

Folgen

Die Hörfähigkeit kann im einfachsten Fall durch den Verlauf der Hörschwelle in einem Tonaudiogramm festgehalten werden (Abb. 5-29). Im Tonaudiogramm bedeutet eine Gerade, die mit der 0 dB Achse zusammenfällt eine normale Hörschwelle. Das schwerhörige Ohr benötigt mehr Schallenergie, d.h. höhere Schallpegel in dB als das normal hörende Ohr. Es wird von einem Hörverlust von x dB gesprochen. Dieser wird im Tonaudiogramm nach unten als Hörverlust eingetragen. Der Hörverlust zeigt für verschiedene Arten von Schwerhörigkeiten einen recht typischen Verlauf.

Bei einer beginnenden Mittelohrschwerhörigkeit, bei der die Schallübertragung in das Innenohr gestört ist, gibt es über die ganze Frequenzachse einen Hörverlust. Wird der Schall über den Knochen eingeleitet (Knochenleitung, z.B. mit auf den Kopf aufgesetzter Stimmgabel)

ergibt sich eine völlig normale Kurve ohne Hörverlust.

Eine beginnende Lärmschwerhörigkeit gibt vor allem zwischen 3 und 5 kHz einen Hörverlust. Es ist der Bereich grösster Empfindlichkeit des menschlichen Ohres. Die Frequenzzusammensetzung des schädigenden Schalls spielt offensichtlich keine bedeutende Rolle. Mit zunehmender Schädigung werden auch andere Frequenzbereiche erfasst.

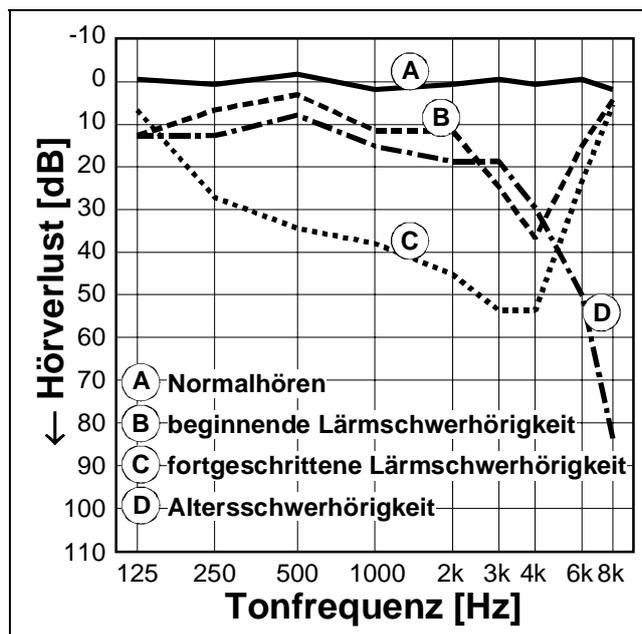


Abb. 5-29: Verschieden Arten von Lärmschwerhörigkeit im Tonaudiogramm.

Abb. 5-29 zeigt auch den typischen Verlauf einer Altersschwerhörigkeit. Diese erfasst im Beginn vor allem alle Frequenzen oberhalb von 2 kHz.

Hinweis: Das Tonaudiogramm gibt nur einen kleinen Aspekt einer Schwerhörigkeit wieder. Veränderungen der Tuningkurven, des Frequenzauflösungsvermögens zeigen sich nicht!

In der Praxis ist vor allem die Kommunikationsfähigkeit wichtig, die ein Tonaudiogramm nur bedingt abbildet. Neben dem Tonaudiogramm wird deshalb das deutlich aufwendigere Verfahren der Sprachaudiometrie eingesetzt. Den Personen werden dazu standardisierte Tonkonser-

ven in einem schallarmen Raum vorgespielt. Abb. 5-30 zeigt einige Beispiele. Bei einer Schalleitungsschwerhörigkeit ist im günstigen Fall die s-förmige Kurve der Erkennungsrate nur nach rechts zu höheren Schalldrücken verschoben.

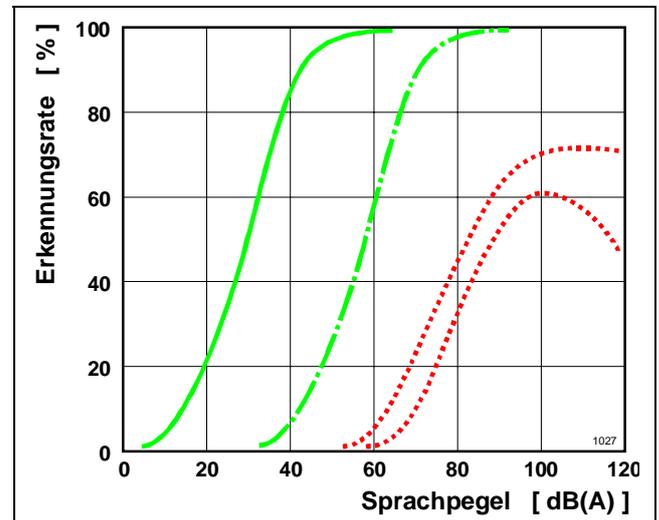


Abb. 5-30: Schematische Darstellung der Auswirkung verschiedener Schwerhörigkeiten auf das Sprachaudiogramm im Vergleich zum Normalhörer. Ausgezogen: Normalhörer; strichpunktirt: Schalleitungsschwerhörigkeit; gepunktirt: Innenohrschwerhörigkeiten.

Bei einer Innenohrschwerhörigkeit wird hingegen niemals eine Erkennungsrate von 100% erreicht.

Hinweis: Während die Schalleitungsschwerhörigkeit recht gut mit einem Hörgerät kompensiert werden kann, gelingt dieses ohne zusätzliche Sprachverarbeitung mit einem normalen Hörgerät nicht. Ein einmal eingetretener Lärmschaden kann also nicht kompensiert werden. Lärmschutz ist demnach die einzig wirksame Massnahme gegen das Auftreten oder die Vergrösserung von Lärmschwerhörigkeit.

Kommunikationsstörungen

Für eine normale Sprachverständigung sollte der Sprachpegel grundsätzlich über dem Geräuschpegel liegen. Das Mass hängt von der Differenziertheit der Sprache ab. Je grösser der verwendete Wortschatz ist, umso grösser werden die Anforderungen.

Hinweis: In lärmiger Umgebung muss der Wortschatz auf wenige standardisierte Wörter eingeschränkt werden.

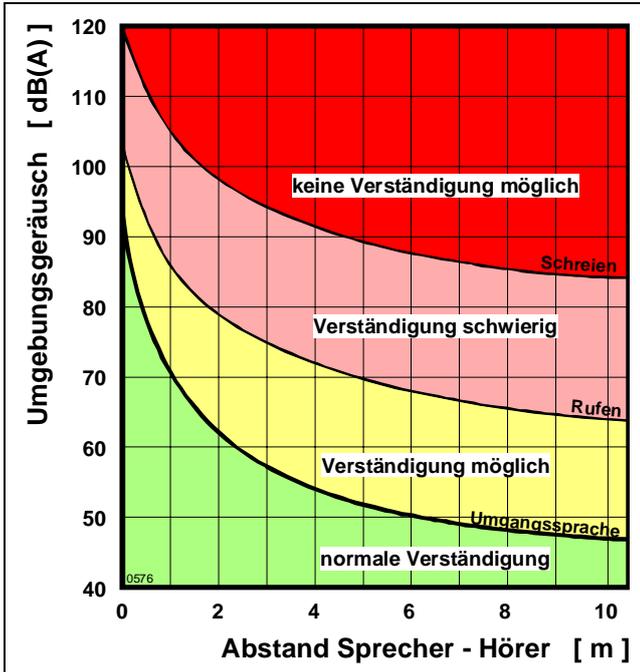


Abb. 5-31: Einfluss von Umgebungsgeräusch und Sprecherdistanz auf die Sprachverständigung (n. BÜRCK W. (1981) Lärm. In Schmidtke H. Ergonomie. Carl Hanser Verlag, München S. 217).

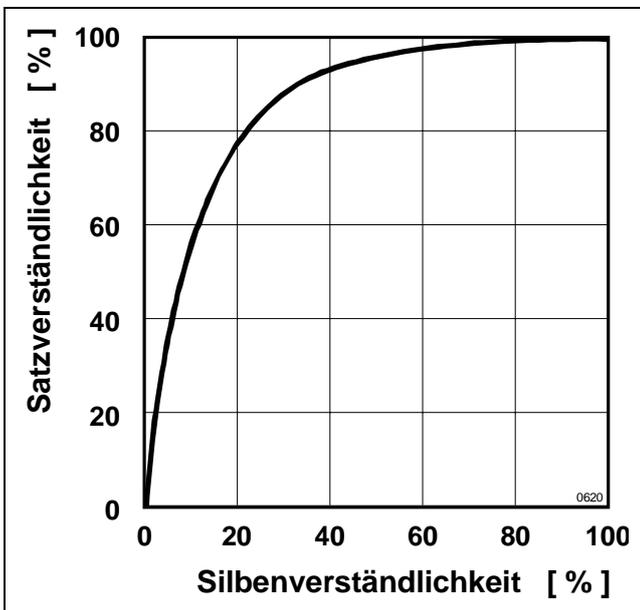


Abb. 5-32: Zusammenhang zwischen Silben und Satzverständlichkeit (n. GRANDJEAN E. (1991) Physiologische Arbeitsgestaltung. ecomed, Landsberg S. 313).

Da die Lautstärke der Sprache mit zunehmender Distanz vom Sprecher abnimmt, wird die

Sprachverständigung in lärmiger Umgebung mit zunehmender Entfernung vom Sprecher mühsamer (Abb. 5-31).

Die natürliche Sprache ist ausserordentlich redundant (=mehrfach angelegte Kennzeichnung der gleichen Information). Das gibt schwerhörigen Personen die Möglichkeit, trotz schlechten Sprachaudiogramms noch lange inhaltlich Gesprächen folgen zu können, wenn die Umgebung nicht zu lärmig ist. Die Silbenverständlichkeit hingegen entspricht dem Sprachaudiogramm, denn Silben sind nicht redundant. Bereits bei einer Silbenverständlichkeit von 50% wird eine Sprachverständlichkeit von annähernd 95% erreicht. Eine solche von nur 20% führt immerhin zu einer Sprachverständlichkeit von 80% (Abb. 5-32).

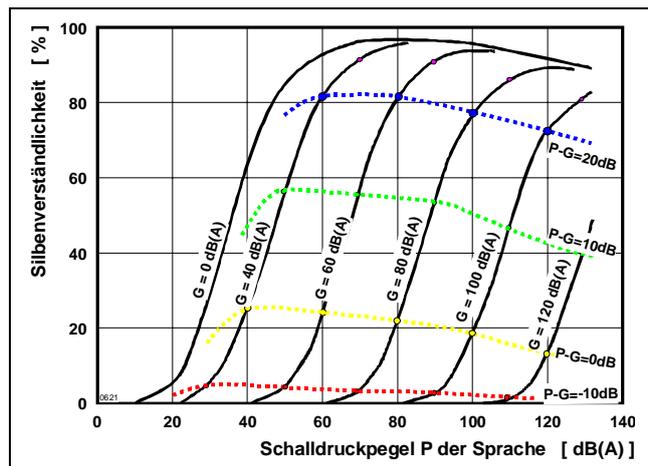


Abb. 5-33: Silbenverständlichkeit als Funktion des Schalldruckes der Sprache (P) und des Geräuschpegels (G) im Raum (n. GRANDJEAN E. (1991) Physiologische Arbeitsgestaltung. Ecomed, Landsberg S. 314).

In Abb. 5-33 sind typische s-förmige Kurven der Silbenverständlichkeit als Funktion des Schalldruckpegels der Sprache eingetragen. Die Kurven verschieben sich erwartungsgemäss mit zunehmendem Geräuschpegel G nach rechts. Punktiert sind jeweils die Punkte verbunden, bei denen der Abstand zwischen Sprachpegel P und Geräuschpegel G, der sogenannte Signal-Rausch-Abstand 0, 10 bzw. 20 dB beträgt. Da

nach Abb. 5-32 bei einer Silbenverständlichkeit von 50% ein Sprachverständnis von etwa 95% erreicht wird, ergibt sich daraus die Faustregel: Der Signal-Rausch-Abstand für ein ausreichendes Verständnis der Muttersprache sollte wenigstens 10 dB betragen.

Hinweis: Bei einer Fremdsprache, die zum ausreichenden Verständnis deutlich weniger redundant als die Muttersprache ist, sowie in Lehrinstituten sollte der Signal-Rausch-Abstand wenigstens 20dB betragen. Unter der Annahme, dass eine normale, gut modulierte Sprache nicht lauter als 65dB(A) ist, ergibt sich ein maximaler Schallpegel von Unterrichtsräumen von 45 dB(A).

Lärmbelästigung

Störende Geräusche können als Lärm definiert werden. „Lärm“ muss aber nicht immer laut sein. Die Lärmbelästigung hängt stark vom Informationsgehalt der Geräusche ab. Bei gleichem dB(A) Wert belästigen unabhängig davon vor allem monotone Geräusche (Lüfter, Laufwerke von Computern), hochfrequente Geräusche und stochastisch auftretende, unvorhersehbare Geräusche, die ständig die Aufmerksamkeit erregen. Bei psych mentalen Arbeiten eignet sich das allein auf eine Frequenz korrigierte dB(A) Mass schlecht zur Abschätzung der Lästigkeit von „Lärm“. Somit sind die Grenzwerte für Büroräume eigentlich nicht der Problematik der Belästigung angemessen.

Höhere Pegel von Umgebungsgeräuschen senken die Arbeitsleistung (Abb. 5-34). Nur mit besonderer Anstrengung und damit nur über eine begrenzte Zeit kann dann die Leistung aufrecht erhalten werden. Ist keine hohe Leistungsbereitschaft der dort tätigen Personen vorhanden oder erfordert bereits die Tätigkeit einen hohen Grad an Konzentration, so wird der Arbeitserfolg deutlich eingeschränkt sein.

Gemäss Abb. 5-34 führen auch zu geringe Schallpegel zu einer Reduktion der Arbeitsleistung.

Bereits eine summende Mücke kann dann ablenkend und belästigend wirken, auch wenn deren Schallpegel unbedeutend ist.

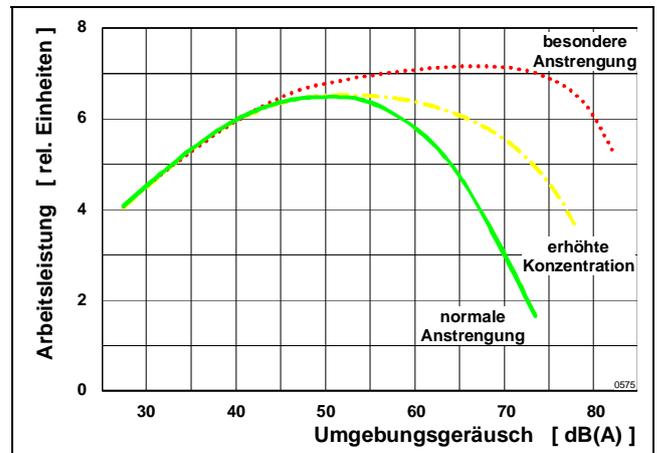


Abb. 5-34: Beeinflussung der Arbeitsleistung durch Lärm (n. BÜRK, W. (1981) Lärm. In Schmidtke H. (Hrsg.) Ergonomie. Carl-Hanser Verlag München).

Extraaurale, unspezifische Lärmwirkungen

Als extraaural werden hier alle unspezifischen Lärmwirkungen bezeichnet, die das vegetative Nervensystem beeinflussen (Abb. 5-35). Lärm kann als allgemeiner Stressor Eustressreaktionen oder Disstressreaktionen auslösen. Weiterhin stört Lärm das Ein- und Durchschlafen.

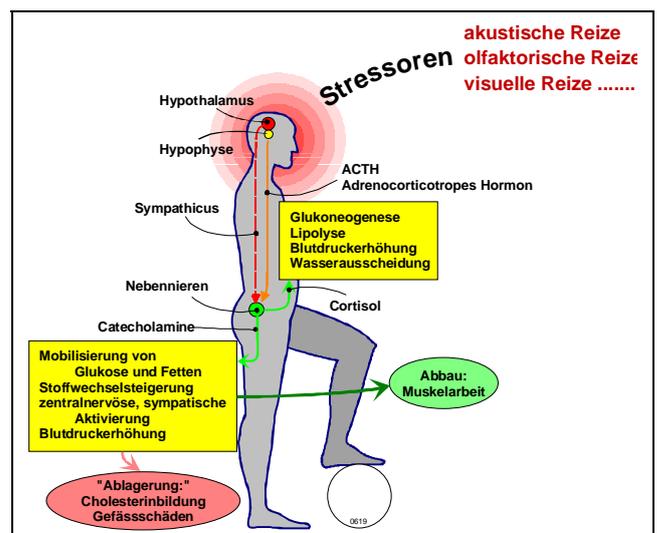


Abb. 5-35: Allgemeines Stressmodell (n. VESTER).

Umgebungsgeräusche wirken bis zu einem Optimum als positiver Stressor. Die Leistung steigt

(Abb. 5-34). Es wird von Eustress gesprochen. Lärm wirkt erst dann als negativer Stressor (Disstress), wenn die Bewältigungsmöglichkeiten (Coping) für die Betroffenen nicht mehr ausreichen. Eine Belastung allein darf nicht mit Disstress verwechselt werden. Belastung in Massen ist für optimales Leben notwendig.

Tab. 5-6: Zusammenstellung unspezifischer Lärmwirkungen (n. SCHEIDT et al., 1986).

Wirkungen auf das endokrine System
Wirkungen auf das Herz-Kreislauf-System
Herzfrequenz Blutdruck periphere Gefässe
Wirkungen auf die Atemfrequenz
Wirkungen auf den Stoffwechsel
Wirkungen auf die Verdauungsorgane
Wirkungen auf den Muskeltonus
Wirkungen auf die Sinnesorgane
Tiefensehen Farbsehen Gleichgewicht

Das allgemeine physiologische Stresskonzept geht auf SELYE zurück und ist in Tab. 5-6 dargestellt. Ein externer oder auch interner Stressor (z.B. akute Prüfungsangst) aktiviert den Hypothalamus (affektives Zentrum). Dieser veranlasst einerseits die Nebenniere, Stresshormone (Catecholamine), Adrenalin und Noradrenalin auszuschütten, und aktiviert weiterhin über Releasingfaktoren die Hypophyse, welche ihrerseits die Niere veranlasst, aktiv zu werden. Insgesamt wird der Körper auf „Flucht“ vorbereitet. Der Blutdruck steigt, und der Muskulatur werden Brennstoffe zur Verfügung gestellt.

5.4 Lärmschutz

Schutzmassnahmen

Die wirksamsten und zumeist auch preiswertesten Schutzmassnahmen sind diejenigen an der Quelle (Tab. 5-7). Erst im zweiten Rang folgen die andern Massnahmen. Es lohnt sich deshalb leise Maschinen zu beschaffen. Ma-

schinen bleiben allerdings nur leise, wenn sie regelmässig gewartet werden. Sie müssen für den Bau ausserdem robust sein.

Tab. 5-7: Massnahmen zur Verhinderung von Lärmschwerhörigkeit

- ▶ **Schallschutz an der Quelle**
- ▶ **organisatorische Massnahmen**
- ▶ **persönlicher Schallschutz**
- ▶ **Personalauswahl, Personalüberwachung**

Hinweis: Heimwerkergeräte eignen sich üblicherweise nicht für den professionellen Gebrauch.

Schallschutz an der Quelle

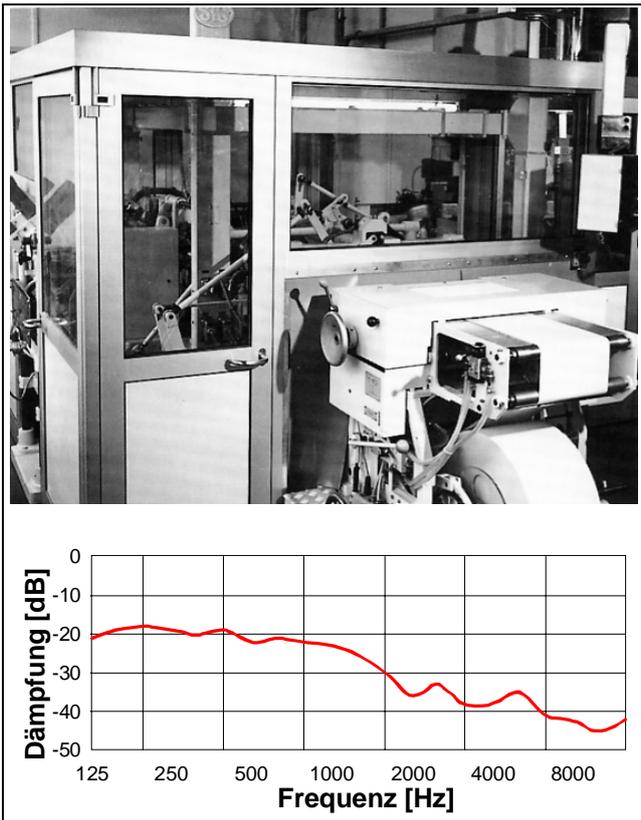


Abb. 5-36: Minderung von Luftschallemission durch Kapselung für hohe Frequenzen. Oben: Vollständig gekapselter Verpackungsautomat mit Pegelreduktion 17 dB(A). Unten: Dämpfungskurve eines gekapselten Hydraulikaggregats (Terzbandanalyse).

Bei der Beschaffung dürfen die Bedingungen der Aufstellung nicht vernachlässigt werden. Die Raumakustik spielt eine wesentliche Rolle für die tatsächliche Schallimmission.

Erstes Ziel muss es sein, leise Maschinen zu konstruieren. Wenn dieses nicht möglich ist, müssen solche lauten Maschinen gekapselt werden (Abb. 5-36). Diese Massnahme ist besonders für hohe Frequenzen wirksam. Bei sehr niedrigen Frequenzen versagt dieses Verfahren.

Hinweis: Stereoanlagen mit viel Energie in den Bässen dringen durch ganze Wohnblocks.

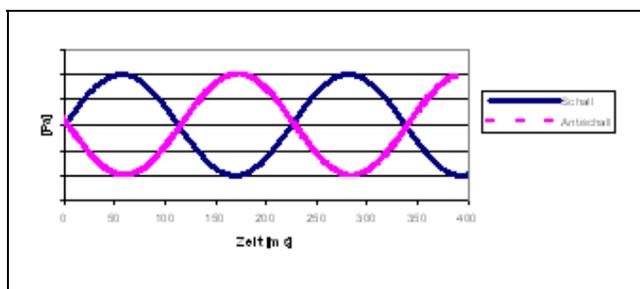


Abb. 5-37: Aktive Minderung von Luftschall durch aktiven Gegenschall für niedrige Frequenzen.

Tiefe Frequenzen können aktiv mit Gegenschall gedämpft werden (Abb. 5-37). Die Überlagerung der originalen Schalls mit einem zusätzlich Schall genau in Gegenphase löscht diesen aus.

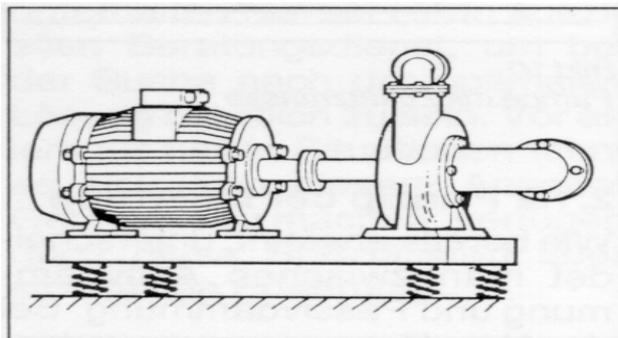


Abb. 5-38: Verminderung der Abgabe von Körperschall durch Dämpfungselemente.

Schallquellen können den Schall auch über den Untergrund übertragen. Dieser Körperschall ist nicht durch eine Schallschutzhaube abzufan-

gen. In diesem Fall müssen die Maschinen mit Dämpfungselement vom Untergrund entkoppelt werden (Abb. 5-38).

Organisatorische Massnahmen

In lärmigen Bereichen sollten sich möglichst wenig Personen aufhalten. Dieses ist dadurch zu erreichen, dass laute Geräte in gesonderten Räumen untergebracht werden und diese Räume von möglichst wenigen Personen betreten werden. Zu den organisatorischen Massnahmen gehören aber auch die Ausbildung bzw. Information der Arbeitnehmer und deren Vorgesetzten.

Persönliche Schutzmassnahmen

Als persönlich Schutzmassnahmen bieten sich Kapseln und Ohrpfropfen an. Beide müssen gut an den Träger angepasst sein, da sie sonst wirkungslos sind (Abb. 5-39). In Abb. 5-40 sind die Dämpfungskurven exemplarisch dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Wirkung mit sinkender Frequenz geringer wird. Die Schutzmassnahmen eignen sich also vorwiegend für Lärmquellen mit hohen Frequenzen. Im besten Fall lassen sich Dämpfungswerte zwischen 25 und 30 dB erreichen.

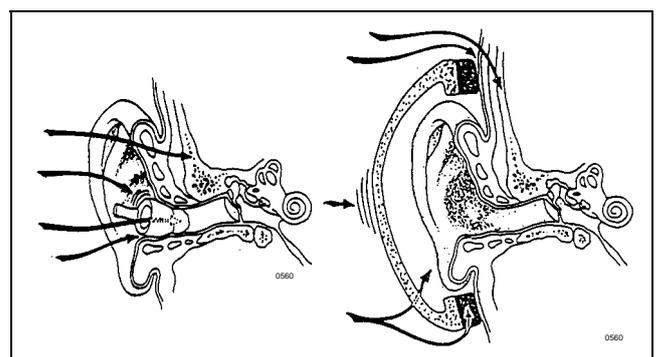


Abb. 5-39: Persönlicher Schallschutz.

Neben diesem passiven Schallschutz gibt es in zunehmendem Masse auch aktiven persönlichen Hörschutz (Abb. 5-41).

Hinweis: Das Tragen eines persönlichen Hörschutzes ist nicht nur eine Frage der Logik, sondern auch

eine des Verhaltens. Hörschutz behindert das Richtungshören und die Verständigung (subjektiv scheint es leise zu sein, dennoch ist keine Kommunikation möglich). Der „Knopf im Ohr“ drückt unter Umständen und ist bei Kollegen ein Schwächezeichen. Unter der Kapsel wird geschwitz. Deshalb ist beispielhaftes Verhalten der Vorgesetzten wichtig.

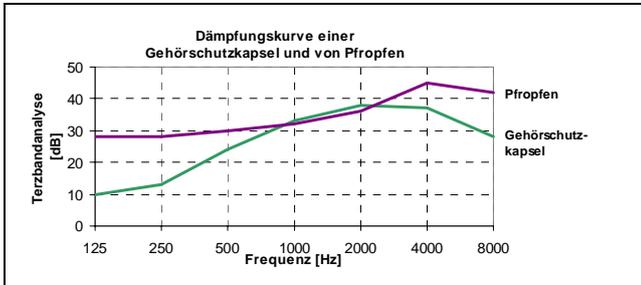


Abb. 5-40: Dämpfungskurven für Gehörschutzkapseln und Pfropfen (Terzbandanalyse).



Abb. 5-41: Beispiele für Hörschutz.

Hinweis: Die Kombination von Ohrpfropfen und Kapseln bringt zwar theoretisch einen addierten Dämpfungswert in dB, ist aber gegen sehr hohe Schallpegel nutzlos, da der Schutz durch die Knochenleitung des Schalls unterlaufen wird (vgl. Abb. 5-16). Dagegen helfen nur Schallschutzanzüge.

Hinweis: Für Musiker gibt es speziellen Hörschutz mit einer linearisierten Kennlinie über einen grossen Frequenzbereich.

Personalauswahl und Überwachung

Es ist eine arbeitsmedizinische Aufgabe Personen mit Einschränkungen der Hörfähigkeit oder bestehenden Ohrerkrankungen vor Schädigung zu schützen. Die Hörfähigkeit lärmexponierter Personen sollte vorsorglich in regelmässigen Abständen kontrolliert werden.

Grenzwerte

Der Lärmschutz stützt sich auf dB(A)-Grenzwerte ab. In zahlreichen Tabellenwerken und Verordnungen sind Grenzwerte der Lärmbelastung für die verschiedensten Bedürfnisse festgehalten. Tab. 5-8 bis Tab. 5-10 geben beispielhaft einen knappen Überblick einmal für den Wohnbereich (Tab. 5-8) und zum andern für berufliche Tätigkeiten (Tab. 5-9, Tab. 5-10). Da Personen sehr unterschiedlich auf Lärm reagieren und mit ihm umgehen können, sind erhöhte Anforderungen bei schwierigen Tätigkeiten oder bei empfindlichen Personen erforderlich. In der Praxis muss immer berücksichtigt werden, dass die Grenzwerte nicht den konkreten Einzelfall abbilden, sondern den Umgang mit der schwierigen Aufgabe „Lärmschutz“ praktikabel machen sollen.

Tab. 5-8: Grenzwerte für die Lärmbelastung bei verschiedenen Tätigkeiten.

Geräuschquellen	Mindestanforderungen	Erhöhte Anforderungen
	L _{r1h} [dB(A)]	L _{r1h} [dB(A)]
Küche		
Einlaufgeräusche und Auslaufgeräusche von Spültrog, Geschirrspüler usw.	≤35	≤30
Benutzung von Installationen und Einrichtungen wie Stöpsel zu Spültrog, Pfannen und Geschirr auf Kombination stellen, Ventilationsklappe öffnen und schliessen, Pfannen- und Flaschenauszug betätigen, Türen und Schubladen von Kombinationen und Hochschränken	≤40	≤35
Waschküche		
Waschmaschine (waschen und schwingen), Tumbler; Spültrog ein- und auslaufen lassen usw.	≤35	≤30
Bad/Dusche/WC/Sauna usw.		
Einlaufgeräusche und Auslaufgeräusche von Badewannen, Lavabo, Bidet, Duschen, WC usw.	≤35	≤30
Benutzung von Sanitärinstallationen Bedienungsgeräusche von Armaturen, Türchen und Schubladen öffnen und schliessen, Gegenstände auf Tablare und in Halterungen stellen, bei Bade- und Duschenwannen klopfen und quietschen, WC-Deckel fallen lassen, Papier	≤40	≤35
Dauergeräusche von Ventilatoren und Lüftungen	≤30	≤25
Cheminée		
Cheminée scheuern, Holz auflegen, Rauchklappe bedienen, Funkenschutzgitter ziehen	≤40	≤35
Sonnenstoren und Rolläden		
Storen und Rolläden hinauf- und herunterkurbeln (inkl. Anschläge oben und unten), Kurbeln einrasten	≤40	≤35
Heizungen		
Dauergeräusche von Heizungen, Kompressoren, Wärmepumpen, Umwälzpumpen	≤30	≤25
Einzelgeräusche von Explosionsklappen,	≤35	≤30
Lift		
Fahren, Stoppen, Lifttüren	≤35	≤30
Garagen		
Garagentor (handbedient) öffnen und schliessen	≤40	≤35
Automatisches Garagentor öffnen und schliessen	≤35	≤30

Grenzwerte der SUVA

Die SUVA unterscheidet einen „Grenzbereich der Gehörgefährdung“ bei einem L_{eq} von 85 bis 87 dB(A) und „gehörgefährdenden Lärm“ von 88 dB(A) und mehr. Der L_{eq} bezieht sich auf min. 8 h / Tag, max. 2000 h / Jahr (vgl. Abb. 5-4 unten). Bei Lärmbelastungen im Grenzbereich sind dem Personal am Arbeitsplatz Gehörschutzmittel zur Verfügung zu stellen, und das Tragen dieser Schutzmittel ist zu empfehlen. Die Gehörkontrollen der SUVA sind fakultativ. Bei gehörgefährdendem Lärm ist die Gehörschadenprophylaxe zwingend. Im Sinne der Vorsorge wird empfohlen, auch bei geringeren Belastungen Schutzmassnahmen zu treffen.

Tab. 5-9: Grenzwerte für die Lärmbelastung bei verschiedenen Tätigkeiten.

maximaler energieäquivalenter Dauerschalldruckpegel [dB(A)]		
Tätigkeit	Mindestanforderung	Erhöhte Anforderung
Gruppe 1:		
industrielle und gewerbliche Tätigkeiten	85	75
Gruppe 2:		
allgemeine Bürotätigkeiten sowie vergleichbare Tätigkeiten in Produktion und Überwachung	65	55
Gruppe 3:		
überwiegend geistige Tätigkeiten, die eine hohe Konzentration verlangen	50	40

Tab. 5-10: Grenzwert für Lärmbelastung an verschiedenen Arbeitsplätzen.

maximaler energieäquivalenter Dauerschalldruckpegel [dB(A)]		
Raum	Mindestanforderung	Erhöhte Anforderung
Kleinbüro bis 3 Personen	40	35
Mittleres Büro	40	35
Sitzungs- und Konferenzzimmer	40	35
Grossraumbüro	45	40
Büro mit mehreren Büromaschinen	45	40
EDV-Maschinenraum	50	45
Werkstattbüro	60	50
Kommandoraum	60	50
Steuerkabine	70	65
Labor	50	45
Pausen- und Bereitschaftsräume	60	55
Liege-, Ruhe und Sanitätsräume	40	35
Kantine	55	50
Operationssaal	40	35
Klassenzimmer	40	35

6

Arbeitsplatz-Ergonomie

6.1

Einleitung

Die Ergonomie ist die Wissenschaft, welche die Reaktionen und das Verhalten des Menschen bei seiner Arbeit untersucht. Das Wort „Ergonomie“ besteht aus den griechischen Wortteilen „ergon“ für Werk, Arbeit und „nomos“ für Regel, Gesetz, Lehre. Es lässt sich als „Arbeitswissenschaft“ ins Deutsche übersetzen. Gegenstand der Ergonomie ist einerseits der Mensch mit seinem Körper und Bewegungsapparat, seinen Sinnesorganen und seiner Psyche. Andererseits wird die Arbeit analysiert und ihre Wechselwirkung mit dem Menschen untersucht. Dabei ist Arbeit nicht nur im engeren Sinne der Arbeitsaufgabe zu sehen, sondern als Arbeitsplatz, Arbeitsumwelt und Arbeitsorganisation.

Hinweis: Ziel der ergonomischen Forschung und Beurteilung ist die Förderung der menschlichen Gesundheit und des Wohlbefindens einerseits, und die Steigerung des Arbeitserfolgs andererseits.

In Abb. 6-1 ist das Gefüge ergonomischer Wechselwirkungen schematisch dargestellt. Zur Verrichtung einer Arbeit muss der Mensch Leistung erbringen. Seine Leistungsfähigkeit ist zum Teil vorhanden, zum Teil wurde sie erworben. Vorhandene Eigenschaften sind Konstitution, Intelligenz, Geschlecht, und Alter. Erworben wurden die Bildung und besondere Fertigkeiten. Abb. 6-3 zeigt als Beispiel für unterschiedliche Leistungsfähigkeit die Muskelkraft in Abhängigkeit vom Alter und vom Geschlecht.

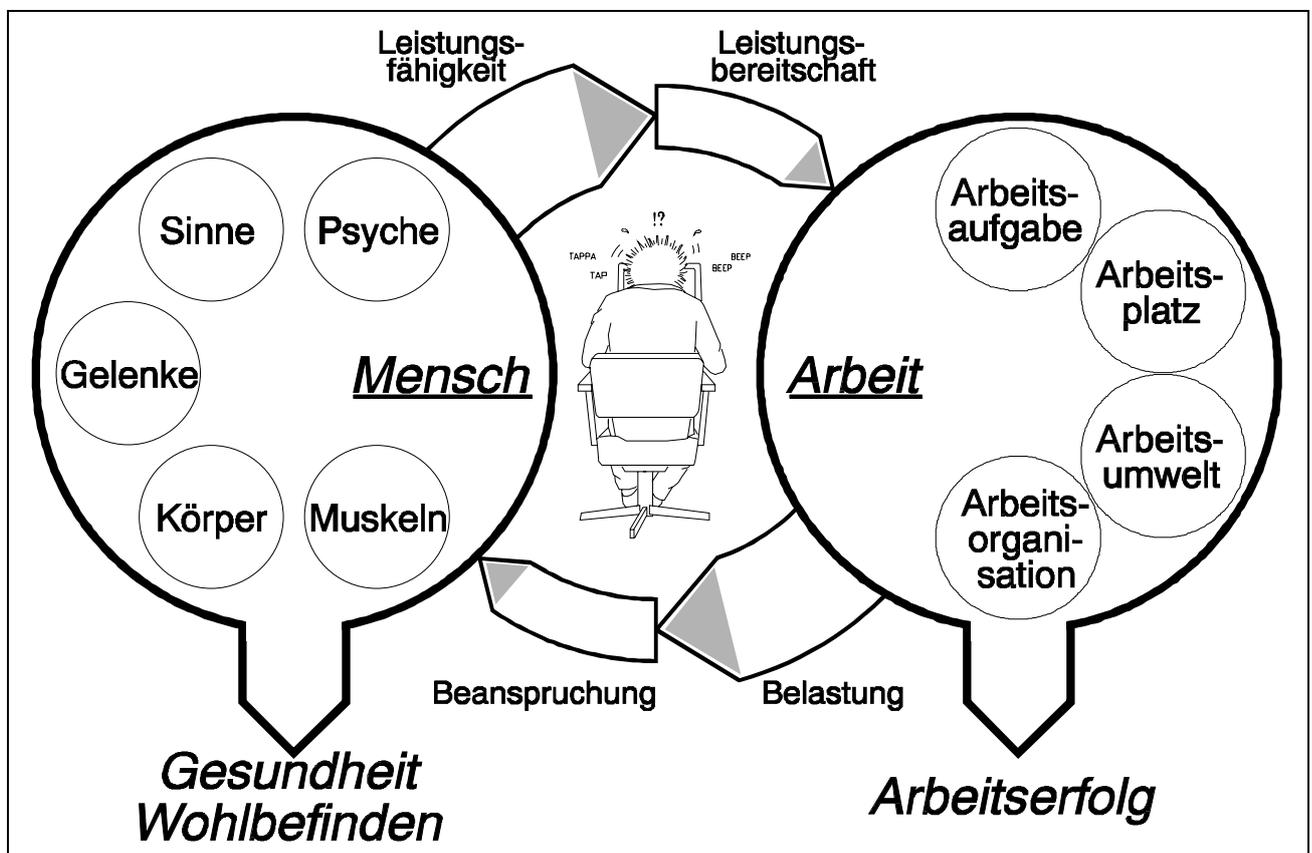


Abb. 6-1: Wechselwirkung zwischen Mensch und Arbeit

Hinweis: Durch Training und Ausbildung ist eine Steigerung der menschlichen Leistungsfähigkeit möglich.

Nicht immer ist der Mensch aber bereit oder in der Lage, seine ganze Leistungsfähigkeit einzusetzen. Seine Leistungsbereitschaft hängt sowohl von physischen, das heisst körperlichen Faktoren wie Kondition oder Disposition, als auch von der Motivation, einem psychischen, das heisst geistigen Faktor ab. Die Disposition beinhaltet unter anderem die Anfälligkeit für Krankheiten und die Tagesrhythmik (vgl. Abb. 6-2). Neben diesen individuellen Faktoren kommen arbeitsbedingte Faktoren hinzu.

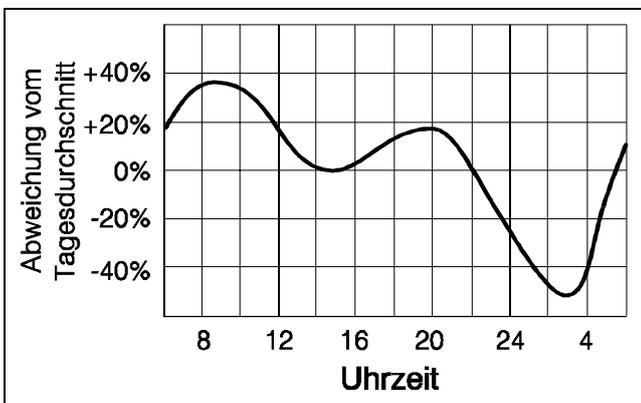


Abb. 6-2: Darstellung der Leistungsbereitschaft in Abhängigkeit von der Tageszeit.

Hinweis: Eine Steigerung des Arbeitserfolgs kann durch Anpassung der Arbeit an die Bedürfnisse des Menschen erreicht werden, da dadurch dessen Leistungsbereitschaft erhöht wird.

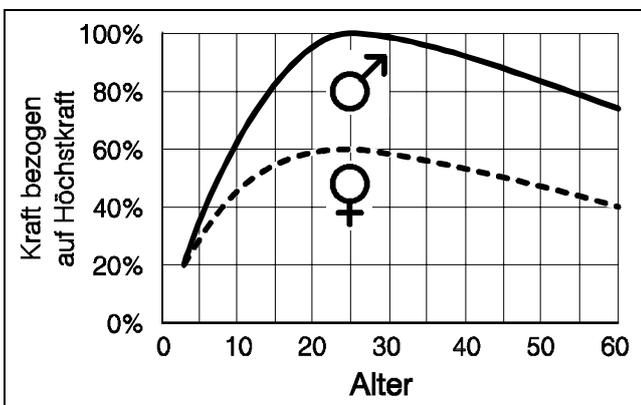


Abb. 6-3: Relative Muskelkraft in Abhängigkeit vom Alter für Männer und Frauen.

Der Einfluss der Arbeit auf den Menschen wird Belastung genannt. Gleiche Belastungen können bei verschiedenen Menschen zu unterschiedlichen Beanspruchungen führen. Der Zusammenhang zwischen Belastung und Beanspruchung wird in Abb. 6-4 veranschaulicht. Wie stark ein Mensch durch eine Belastung beansprucht wird, hängt wiederum von seiner Leistungsfähigkeit ab. Je nach dem, wie lange eine Belastung andauert und wie gross deren Intensität ist, kann der Mensch sowohl in seinem Wohlbefinden, als auch in seiner Gesundheit beeinträchtigt werden.

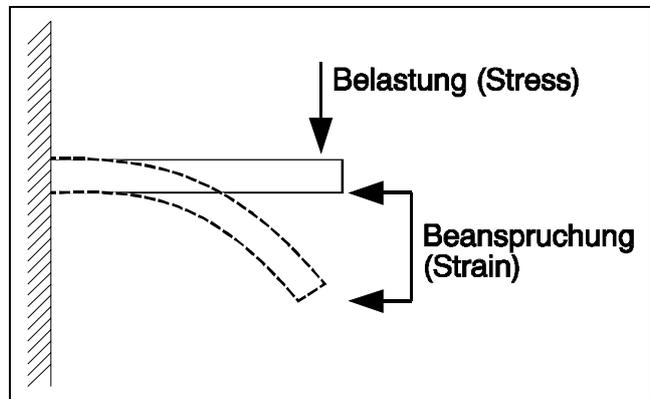


Abb. 6-4: Belastung eines Balkens (z.B. durch ein Gewicht) und seine Beanspruchung (Verbiegung).

Hinweis: Eine Steigerung des Wohlbefindens und eine Erhaltung der Gesundheit kann durch ein Anpassen der Arbeit an die Bedürfnisse des Menschen erreicht werden, da dadurch die Arbeitsbelastung verringert wird.

Hinweis: Durch Training und Ausbildung wird der Mensch von Arbeitsbelastungen weniger beansprucht.

Eine Übersicht über kritische Grössen und Faktoren der Arbeitsbelastung auf den Menschen gibt Tab. 6-1.

Tab. 6-1: Kritische Grössen und Faktoren der Arbeitsbelastung auf den Menschen.

Arbeit Mensch	Arbeitsaufgabe soll Arbeitserfolg ermöglichen	Arbeitsplatz soll Arbeitsaufgabe technisch unterstützen	Arbeitsumwelt soll Arbeitsaufgabe nicht behindern	Arbeitsorganisation soll Arbeitsaufgabe organisatorisch unterstützen
Sinne Informationsaufnahme und Verarbeitung	minimal benötigte Information Informationskomplexität Latenzzeit, Reaktionszeit Aufgabendauer Vielfalt der Informationsarten einzusetzende Sinnesorgane	Gerätegestaltung Informationsauswahl Wartezeiten Informationsvorverarbeitung Informationsgestaltung Geräteauswahl	Lärm Beleuchtung Gerüche Ablenkung, Störung Reizüberflutung Behinderung der Sinnesorgane	Warnhinweise Entwicklungsaufwand Informationspufferung Forschungsaufwand Aufgabenteilung Personenauswahl: Seh-, Hörfähigkeit
Gelenke Bewegungsraum	Bewegungsgenauigkeit Bewegungsbereich Gelenkfestigkeit Bewegungshäufigkeit Bewegungsvielfalt einzusetzende Gelenke	Arbeitsmittelanordnung Arbeitsfeldgrösse, Auflageflächen Dämpfungsvorrichtungen Arbeitsablauf, Ordnung Arbeitsmittelgestaltung Arbeitsmittelauswahl	Erschütterungen Schutzvorrichtungen Vibrationen, Stösse Unordnung Gleichgewichtsanforderung Bewegungsfreiraum	Anlernphase Sicherheitsbestimmungen Arbeitsort Beratung Arbeitsverteilung auf die Mitarbeiter Personenauswahl: Fertigkeit
Muskeln Krafterzeugung	Feinmotorik Kraftbedarf Muskelgeschwindigkeit, Reaktionszeit Aufgabendauer Kräftedynamik, Haltearbeit einzusetzende Muskelgruppen	Werkzeuggestaltung Werkzeugverfügbarkeit, Frachtmittel Mechanisierung Arbeitsweise (stehend, sitzend, ...) Arbeitsplatzgestaltung, -variabilität Werkzeugauswahl	Wärmeisolation Aufgänge (Treppen, Rampen, ...) Unfallgefahr Bewegungsmangel Berufstraditionen Behinderung der Muskulatur	Zutrittsberechtigung Verfügbarkeit von Hilfskräften Achtsamkeit, Sorgfalt Job-Rotation Instruktion Personenauswahl: Kräftigkeit
Körper Energieversorgung	Entbehungen Energiebedarf, Dauerleistungsgrenze Sauerstoffbedarf, Schadstoffabwehr Stoffwechsel Erholungszeitanteil Trainingszustand	Personenaufsicht, Automatisierung Aufgabenwechsel Luftqualitätsüberwachung Arbeitskleidung Arbeitszeitkontrolle Übungsmöglichkeit	Erkrankungsrisiko Verpflegungsmöglichkeit Luftqualität Klima mangelnde Erholungsräumlichkeit mangelnde Fitnessmöglichkeit	medizinische Versorgung Nahrungsangebot Rettungseinrichtungen hygienische Einrichtungen, Reinigung Pausenregelung Personenauswahl: Geschlecht, Alter
Psyche Motivation	Verantwortung Anzahl / Schwierigkeit der Aufgaben Eigeninitiative Arbeitsdauer Dispositionsfreiraum, Monotonie Intelligenz, Bildung	soziale Einordnung Raum-, Arbeitsplatzgestaltung Erfolgskontrolle, Selbständigkeit Planungsinstrumente Arbeitsrhythmus Informationsmöglichkeiten	Betriebsklima Wirtschaftslage Stellenmarkt Erwartungsdruck gelernter ≠ ausgeübter Beruf mangelnde Fortbildungsmöglichkeit	Kooperation Anzahl Mitarbeiter Lohnhöhe, Aufstiegschancen Arbeitszeitstrukturierung, Ferien Aufgabenunabhängigkeit Pers.auswahl: Intelligenz, Erfahrung

Der beste Ansatz ergonomische Erkenntnisse anzuwenden, ist wenn sie bereits im Entwurf eines Geräts oder Arbeitsplatzes berücksichtigt werden. Man spricht dann von konzipierender Ergonomie. Aber auch Verbesserungen nicht optimaler Verhältnisse sind Ziel ergonomischer Arbeit. In diesem Fall handelt es sich um korrigierende Ergonomie. Für beide Arten ergonomischer Tätigkeit muss man die Leistungsfähigkeiten und Bedürfnisse des Menschen kennen. Diese Kenntnis wird an arbeitswissenschaftlichen Hochschulinstituten durch experimentelle Untersuchungen gewonnen.

Konzipierende Ergonomie

Es gibt viele Berichte über Produkte, bei welchen Entwickler und Designer die Bedürfnisse des Menschen nicht berücksichtigt haben. Beispiele sind:

- Zuwenig Beinraum in Lastwagenkabinen um Pedale bedienen zu können,
- Unmöglichkeit gewisse Verkehrssignale aus Fahrererkabinen zu erkennen,
- Steuerungen, welche mit Handschuhen nicht zu bedienen sind,
- unerreichbare Notschalter,
- Farbcodierung von Anzeigen so, dass Warnungen und Gefahrensituationen nicht voneinander zu unterscheiden sind.

Die Entwicklung bzw. das Design von Arbeitssystemen und Produkten ist daher ein Prozess, in den schon früh die Belange der Ergonomie einfließen sollten. Die Benutzbarkeit (Usability) wird nicht in einem einzigen Schritt erreicht, sondern mit einem sich wiederholenden (iterativen) Vorgehen mit Beteiligung der Zielbenutzer:

1. Zieldefinition Aufgaben und Benutzer
2. Funktionelles Layout
3. Konstruktion Prototyp
4. Diskussion Ergonomie
5. Verbesserung Prototyp
6. Test im Usability-Labor an Zielbenutzern (Durchführung: Ergonom und Designer zusammen!)
7. Diskussion Usability mit Ergonom und Benutzer.
8. Produktrevison
9. Feldeinsatz und Test von Markt und Akzeptanz
10. ev. weitere Revision und zurück zu 6 oder 9, sonst Endprodukt

Korrigierende Ergonomie

Die korrigierende Ergonomie beinhaltet eine Analyse des momentan vorhandenen Zustands am Arbeitsplatz. Die Arbeitsplatzanalyse wird mit Hilfe von Checklisten durchgeführt. Durch Messungen und Vergleich mit Grenzwerten und Empfehlungen können Verbesserungen am Arbeitsplatz erarbeitet werden. Wesentliche Elemente einer Beurteilung sind auch die Informationen von den Betroffenen (Fragebogen). Allerdings müssen diese von der Fachperson gewertet und eventuell anders gedeutet werden. Werden von Betroffenen beispielsweise Sehbeschwerden (Asthenopie) auf Eigenschaften des Bildschirms zurückgeführt, könnten die wirklichen Ursachen etwa ungünstige klimatische Bedingungen oder ungenügende Brillenkorrekturen sein.

Unfallverhütung

Eine weitere Einwirkung der Arbeit auf den Menschen sind Unfälle. Die Unfallgefahr belastet den Menschen im allgemeinen nicht, besonders dann, wenn er sie nicht direkt wahrnimmt. Selbstverständlich müssen Sicherheitsvorkehrungen dennoch getroffen werden. Dies

ist Aufgabe der Arbeits- und Umwelthygiene.

Unfälle können entstehen durch:

- **mechanische Einwirkungen** (Zerbersten, Abschleudern, Einziehen, Einhaken, Quetschen, Schneiden, Stechen, Stossen, Schlagen, Kippen, Schleudern, Werfen, Fallen, Rutschen, Ausgleiten, Stolpern, Überfahren, Schürfen)
- **Temperatur** (Verbrühen, Unterkühlen)
- **chemische / biologische Einwirkungen** (Verbrennen, Vergiften, Verätzen, Ersticken, Ertrinken, Infizieren)
- **Druck** (Explodieren, Implodieren, Druckunterschiede z.B. beim Auftauchen aus grosser Tiefe)
- **Überbelastung der Gelenke** (Verrenken, Verstauchen, Umknicken)
- **Elektrizität** (elektrischen Stromfluss, Blitzschlag, elektrostatische Aufladung)
- **Strahlung** (Röntgen-, Laser-, Mikrowellen-, Infrarot-, Ultraviolett-, radioaktive Strahlung)
- **Licht, Schall** (Blendung, Knall)

Zum Beispiel ist ein über einem Fussweg liegendes Kabel eine Stolperstelle, die eine Gefahr darstellt. Zur Unfallverhütung kann man entweder das Kabel entfernen oder den Menschen durch eine Absperrung von dieser Stelle fernhalten.

6.2 Anthropometrie

Die Anthropometrie ist die Wissenschaft, die sich mit den Dimensionen des Menschen befasst. Ihre Ergebnisse werden für die Dimensionierung von Gegenständen, Arbeitsplätzen und Räumen verwendet.

Statische Anthropometrie

Es gibt die geometrischen Masse des Menschen wie z.B. die Körperhöhe, den Augenabstand, den Winkelbereich des Ellenbogen oder des Hüftgelenkes. Diese Betrachtungsweise soll kurz als statische Anthropometrie bezeichnet werden. Die Werte erlauben uns zum Beispiel die Verstellbreite eines höhenverstellbaren Stuhls zu bestimmen oder auch den maximalen Greifraum an einem Arbeitsplatz.

Um Arbeitsplätze und Produkte an den Körperbau des Menschen anpassen zu können, müssen zuvor die Körpermasse ermittelt werden. Da grosse individuelle Unterschiede auftreten, müssen die Körpermasse statistisch ausgewertet werden. Zudem ist es je nach Anwendungszweck sinnvoll, die Masse verschiedener Personengruppen (Geschlecht, Alter, Volksgruppen etc.) separat zu behandeln. So haben etwa Italiener eine geringere Körpergrösse als Holländer.

Mittelwert und Standardabweichung

Eine naheliegende Idee ist, die Mittelwerte der Körperabmessungen als Grundlage der Entwicklung zu verwenden. Doch ist das wirklich eine gute Lösung? Es seien folgende Situationen betrachtet:

- a) Wie hoch soll eine Tür konstruiert werden? Nähme man die mittlere Körpergrösse als Massstab, würden sich rund 50% der Personen bücken müssen (nachdem sie sich evtl. erst den Kopf angeschlagen haben). Wie hoch soll die Türhöhe sein, wenn gefordert wird, dass 99% der Personen ohne Bücken hindurchgelangen?
- b) Wie hoch sollen Haltestangen im Tram angebracht werden? Sie sollen für möglichst viele Fahrgäste erreichbar sein, aber man will dennoch unter ihnen durchgehen können.
- c) In welcher Distanz sind die Stellteile in der Fahrerkabine eines Autos anzuordnen? Damit jede Person daran reichen kann, sind hier die kleinen Personen massgeblich.
- d) Wie hoch soll ein Tisch sein, an dem stehend gearbeitet wird? Hier ist es richtig, sich am Mittelwert zu orientieren. Dennoch werden im besten Fall 70% der Personen mit dieser Tischhöhe zufrieden sein. In welchem Bereich muss der Tisch höhenverstellbar sein, damit 95% der Nutzer zufrieden sind?

Man ist also oft auch an extremen Merkmalen interessiert ist. Natürlich macht es keinen Sinn, in solchen Fällen den grössten Mann und die kleinste Frau in der Weltbevölkerung zu suchen und als Massstab zu nehmen. Es interessiert vielmehr die Häufigkeitsverteilung der Merkmale in der Zielgruppe (Abb. 6-5). In der dargestellten Gruppe waren beispielsweise etwa 23% der Frauen kleiner als 151 cm (10% + 5% + 5% + 3%).

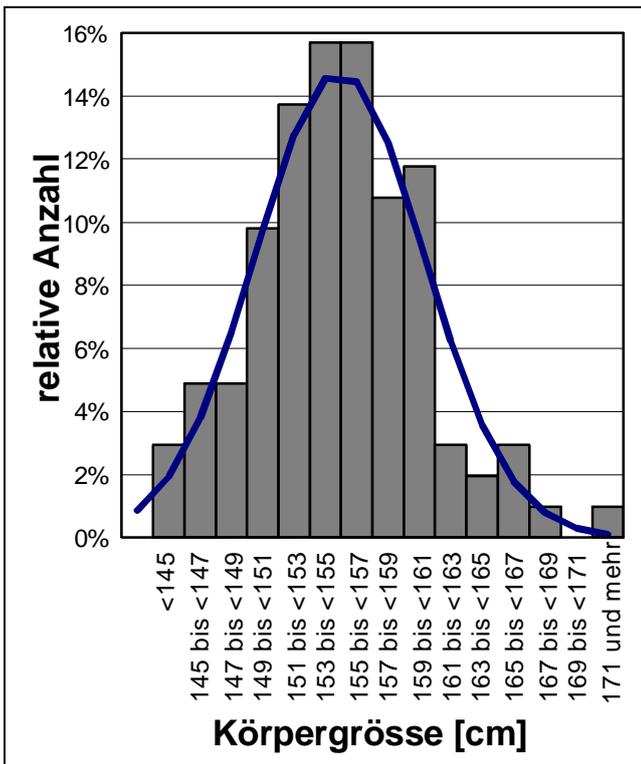


Abb. 6-5: Häufigkeitsverteilung der Körpergrösse von 102 **südländischen** Frauen und angepasste Normalverteilung mit Mittelwert 155 cm und Standardabweichung 5.4 cm (Burandt 1978).

Damit auch Zwischenwerte ermittelt werden können, werden die Daten an eine Normalverteilung angepasst. Das Maximum der Normalverteilung befindet sich beim Mittelwert, ihre Breite wird durch die Standardabweichung bestimmt.

Achtung: Es darf nicht jedes Mal vorausgesetzt werden, dass die Messwerte symmetrisch um den Mittelwert verteilt sind und dass eine Normalverteilung die passende Modellverteilung ist.

Mit Hilfe einer angepassten Verteilungskurve lassen sich folgende Fragestellungen beantworten:

- Wo liegen die Grenzen des Bereiches, in dem 90% der Körperlängen enthalten sind und der die grössten und kleinsten Körperlängen zu je 5% ausschliesst? (Antwort in diesem Beispiel: 146 cm und 164 cm).

Median und Perzentile

Der Wert, bei welchem 50% der Personen darüber und 50% darunter liegen, heisst Median. Wenn die Verteilungskurve symmetrisch ist, entspricht er dem Mittelwert. Der Wert bei welchem 95% der Personen darunter liegen heisst 95. Perzentil. Entsprechend gibt es auch andere Perzentilwerte wie z.B. das 5. Perzentil. Das 25. Perzentil heisst auch unteres Quartil, da es das untere Viertel der Personen beinhaltet; das 50. Perzentil entspricht dem Median, das 75. Perzentil dem oberen Quartil.

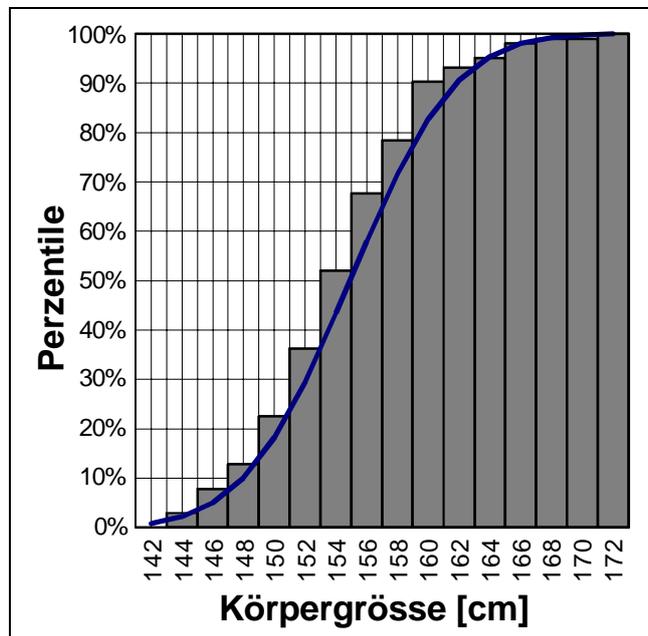


Abb. 6-6: Perzentile der Körpergrössen von **südländischen** Frauen mit kumulierten Daten und kumulativer Verteilung.

Im Prinzip lassen sich die Perzentile aus der Verteilung gemäss Abb. 6-5 herauslesen. Diese Arbeit kann man sich aber vereinfachen, indem

man in einem ersten Schritt die Häufigkeiten kumuliert (Abb. 6-6).

Aus der Kurve in Abb. 6-6 ist ersichtlich, dass das 10. Perzentil 148 cm beträgt, das heisst, 10% der Frauen sind kleiner als 148 cm. Das 90. Perzentil ist 162 cm, das heisst, 90% der Frauen sind kleiner als 162 cm. Mit Hilfe der kumulierten Häufigkeitsverteilung lassen sich folgende Fragestellungen beantworten:

- 95% der Arbeiterinnen sind kleiner als wie viel cm? (Antwort in diesem Beispiel: 164 cm).
- Wie gross ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine der Arbeiterinnen kleiner als 152 cm ist? (Antwort: 30%).
- Ein Durchgang habe eine lichte Höhe von 158 cm. Wie viele der Arbeiterinnen (in %) werden darin aufrecht (ohne Schuhe) stehen können? (Antwort: etwa 71%).

In ergonomischen Tabellen werden oft das 5. und das 95. Perzentil sowie der Median angegeben.

Hinweis: Anthropometrische Masse können nicht beliebig addiert werden. Es gibt z.B. Personen mit einem langen Oberkörper und kurzen Beinen und umgekehrt. Differenziertere Daten liefert z.B. das Programm „PeopleSize“. Dort kann neben dem Alter auch die ethnische Herkunft vorgegeben werden.

Funktionelle Anthropometrie

(nach einem Skript von Prof. H. Krueger)

Nicht jede Möglichkeit, die mechanisch theoretisch denkbar ist, wird vom Menschen tatsächlich genutzt. Personen bewegen sich in ihrer Umwelt. Dadurch ergeben sich Beschränkungen der mit der „statischen“ Anthropometrie gewonnenen Daten. Wir definieren deshalb die an den Funktionen von Menschen orientierte Anthropometrie als „funktionelle“ Anthropometrie. Folgende Faktoren bestimmen den tatsächlich genutzten Bewegungsraum:

- ererbte Bewegungsmuster
- erworbenes Verhalten,
- energetischer Aufwand (Ökonomie)
- nervöser Aufwand (Ökologie),
- mögliche Kraftentwicklung, Leistung
- schmerzhaft Gelenkstellungen,
- interne Kräfte (Haltearbeit)
- gesundheitlich nachteilige Auswirkungen

Einschränkungen des optimalen Bewegungsraumes im Hinblick auf Tätigkeiten führt im allgemeinen nicht nur zu einer verminderten Arbeitsleistung, sondern erhöht auch die Unfallgefahr und führt häufig zu gesundheitlichen Einschränkungen. Im Folgenden werden Beispiele aufgezeigt, die zeigen, wie sich die gestaltete Umgebung des Menschen auf sein Verhalten, seinen Energieverbrauch, seine Kraftentfaltung, sein Komfortempfinden und auf biomechanische Kräfte im Körperinneren auswirkt.

Verhalten

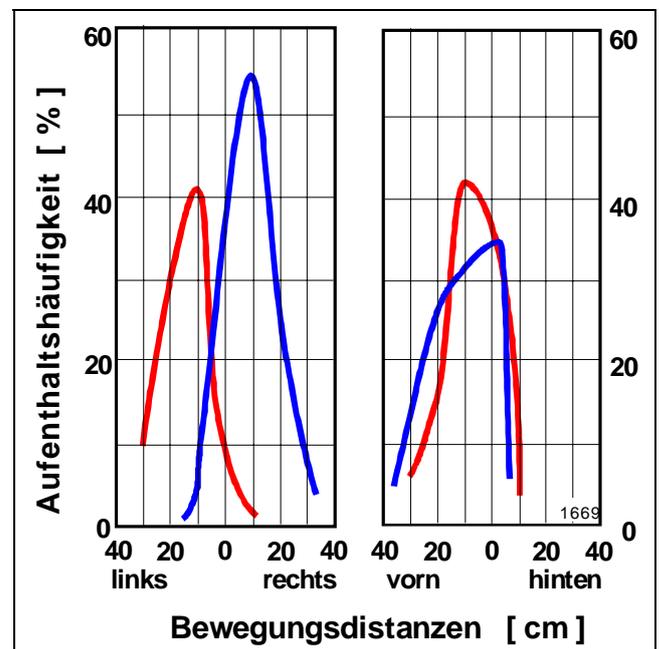


Abb. 6-7: Bewegungsraum der Füße bei langandauernder Schreibtischtätigkeit für den linken und den rechten Fuss.

Die uneingeschränkte Bewegungsfläche der Füße beim Sitzen hat nach Abb. 6-7 eine Ausdehnung von 70 cm (Breite) x 60 cm (Tiefe).

Hinzugerechnet werden muss die Breite und die Länge der Füsse (Schuhe).

Hinweis: Jede Fussstütze mit kleinerer Auflagefläche ist unzureichend und potentiell gesundheitsgefährdend.

Energieverbrauch

Die Probanden mussten im Sitzen in vorgegebene Richtungen wiederholt Gewichte von 1 kg versetzen. Ohne Sichtkontrolle ist die Richtung von 60° bezüglich Energieverbrauch am günstigsten (Abb. 6-8). Der Energieverbrauch kann über den Sauerstoffverbrauch (O₂-Verbrauch) in der Atemluft bestimmt werden.

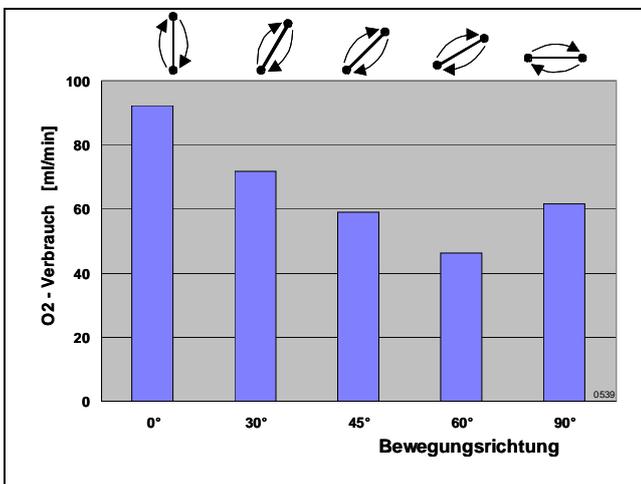


Abb. 6-8: Energieverbrauch (gemessen als Sauerstoffverbrauch) bei verschiedenen Bewegungsrichtungen der Hand bei Transportaufgaben im Greifraum.

Hinweis: Bei der Einrichtung von Montageplätzen spielt die Positionierung der Vorratsbehälter im Hinblick auf den physiologischen Arbeitsaufwand (Energieeinsatz) eine wichtige Rolle.

Unterschiedliche Haltungen des Oberarms ergeben unterschiedlichen Arbeitsumsatz (Energieverbrauch) und resultieren in unterschiedlicher Arbeitsleistung (Abb. 6-9).

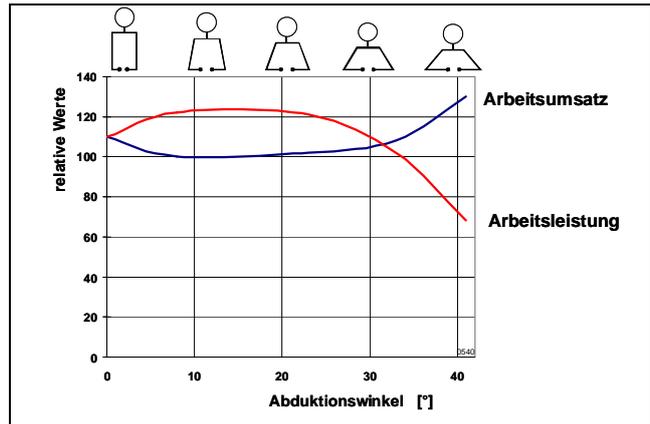


Abb. 6-9: Energieverbrauch (Arbeitsumsatz) und Leistung bei verschiedenen Haltungen (Abduktionswinkel) des Oberarms beim Verpacken von Lebensmitteln.

Hinweis: Es gibt einen Bereich optimaler Abduktionswinkel bei der die Leistung optimal ist und gleichzeitig der physiologische Aufwand minimal ist.

Für eine Treppe gibt es einen optimalen Neigungswinkel und eine optimale Auftrittstiefe (Abb. 6-10). In alten Treppenhäusern geben die „Einschleifspuren“ einen Hinweis auf günstige Dimensionen.

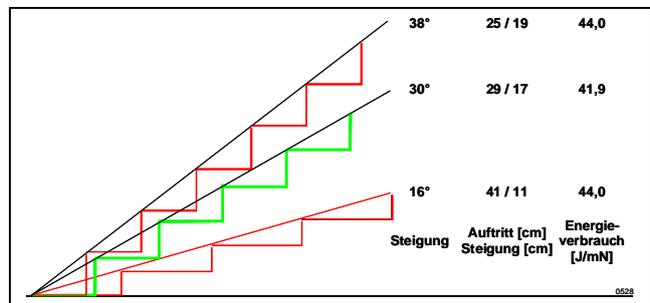


Abb. 6-10: Energieverbrauch bei verschiedenen Neigungswinkeln und Auftrittstiefen von Treppen.

Hinweis: Nicht nur der physiologische Aufwand (Energieverbrauch) ist bedeutend, sondern auch der Aspekt der Unfallgefahr. Treppen, die das natürliche Schrittmuster nicht beachten sind unfallgefährdend.

Die Leistung von Probanden an einem Fahrradergometer hängt von der Tretgeschwindigkeit ab (Abb. 6-11). Ergometer sind Arbeitsgeräte, mit denen auf einfache Art körperliche Arbeit im Labor simuliert wird (Abb. 6-12).

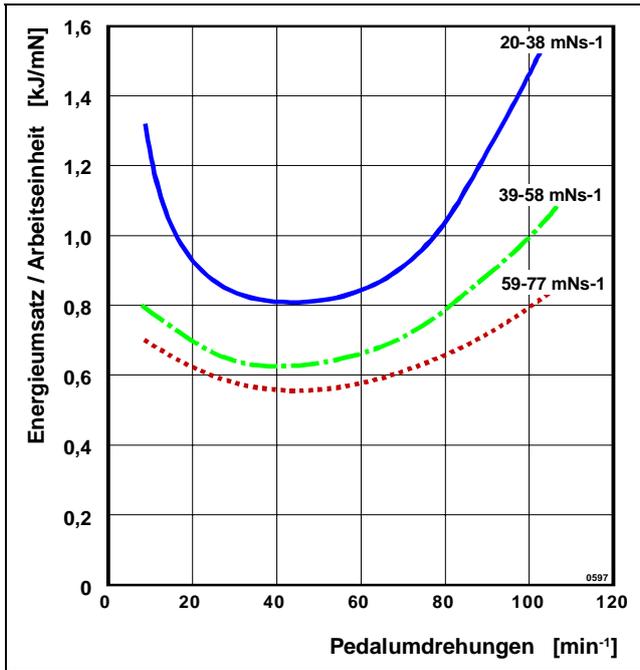


Abb. 6-11: Energieverbrauch bei Fahrradergometerarbeit.



Abb. 6-12: Fahrradergometer mit PC-Schnittstelle zur Aufzeichnung der Leistung und zur Simulation unterschiedlicher Belastungsprofile.

Hinweis: Die dynamische gemessene Muskelkraft unterscheidet sich deutlich von der statisch gemessenen. Im allgemeinen ist die dynamische grösser als die statische.

Fähigkeit zur Kraftentwicklung

Welche Kräfte der Mensch entwickeln kann, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Abb. 6-13 zeigt als Beispiel die Auftretenshäufigkeit („Frequenz“) der Kräfte für das Heben von Lasten getrennt nach Körperhaltung bzw. verwendeter Muskelgruppe (Arme, Beine, Rücken) und nach Geschlecht.

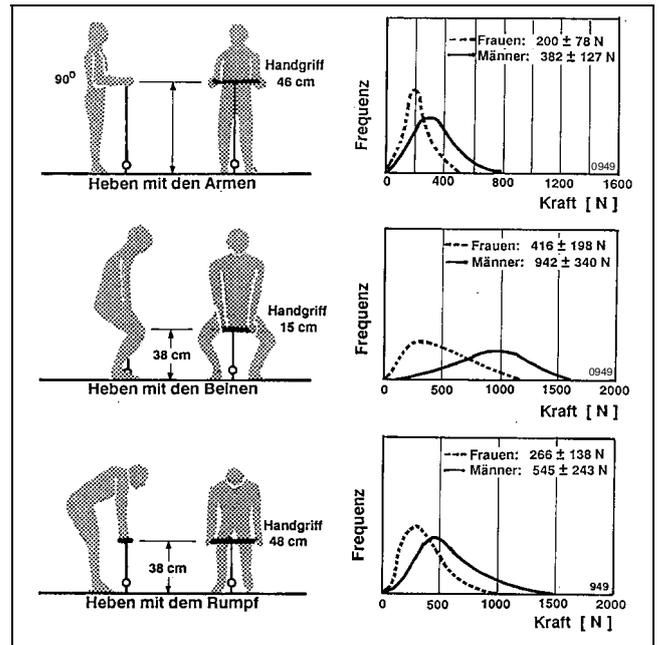


Abb. 6-13: Kraftverteilung von Armen, Beinen und Rücken im Vergleich.

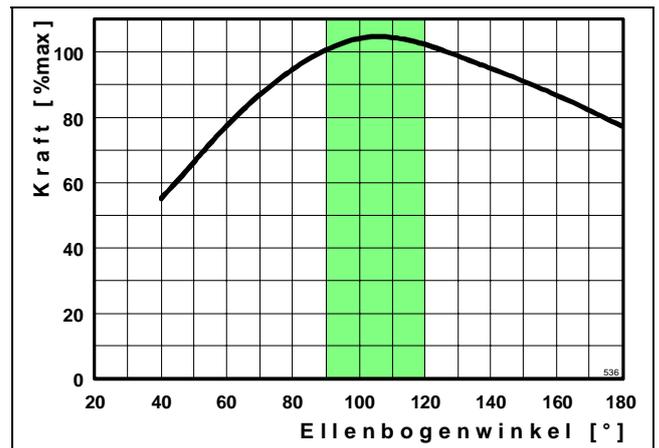


Abb. 6-14: Kraftentwicklung in Abhängigkeit des Ellenbogenwinkels.

Für jedes Gelenk gibt es einen optimalen Winkelbereich, in dem maximale Kraft erreicht wird (Abb. 6-14). Für das Ellenbogengelenk wird die

maximale Beugekraft (Heben) zwischen 90 und 120° erreicht.

Die mit den Beinen aufgebrauchte maximale Druckkraft mit rückwärtiger Abstützung des Beckens ändert sich mit der Richtung der ausgeübten Kraft. Ein wesentliches Element ist die Rücken- bzw. die Beckenstütze, die erst die volle Entfaltung der Beinkraft über das eigene Körpergewicht hinaus erlaubt (Abb. 6-15).

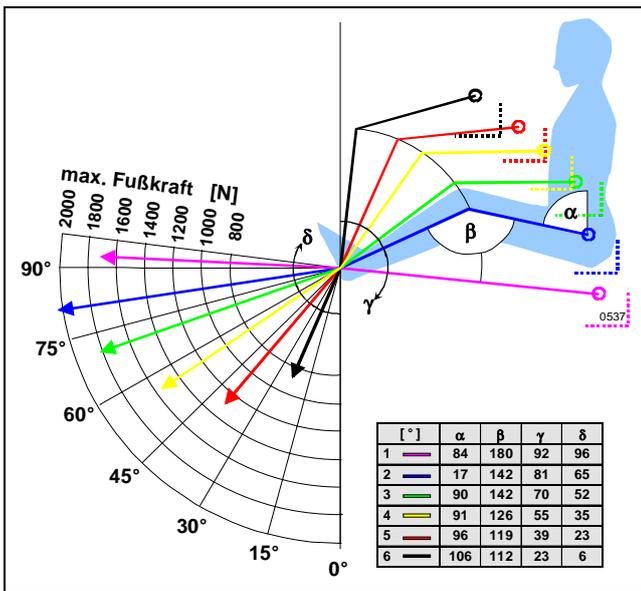


Abb. 6-15: Fusskraft bei verschiedenen Sitzpositionen.

Diskomfort, Schmerzen

Die Wahl des Werkzeuges bestimmt die Handhaltung. Eine ungünstige Abduktion (Verdrehung nach Aussen) des Handgelenkes über längere Zeit verursacht bei einem Teil der Benutzer Beschwerden im Bereich der Handwurzelknochen (Abb. 6-16). Bei ungünstiger Arbeitshaltung entwickeln sich nicht nur Beschwerden, sondern Krankheiten mit einer Einschränkung der Arbeitsfähigkeit. Dieses kann in einfachen Fällen eine Sehnenscheidenentzündung (Tendosynovitis) oder eine Entzündung eines Knochenfortsatzes (Epicondylitis, z.B. Tennis-Ellenbogen) und in schweren Fällen ein Karpaltunnel-Syndrom sein (Abb. 6-17).

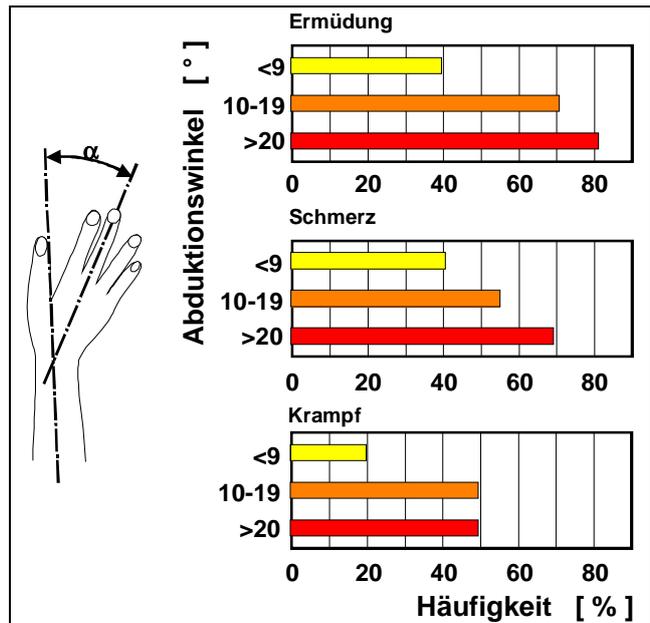


Abb. 6-16: Häufigkeit von Symptomen im Handbereich bei verschiedenen Abduktionswinkeln der Hand (n. LÄUBLI).

Hinweis: Bedienen einer Tastatur mit abgewinkelten Handgelenken ist gesundheitsschädlich.

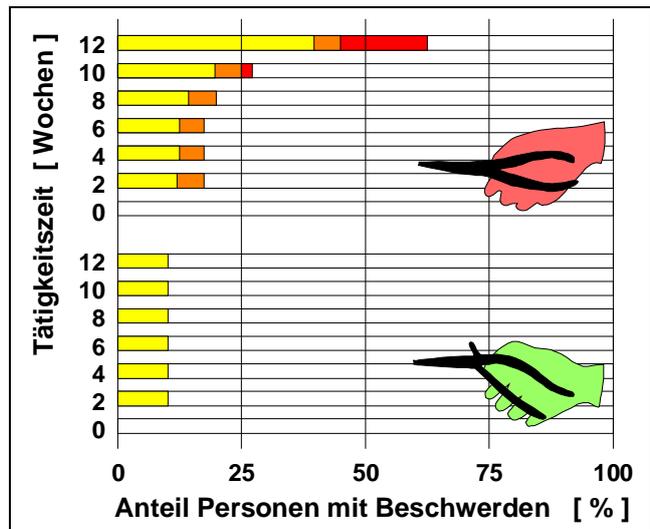


Abb. 6-17: Erkrankungshäufigkeiten bei unterschiedlich geformten Zangen. Linker Säulenteil: Tendosynovitis, mittlerer Säulenteil: Epicondylitis, rechter Säulenteil: Karpaltunnel-Syndrom (für die Bezeichnungen siehe Text).

Hinweis: Die Wahl eines Werkzeuges sollte nicht nur nach technischen Gesichtspunkt erfolgen. In die finanziellen Gesamtkosten gehen auch die physiologischen Kosten ein, die hier zu Fehlzeiten am Arbeitsplatz führen.

Interne Kräfte (Biomechanik)

Bei einer aufrechten Haltung (Abb. 6-18 links, Blick geradeaus leicht nach vorn geneigt) benötigt deutlich weniger Kraft als eine nach vorn gebeugte Haltung (Abb. 6-18 rechts, Blick auf die Tischoberfläche gerichtet). Die nach unten gerichteten Pfeile sind ein Mass für die erforderliche muskuläre Kraft, die das Gewicht des Kopfes bzw. des Rumpfes ausbalanciert. Eine vorgebeugte Haltung belastet zusätzlich die Lendenwirbelsäule, wenn die Arme nicht aufgestützt werden können.

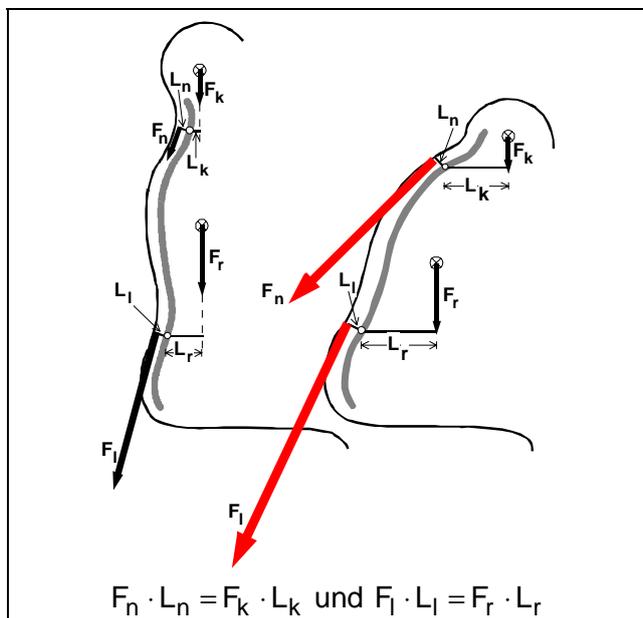


Abb. 6-18: Die Kopfhaltung bestimmt massgebend die Belastung der Halswirbelsäule

Eine Zunahme des Körpergewichtes bedeutet eine mehrfache Zunahme der muskulären Haltekraft und damit der Belastung der Wirbelsäule. Die Verlagerung des Schwerpunktes nach vorn bewirkt eine zusätzliche Vergrösserung des physiologischen Aufwandes (Abb. 6-19). Auch hier müssen qualitativ die Drehmomente, die aus Belastung (Körpergewicht M_1 und Hebelarm L_1 bzw. M_2 und L_2 nach Gewichtszunahme) und muskulärer Haltekraft (Kraft der Rückenmuskulatur m_1 bzw. m_2) gleich gross sein. Es gilt:

$$L_1 \cdot M_1 = l_1 \cdot m_1 \text{ bzw. } L_2 \cdot M_2 = l_2 \cdot m_2 .$$

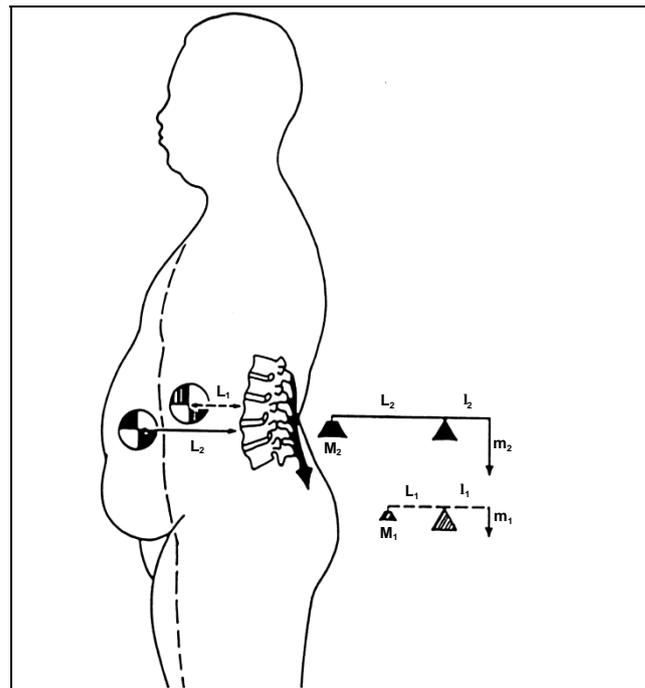


Abb. 6-19: Bei der Betrachtung darf der interne physiologische Aufwand für Körperhaltungen nicht vernachlässigt werden.

Dabei ist l_1 bzw. l_2 der Abstand des Angriffspunktes der Rückenmuskulatur von der Achse der Wirbelsäule.

Anthropometrische Daten

Anthropometrische Messungen werden unter streng definierten Bedingungen durchgeführt. Sie weisen immer eine Verteilung auf. Um sie zu bestimmen, müssen verschiedene Randbedingungen beachtet werden:

- genaue Definition des Masses
- genaue Definition des Probandenkollektivs (Alter, Geschlecht, Volkszugehörigkeit, ...)
- genaue Definition der Messbedingungen (Temperatur, Ernährungszustand, Tageszeit)
- Festlegung der Messgenauigkeit.

Die dabei gefundenen Werte sind nur für die originalen Situationen und Bedingungen typisch (repräsentativ). Beispiele sind in Abb. 6-20 / Tab. 6-2 und in Abb. 6-21 / Tab. 6-3 dargestellt.

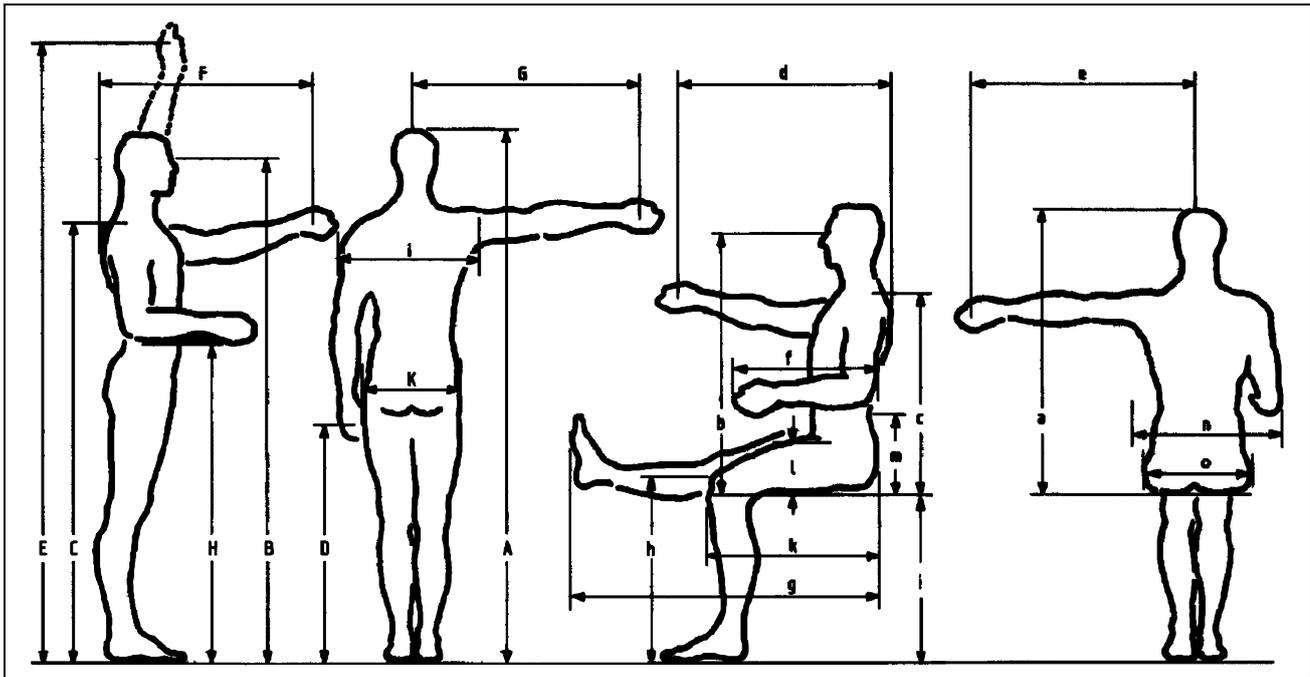


Abb. 6-20: Vermassungsvorlage Gliedermasse

Tab. 6-2: Gliedermasse einheimischer Arbeiter in cm (nach Burandt 1978).

Perzentile:	Männer			Frauen			Abweichung durch Bewegung
	5.	50.	95.	5.	50.	95.	
Stehende Körperhaltung							
A Körperlänge	162	172	182	150	160	170	-1%
B Augenhöhe.....	152	162	172	140	150	160	-2%
C Schulterhöhe.....	132	141	150	121	131	141	-2%
D Reichhöhe nach unten bis Faustachse	69	75	81	64	70	76	-5%
E Reichhöhe nach oben bis Faustachse	192	206	220	172	186	200	-2%
F Reichweite nach vorne ohne Schultervordrehung ..	73	80	87	68	75	82	+5%
F Reichweite nach vorne mit Schultervordrehung	84	92	100	74	82	90	+5%
G Reichweite zur Seite bis Faustachse	73	80	87	67	74	81	+5%
H Ellenbogenhöhe	98	106	114	88	95	102	-1%
I Schulterbreite.....	41	45	49	36	41	46	
K Hüftbreite	31	35	39	33	37	41	
Sitzende Körperhaltung							
a Sitzhöhe.....	85	90	95	80	85	90	-35%
b Augenhöhe.....	74	79	84	69	74	79	-35%
c Schulterhöhe.....	54	59	64	48	54	60	-15%
d Reichweite nach vorne ohne Schultervordrehung ..	73	80	87	68	75	82	+25%
e Reichweite zur Seite bis Faustachse	74	81	88	67	74	81	+20%
f Unterarmlänge bis Fingerspitze	44	47	50	40	43	46	
g Beinlänge: Kreuzbein-Sohle	98	107	116	86	100	114	
h Kniehöhe.....	51	55	59	43	49	55	
i Unterschenkelhöhle bis Kniekehle	40	43	46	36	39	42	
k Oberschenkellänge	55	59	63	53	57	61	
l Oberschenkelstärke.....	11	14	17	11	14	17	
m Ellenbogenhöhe über Sitzfläche	19	23	27	19	23	27	-30%
n Ellenbogen-Aussenbreite.....	38	44	50	33	40	47	
o Gesässbreite	33	36	39	33	37	41	

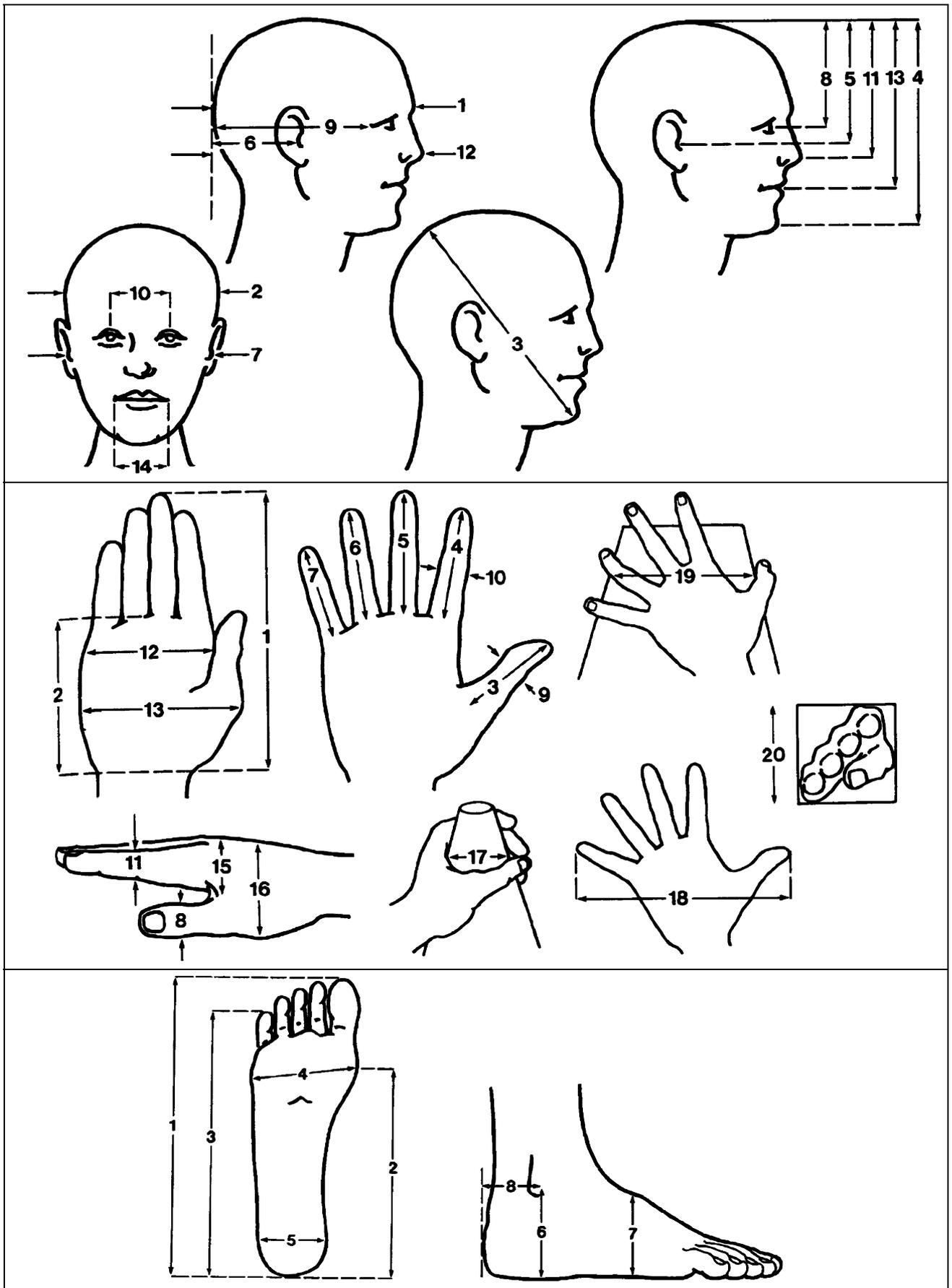


Abb. 6-21: Vermassungsvorlage Körperteile

Tab. 6-3: Abmessungen von Körperteilen **in mm** (nach Pheasant 1988).

	Männer			Frauen			Notizen
	5.	50.	95.	5.	50.	95.	
Kopf							
1 Kopflänge	180	195	205	165	180	190	
2 Kopfbreite	145	155	165	135	145	155	
3 Grösster Durchmesser über Kinn	240	255	265	225	235	245	
4 Kinn bis Scheitel	205	225	240	200	220	240	
5 Ohr bis Kopfoberseite.....	115	125	135	110	125	135	
6 Ohr bis Kopfhinterseite.....	90	100	115	85	100	115	
7 Jochbogenbreite	125	135	145	120	130	135	
8 Auge bis Scheitel	105	115	125	100	115	130	
9 Auge bis Kopfhinterseite	160	170	185	145	160	175	
10 Pupillenabstand	55	60	70	55	60	65	
11 Nase bis Scheitel	130	150	165	125	145	165	
12 Nase bis Kopfhinterseite (Kopftiefe).....	205	220	235	190	205	220	
13 Mund bis Scheitel.....	165	180	195	155	170	190	
14 Lippenlänge	40	50	55	35	45	50	
Hand							
1 Handlänge	173	189	205	159	174	189	
2 Länge der Handfläche.....	98	107	116	89	97	105	
3 Länge des Daumens	44	51	58	40	47	53	
4 Länge des Zeigefingers.....	64	72	79	60	67	74	
5 Länge des Mittelfingers	76	83	90	69	77	84	
6 Länge des Ringfingers	65	72	80	59	66	73	
7 Länge des kleinen Fingers	48	55	63	43	50	57	
8 Breite des Daumens.....	20	23	26	17	19	21	
9 Dicke des Daumens.....	19	22	24	15	18	20	
10 Breite des Zeigefingers	19	21	23	16	18	20	
11 Dicke des Zeigefingers.....	17	19	21	14	16	18	
12 Handbreite (über Fingergrundgelenk).....	78	87	95	69	76	83	
13 Handbreite (über Daumengrundgelenk).....	97	105	114	84	92	99	
14 Handbreite (Minimum).....	71	81	91	63	71	79	
15 Dicke der Hand (bei Fingergrundgelenk)	27	33	38	24	28	33	
16 Dicke der Hand (mit Daumen)	44	51	58	40	45	50	
17 grösster Greifdurchmesser	45	52	59	43	48	53	
18 grösste Handspanne	178	206	234	165	190	215	
19 grösste nutzbare Handspanne.....	122	142	162	109	127	145	
20 kleinster quadratischer Durchlass.....	56	66	76	50	58	67	
Fuss							
1 Fusslänge	240	265	285	215	235	255	
2 Ristlänge.....	175	190	210	160	175	190	
3 Länge bis kleiner Zeh.....	195	215	235	180	195	210	
4 Fussbreite.....	85	95	110	80	90	100	
5 Fersenbreite.....	60	70	75	50	55	65	
6 Knöchelhöhe.....	60	70	85	55	65	75	
7 Fussrückenhöhe	70	80	90	60	70	80	
8 horizontaler Fersen-Knöchel-Abstand.....	50	55	60	45	50	55	

In der Literatur zu findende Daten müssen von Zeit zu Zeit wieder erneut bestimmt werden. So vergrössert sich zum Beispiel in unserem Kulturkreis die Körperlänge (Akzeleration). Die Akzeleration liegt zwischen 1.4 mm bei der 5. Per-

zentil-Frau und 2.3 mm pro Jahr beim 95. Perzentil-Mann.

Es ist dringend erforderlich, alle anthropometrischen Daten aus Veröffentlichungen vor der

Anwendung auf ihre Übertragbarkeit zum gegebenen Problem zu überprüfen. Dazu einige Beispiele (nach Burandt, 1978):

- Mit Körpermassen von Rekruten sollte man nicht die Ausstattung für Altersheime dimensionieren...
- Tabellen von 1888 sind zum Design für Menschen von heute unbrauchbar...
- Für Arbeiter, die aus dem fernen Süden kommen, sind Körpermasse hiesiger Arbeiter nicht repräsentativ...
- Im Polaranzug ist der Mensch voluminöser als im Badeanzug...
- Ein sehr dünner Mann und ein überaus dicker Mann können gleich gross sein...
- Es gibt keinen Menschen, der in allen anthropometrischen Merkmalen durchschnittlich ist...
- Wird ein grösserer Gegenstand im Hinblick auf eine Frau „durchschnittlicher“ Grösse dimensioniert, kann er für 15% aller Frauen zu klein und für 15% zu gross sein...
- Die Augenhöhe über der Sitzfläche kann bei zusammengesackter Sitzhaltung während einer Montage kleiner Teile bis 40% unter der Höhe liegen, die an der aufrechten, anthropometrischen Standardhaltung festzustellen ist...
- Tischhöhen, die für Arbeiten an Schreibmaschinen ermittelt wurden, können für Bildschirmarbeitstische nicht empfohlen werden...
- Wenn Greifraumabmessungen und -lagen in Flugzeugkesselmodellen für Piloten definiert wurden, eignen sie sich nicht für die Dimensionierung eines LKW-Fahrerplatzes.

Hinweis: Anthropometrische Tabellen sind deshalb nur mit gebotener Umsicht auf andere Gegebenheiten übertragbar.

Für den Konstrukteur oder den Designer gibt es folgende Hilfsmittel (statische Anthropometrie):

- Normen (z.B. für Körpermasse: DIN 33 402, DIN 33 408 oder DIN 33 416)
- Ergonomiebücher mit Listen der entsprechenden Körpermasse und deren Streuung.
- Computerprogramme welche Perzentile berechnen können (z.B. PeopleSize, Open Ergonomics Ltd)
- Schablonen (z.B.: <http://www.iwa.de>, siehe auch Abb. 6-22)
- Puppen / Drahtfiguren: Für die Konstruktion wurden und werden Normfiguren aus Kunststoff in Originalgrösse oder mit vorgegebenem Verkleinerungsstabsstab eingesetzt.
- CAD-Programme: Heute treten an die Stelle von Puppen mehr und mehr Computer generierte 3-dimensionale Figuren, die sich teilweise in ihren Abmessungen realen Personen anpassen lassen (Abb. 6-23). Ganze Bewegungsräume können simuliert werden. Es resultieren Angaben über komfortable Stellungen der Extremitäten. CAD-Modelle sind z.B.: Ramsis, Anthropos, Madymo, Mannequin, Sammie, Tommi, Werner.

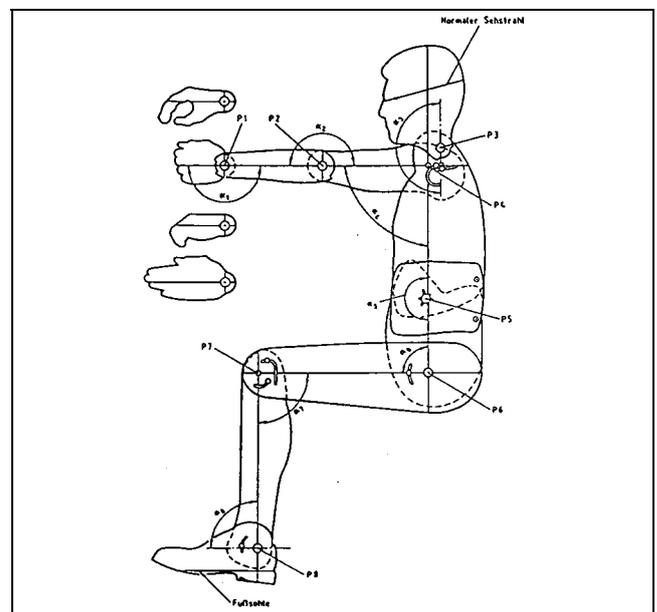


Abb. 6-22: Anthropometrische Schablone für einen sitzenden Menschen („Kieler Puppe“).

Da es keinen Standardmenschen gibt, sind solche Hilfsmittel ähnlich wie die Tabellen mit Vorsicht zu verwenden. Zudem ist der Mensch kein

statisches Wesen. Auch dynamische Bewegungen müssen durch Bewegungsanalysen erfasst werden (funktionelle Anthropometrie).

Aktuell wird an Verfahren gearbeitet, die eine automatische Übertragung von Kenngrößen realer Personen in CAD Modelle erlauben, welche sich bewegen und Handlungen durchführen können. Ein sehr weit entwickeltes System mit zugehörigem „Body-Scanner“ ist das von der Automobilindustrie initiierte System Ramsis. Der Bodyscanner erlaubt die Adaptation der Simulation an echte Personen (vgl. Abb. 6-24, Abb. 6-25 und Abb. 6-26).

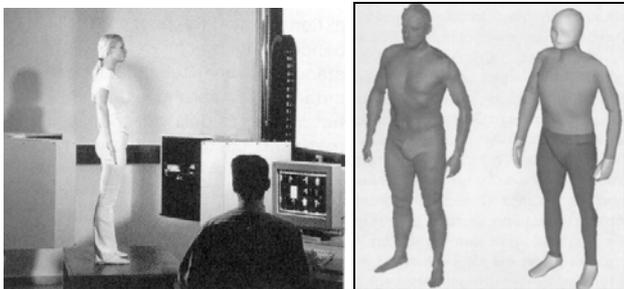


Abb. 6-23: Beispiel eines Menschenmodells: Links: Automatisierte anthropometrische Vermessung einer Person zur Anpassung der CAD-Figur. Rechts: Mann im Original und als CAD-Modell.

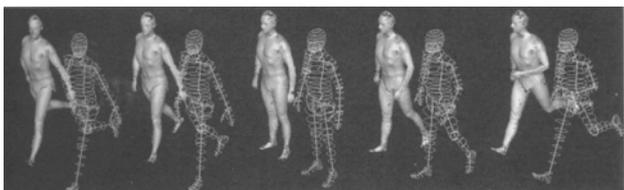


Abb. 6-24: Bewegungsstudie mit der zugehörigen automatisierten Übertragung der Bewegungsdaten auf ein CAD Modell.

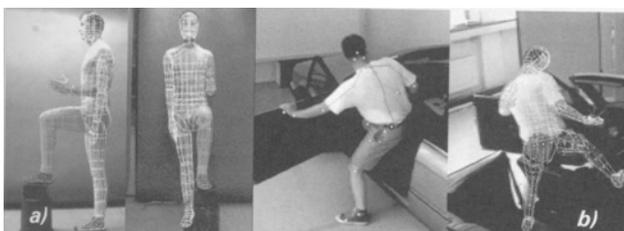


Abb. 6-25: Anpassung von CAD Modellen an die Realität: a): Aufnahme der statischen Grundgrößen aus zwei Richtungen, welche um 90° versetzt sind. b): Übernahme eines Bewegungsvorganges (Einsteigen in ein Auto).

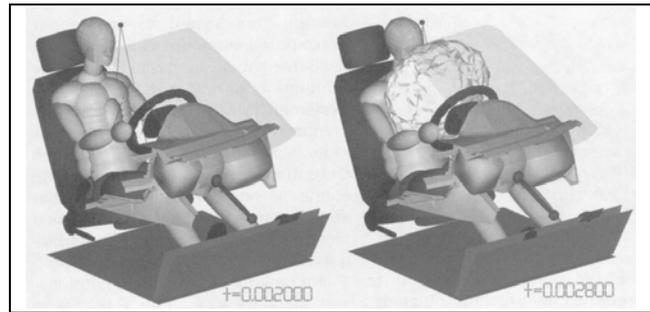


Abb. 6-26: Airbag Simulation.

Weitere Messgrößen

Ähnliche Untersuchungen wie die Längen-, Winkel- Kraft- und Energiemessungen lassen sich auch für andere Größen durchführen. Zum Beispiel kann mit einer Fragebogenaktion herausgefunden werden, wie hell eine Beleuchtung sein soll, damit 95% der Befragten sie nicht als zu dunkel einstufen. Ausser für die menschliche Leistungsfähigkeit interessiert man sich auch für die Beanspruchung, welche in einem Menschen arbeitsbedingt hervorgerufen wird. Dazu werden physiologische Größen gemessen, welche eine indirekte Abschätzung für die Stärke der Beanspruchung liefern. Beispiele für solche Größen sind der Puls, der elektrische Widerstand der Haut, die Häufigkeit des Lidenschlags und die Geschwindigkeit in Reaktionstests. Messungen dieser Art geben nur Anhaltspunkte für die Beanspruchung und sind je nach der dazugehörigen Belastung mehr oder weniger aussagekräftig. Sie werden daher häufig kombiniert eingesetzt und mit einer zusätzlichen direkten Befragung zur Beanspruchung ergänzt. Mit solchen Untersuchungen kann getestet werden, welchen von zwei oder mehr möglichen Geräten oder Arbeitsmethoden der Vorzug zu geben ist, um die Beanspruchung und damit auch die Ermüdung gering zu halten.

6.3 Arbeitsplatzgestaltung

Eine ergonomische Regel besagt, dass Arbeitsplätze und Werkzeuge so auszulegen sind, dass sie von mindestens 90% der in Frage kommenden Zielpersonen ohne Schwierigkeiten benutzbar sind. Für die anderen 10% der Personen sind unter Umständen spezielle Lösungen oder teure Spezialanfertigungen notwendig.

Im konkreten Fall eines Arbeitsplatzes muss daher abgeklärt werden, welche Umstände seiner Benutzung Grenzen setzen. Eine Möglichkeit ist, den Sehraum und den Greifraum zu analysieren. Das heisst, zu ermitteln, welche Stellen im Raum gut, ohne grosse Anstrengung zu sehen bzw. zu greifen sind. Für gewisse Arbeiten ist auch der Beinraum zu beachten. Dabei muss immer nach der vorgesehenen Arbeitshaltung (Gehen, Stehen, Sitzen, Liegen etc.) unterschieden werden.

Arbeitshaltung

Jeder Arbeitsplatz muss individuell den physischen Bedürfnissen angepasst werden können.

Hinweis: Um muskulo-skelettalen Beschwerden vorzubeugen und die Blutzirkulation zu fördern ist es von Vorteil, wenn an einem Arbeitsplatz in unterschiedlichen Arbeitshaltungen gearbeitet werden kann. Dies ist besonders für lang andauernde Arbeiten wichtig.

Ferner muss auch das Verhalten der Person zugunsten ihrer Gesundheit optimiert werden. Dieses erfordert grundsätzlich Unterrichtung und Hebung der Bereitschaft zur aktiven Mitwirkung.

Stehen

Bei Steharbeitsplätzen sollte die Tischfläche in der richtigen Höhe sein (Abb. 6-27). Die Füsse müssen parallel bzw. leicht auswärts gerichtet sein können, ohne dass der Oberkörper sich

dadurch bei der Arbeit vorbeugen muss. Stehhilfen sind notwendig, um die Beine zwischendurch zu entlasten. Stehen hat einen erhöhten hydrostatischen Druck in den Beinen zur Folge, was mit der Zeit zu Krampfadern führen kann.

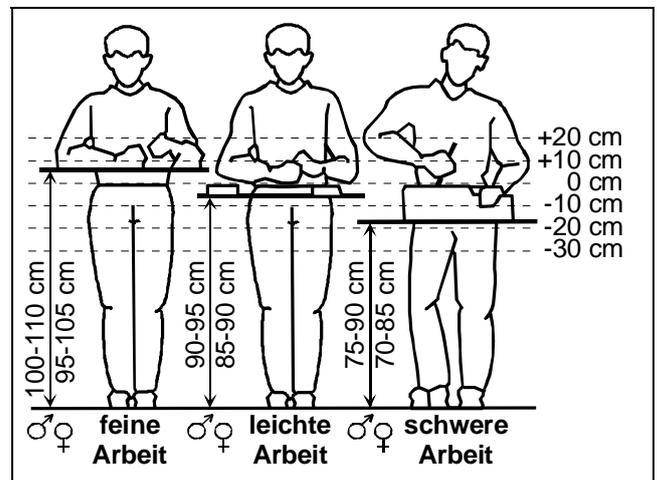


Abb. 6-27: Empfohlene Tischhöhen bei stehender Arbeit. Das Bezugsmass ist die Ellenbogenhöhe (0 cm), die im Durchschnitt bei Männern 105 cm und bei Frauen 98 cm über dem Boden liegt.

Sitzen

Bei einer sitzenden Schreibkraft sind die richtige Höhe des Tisches und der Sitzfläche, die ausreichende Beinfreiheit und ein geeigneter Stuhl Voraussetzungen für ein angenehmes Arbeiten. Um den unterschiedlichen Grössen der Personen Rechnung zu tragen, sollen Stuhl und Tisch verstellbar sein. Der Verstellbereich sollte die Grössen von 90% aller in Frage kommender Personen umfassen. Ist der Tisch in der Höhe nicht verstellbar, ist für kleine Personen eine Fussstütze zu verwenden.

Hinweis: Fussstützen müssen eine Abstellfläche von mindestens 70 x 70 cm aufweisen (natürlicher Bewegungsraum der Beine).

Ältere Empfehlungen fordern eine aufrechte Sitzhaltung und einen geraden Rücken. Das erfordert jedoch aktive Muskelkraft. Kontinuierlich angespannte Muskeln ermüden schnell. Daher sitzen die Menschen am Arbeitsplatz meistens

anders. Der ermüdete Körper sucht Entspannung, indem er sich auf der Rückenlehne abstützt oder in sich zusammenfällt. Beim Lesen und Zeichnen auf vorwiegend horizontaler Tischplatte ist der Oberkörper nach vorne geneigt; am Computer in den Stuhl zurückgelehnt. Auch perfekt angepasstes Mobiliar kann dies nicht verhindern. Bei häufigem Bewegen werden die Muskeln besser durchblutet. Bewegung während der Arbeit ist deshalb notwendig. Das Mobiliar muss je nach Tätigkeit entsprechend anpassbar sein.

Sitzen auf einem Ball oder Sitzen auf einem Kniestuhl können den konventionellen Stuhl nicht ersetzen, sondern höchstens ergänzen. Bälle können zwischendurch zur Auflockerung bei der Arbeit eingesetzt werden. Kniestühle (Balance-Stuhl) belasten die Kniegelenke stark. Deutliches Anzeichen ist ein Gefühl der Steife in den Knien. Ein Kniestuhl sollte deshalb nur für kurze Zeit benutzt werden.

Wie wird ein Sitzarbeitsplatz korrekt eingestellt?

1. Die Vorderkante des Sitzes muss so hoch über dem Boden eingestellt sein, wie die Länge des Unterschenkels von der Kniekehle bis zur Fusssohle beträgt.
2. Beim Zurücksitzen in den Stuhl muss zwischen der Vorderkante des Sitzes und der Kniekehle ein Abstand von mindestens drei Fingerbreiten bestehen bleiben.
3. Die Rückenlehne soll in der Höhe nur soweit verstellt werden, dass sie den Rücken gut stützt.
4. Wenn der Stuhl korrekt eingestellt ist und die Person sitzt, wird die Vorderkante der Tischplatte auf die Höhe des Ellenbogens bei locker herunterhängenden Oberarmen eingestellt.
5. Alle Gegenstände unter dem Tisch, welche die freie Beinbewegung behindern, müssen zur Seite geräumt werden.

Heben und Tragen

Gegenstände sollen mit durchgestreckter, möglichst aufrechter Wirbelsäule gehoben werden. Ruckartige Bewegungen sind schlecht. Belastungen sollen daher zeitlich gedehnt werden. Tragen soll möglichst dicht am Körperschwerpunkt erfolgen. Beim häufigen Heben und Tragen schwerer Lasten sollten unabhängig davon, ob allein oder zu zweit getragen wird, mechanische bzw. technische Hilfen eingesetzt werden. Trägt man zu zweit, so muss man darauf achten, dass die Partner ungefähr die gleiche Konstitution haben und dass das Gewicht gleichmässig verteilt wird.

Der Sehraum

Sehdistanz

Da das Auge nur ein begrenztes Auflösungsvermögen – eine begrenzte Sehschärfe – besitzt, wird die notwendige Sehdistanz durch die Grösse des kleinsten zu erkennenden Sehdetails (Tab. 6-4) und durch dessen Farbe und Kontrast bestimmt.

Sehr kleine Objekte oder Objekte mit geringem Kontrast müssen nahe ans Auge gebracht werden, was die Fokussierfähigkeiten des Auges (Akkommodation) stark beansprucht. Mit zunehmendem Alter nimmt die Fähigkeit ab, in der Nähe scharf sehen zu können (Alterssichtigkeit, Presbyopie; Abb. 6-28). Daher benötigen ältere Personen eine Altersbrille.

Hinweis: Lang andauernde Arbeiten mit kleinen Sehdistanzen sollen mit anderen Arbeiten abwechseln. Der Blick in die Ferne soll möglich sein.

Ist ein zu erkennendes Detail sehr klein oder ist die Sehfähigkeit der Person gering, sind Sehhilfen wie Brillen, Lupen oder Mikroskope erforderlich. Sind die Sehobjekte genügend gross, können sie in die für den Menschen bequemste Distanz gebracht werden. Diese ist für verschiedene Blickrichtungen etwa gleich.

Tab. 6-4: Sehdistanzen und Gesichtsfeldgrößen nach Art der Arbeit (gilt für normales Sehvermögen, gute Kontraste und ausreichende Beleuchtungsstärke).

Gesichtsfeldgrösse [mm] (Durchmesser)			Beispiele
Sehentfernung [mm] (Auge – Sehobjekt)			
Feinstarbeiten	120-250	200-410	Kleinstteile Montage (Uhren, Schmuck, elektronische Bauelemente)
Feinarbeiten	250-350	410-570	Radio-, Fernsehgeräte Montage
mittelgrobe Arbeiten	350-500	570-820	Arbeiten an Pressen, Bohrwerken, Drehmaschinen; Schreiben, Anzeigen Ablesen
grobe Arbeiten	500-1500	820-2460	Verpacken, grobe Schleifarbeiten; Arbeit mit langen Zangen
Nähe beobachten	350-750	570-1200	Arbeit am Bildschirm, Lesen
Ferne beobachten	>1500	>2460	grosse Wandanzeigetafeln, Autofahren

Sind die Distanzen der Sehobjekte verschieden, soll sich die Sehdistanz nach der wichtigsten Sehaufgabe richten.

Hinweis: Als optimale Sehdistanz sind 500 mm vorzusehen. Muss das Sehobjekt, wie z.B. ein Bildschirm, nicht mit den Händen erreicht werden, ist ein grösserer Abstand vorteilhaft (Ruhelage der Akkommodation).

Blickfeld

Das Blickfeld ist derjenige Raumbereich, in dem ein Mensch bezogen auf seine jeweilige Körperhaltung ein Sehobjekt mit dem Blick, d.h., mit den Augen scharf fixieren kann. Es wird durch die Augenbewegung begrenzt. Wird der erkennbare Raumbereich durch zusätzliche Kopf- und Rumpfbewegungen vergrössert, spricht man vom erweiterten Blickfeld.

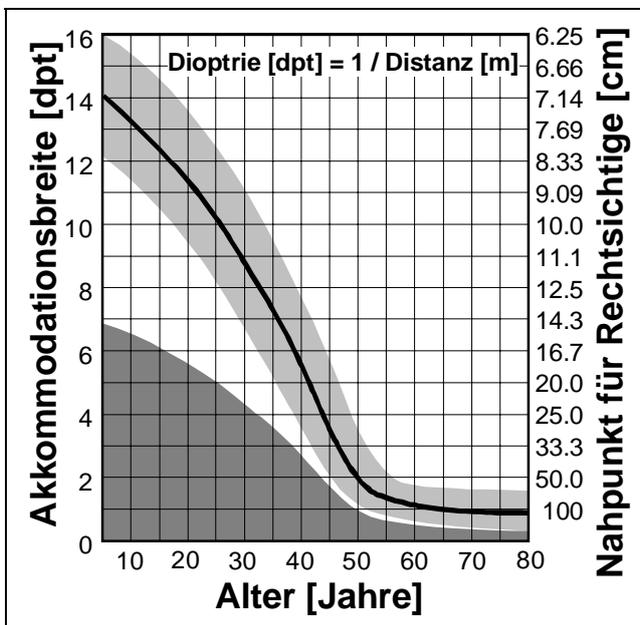


Abb. 6-28: Abnahme der Fähigkeit in der Nähe scharf zu sehen mit zunehmendem Alter. Grau oben: Streubereich; Grau unten: Für die Arbeit ohne Überanstrengung verwendbarer Bereich.

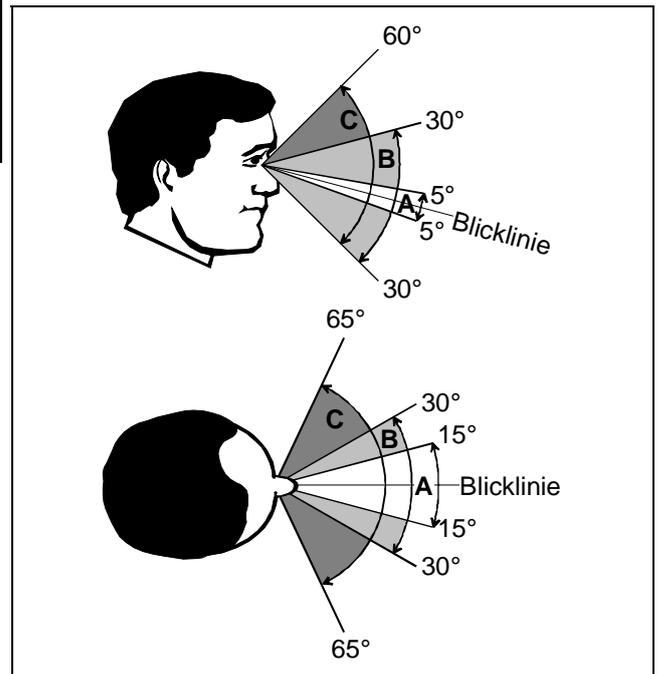
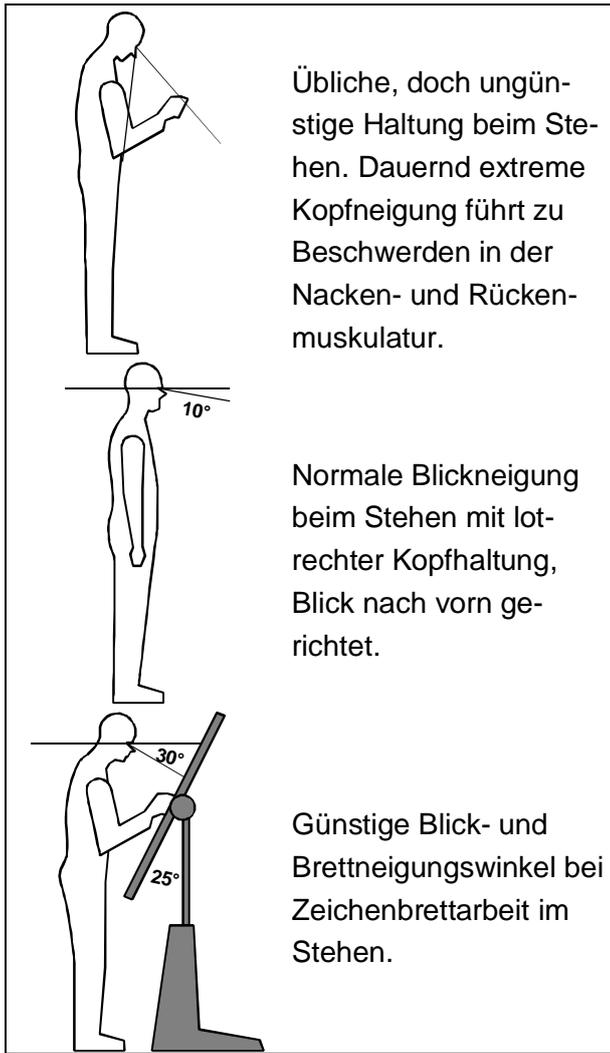


Abb. 6-29: Optimales Blickfeld (A), zulässiges Blickfeld (B) und durch Kopfbewegung erweitertes zulässiges Blickfeld (C).

Hinweis: Manipulationsstellen und Handstellteile müssen im Blickfeld liegen, um sie auffinden, identifizieren und falls erforderlich die Manipulation mit den Augen verfolgen zu können. Wichtige optische Anzeigen sollen im optimalen Blickfeld liegen (Abb. 6-29).



Übliche, doch ungünstige Haltung beim Stehen. Dauernd extreme Kopfneigung führt zu Beschwerden in der Nacken- und Rückenmuskulatur.

Normale Blickneigung beim Stehen mit lotrechter Kopfhaltung, Blick nach vorn gerichtet.

Günstige Blick- und Brettneigungswinkel bei Zeichenbrettarbeit im Stehen.

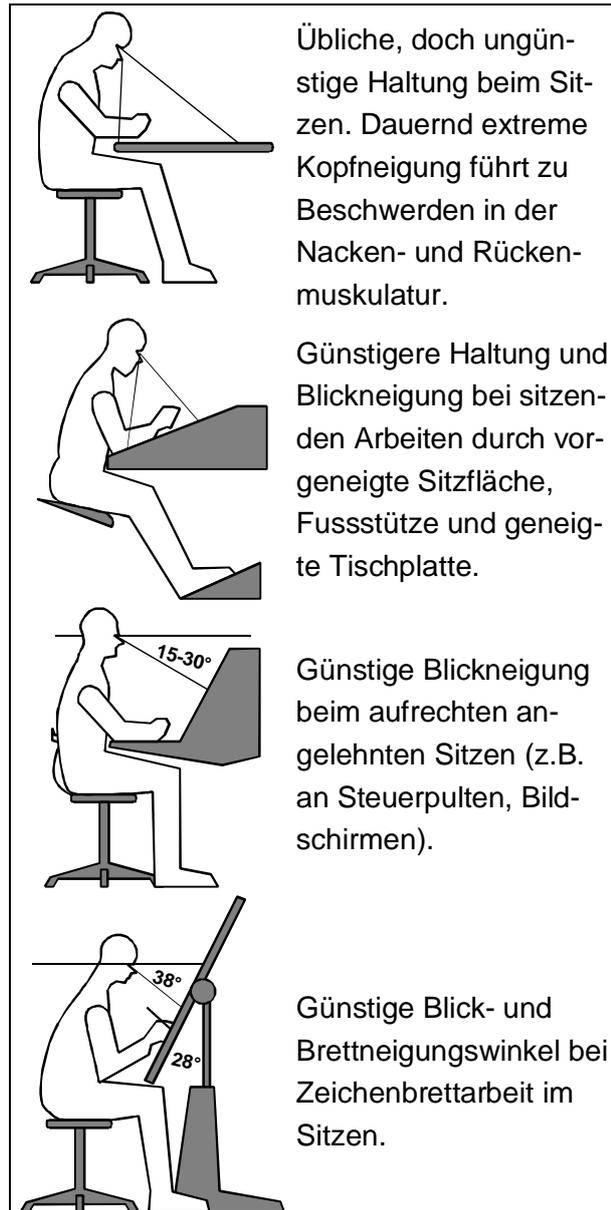
Abb. 6-30: Beispiele für Kopfhaltungen und Blicklinien bei verschiedenen Aufgaben im Stehen.

Blicklinie und Kopfhaltung

Das Blickfeld, bezogen auf die Umwelt, hängt von der jeweiligen Arbeitshaltung ab. Dies wird durch die Richtung der Blicklinie festgelegt. Beispiele für verschiedene Kopfhaltungen und Blicklinien bei unterschiedlichen Aufgaben sind in Abb. 6-30 und Abb. 6-31 zu sehen.

Hinweis: Bei mehreren Sehaufgaben an verschiedenen Sehorten sollen sich die Blicklinien nach der wichtigsten Sehaufgabe richten.

Hinweis: Arbeiten beider Hände sind um so schwerer zu kontrollieren, je weiter sie sich voneinander und von der Mittelebene entfernen.



Übliche, doch ungünstige Haltung beim Sitzen. Dauernd extreme Kopfneigung führt zu Beschwerden in der Nacken- und Rückenmuskulatur.

Günstigere Haltung und Blickneigung bei sitzenden Arbeiten durch vorgeneigte Sitzfläche, Fussstütze und geneigte Tischplatte.

Günstige Blickneigung beim aufrechten angelehnten Sitzen (z.B. an Steuerpulten, Bildschirmen).

Günstige Blick- und Brettneigungswinkel bei Zeichenbrettarbeit im Sitzen.

Abb. 6-31: Beispiele für Kopfhaltungen und Blicklinien bei verschiedenen Aufgaben im Sitzen.

Hinweis: Die betrachtete Arbeitsfläche soll möglichst senkrecht zur Blicklinie gerichtet sein.

Gesichtsfeld

Das Gesichtsfeld ist jenes Gebiet des Arbeitsbereichs, welches mit einem Blick, ohne Kopf- und Augenbewegung, mehr oder weniger scharf wahrgenommen wird. Es ist trotz fehlender Augenbewegung grösser als das Blickfeld, da auch die unscharfen, nicht in der Blickrichtung liegenden Bereiche dazugehören. Abb. 2-5 (Seite 2-3) zeigt das Gesichtsfeld des rechten

Auges; Tab. 6-4 sind Gesichtsfeldgrößen für verschiedene Sehentfernungen zu entnehmen.

Hinweis: Es ist zu berücksichtigen, dass Farben nicht im ganzen Gesichtsfeld (Abb. 2-5), aber im ganzen Blickfeld zu erkennen sind.

Hinweis: Es ist darauf zu achten, dass beidäugiges Sehen möglich ist. Dadurch kann die Tiefe von Sehobjekten besser wahrgenommen werden (Tiefensehen, Stereosehen).

Hinweis: Die Sehschärfe nimmt gegen den Rand des Gesichtsfeldes (die Peripherie) stark ab (Abb. 2-15, Seite 2-8).

Weniger wichtige optische Anzeigen können im äusseren Gesichtsfeld liegen. Sie werden nur erkannt, wenn sie gross und hell sind. Das Auge ist im äusseren Gesichtsfeld empfindlich auf zeitliche Helligkeitsänderungen. Wenn der Operateur dort auf optische Anzeigen in bestimmten Situationen aufmerksam gemacht werden soll, kann man sie daher als Blinklicht mit etwa 4 Blinks pro Sekunde ausführen. Sie können zusätzlich mit einem akustischen Signal versehen werden oder durch eine zentral gelegene allgemeine Warnanzeige die Aufmerksamkeit auf sich ziehen.

Der Greifraum

Der Greifraum bezeichnet diejenigen Stellen, welche von den Händen, ohne Änderung der Körperhaltung, erreicht werden können (Abb. 6-32 und Abb. 6-33). Um im grossen Greifraum einen Gegenstand zu erreichen sind Drehungen im Schulter-, Ellbogen- und Handgelenk erforderlich. Oft werden auch die Schultern mitbewegt. Im kleinen Greifraum wird nur der Unterarm bewegt. Er ist bequemer zu benutzen.

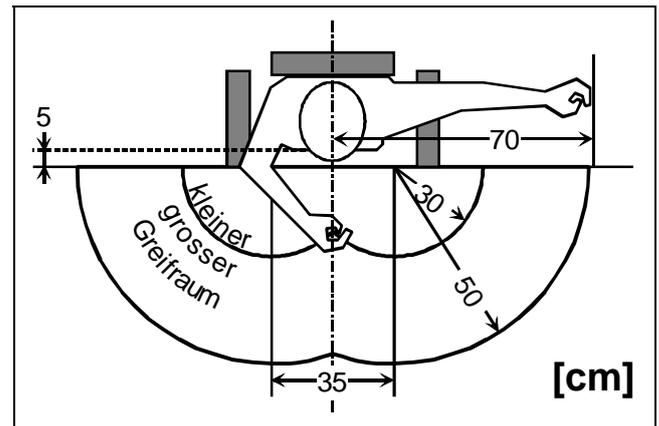


Abb. 6-32: Kleiner und grosser Greifraum in Tischhöhe für eine Körperhöhe von 150 cm.

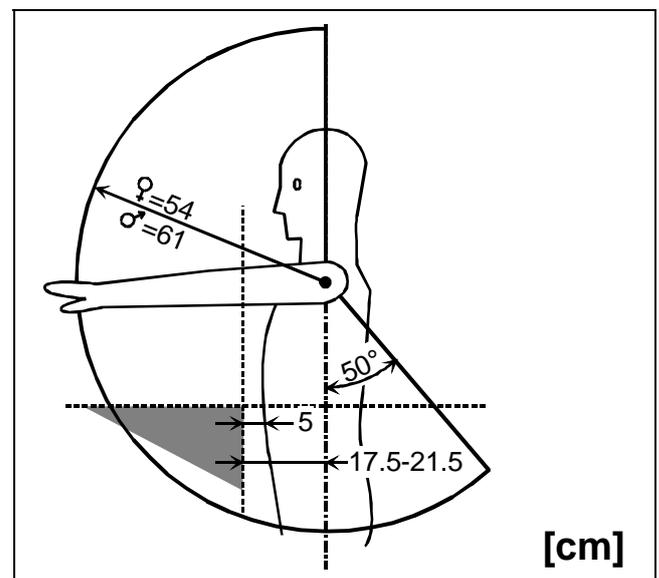


Abb. 6-33: Greifraum der Hände (5. Perzentil) und Abstand Tisch-Körper. Sind Frauen und Männer für diesen Arbeitsplatz vorgesehen, ist die Begrenzung für Frauen massgeblich.

Beispiel Bildschirm-Arbeitsplatz

Der Bildschirm gewinnt in der Arbeitswelt immer mehr an Bedeutung. In vielen betrieblichen Bereichen führt der Einsatz von Bildschirmen zu Arbeitserleichterungen; die Arbeit am Bildschirm verlangt aber hohe Sehanforderungen und beansprucht den Stützapparat. Damit verknüpfte Beschwerden (Sehbeschwerden, Kopfschmerz u.a.) werden von den Betroffenen oft auf Ursachen zurückgeführt, deren Einfluss erfahrungsgemäss keine oder nur untergeordnete Bedeutung haben („unnatürliches“ Licht, „Elektrosmog“, etc.). Siehe die Checkliste auf den nächsten zwei Seiten.

Auswirkungen der Arbeitsgestaltung

Die Art der Tätigkeit beeinflusst ganz wesentlich, wie weit der mögliche Bewegungsraum genutzt wird bzw. genutzt werden kann. Bei der Tätigkeit am Bildschirm besteht ein recht grosser Spielraum für verschiedene Körperhaltungen (Abb. 6-34). Ganz anders ist bei der Verwendung eines Mikroskops in der histologischen Zelldiagnostik der Bewegungsraum massiv beschränkt, nämlich für 95% der Zeit auf ein Feld von gut 4 cm² (Abb. 6-35). Eine Entlastung bietet allein eine zeitlich befristete Wendung zur Seite (Position B in Abb. 6-35: Notizen, neues Präparat). Die Einschränkung der Bewegung (statische Haltearbeit) führt zu einem hohen Prozentsatz muskuloskelettaler Beschwerden in den betroffenen Berufen.

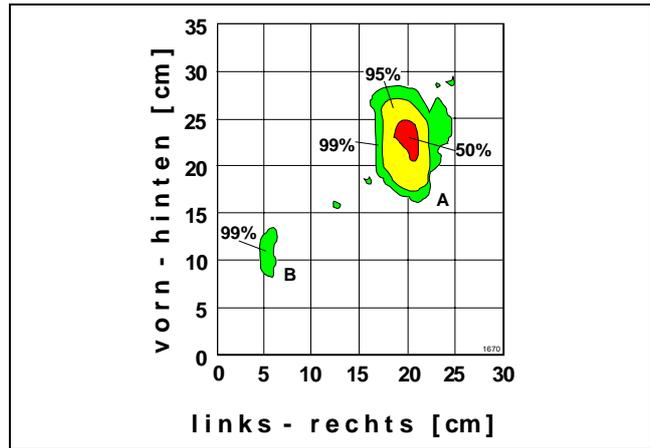


Abb. 6-34: Bewegungsfläche des Mittelpunktes des Kopfes in Aufsicht während einer Stunde Arbeit am Bildschirm.

Hinweis: Einschränkung im natürlichen Bewegungsraum durch Arbeitsgeräte (Mikroskop), die Geometrie des Arbeitsplatzes (Beinfreiheit, Stehen auf einem Bein), die Arbeitsorganisation (monotone muskuläre Belastungen und Abwechslung) führen potentiell zu muskuloskelettalen Beschwerden.

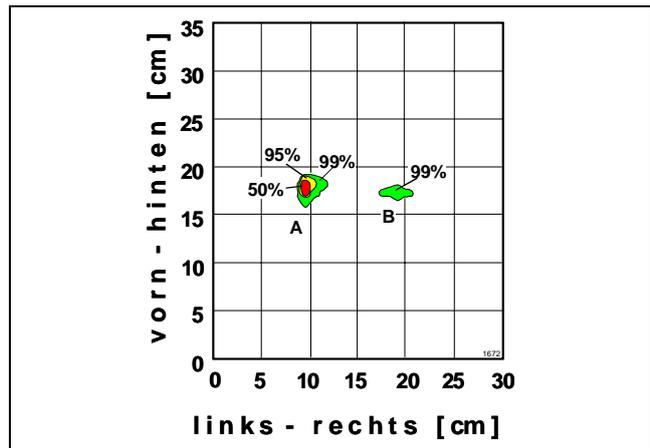


Abb. 6-35: Wie Abb. 6-34 aber für Arbeit am Mikroskop.

Checkliste Bildschirm-Arbeitsplatz

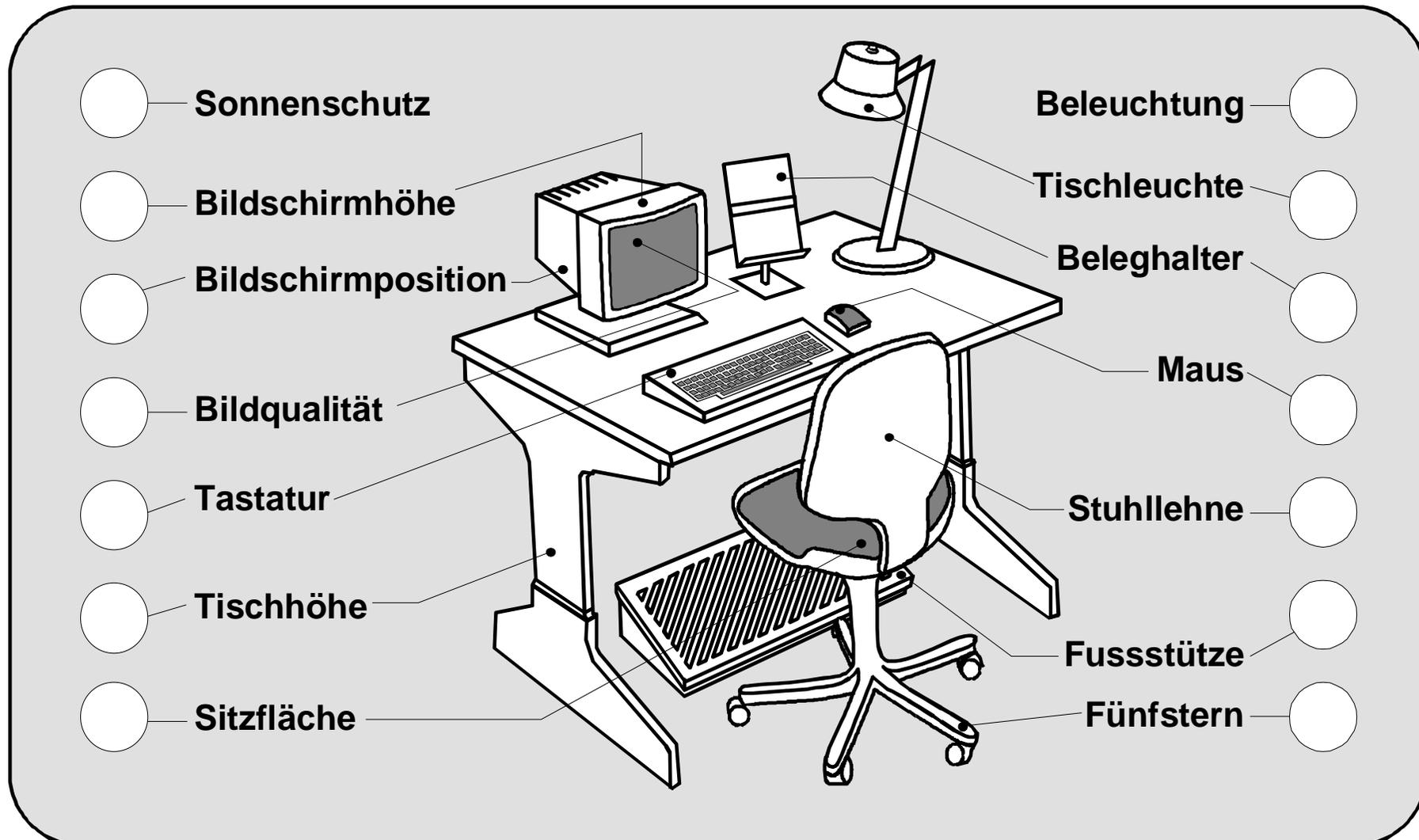


Abb. 6-36: Gütekriterien eines Bildschirm-Arbeitsplatzes. Die Kreise sind für eine Bestätigungsmarkierung oder auch eine mehrstufige Qualitätsbewertung mit Ziffern vorgesehen: 0 = ungeeignet, 1 = geeignet, 2 = gut geeignet, 3 = sehr gut geeignet.

Erklärungen zur Checkliste Bildschirm-Arbeitsplatz (vgl. Abb. 6-36)

- **Sonnenschutz:** Dunkle Storen bieten Blend- und Spiegelungsschutz, wenn durch sie die Sonne nicht als Scheibe erkannt werden kann. Äussere Storen sind klimatisch günstiger.
- **Bildschirmhöhe:** Der Blick zur Bildschirm-Oberkante soll horizontal, besser leicht nach unten verlaufen (Bildschirm direkt auf den Tisch). Der Blick zur Bildschirmmitte soll etwa 15°-30° nach unten geneigt sein. Wenn keine Spiegelungen auftreten, kann der Bildschirm um gleichviel nach hinten geneigt werden.
- **Bildschirmposition:** Als Sehentfernung sind 50 bis 70 cm vorzusehen. Bildschirm, Beleg und Tastatur so anordnen, dass der Rücken nicht dauernd durch schiefe oder gedrehte Haltungen belastet wird. Die häufigste Sehaufgabe soll sich geradeaus befinden. Der Blick zum Bildschirm soll parallel zur Fensterfront und parallel zu den Deckenleuchten verlaufen (vermeidet Spiegelungen und Blendung).
- **Bildqualität:** Die Zeichen müssen gut lesbar sein (Grösse, Schärfe, Kontrast, Helligkeit, Polarität). Sie dürfen nicht Zittern oder Flimmern. Die Oberfläche soll einen guten Reflexschutz aufweisen. Zusätzliche Bildschirmfilter beeinträchtigen oft Bild- und Zeichenqualität.
- **Tastatur:** Die Tastenoberfläche der Reihe A,S,D soll maximal 30 mm über der Tischfläche sein; die Tastenabstände sollen 17 bis 19 mm betragen (Anthropometrie der Hand). Konkave Tastenoberflächen bieten gute seitliche Fingerführung. Empfohlen wird ein Tastenweg von 3-5 mm mit spürbarem Druckpunkt (Rückkopplung) und definiertem, konstantem Auslösedruck. Die Tastatur soll frei beweglich und rutschfest sein. Die Handballen sollen vor der Tastatur aufliegen können.
- **Tischhöhe:** Es sind 72 cm Tischhöhe vorzusehen, wenn möglich verstellbar während der Arbeit. Der Verstellmechanismus darf nicht verletzungsgefährdend sein.
- **Sitzfläche:** Gut ist eine feste, aber nicht zu harte Polsterung welche keinen Wärmestau verursacht und Körperfeuchte abführen kann. Die Vorderkante soll gerundet sein (freie Blutzirkulation in den Kniekehlen). Sitztiefe und -höhe müssen auch kleinen Personen ermöglichen, mit senkrechten Unterschenkeln die Rückenlehne zu nutzen. Zwischen Kniekehle und Vorderkante sollen 3 Fingerbreit frei sein.
- **Beleuchtung:** Bewährt haben sich Systeme mit ca. 70% Direkt- und 30% Indirektlichtanteil. Das Licht soll nicht zu Blendung und Reflexen führen. Letzteres ist mit modernen LCD-Flachbildschirmen zunehmend kein Problem mehr.
- **Tischleuchte:** Eine Tischleuchte soll variabel sein um individuelle und momentane Lichtbedürfnisse zu befriedigen. Das Licht muss für Rechtshänder von links kommen (kein Schattenwurf) und den Beleg beleuchten, nicht den Bildschirm. Es soll genügend weit und gleichmässig über den Tisch verteilt sein (keine punktförmige Spiegelungen). Die Lampe soll nicht heiss werden und nicht flimmern. Nachbarn dürfen auch bei Schrägstellung der Leuchte nicht geblendet werden.
- **Beleghalter:** Beleghalter sind in Neigung, Drehung und Höhe individuellen Bedürfnissen anzupassen. Ein Zeilenlineal kann vorteilhaft sein. Belege sind besser zu bearbeiten, wenn ihr Aussehen demjenigen auf dem Bildschirm ähnlich ist (Polarität, Schriftgrösse). Die Distanz soll derjenigen des Bildschirms entsprechen (kein Umakkomodieren).
- **Maus:** Benutzende sollen die Art der Maus selber wählen. Es ist dabei darauf zu achten, dass gewisse Mäuse nur für Links- oder Rechtshänder sind. Es soll taktil eindeutig erkennbar sein, welche Orientierung die Maus in der Hand hat. Einige Benutzende haben Mühe mit dem Doppelklick. Es soll eine Mausmatte eingesetzt werden und verschmutzte Mausmechanik muss gereinigt werden.
- **Stuhllehne:** Die Lehne soll in der Höhe nur soweit verstellt werden, dass sie den Rücken gut stützt (Beckenstütze). Eine variable, entsprechend der Körperhaltung frei wählbare Rückneigung fördert gesundes bewegtes Sitzen. Die Lehne darf gelegentliche Dehnungsübungen mit nach hinten gestreckten Armen nicht behindern (entlastet Rückenmuskulatur).
- **Fussstütze:** Der Beinraum muss freigeräumt sein. Eine Fussstütze für eine kleinere Person soll eine Fläche von mindestens 70x70 cm aufweisen.
- **Fünfstern:** Für die Standsicherheit ist ein Fuss mit mindestens fünf Auflagepunkten (z.B. Fünfstern) notwendig. Er darf aber nicht zum Stolpern führen. Rollen sollen beim Aufstehen gebremst werden.

7

Büroraumkonzepte

(nach einem Skript von Prof. H. Krueger)

7.1**Einführung**

Die Gestaltung von Büroräumen bestimmt sehr wesentlich den Arbeitserfolg. Sie ermöglicht beispielsweise bestimmte Formen der Zusammenarbeit oder verhindert sie.

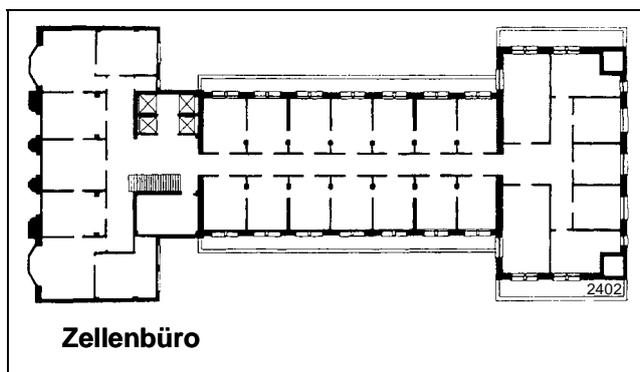


Abb. 7-1: Beispiel eines Zellenbüros.
Architekten Adler und Sullivan: Garrick Building, Chicago 1892

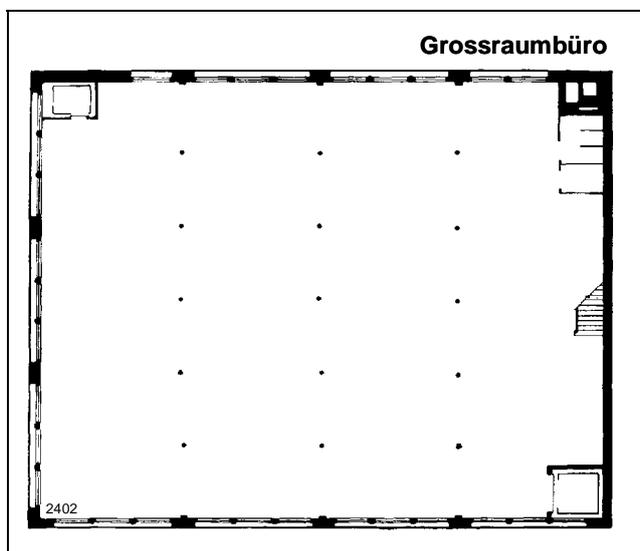


Abb. 7-2: Beispiel eines Grossraumbüros.
Architekt: Le Baron Jenney Chicago 1879

Die extremen Büroformen sind einmal das Zellenbüro mit einer grossen Zahl aufeinandergeschichteter Bürogeschosse und auf jedem Ge-

schoss identische Büros (... jedes Büro eine Wabe in einem Bienenstock, nur eine Zelle (Abb. 7-1) und nichts weiter³) und andererseits das multifunktionale Grossraumbüro (Abb. 7-2), das später von Mies van der Rohe als Idealform gefordert wurde (... Das Bürohaus ist ein Haus der Arbeit, der Organisation, der Klarheit, der Ökonomie. Helle, weite Arbeitsräume, übersichtlich, ungeteilt, nur gegliedert wie der Organismus des Betriebes⁴.) Dazwischen steht das Gruppenbüro, bei dem das Grossraumbüro auf die Grösse einer Arbeitsgruppe, einer „Schulklasse“ reduziert wird.

Auf Raumkonzept und Arbeitsplätze wirken viele Entwicklungen und Überlegungen ein, nämlich:

- Der zunehmende Dialog Mensch-Maschine und die befürchtete Abnahme sozialer Kontakte;
- Die wachsende Vielschichtigkeit der Arbeit und deren Umsetzung in organisatorische komplexe Netzstrukturen;
- Ständig wechselnde Arbeitsmittel und Partner und häufig auch der Arbeitsorte;
- Die höheren Anforderungen an Ausbildung im Umgang mit Informatikmitteln;
- Das Auseinanderbrechen gemeinsamer örtlicher und zeitlicher Büroarbeit zu Gunsten dezentraler Arbeit an externen Orten und zu unterschiedlichen Zeiten.

Bezogen auf Raumkonzepte und Arbeitsplätze kann festgestellt werden:

- Die neuen Aufgaben und Arbeitsformen lösen das Paradigma fester Arbeitsplätze für die Mitarbeiter auf;

³ SULLIVAN L. (1896) The tall office building artistically considered, Chicago

⁴ MIES VAN DER ROHE (1923) Zeitschrift G, Berlin

- Die wechselnden Arbeitsplätze erfordern verschiedene Ausstattungen und Arbeitsbedingungen.

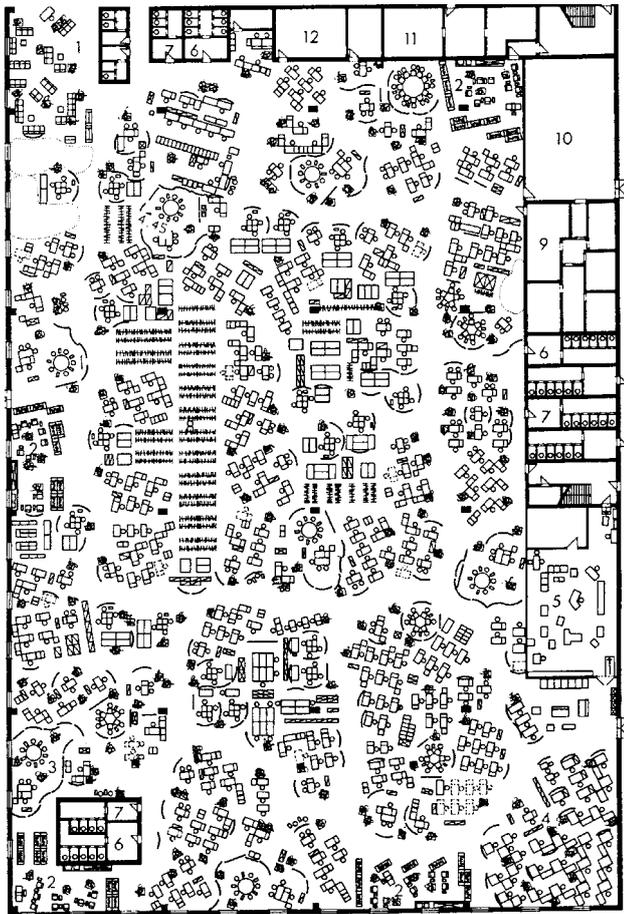


Abb. 7-3: Bürolandschaft.
Das Grossraumbüro (GEG-Versand) stellt sich als ein Raum ohne Grenzen dar: GEG Planungsteam: Kamen 1966.

„Im modernen Büro bedeutet eine Position nicht länger einen Platz“. Dieser ist vielmehr als „Knoten in einem Kommunikationsnetz“. Stone und Luchetti stellen ausserdem fest, „dass es den Mitarbeitern sowohl in den bestehenden Grossraumbüros als auch in den Bürolandschaften (Abb. 7-3) schwerer fällt, konzentrierte Denkarbeit zu leisten, und diese darüber hinaus auch die Möglichkeit zu vertraulichem Gespräch vermissen“⁵. So wurde ein reduziertes Grossraumbüro, das Gruppenbüro (Abb. 7-4) entwickelt. Es bietet einer Arbeitsgruppe Raum.

⁵ STONE, PH.J.; LUCHETTI, R. (1985) Your office is where you are. Harvard Manager 4

Eine Gruppengrösse von 15-25 Mitarbeitern hat sich als günstig herauskristallisiert.

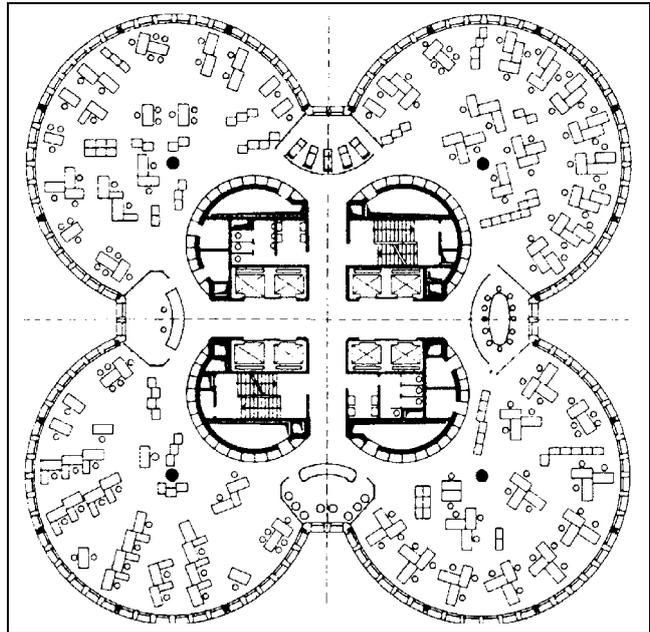


Abb. 7-4: Gruppenbüro (BMW-Vierzylinder: als Firmensymbol aus gestapelten Gruppenräumen.
Architekt: Karl Schwarzer, München 1973

7.2 Büroanforderungen

Bürogebäude sind indirekt Führungsinstrumente. Sie können eine statusbetonte Bürokratie festmauern. Das Raumkonzept kann Teamarbeit und Privatheit (Tab. 7-4) verhindern oder fördern. Flexibilität einer Organisation, selbstverantwortliche Mobilität der Mitarbeitenden kann mit ihm angelegt sein, der Weg zu strategischen Unternehmenszielen kann durch sie vorgespurt werden.

Die moderne Technologie verschiebt Aufgaben und Tätigkeitsschwerpunkte aller Mitarbeitenden. Ungestörtheit als Voraussetzung für konzentriertes Arbeiten beschränkt sich schon lange nicht mehr auf Führungskräfte und einige Spezialisten. Mitarbeiter, die bislang in arbeitsteiligen Gruppen gearbeitet haben, müssen zunehmend auch konzentrierte Einzelarbeit leisten. Flache Hierarchien stellen andere Forde-

rungen an die Raumplanung. Die Informationstechnologie hat auch die Welt des traditionellen Einzelkämpfers verändert. Der Bedarf an Abstimmung und Informationsaustausch hat deutlich zugenommen. Das erfordert eine unmittelbare, informelle Einbindung in ein Team, in dem jeder über jeden informiert ist und kurzfristig für Besprechungen zur Verfügung steht. Die Grenzen zwischen traditionellen Funktionsgruppen sind längst aufgelöst. Traditionelle Bezeichnungen, wie Sekretärin, Sachbearbeiter oder Manager haben inhaltlich ihre Bedeutung verloren.

Tab. 7-1: Verschiedene, empirisch gefundene Verhaltenstypen⁶.

<p>„Schwergewichte“ Sind meist bei Besprechungen an ihrem Arbeitsplatz anzutreffen. Sie sind zufrieden und schaffen sich die Ungestörtheit, die sie brauchen. 50 % sind Manager. Der Rest sind leitende Angestellte und Spezialisten.</p> <p>„Planer“ Sie nehmen überwiegend an Besprechungen teil, die nicht an ihrem Arbeitsplatz stattfinden. Etwa 50 % sind Manager. Weiterhin gehören Planer, Ingenieure und technische Spezialisten zu dieser Gruppe.</p> <p>„Denker“ arbeiten konzentriert und vorwiegend allein. Die Mehrzahl sind Spezialisten. Manager sind nur zu 11 % in dieser Gruppe. Es ist eine eher unzufriedene Gruppe wegen des Mangels an Ungestörtheit, wenn sie kein Einzelzimmer haben.</p> <p>„Einzelgänger“ sind zumeist „Denker“, die entweder ein Einzelzimmer haben, eine „stille Ecke“ oder auch zu Hause arbeiten können und dann nicht leicht am Arbeitsplatz anzutreffen sind.</p> <p>„Forscher“ zeichnen sich durch intensive, kreative Informationsbearbeitung aus. 25 % sind Manager. Sie sind am unzufriedensten wegen des Konfliktes zwischen Konzentration und Gruppenarbeit.</p> <p>„Macher“ nehmen noch mehr als Planer an Besprechungen abseits ihres Arbeitsplatzes teil. Dort arbeiten sie selten konzentriert. Viele sind im „kundenorientierten“ Einsatz oder in Leitungsfunktionen, klagen aber dennoch über Mangel an Ungestörtheit.</p> <p>„Verwalter“ sind stark an den eigenen Schreibtisch gebunden. Sie erledigen dort vorwiegend Routinearbeiten. Sie finden sich vor allem in sachbearbeitenden Abteilungen.</p> <p>„Verkäufer“ werden vor allem von der Gruppe der Aussendienstmitarbeiter gestellt. Sie sind, weil zumeist abwesend, häufig am schlechtesten untergebracht. Dadurch entstehen Ressentiments, die besonders ernst zu nehmen sind, weil diese Personen das Unternehmen nach aussen an vorderster Front repräsentieren.</p>
--

Wegen der Bedeutung des Gebäudes ist es wichtig, sich über die Bedürfnisse der Bewohner Gedanken zu machen (Tab. 7-1 bis Tab. 7-3).

Tab. 7-2: Verhaltenstypen und deren typischen Tätigkeiten

	Tätigkeit		
	konzentrierte Einzelarbeit	Gruppenarbeit	Anwesenheit am eigenen Platz
Schwergewicht	viel	viel	viel
Planer	viel	viel	wenig
Denker	viel	wenig	viel
Einzelgänger	viel	wenig	wenig
Forscher	wenig	viel	viel
Macher	wenig	viel	wenig
Verwalter	wenig	wenig	viel
Verkäufer	wenig	wenig	wenig

Nicht völlig überraschend werden auf jeder Hierarchiestufe Vertreter dieser Typen gefunden. Eine Mischung aus Einzel- und Gruppenarbeit findet sich zunehmend an allen Arbeitsplätzen. Diesen Anforderungen können weder das Zellenbüro noch das Gruppenbüro oder gar das Grossraumbüro gerecht werden.

Tab. 7-3: Verschiedene Aufgaben stellen unterschiedliche Anforderungen an die Gebäude.

	Aufgabe		
	unternehmerische Aufgaben	kreative Informationsverarbeitung	Routine Informationsverarbeitung
Raumkonzept	niedrig	viel	mittel
Arbeitsplatzergonomie	niedrig	mittel	hoch
individuelle Privatheit	hoch	hoch	niedrig
Gruppen-Privatheit	mittel	hoch	niedrig
Arbeitsumwelt	niedrig	mittel	hoch
Symbolik	hoch	niedrig	mittel
Besprechungsräume	hoch	mittel	niedrig
Erholungszone	niedrig	mittel	hoch

Während Teamgeist in aller Munde ist, wird die andere gleich wichtige Seite der Medaille, die Privatheit häufig unterschlagen. Bürogebäude können die eine oder die andere Seite fördern oder behindern. Das Zellenbüro zeigt die negative Seite der Privatheit, die Isolation, das Gruppenbüro kann die Würde des Einzelnen vernachlässigen und damit die Grundvoraussetzung für förderliche Teamarbeit, die Freiwilligkeit verhindern.

⁶ ELLIS, P. (1990) Planungsanforderungen aus dem Wandel der Büroarbeit. in: congena: Kombi-Büro, Baden-Baden 1990

Ein Büro, welches Privatheit sichert, muss vier Forderungen erfüllen (Tab. 7-4).

Tab. 7-4: Kennzeichen der „Privatheit“

<p>Wahlfreiheit: zwischen Unabhängigkeit und Zusammenarbeit</p> <p>Territoriale Identität: in einem selbst kontrollierten Territorium setzt die Mitarbeitenden in die Lage, den Kontrollverlust in Gruppenarbeit zu ertragen.</p> <p>Umweltkontrolle: im persönlichen Territorium ist eine wichtige Voraussetzung für Selbstdarstellung und individuelle Gestaltung entsprechend den eigenen physiologischen Bedürfnissen. Hierzu gehören in Grenzen Licht, Luft und Lärm.</p> <p>Zugangskontrolle: trägt dem Bedürfnis nach Vertraulichkeit und Informationsprivatheit Rechnung</p>
--

7.3 Kombi-Büro

Da weder das Zellenbüro noch das Grossraumbüro den Anforderungen der modernen Arbeitswelt, den Konditionen des Zeitalters der Informationstechnologie entspricht, wurde ausgehend von skandinavischen Entwicklungen (ESAB-Hauptverwaltung; Stockholm 1976) das sogenannte Kombi-Büro (Abb. 7-5 bis Abb. 7-9) entwickelt. Die Prinzipien des Kombibüros und dessen Weiterentwicklungen setzen an die Stelle konventioneller Raumkonzepte eine andere Philosophie der Flexibilität, eine Philosophie, die den Wunsch nach Privatheit berücksichtigt. Es ist eine Flexibilität, die Menschen, Organisationen und Gebäude umfasst.

Im Kombi-Büro hat jeder Mitarbeitende im Idealfall ein Standardzimmer mit Blick nach draussen. Die Tischfläche ist so erweitert, dass eine Besprechung mit zwei bis drei Personen für eine Projektarbeit möglich ist. Das Standardbüro erfüllt den Wunsch nach Privatheit. Dieses Büro kann so eingerichtet werden, dass es etwa 90% üblicher Büroarbeiten gerecht wird. Eine bessere und allgemein akzeptierte bessere Raumausnutzung wird erreicht, wenn das Standardbüro zwei bis vier Personen Raum bietet.

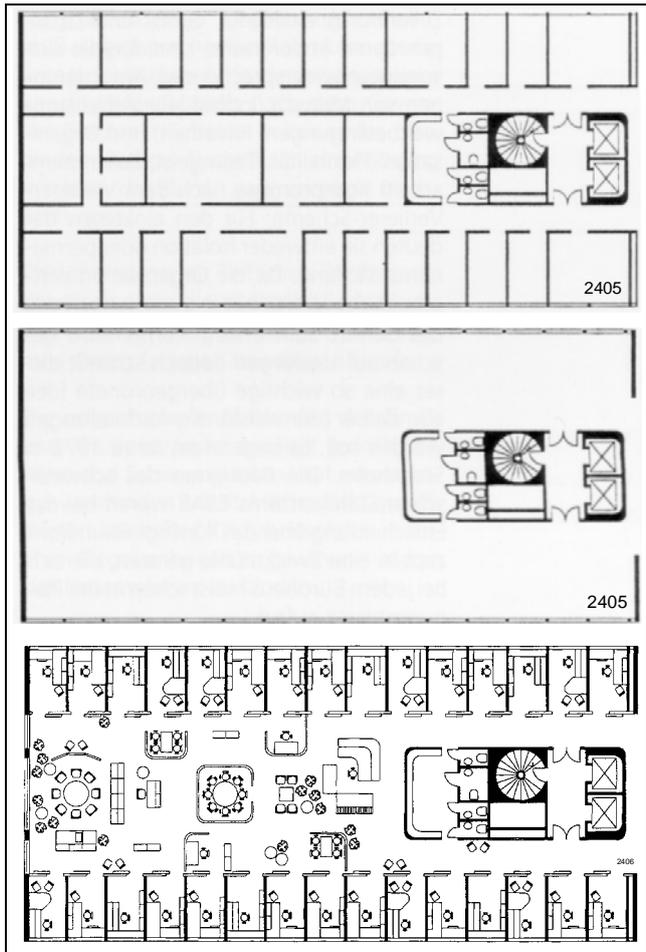


Abb. 7-5: Kombi-Büro als Fortentwicklung von Zellen-Büro und Gruppen- bzw. Grossraumbüro. Die Zellen-Büros werden mit Glaswänden gegen die Interaktionszone im Mittelteil abgeteilt. Oben: Zellen-Büro, Mitte: Grossraumbüro, unten: Kombi-Büro.

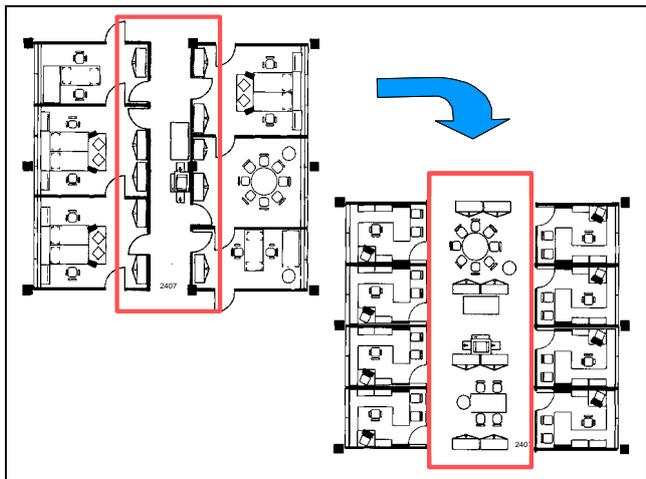


Abb. 7-6: Umrüstung vom Zellenbüro zum Kombi-Büro.

Dieses ist vor allem bei der Beschäftigung von Teilzeitkräften und Aussendienstmitarbeitern der Fall. Die Standardbüros sind nach Innen mit Glaswänden gegen die Gemeinschaftsfläche schalldicht abgetrennt. Ein störender Sichtkontakt kann im Bedarfsfall durch Jalousien unterbunden werden, sollte aber in der Regel vorhanden sein.

Anstelle der herkömmlichen Büroformen empfehlen deshalb Stone und Luchetti Aktionszentren zu einem abgeschirmten privaten Bereich. Nach Bedarf pendeln die Mitarbeitenden zwischen Aktionszentren und privatem Bereich.



Abb. 7-7: Kombi-Büro: DIFI, Filmer GmbH, Varel
Planung: R. Bölts, Oldenburg, 1989.

Neben den Standardbüros an der Aussenseite des Gebäudes gibt es im Innern Gemeinschaftsräume („Wohnzimmer“, „Marktplatz“), die das Spektrum der gruppenspezifischen und sozialen Funktionen aufnehmen.

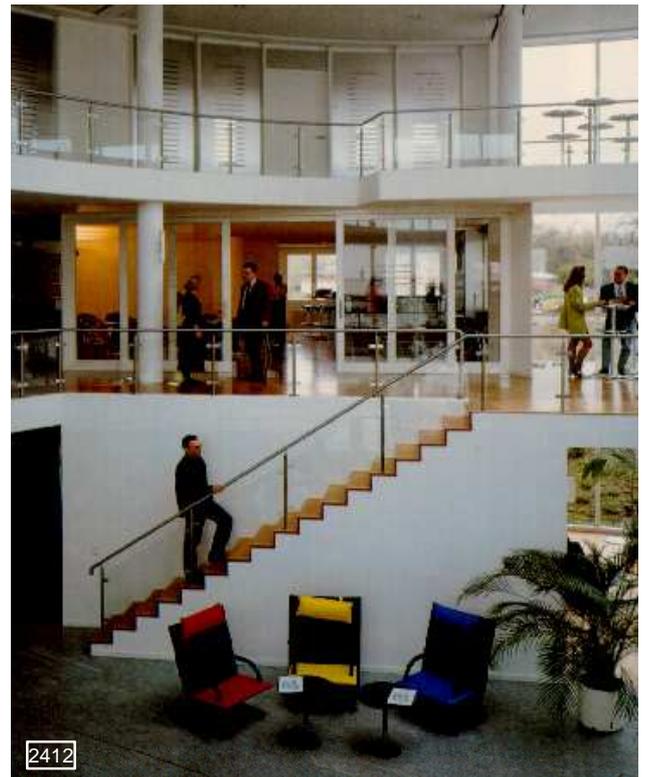


Abb. 7-8: Kombi-Büro. Drees & Sommer Stuttgart
Planung: St. Imbery, H. Sommer Stuttgart, 1992.



Abb. 7-9: Kombibüro: Vorstandsetage Audi AG, Ingolstadt.
Planung: G Henn Ingolstadt.

Im Kombi-Büro gibt es zwei Flexibilitätsphilosophien. In der Gemeinschaftszone ist fast alles möglich. Dem gegenüber grenzen sich die Arbeitsräume ab. Ihre Ausstattung wird mit derselben Qualität für alle Mitarbeiter festgelegt. Innerhalb der Grenzen hat der einzelne volle Freizügigkeit.

Als günstige organisatorische Grösseneinheit für die Gruppe in einem Kombi-Büro hat sich eine Grösse von 15-20 Mitarbeitern bewährt. Kleinere Gruppen mindern die Wirtschaftlichkeit der Gemeinschaftsräume, grössere ergeben ungünstige Raumschnitte.

Eine wichtiger Aspekt des Kombibüros ist die Möglichkeit nach Bedarf allein und doch bei allen zu sein. Der notwendige informelle Informationsaustausch ist gewährleistet, aber auch ein ungeplanter, nichtstrukturierter Informationsfluss ist möglich.

7.4 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit (Abb. 7-10 und Abb. 7-11) der verschiedenen Büroformen hängt vom Raster des Gebäudes, der Grösse der Zellenbüros, den Sondernutzflächen, dem Verkehrsraum ab. Hinzu kommen die unterschiedlichen Anforderungen der Bürotypen an die Haustechnik. Bezüglich der Haustechnik stellt das Grossraumbüro und das Gruppenbüro die höchsten Anforderungen. Rechnet man alle Kosten, liegt das Kombi-Büro zwischen dem Standard-Zellenbüro und Grossraumbüro sowie dem Gruppenbüro. Am teuersten ist das Komfort-Zellenbüro⁷. Das Kombi-Büro besitzt die günstigsten Bedingungen für nachträgliche Änderungen.

Wichtig für das Kombi-Büro ist die Idee der Flexibilität. Das Gebäude folgt den Anforderungen

von Organisation und Privatheit ohne grosse Umbaukosten. Unter funktionalen Aspekten ist die Summe aus Kommunikationsmöglichkeiten und gleichzeitiger störungsfreier Arbeitsweise beim Kombi-Büro am höchsten. Damit entspricht das Kombi-Büro den durch die heutige Informationstechnologie bestimmten Anforderungen funktional am besten. Was allerdings nicht heisst, dass es in jedem Fall die beste Lösung sein muss.

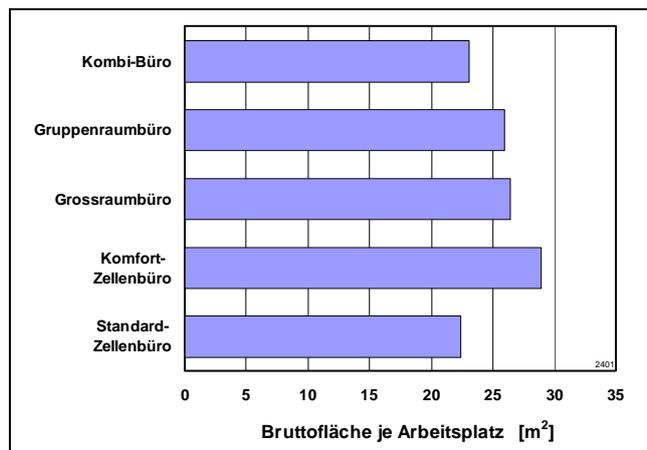


Abb. 7-10: Bruttoflächenverbrauch für einen Arbeitsplatz für verschiedene Büroformen.

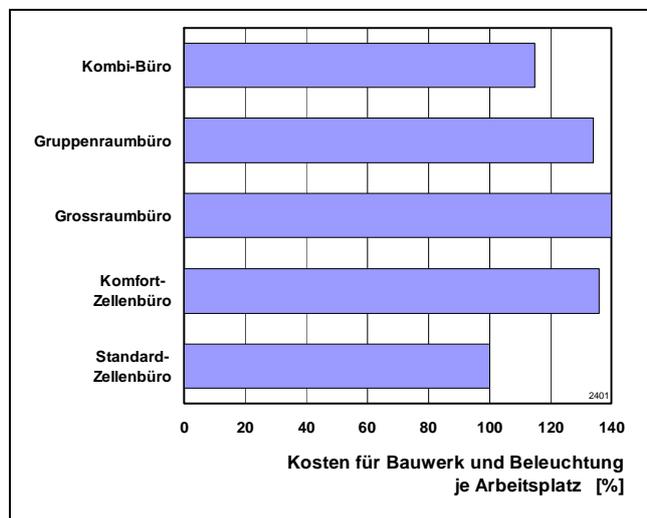


Abb. 7-11: Vergleich der Kosten für verschiedene Büroformen.

Die Erfahrung zeigt, dass die Zufriedenheit der Mitarbeitenden weniger durch technische Perfektionierung als durch den Grad der Möglichkeit persönlicher Selbstbestimmtheit, persönlicher Einflussnahme gegeben ist. Deshalb ist es

⁷ SOMMER, H. (1994) Büroformen im Wirtschaftlichkeitsvergleich

für die Wirtschaftlichkeit ausserordentlich wichtig, diesen den Zusammenhang zwischen Anforderungsprofil, Organisation und Büroform zu verdeutlichen.

Ideal vom Kosten-Nutzen-Profil sind Kombi-Büros überall dort, wo die Tätigkeit einen häufigen Wechsel von konzentriertem Arbeiten und Kommunikation erfordert. Es bietet sich als ideale Büroform an bei der Renovierung und Neuorganisation von Bürogebäuden mit grösseren Raumtiefen.

7.5 Business-Club

Der Business-Club (Abb. 7-12) ist eine Mischung von offenen Denkplätzen und geschlossenen Konzentrationsräumen. Er greift auf „Zitate“ des Wohnens zurück. Der Business-Club setzt eine hochentwickelte technische Infrastruktur voraus. Drahtlose Telekommunikation und Vernetzung sind wesentliche Elemente. Es besteht Freiheit von Arbeitsstunden und Freiheit von Statussymbolen.

7.6 Das Büro der Zukunft

Im Büro wird Information erzeugt und bearbeitet. Die Arbeitsräume der Zukunft werden sich als Interface zu Informationsräumen ändern. Sie werden sich im Vergleich zu heute in verschiedensten Formen darstellen. Hier seien exemplarisch drei Studien zur Entwicklung neuer Darstellungsformen erwähnt (buildit; „Ambiente“ bzw. i-land; Office 21). Sie werden heute im allgemeinen unter dem Begriff „Augmented Reality“ (AR) entwickelt. Allen gemeinsam ist eine Neugestaltung der Human Computer Interaction (HCI), die stärker auf die Bedürfnisse des Benutzers eingeht. Ausserdem werden nicht nur die Mittel des traditionellen Büros abgebildet (Desktop), sondern es werden auch die Möglichkeiten der neuen Medien eingesetzt. Es

wird bildhaft nicht das traditionelle gedruckte Buch auf eine DCD-Rom geschrieben, sondern eine neue flexible „Buchform“ entwickelt (Augmented Reality).

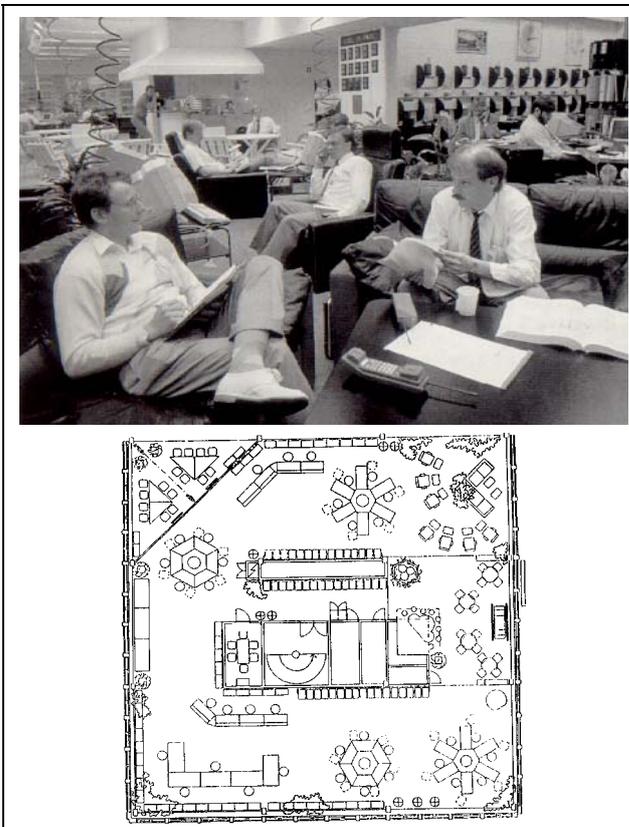


Abb. 7-12: Business Club. Digital Equipment Corporation, Espoo / Helsinki. Grundriss durch Mitarbeiter gestaltet, Helsinki 1986.



Abb. 7-13: Büro der Zukunft
Beispiel: virtuelles Aktengestell.

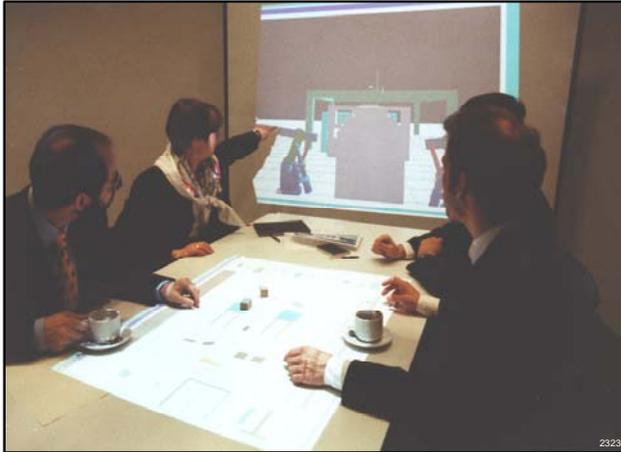


Abb. 7-14: Gruppenarbeit im Büro der Zukunft
Beispiel: Planung mit Build-it.

Eine Erweiterung im Sinne von AR, ein Schritt in Richtung eines anschaulichen papierlosen Büros ist das virtuelle Aktengestell (Abb. 7-13). Der Mitarbeiter am andern Arbeitsplatz kann die Verfügbarkeit von Akten direkt am sekundären Bildschirm erkennen.

Alle Lösungsansätze nehmen eher den Gedanken des Business-Büros auf als denjenigen anderer Büroorganisationen. Grundaxiom ist weiterhin ein ständiger, schneller Wechsel der Gruppenzugehörigkeit je nach Aufgabe sowie ein Wechsel zwischen Tätigkeiten als Einzelperson, in Kleingruppen und in Gesamtgruppen.

Build-It⁸

Build-it ist ein interaktives Instrument für Planungsarbeit in Gruppen. Ziel ist es, über ein anschauliches computer-generiertes Modell schnell zu einem gemeinsamen kognitiven Modell zu kommen und damit den Planungsprozess qualitativ zu verbessern und zu beschleunigen. Auf eine Tischfläche wird das Aktionsobjekt projiziert, z.B. der Grundriss einer Fabrik (Abb. 7-14). Die Objekte werden mit Stellvertretern (Bricks) manipuliert, deren Position automatisch bestimmt wird. Die Tischfläche wird

damit als inter-aktive Aktionsfläche wie eine Bildschirmoberfläche genutzt. Zusätzlich sehen die Akteure auf einer Wand eine perspektivische 2½-D Darstellung. Grösse und Standpunkt dieser Darstellung können ebenfalls mit aktiven Elementen kontinuierlich verändert werden (Abb. 7-15).

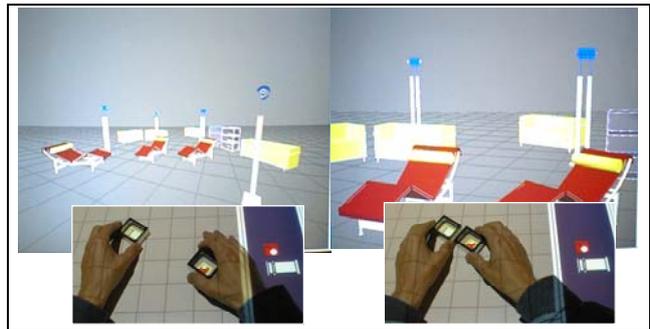


Abb. 7-15: Büro der Zukunft
Beispiel: manuelle Änderung des Vergrößerungsmaßstabes in Build-it.

Ambiente⁹

Ambiente integriert in einer interaktiven i-LAND Umgebung virtuelle Informationsräume und reale Architektur-Räume (Abb. 7-16). Mit den an jedem Arbeitsplatz vorhandenen Computern haben sich die Arbeitsbedingungen dramatisch verändert. Die Technologie bietet heute weitaus mehr Möglichkeiten als mit den Desktop-Maschinen genutzt werden. i-LAND ist eine Machbarkeitstudie, welche versucht, die Eingangsfunktion in die Informationswelt vom nun schon traditionellen „Desktop“ zu lösen und damit den Anforderungen von ad hoc Arbeitsgruppen, von virtuellen Organisationen, von physisch verteilten und mobilen Arbeitnehmenden, Desk Sharing und anderen Innovationen am Büroarbeitsplatz in „natürlicher“ Form gerecht zu werden. Empirische Studien zeigen, dass Gruppen mit einem ausgeglichenen Ver-

⁸ Fjeld, MORTON: <http://www.ihb.bepr.ethz.ch>

⁹ STREITZ A. et. al. (1999) i-LAND: An interactive landscape for creativity and innovation. Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, Pittsburg Pennsylvania, USA, ACM Press pp. 120-127
<http://www.darmstadt.gmd.de/ambiente> Juni 2001.

hältnis von individueller Tätigkeit, Tätigkeit in Subgruppen und in kompletten Gruppen bessere Ergebnisse liefern als solche, die ständig in einer kompletten Gruppe arbeiten. Hier liegt aber technologisches Entwicklungspotential für die Informatik.

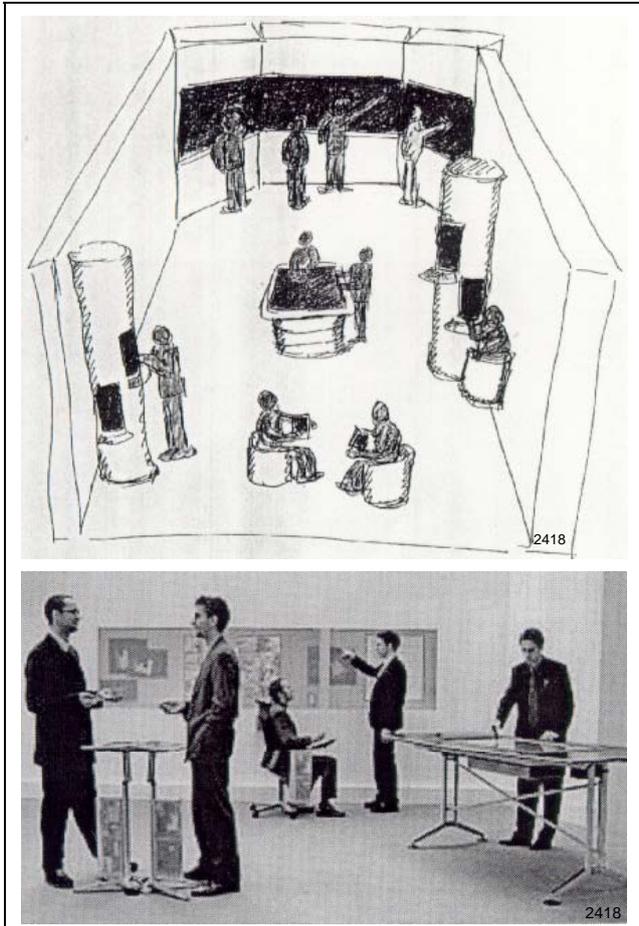


Abb. 7-16: Büro der Zukunft
Beispiel: Ambiente / i-LAND.

Für das i-LAND Büro gibt es bislang prototypisch verschiedene Arbeitsmittel (Room ware), nämlich:

- interaktive Projektwand (DynaWall, Abb. 7-17)
- interaktiver Tisch (InteracTable, Abb. 7-18)
- interaktiver Stuhl (CommChair, Abb. 7-19)
- Transportbaustein (Passage)

DynaWall ist ein grosser Touchscreen an der Wand. Die berührungsempfindliche Fläche bietet neue Human-Computer Interaktionen. Die

interaktiven Objekte hat der Benutzer an beliebiger Stelle zur Hand.

Der InteracTable stellt auf Tischen verschiedene Grössen Informationsobjekte für kleine Gruppen von 2-6 Personen zur Verfügung.

Der CommChair hat ein kabelfreies Interface zum Datennetz und eine unabhängig Stromversorgung. Er führt in den privaten Datenbereich.

Der Transport von komplexen Informationen aus verschiedenen Datenquellen ist häufig eine aufwendige Aufgabe. Für die Passage solcher Information wurde ein spezielles Hilfsmittel entwickelt. Es ist ein vom System erkennbarer einfacher realer Gegenstand (Bridge), an den die Information angedockt und transportiert werden kann.



Abb. 7-17: Büro der Zukunft: DynaWall.



Abb. 7-18: Büro der Zukunft: InteracTable.



Abb. 7-19: Büro der Zukunft: CommChair.

Office 21¹⁰

Das Projekt Office 21 nimmt den Gedanken „Arbeiten mit wem, wo und wann Du willst“ auf und versucht ihn mit moderner Informationstechnologie umzusetzen (Abb. 7-20). Für eine flexible Arbeit im Büro sind die sogenannten TIME-Branchen (Telekommunikation, Informationstechnologie, Medien, Entertainment) zentral. Für diesen Bereich gilt es, Kreativitätsräume zu schaffen. Während i-LAND vorwiegend auf visuelle Information abgestellt ist, wird im Office21 der multimedialen Informationstechnologie Rechnung getragen.

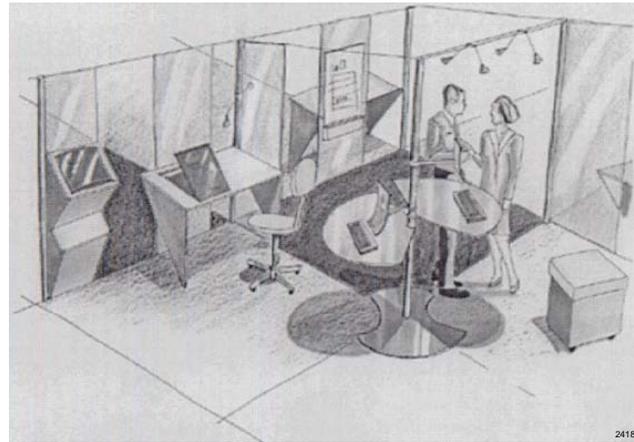


Abb. 7-20: Büro der Zukunft
Beispiel: Office 21.

Videokonferenzen vereinigen Bild und Ton. Holographie kombiniert mit Audio- und Videosensoren ermöglichen eine Telepräsenz. Persönliche, in der Kleidung oder auf der Haut getragene elektronische Geräte (Kopfhörer, Handy, Diktiergerät, Gebäudekonzepte mit informationstechnischer Infrastruktur, Satelliten-Navigationssystem, medizinisches Überwachungssystem) binden den Menschen in das weltweite Informationsnetz ein.

Es ist anzunehmen, dass neben Workflow- und Dokumentenmanagementsystemen Kommunikation- und Kreativitätssysteme eine wichtige Position einnehmen werden.

- Grundgedanke des Konzeptes ist eine hohe Flexibilität. Damit kommt der Informationstechnik, der Haustechnik, der Akustik und den raumstrukturierenden Elementen eine wichtige Bedeutung zu.

¹⁰ <http://www.office21.de>

8

Literatur

Zum Sehen und zur visuellen Wahrnehmung

- Goldstein E. B.: Wahrnehmungspsychologie. Spektrum Lehrbuch Spektrum Akademischer Verlag (2002).
- Rock, I.: Wahrnehmung. Vom visuellen Reiz zum Sehen und Erkennen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford (1985).
- Schmidt R. F., Lang F., Thews G.: Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie. Springer-Lehrbuch 29. Aufl. Springer Berlin (2005).
- Gregory R. L.: Auge und Gehirn. Psychologie des Sehens. rororo Taschenbücher Nr. 60805. Rowohlt (2001).
- Zwicker E., Fastl H.: Psychoacoustics. 2nd Ed., Springer-Verlag, Berlin (1999).
- Schmidtke H., Bubb H., Rühmann H., Schaefer P.: Lärmschutz im Betrieb. Bayerisches Staatsministerium für Arbeit Familie und Sozialordnung (1991).
- SUVA: Belästigender Lärm am Arbeitsplatz. Bestellnummer 66058.
- SUVA: Gehörgefährdender Lärm am Arbeitsplatz. Bestellnummer 44057.
- SUVA: Lärmbekämpfung in der Industrie. Bestellnummer 66076.
- SUVA: Musik und Hörschäden. Bestellnummer 84001.

zur Beleuchtung

- Lange H. (Hrsg.): Handbuch für Beleuchtung. 5. Aufl., Ecomed-Fachverlag (2005).
- Baer R., Eckert M., Gall D.: Beleuchtungstechnik. Grundlagen. Verlag Technik (1996).
- Hentschel H.-J.: Licht und Beleuchtung. Grundlagen und Anwendungen in der Lichttechnik. 5. Aufl. Hüthig (2002).
- Ris H.-R.: Beleuchtungstechnik für Praktiker. VDE-Verlag (2003).
- Verwaltungsberufsgenossenschaft VBG: Beleuchtung im Büro. BGI 856, Hamburg (2004).
- Kramer H., von Lom W.: Licht. Bauen mit Licht. Verlagsges. Müller (2002).

zum Klima

- Eissing G. (Hrsg.): Klima und Luft, Inst. für angewandte Arbeitswissenschaft IfaA; Wirtschaftsverlag Bachem, Köln (1986).
- Hettinger T.: Einfluss des Klimas auf den Menschen. Aus: Klima und Luft, Wirtschaftsverlag Bachem, Köln (1986).
- Wenzel H.G., Piekarski C.: Klima und Arbeit. Bayerisches Staatsministerium für Arbeit und Sozialforschung. 4. Auflage, München (1985).

zum Hören

- Schmidt, Lang, Thews: siehe „zum Sehen“

zur Arbeitsplatz-Ergonomie

- Pheasant S.: Body Space. Anthropometry, Ergonomics and Design. Taylor & Francis, London (1988).
- Burandt U.: Ergonomie für Design und Entwicklung. O. Schmidt, Köln (1978).
- Grandjean E.: Physiologische Arbeitsgestaltung. Leitfaden der Ergonomie. 4. Auflage, Ott Verlag Thun (1991).
- Woodson W.E., Tillman B., Tillman P.: Human Factors Design Handbook. 2nd Ed. McGraw-Hill, New York (1992).
- Schmidtke H.: Lehrbuch der Ergonomie; 3. Auflage, Hanser, München (1992).
- IfaA: Arbeitsgestaltung in Produktion und Verwaltung. Taschenbuch für den Praktiker. Wirtsch.verl. Bachem, Köln (1989).
- Krueger H.: Arbeiten mit dem Bildschirm – aber richtig! Bayerisches Staatsministerium für Arbeit, Familie und Sozialordnung (1993).
- SUVA: Die Arbeit am Bildschirm. Bestellnummer 44022.

zu Büroraumkonzepten

- Congena (Hrsg.): Zukunftsstrategie Kombi-Büro. Chancen für Architektur und Organisation. Verlag Callwey München (1994).
- Mehrabian A.: Räume des Alltags oder wie die Umwelt unser Verhalten bestimmt. Campus Verlag Frankfurt, New York (1978).

