

# Erschliessungsanlagen I

## Unterlagen zur Vorlesung

**Educational Material**

**Author(s):**

Heinimann, Hans-Rudolf

**Publication date:**

2001

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004175012>

**Rights / license:**

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



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

*D-FOWI*  
*Forstliches Ingenieurwesen*

# Erschliessungsanlagen I

## Erschliessungsplanung im ländlichen Raum

April 2001

---

Unterlagen zur Vorlesung

---

---

Prof. Dr. H.R. Heinimann

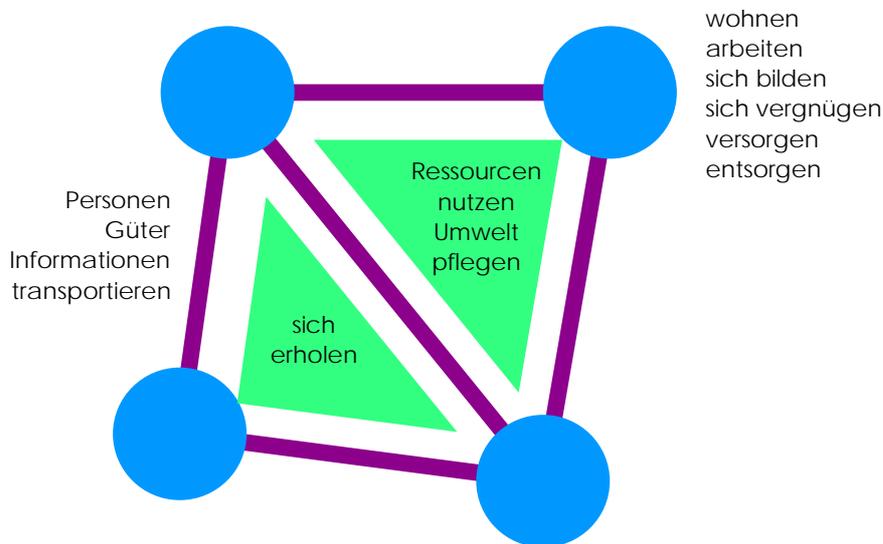
---

D-FOWI  
Forstliches Ingenieurwesen  
ETH-Zentrum HG G 23.2  
CH-8092 Zürich

Tel (+41) 1 632 32 36  
Fax (+41) 1 632 11 46  
e-mail [heinimann@fowi.ethz.ch](mailto:heinimann@fowi.ethz.ch)  
<http://www.fowi.ethz.ch/piw/teach/>

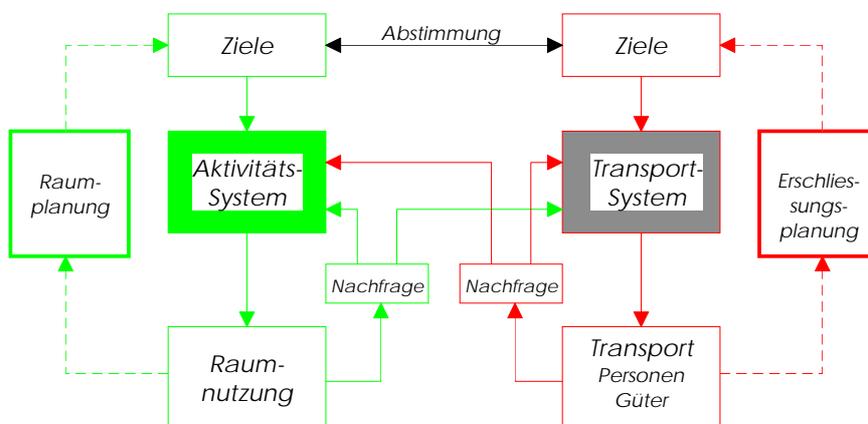
# 1. Einführung

## 1.1 Sozio-ökonomische Strukturen im ländlichen Raum



Ein urbanes Netzwerk überspannt die dichtbesiedelten Landschaften Mitteleuropas. Die sektorielle Unterscheidung zwischen „städtisch“ und „ländlich“ ist damit nicht mehr zweckmässig. Das wirtschaftliche Leben findet in den Knoten statt. Um den Austausch von Gütern, Personen und Information sicherstellen zu können, sind Transportanlagen und Transportsysteme notwendig.

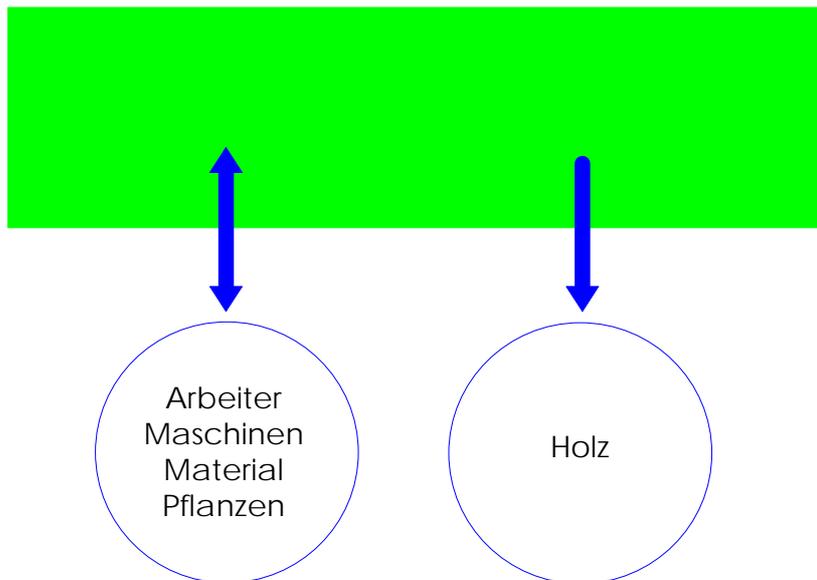
Im „ländlichen Raum“ finden die menschlichen Tätigkeiten nicht in Knoten sondern in der ganzen Fläche statt. Damit ist die Zugänglichkeit in forstlich und landwirtschaftlich genutzten Gebieten ein Flächenproblem und nicht ein „Punkt-Punkt“-Problem wie bei urbanen Erschliessungen. Dieser grundlegende Unterschied erfordert eine angepasste Methodik, die Gegenstand der Vorlesung „Erschliessungsanlagen I“ ist



Produktion und Transport stehen in einer engen Wechselbeziehung. Die kulturgeschichtliche Entwicklung des Alpenraumes wurde primär durch die Entwicklung der Verkehrswege geprägt. Diese Feststellung gilt auch in kleineren Einheiten. Die Entwicklung eines Erschliessungsnetzes fördert in der Regel die menschlichen Nutzungs-, Produktions- und Erholungsaktivitäten. Die Entwicklung von Erschliessungssystemen und Landnutzungssystemen muss daher zwingend ganzheitlich betrachtet werden.

Steinlin (1984) definiert Forstwirtschaft als „*alle menschlichen Aktivitäten, die darauf ausgerichtet sind, Waldökosysteme in einen Zustand zu bringen oder in einem Zustand zu erhalten, in welchen sie in der Lage sind, bestimmte menschliche Bedürfnisse nach Gütern und/oder Dienstleistungen nachhaltig zu erfüllen*“.

## 1.2 Transportbedürfnisse



Transportbedürfnisse entstehen aus arbeitsteilig organisierten Gesellschaften. Für die Walderhaltung und -pflege müssen Personen zur Arbeit in den Wald und wieder zurück an ihren Wohnort transportiert werden (Pendeltransporte). Der nachwachsende Rohstoff Holz wird im Einwegtransport aus dem Wald in die Verbraucherzentren transportiert (rund 4.5 Mio m<sup>3</sup> pro Jahr!).

Die Menge „Personentransport“ wird in der Regel in *Personenkilometern* angegeben. Die unterschiedlichen menschlichen Tätigkeiten

- wohnen,
- arbeiten,
- sich vergnügen,
- sich bilden,
- sich versorgen,
- entsorgen

ergeben Personenströme, die als Transportbedürfnisse verstanden werden.

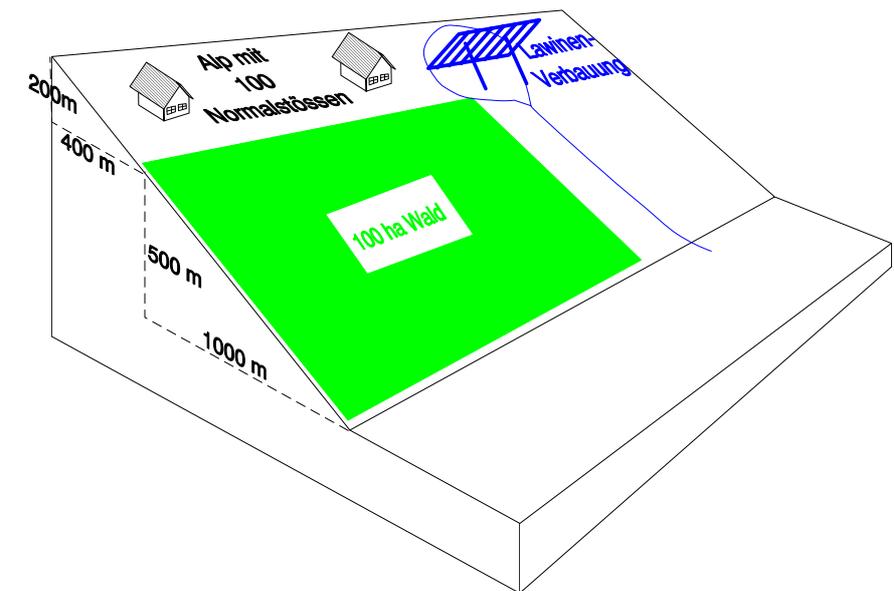
Die Menge „Gütertransport“ wird in der Regel in *Tonnenkilometern* angegeben. Die wichtigsten zu transportierenden Güter sind:

- Rohstoffe,
- Nahrungsmittel,
- „Energistoffe“,

- Kapitalgüter (Maschinen, Anlagen),
- Konsumgüter,
- Abfälle.

Der Zweck der Ingenieurwissenschaften ist, *menschliche Bedürfnisse* mit Hilfe von Technik zu *befriedigen*. Am Anfang jeden technischen Handelns muss somit die Klärung der Bedürfnisse stehen.

### 1.3 Problemmodell



Im Alpenraum sind verschiedene Landnutzungsformen eng miteinander verzahnt. Wald, Landwirtschaft, Alpwirtschaft, Tourismus und Siedlungsgebiete überziehen unsere Landschaft mit einem reich gegliederten Muster. Eine ganzheitliche Betrachtung erhebt den Anspruch, die aus den verschiedenen Nutzungen entstehenden Transportbedürfnisse ganzheitlich in eine technische Problemlösung zu integrieren (sog. *Integrale Erschliessung*).

Es ist heute allgemein anerkannt, dass technische Anlagen und Systeme auch Risiken in sich bergen. Damit ergibt sich die Problemstellung, die die Erschliessungsplanung zu lösen hat:

*Wie muss ein Transportsystem (Kombination von Anlagen und Transportmitteln) gestaltet werden, damit eine optimale Gesamtwirkung erreicht wird?*

- *Wie sollen neu anzulegende Transportsysteme gestaltet werden?*
- *Wie sollen und können vorhandene Planungen an die heutigen Bedürfnisse und technischen Möglichkeiten angepasst werden?*
- *Wie sollen und können vorhandene Erschliessungsanlagen (z.B. Wegnetze aus den Jahren 1950 bis 1965) an die heutigen Bedürfnisse und technischen Möglichkeiten angepasst werden?*

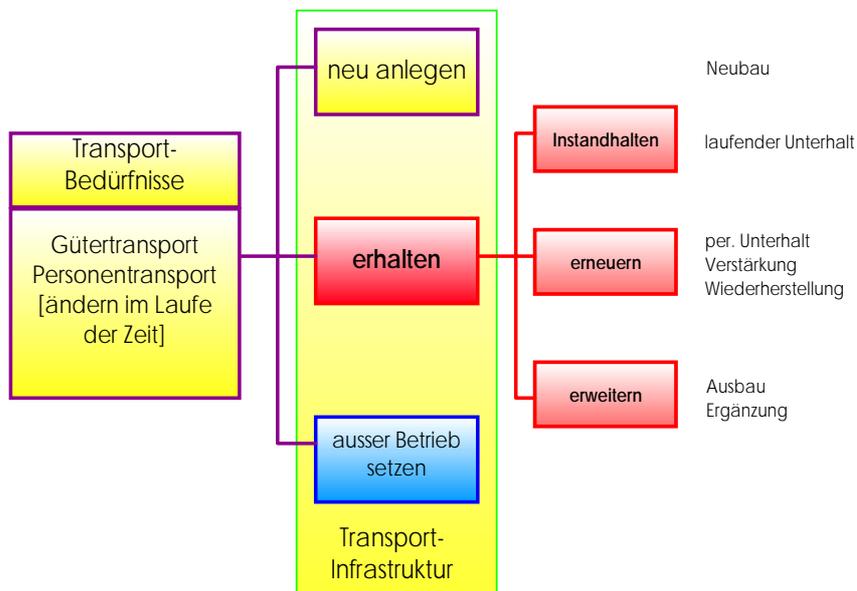
## 1.4 Gegenstand der Erschliessungsplanung

Erschliessungsplanung wird wie folgt definiert:

*Aufgabe der integralen Erschliessungsplanung ist es, **Transportsysteme** für die Landnutzung zu entwickeln, welche die gesellschaftlichen und individuellen **Transportbedürfnisse** in einem abgegrenzten Gebiet **gesamtheitlich befriedigen**.*

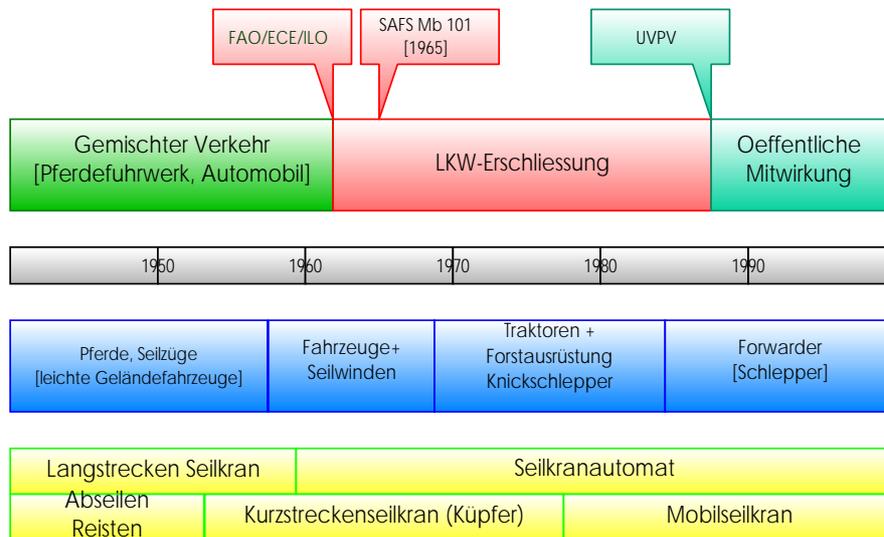
*Transportsysteme bestehen aus zwei Komponenten:*

- *ortsfesten **Erschliessungsanlagen**, die permanent im Gelände angelegt sind und*
- ***Transportmittel**, die mobil im Gelände eingesetzt werden.*



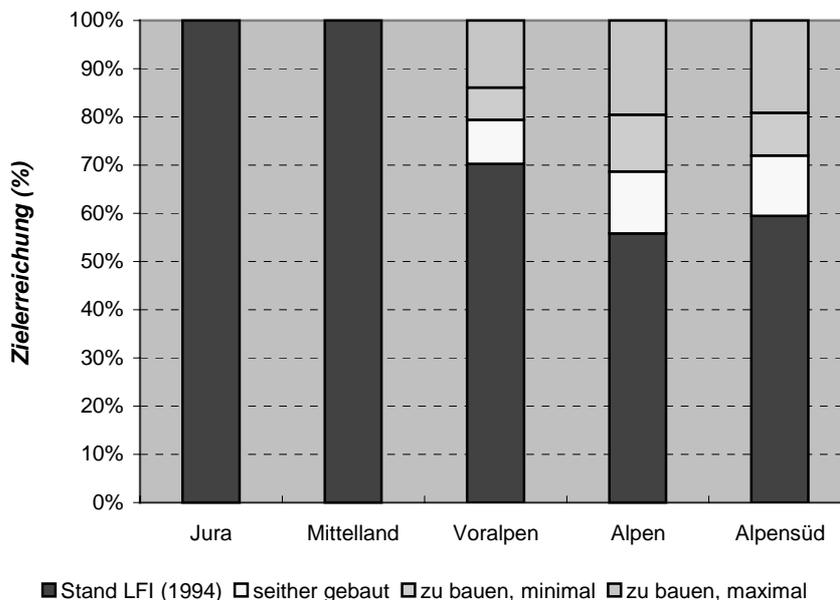
Mit dem Beginn der modernen Forstwirtschaft entstand das Bedürfnis, Erschliessungsanlagen **neu anzulegen**. In Mitteleuropa haben wir gut entwickelte Erschliessungsanlagen. Das Problem verlagert sich zunehmend auf die **Erhaltung (Re-Engineering)**, während es in Einzelfällen auch vorkommt, dass Erschliessungsanlagen **ausser Betrieb gesetzt** werden.

# 1.5 Historische Entwicklung der forstlichen Erschliessungsplanung als wissenschaftliche Disziplin

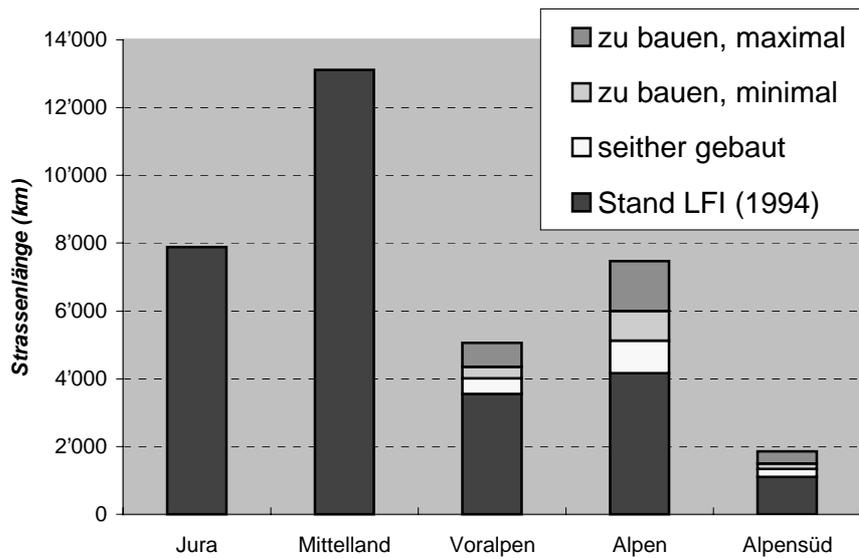


Die Entwicklung der forstlichen Erschliessung ist eng mit der Entwicklung der entsprechenden Transporttechnologie verbunden. Bis zum zweiten Weltkrieg dominierten mit tierischer Kraft gezogene Fuhrwerke. Mit dem Durchbruch des Lastwagentransportes entwickelte sich eine eigentliche Transporttheorie, die auf ein internationales FAO/ECE/ILO Seminar zurückgeht. Die neueste Entwicklung versucht, die Umweltverträglichkeit in die Ueberlegungen miteinzubeziehen.

# 1.6 Stellenwert der Erschliessungsplanung in der Schweiz



Aus heutiger Sicht ist die Erschliessung im schweizerischen Mittelland und im Jura praktisch abgeschlossen. Im Alpengebiet erreicht die Erschliessung einen Ausbaugrad von etwa 75%. Zahlen gemäss Landesforstinventar II, zukünftiger Bedarf geschätzt.



Aus heutiger Optik kann das Neubauvolumen mit minimal etwa 500 km, maximal mit etwa 2000 km geschätzt werden. Eine genaue Zahl lässt sich nicht ermitteln, da die Zielvorstellungen und die gesellschaftliche Akzeptanz einem stetigen Wandel un-

## 1.7 Aktuelle Probleme und Konflikte

Die Hauptprobleme der Erschliessung liegen im Problemfeld „Technik-Oekologie“. Leider werden fast immer nur die Konflikte öffentlich diskutiert. In vielen Punkten besteht jedoch Uebereinstimmung, so z.B. bei

- der Erhaltung des Waldareals;
- der nachhaltigen Erhaltung und Nutzung unserer natürlichen Ressourcen;
- dem Verzicht auf flächendeckend gleich intensive Nutzung;
- der Bedeutung des erneuerbaren Rohstoffes Holz;
- ...

Hingegen bestehen Konflikte auf verschiedenen Ebenen. So z.B. auf der Ebene der Zielsetzungen:

- bei der Nutzungsintensität;
- beim Ausmass und der Pflege von Waldreservaten;
- bei der Frage, was unter „naturnaher Waldwirtschaft“ zu verstehen ist.

Auf der Ebene der Massnahmen stehen folgende Konflikte an:

- bei den Erschliessungs- und Ernteverfahren;
- bei den Verfahren zur Walderneuerung;
- bei der Baumartenwahl;
- beim Ausmass von Alt- und Totholzbeständen;
- bei der Gestaltung von Waldrändern.

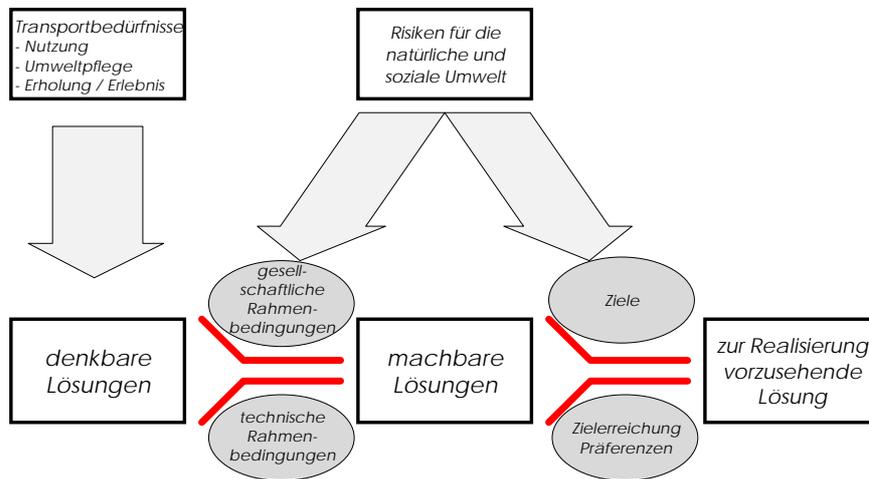
## 1.8 Lehrveranstaltung: Erschliessungsanlagen I

Die Vorlesung „Erschliessungsplanung“ ist eine Einführung und soll:

- ingenieurmässiges Problemlösen vermitteln,
  - insbesondere den methodischen Rahmen, um Transportbedürfnisse und andere raumwirksame Interessen zu erfassen, zu bewerten und im Rahmen der wirtschaftlichen, technischen und gesellschaftlichen Möglichkeiten zu entscheidungsreifen Projekten zu entwickeln.
- einen ganzheitlichen Denkansatz zeigen;
- Konzepte und Theorien der Erschliessungsplanung darstellen;
- Offenheit gegenüber neuen Ideen vermitteln;
- die Fähigkeit entwickeln, fundierte technische Entscheidungen vorzubereiten.

## 2. Rahmenbedingungen

### 2.1 Allgemeines



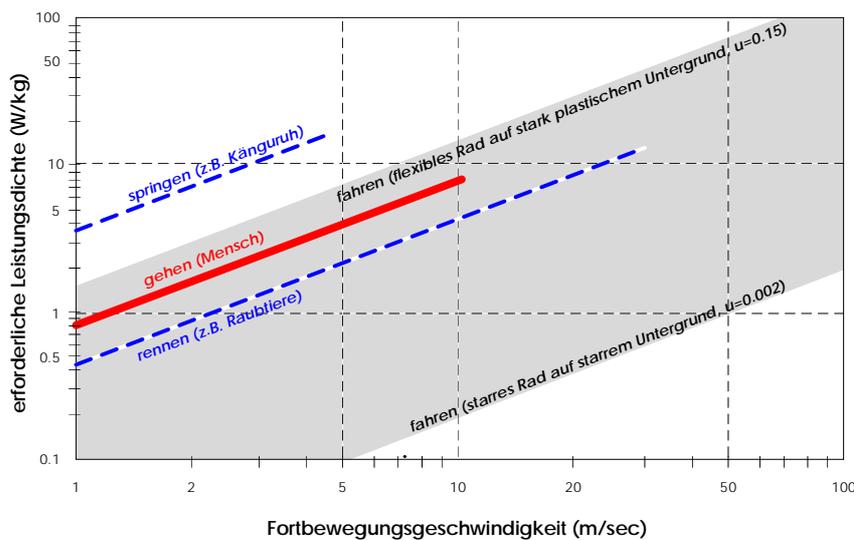
Die zur Realisierung vorzusehende Lösung wird nach dem Prinzip „vom Groben zum Detail“ ermittelt. Es gibt eine ganze Anzahl denkbarer Lösungen, welche die Transportbedürfnisse, die das Planungsvorhaben ausgelöst haben, befriedigen könnten. Sie werden allerdings eingeschränkt durch technische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen. Aus den machbaren Lösungen wird jene für die Realisierung vorgesehen, welche die Ziele am besten erreicht.

### 2.2 Technische Rahmenbedingungen

#### 2.2.1 Denkbare Lösungen

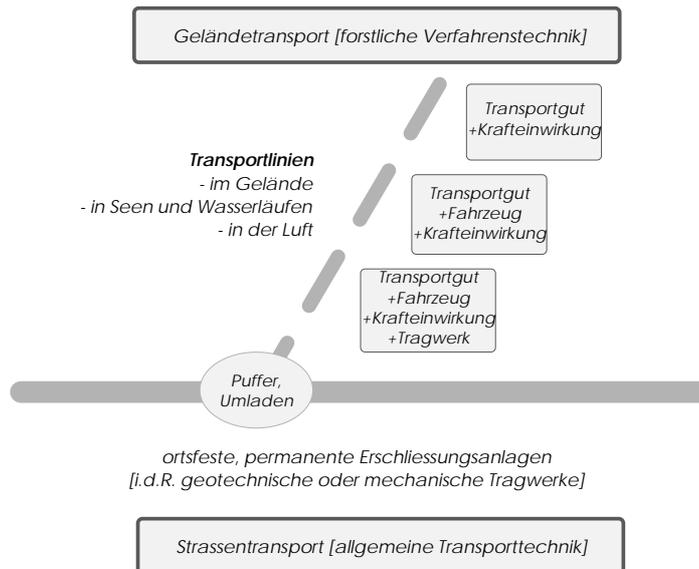
Prinzip des Geländetransportes	Vorgang	Anlagen/Transportlinien	Mobile Systeme Transporttechnologie
<b>gleiten, rutschen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>mit Schwerkraft</li> <li>mit Zugkraft</li> </ul>	<b>rücken (skid)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>reisten</li> <li>rücken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reistzüge, Riesen</li> <li>Wege, Rückegassen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Halbschalen (Log Lines)</li> <li>Traktoren, Schlepper, Schlitten</li> </ul>
<b>tragen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>mit menschlicher Kraft</li> <li>mit tierischer Kraft</li> </ul>	<b>rücken</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wege</li> <li>Wege</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Handgeräte</li> <li>Pferde</li> </ul>

Prinzip des Geländetransportes	Vorgang	Anlagen/Transportlinien	Mobile Systeme Transporttechnologie
<i>rollen (auf Rädern)</i>	<i>rücken (forward)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wege, Rückegassen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forwarder</li> </ul>
<i>rollen (aufgehängt)</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• mit Schwerkraft</li> <li>• mit Zugkraft</li> </ul>	<i>rücken (yard)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seillinien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konventionelle Seilkräne</li> <li>• Mobilseilkräne</li> </ul>
<i>schwimmen</i>	<i>flößen</i> <i>triften</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rechen</li> <li>• Klausen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Handgeräte</li> </ul>
<i>fliegen</i>	<i>rücken</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ballone</li> <li>• Helikopter</li> <li>• Luftschiffe</li> </ul>



BEKKER entwickelte eine Theorie der landgestützten Fortbewegung. Er stellt unter anderem einen Zusammenhang zwischen erforderlicher Leistungsdichte und gewünschter Fortbewegungsgeschwindigkeit her. Die radgestützte Fortbewegung ist bezüglich Effizienz allen anderen Fortbewegungsarten überlegen, sofern Rad und Fahrbahn starr sind. Mit zunehmender Plastizität der Unterlage wird der Bewegungswiderstand grösser. Gehen und rennen, wie es die Natur kennt, sind vor allem bezüglich Anforderungen an den Untergrund hoch überlegen. BEKKER folgert, dass sich das Rad durchgesetzt habe, weil Befestigungen von Fahrbahnen sehr leicht realisiert werden konnten.

Forstliche Erschliessungen bestehen aus zwei Komponenten: (1) aus ortsfesten, dauerhaften, linienförmigen Anlagen und (2) aus Geländetransport-Technologie, wie sie die forstliche Verfahrenstechnik entwickelt und beschreibt.



## 2.2.2 Technische Grenzen der Erschliessungsanlagen

Der Begriff **Anlagen** ist rechtlich relevant, da er für den Vollzug verschiedener Gesetze von Bedeutung ist. So wird er beispielsweise in den Bau- und Planungsgesetzen, den Gewässerschutzgesetzen sowie in den Natur- und Heimatschutzgesetzen verwendet. Gemäss Art. 22 RPG brauchen Bauten und Anlagen grundsätzlich eine Bewilligung, weshalb entscheidend ist, was unter einer Anlage zu verstehen ist.

Bauten und Anlagen sind (gemäss Erläuterungen zum Raumplanungsgesetz) mindestens jene **künstlich geschaffenen** und **auf Dauer angelegten** Einrichtungen, die in bestimmter fester Beziehung zum Erdboden stehen und geeignet sind, die Vorstellungen über die Nutzungsordnung zu beeinflussen, sei es, dass sie

- den Raum äusserlich erheblich verändern;
- die Erschliessung belasten;
- die Umwelt beeinträchtigen.

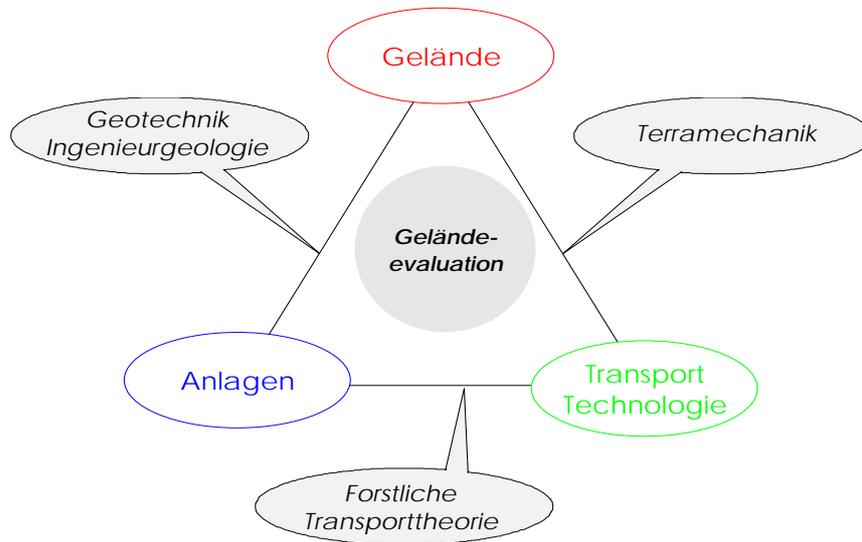
Unter Anlagen versteht man im engeren Sinn mindestens Verkehrseinrichtungen und erhebliche Geländeänderungen.

Forstlich relevante Verkehrseinrichtungen sind:

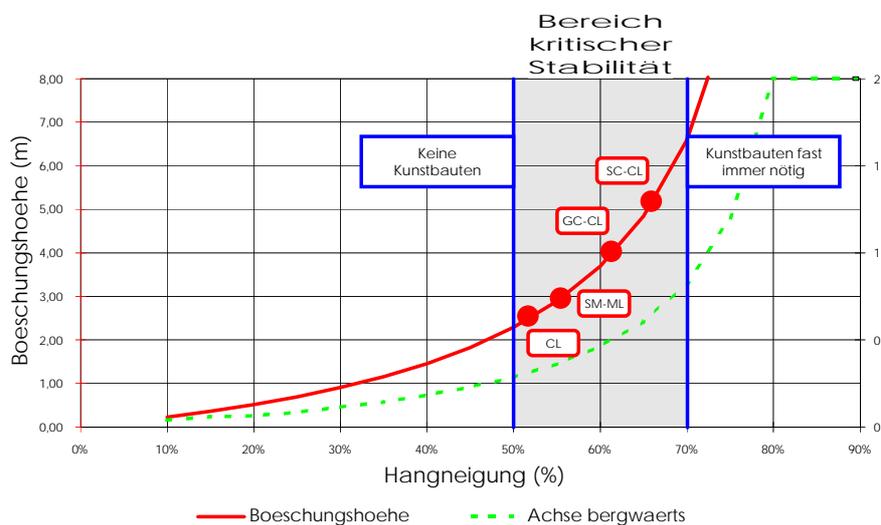
- **Strassen** (künstlich geschaffene Verkehrsflächen, die mit sämtlichen gemäss Verkehrsgesetzgebung zugelassenen Fahrzeugen befahren werden können);

- **Wege** (Rückewege, Maschinenwege, Fusswege, Traktorwege); d.h. künstlich geschaffene Verkehrsflächen, die nur mit bestimmten Fahrzeugtypen befahren werden können.

Für forstliche Transportsysteme spielen daneben **Gelände-Transportlinien** (Rückegassen, Seillinien, Pflegeschneisen) eine bedeutende Rolle. Sie werden ohne Erdbewegungen angelegt und gelten somit nicht als Anlagen.



Die künstlichen Komponenten „Erschliessungsanlagen“ und „Gelände-Transporttechnologie“ stehen in enger Wechselbeziehung mit dem Gelände, das als gegeben hingenommen werden muss. Die technischen Grenzen für die Erschliessungsanlagen ergeben sich primär aus geotechnischen und ingenieurgeologischen Gegebenheiten.



Böschungsinstabilität ist ein Gefährdungsbild, das für die geotechnische Bemessung von Strassenkörpern massgebend ist. Die Berechnung von Böschungsstabilitäten ist ein wichtiges Teilgebiet der Geotechnik. Die zulässige Böschungshöhe hängt ab von der Bruchmechanik, den Scherparametern des Bodens und der Geometrie von Gelände und Bauwerk.

Ingenieure sind nicht frei im Umgang mit geotechnischen Problemstellungen. Hinweise über den Umgang mit geotechnischen Risiken finden sich in der SIA Dokumentation D064, aus der folgendes zu entnehmen ist:

- Gefährdung von Leib und Leben muss ausgeschlossen sein;

- Risiko muss mit dem Auftraggeber unter Nennung der Folgen vereinbart werden;
- das Risiko muss in einem angemessenen Verhältnis zum wirtschaftlichen Nutzen stehen;
- akzeptierte Risiken sind zur Einschränkung des Risikofalles durch angemessene Kontrollen zu überwachen.

Nichtbeachtung dieser vier Voraussetzungen gilt als Verstoß gegen die Sorgfaltspflicht und begründet im Schadenfall ein Verschulden.

### 2.2.3 Technische Grenzen des Transportes im Gelände

Eine erste Grenze ergibt sich aus der Befahrbarkeit. Die Terramechanik stellt Methoden und Modelle zur Verfügung, mit denen die Befahrbarkeit abgeschätzt werden kann.

Die *Bodenverhältnisse* sind eine entscheidende Grösse, die mit drei Grössen charakterisiert wird:

- *der Bodentragfähigkeit*. Im einfachsten Fall wird sie mit dem Eindringwiderstand eines Kegelpenetrometers gemessen. Aus der Bautechnik ist der CBR-Wert bekannt. In der Terramechanik wird meistens der CI-Wert verwendet (Kraft (in kN), die benötigt wird, um einen 30° Kegel mit einer Basisfläche von 0.5 Quadrat-Inch in den Boden hineinzudrücken. Komplexere Modelle basieren auf den Scherparametern  $\phi$  und  $c'$  sowie Parametern für die Zusammendrückbarkeit des Bodens (Bevameressungen nach BEKKER).
- *Der Hangneigung*. Der Hangabtrieb wirkt als zusätzlicher Bewegungswiderstand.
- *Der Oberflächenrauigkeit*. Sie versucht, die räumliche Variabilität von Hindernishöhe und -häufigkeit zu beschreiben. Aus heutiger Sicht können Radfahrzeuge Hindernisse mit einer maximalen Höhe von 80 cm überwinden (Tandem-Achsen).

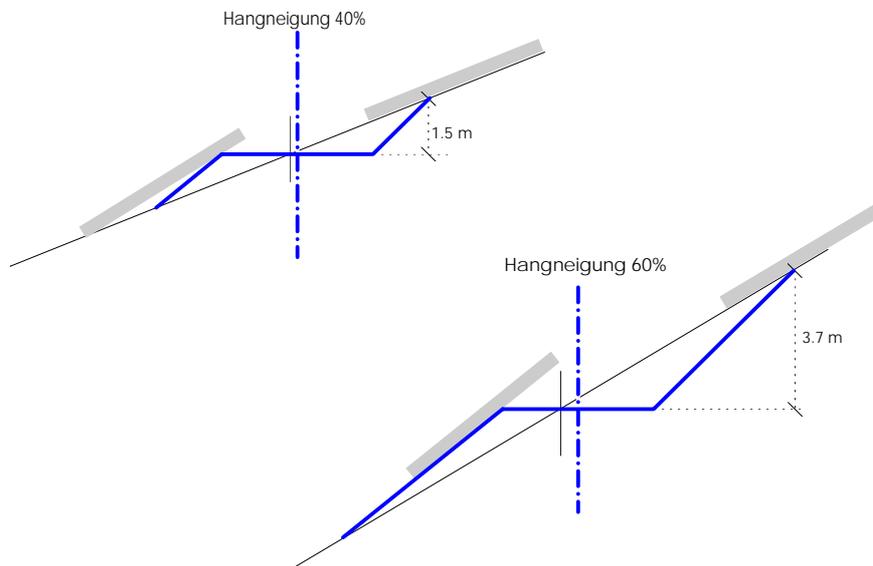
Die Quantifizierung der *Fahrzeugeigenschaften* ist eine weitere Voraussetzung, um die technischen Grenzen der Befahrbarkeit abzuschätzen. Reifenparameter (Durchmesser, Breite, Innendruck, Bauweise), Anordnung und Antrieb der Räder (Anzahl, Allradantrieb) sowie die statischen und dynamischen Kräfte, die auf die einzelnen Räder einwirken, sollten bekannt sein, damit eine Aussage über die Befahrbarkeit möglich ist.

KUONEN (1983) gibt als Grenze der Befahrbarkeit 25% an. Mit den aktuellsten terramechanischen Modellen kann folgendes festgestellt werden:

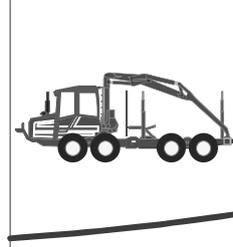
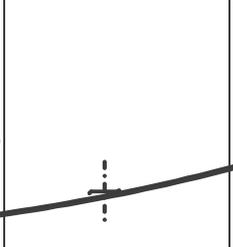
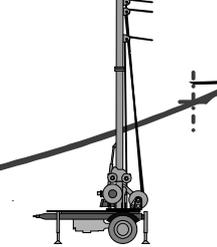
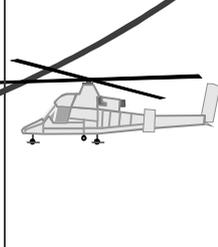
- die Steigfähigkeit hängt von den Bodeneigenschaften ab. Bei Bodentragfähigkeiten von 1% CBR liegt sie bei etwa 15% Hangneigung. Bei sehr guten Bodentragfähigkeiten ( $> 15\%$  CBR) liegt sie bei 30% bis 35% Hangneigung.

- Die Fahrzeugeigenschaften beeinflussen die Steigfähigkeit ebenfalls. Mit zunehmender Reifenbreite nimmt sie zu, ebenfalls mit abnehmendem Reifendruck.

Die Grenzen der Befahrbarkeit ergeben sich aus heutiger Sicht aus den ökologischen Risiken, die das Befahren mit sich bringt.



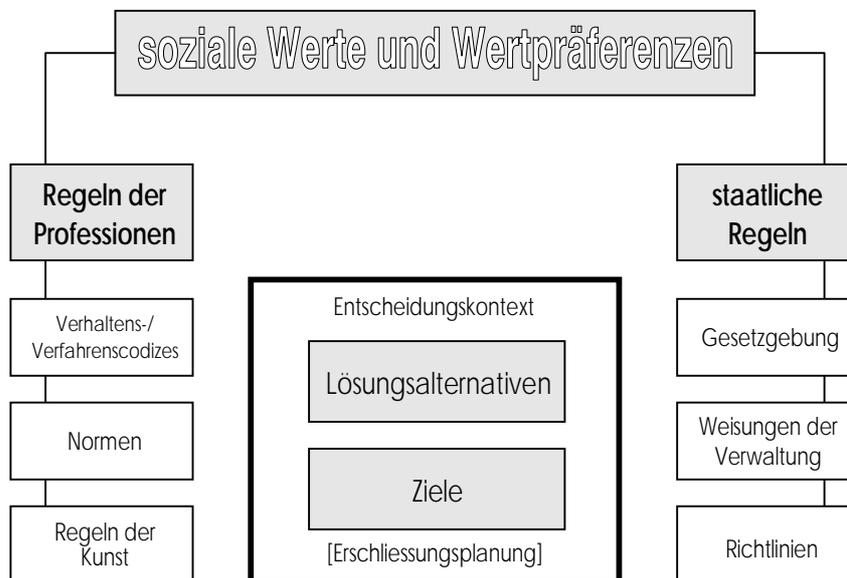
In Hanglagen kann nicht mehr direkt im Gelände gefahren werden. Eine Möglichkeit, Holz zu einer Erschliessungsanlage zu bringen, liegt im Gleiten über den Boden, entweder mit Zugkraft oder mit Schwerkraft. Je steiler das Gelände, desto schwieriger wird die Uebernahme an der Schnittstelle.

boden-gestützt		seil-gestützt	luftfahrzeug-gestützt
			
<b>Rückegassen</b>	<b>Maschinenwege</b>	<b>Seillinien</b>	<b>Fluglinien</b>
			
<b>Kriterien</b>	10-35% Neigung ökonomisch ökologisch	35-50% Neigung ökonomisch ökologisch	ökonomisch ökologisch

In mitteleuropäischen Verhältnissen werden die Gelände-Transport Technologien wie folgt abgegrenzt. In befahrbaren Lagen stellt der Transport mit Forwardern die wirtschaftlichste und umweltverträglichste Lösung dar. In Hangneigungen zwischen etwa 25% und 40% wird das Holz von Maschinenwegen aus mit Windschleppern zugezogen. Oberhalb von etwa 40% Hangneigung bilden Seilkräne das Rückgrat des Holzrückens.

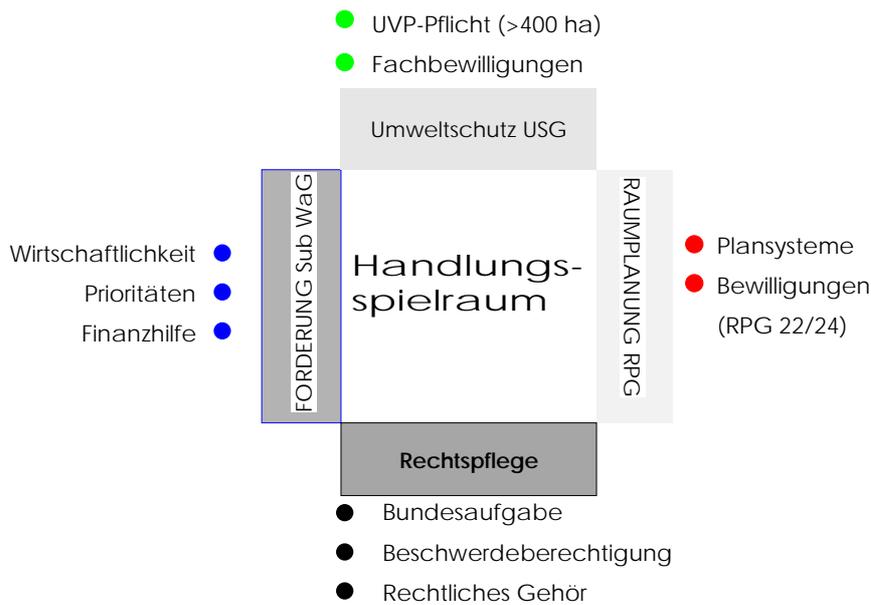
## 2.3 Gesellschaftliche Rahmenbedingungen

### 2.3.1 Normative Regelwerke



Gesellschaftliche Konventionen und Regeln werden in unterschiedlicher Form festgelegt. Die staatlichen Regeln sind für jedermann verbindlich und können mit Zwang durchgesetzt werden (gesetzliche Normen). Professionen haben ihre eigenen Regelwerke, die unterschiedliche Verbindlichkeiten haben.

### 2.3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen



Rechtliche Rahmenbedingungen sind in folgenden Bereichen zu beachten: Bei der Umweltschutzgesetzgebung, bei der Raumplanung, bei der forstwirtschaftlichen Förderung und bei der Rechtspflege (öffentliche Mitwirkung).

### 2.3.3 Professionelle Regelwerke

Regelwerke sind auf folgenden Ebenen vorhanden:

- weltweit mit ISO Normen;
- europäisch als EUROCODES;
- schweizerisch mit SN Normen. Normen über Baustoffe (Kies, Beläge, ...) und mit SIA-Normen;
- für den forstlichen Strassenbau sind immer noch die Merkblätter der Schweizerischen Arbeitsgemeinschaft für den forstlichen Strassenbau SAFS im Gebrauch, obwohl sie in vielen Fällen revisionsbedürftig sind.

### 2.3.4 „Regelwerke“ der NGOs

Non-governmental Organizations (NGOs) haben in vielen Staaten Mitwirkungsrechte. Sie stellen ihre eigenen Regeln auf, die fallweise konsultiert werden sollten. So fordert der Schweizerische Bund für Naturschutz in seiner Publikation „Thesen für mehr Natur im Wald“ (1989):

- *Die Grenzen der Walderschliessung erkennen (These 12). Walderschliessungen sind, wo ihr Erfordernis eindeutig belegt ist, so zurückhaltend und naturschonend wie möglich anzulegen. Sie sind einem öffentlichen Bewilligungsverfahren zu unterstellen.*

## 3. Erschliessungs-Modelle

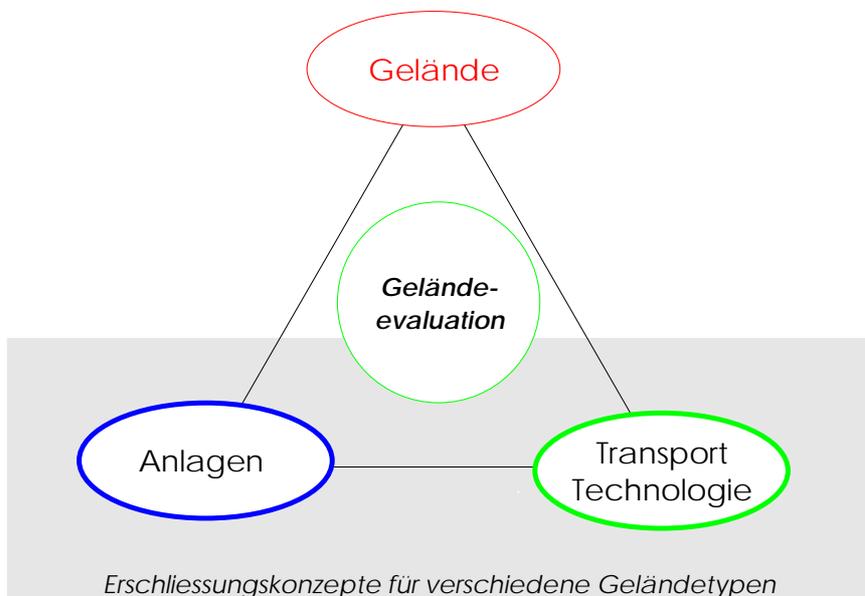
### 3.1 Begriffliche Abgrenzung

Das Grundproblem besteht darin, wie Erschliessungsanlagen und Transporttechnologie aufeinander abgestimmt werden sollen. Die grosse Variabilität der Geländebedingungen erschwert die Fragestellung beträchtlich. Um komplexe Probleme - wie sie Erschliessungssysteme darstellen - behandeln zu können, müssen die konkreten Sachverhalte abstrahiert werden. Diese Abstraktion findet vorerst im Problemfeld statt und führt zu:

- graphisch-anschaulichen, vereinfachten Abbildungen der Realität (Modellen);
- quantitativ beschreibbaren Strukturmodellen, welche die Realität mathematisch-abstrakt wiedergeben.

Auf der abstrakten Modellebene können Lösungsprinzipien hergeleitet werden, die durch schrittweise Verfeinerung an die realen Verhältnisse angepasst werden müssen.

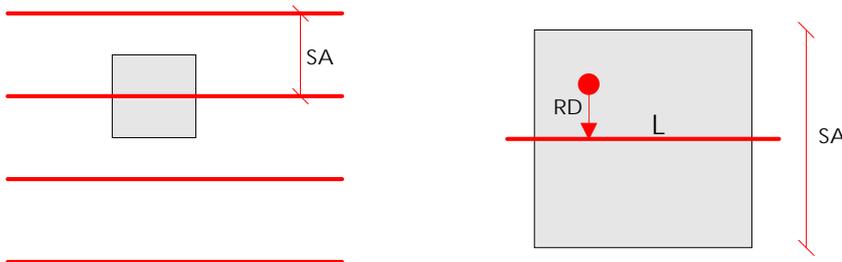
Die Lösungsprinzipien, die uns für forstliche Erschliessungsprobleme zur Verfügung stehen, werden auch **Erschliessungskonzepte** genannt. Erschliessungskonzepte sind Modellvorstellungen, welche die räumliche Anordnung der Anlagen und Transportlinien für bestimmte Transporttechnologien und Geländetypen in abstrakter Form festlegen.



Erschliessungsplanung ist ein Optimierungsproblem mit verschiedenen Zielgrößen. Zum einen geht es darum, die Bau- und Unterhaltskosten für Erschliessungsanlagen zu minimieren. Zum anderen sollen die Kosten für Transporte im Gelände ebenfalls minimiert werden. Ein wichtiges Teilziel umfasst zudem die Minimierung der Auswirkungen auf die Umwelt. Um das Optimierungsproblem einzugrenzen müssen verschiedene Erschliessungskonzepte hergeleitet und analysiert werden.

## 3.2 Modelle in der Ebene

### 3.2.1 Systematische Anordnung der Transportlinien



Das einfachste Grundmodell geht von der Annahme aus, dass wir uns in einer geometrischen Ebene mit einer unendlichen Ausdehnung befinden. Ein Strassennetz wird parallel angeordnet, wobei die einzelnen Strassenzüge unendlich lang sind. Von jedem Punkt der Ebene aus erfolgt der Transport im Gelände „querfeldein“ auf dem kürzesten Weg zur nächstgelegenen Strasse.

Es lassen sich folgende Zusammenhänge definieren:

$$\text{Strassendichte} \quad SD = \frac{L}{F} \quad [3.1]$$

$$\text{Strassenabstand} \quad SA = \frac{F}{L} \quad [3.2]$$

Aus den Formeln [3.1] und [3.2] ergibt sich folgender Grundzusammenhang [3.3]:

$$SD \cdot SA = \frac{L \cdot F}{F \cdot L} = 1 \quad [3.3]$$

Wenn der Transport auf dem kürzesten Weg an die nächste Strasse erfolgt, beträgt die Rückedistanz RD

$$\text{Rückedistanz} \quad RD = \frac{SA}{4} \quad [3.4]$$

Aus den Formeln [3.3] und [3.4] lässt sich herleiten, welche Strassendichte nötig ist, um eine vorgegebene mittlere Rückedistanz zu erreichen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Rückedistanzen gleichmässig im Intervall  $[0, SA/2]$  verteilt sind. Der Mittelwert repräsentiert deshalb die wirklichen Verhältnisse nur annähernd.

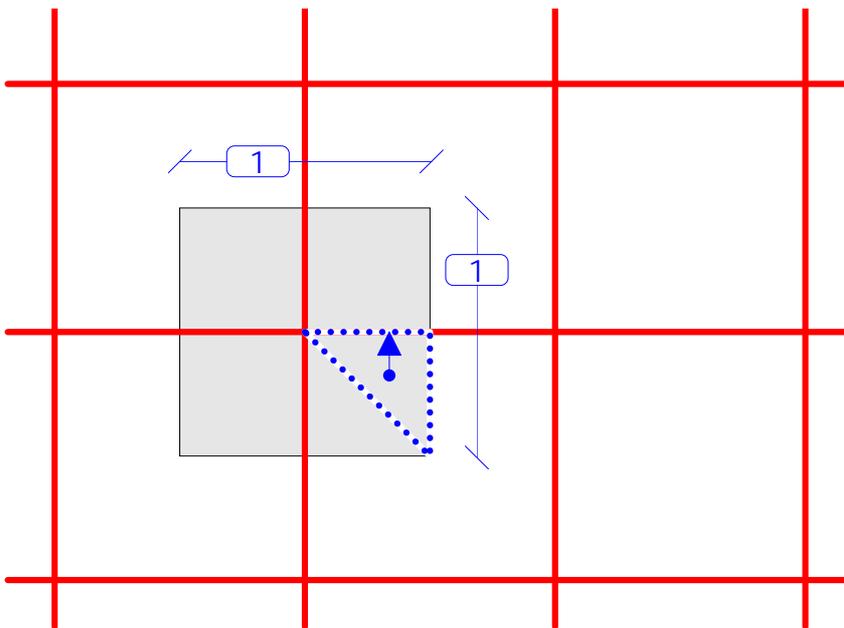
$$\text{Strassendichte} \quad SD = \frac{1}{4 \cdot RD} \quad [3.5]$$

Es ist üblich, dass die Strassendichte in Meter pro Hektar (m'/ha) angegeben wird, während Distanzen immer in Metern angegeben werden. Damit erhält die Formel [3.3] folgende Form:

$$SD \cdot SA = \frac{10000m}{10000m^2} \cdot m = \frac{m \cdot m}{ha} \cdot 10000 \quad [3.6]$$

Um eine durchschnittliche Rückedistanz von 250m zu erreichen, ist folgende Strassendichte erforderlich:

$$SD = \frac{10000}{4 \cdot 250} \cdot \left[ \frac{m}{ha} \right] = 10 \left[ \frac{m}{ha} \right]$$



Der Modellfall mit unendlich langen, parallelen Strassen spiegelt die realen Verhältnisse nur unzureichend wieder. An einer kreuzweisen Anordnung soll deshalb geprüft werden, wie Strassendichte und Rückedistanzen zusammenhängen.

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass für die betrachtete Teilfläche  $F=1$  und  $L=2$  ist. Daraus lassen sich die theoretische und die effektive Rückedistanz berechnen.

$$RD_{Modell} = \frac{SA}{4} = \frac{F}{L \cdot 4} = \frac{1}{2 \cdot 4} = 0.125$$

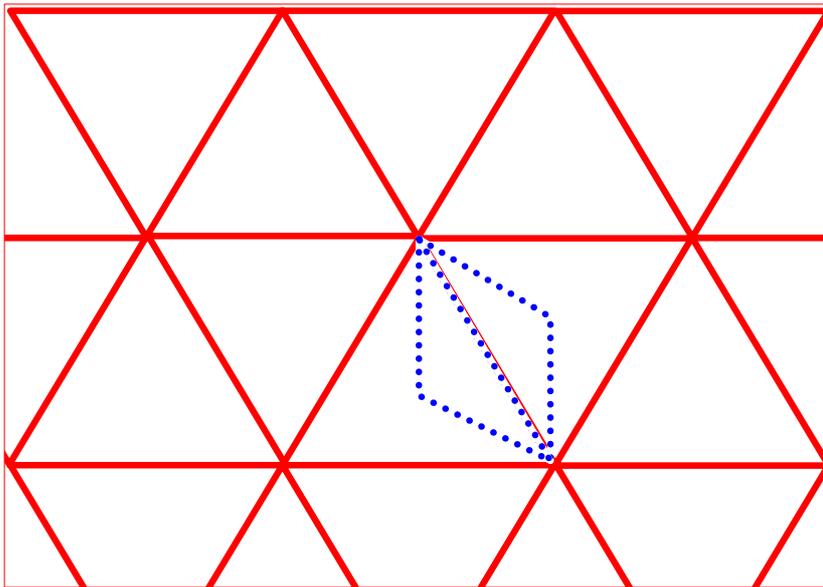
Die effektive mittlere Rückedistanz entspricht der Distanz vom Schwerpunkt eines Dreiecks, das die Transportverhältnisse für die ganze Fläche repräsentiert. Sie beträgt

$$RD_{Gitter} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{6} = 0.1667$$

Das Grundmodell (Formel [3.4]) liefert eine zu kleine Rückedistanz. SEGBADEN (1964) hat einen Korrekturfaktor definiert, der diese Modellungengenauigkeit korrigiert. Er bezeichnet ihn als Netzkorrekturfaktor V:

$$\text{Netzkorrekturfaktor } c_{net} = \frac{RD_{effektiv}}{RD_{Modell}} \quad [3.7]$$

Nachfolgend werden einige weitere Fälle untersucht.



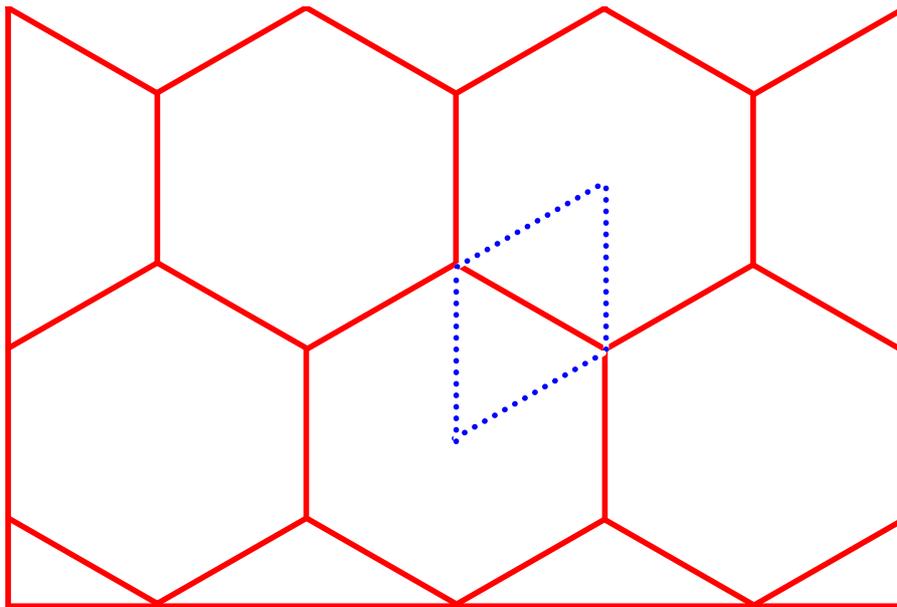
Anordnung der Strassenlinien dreiecksförmig.

$$L = 1$$

$$F = \tan(30^\circ)$$

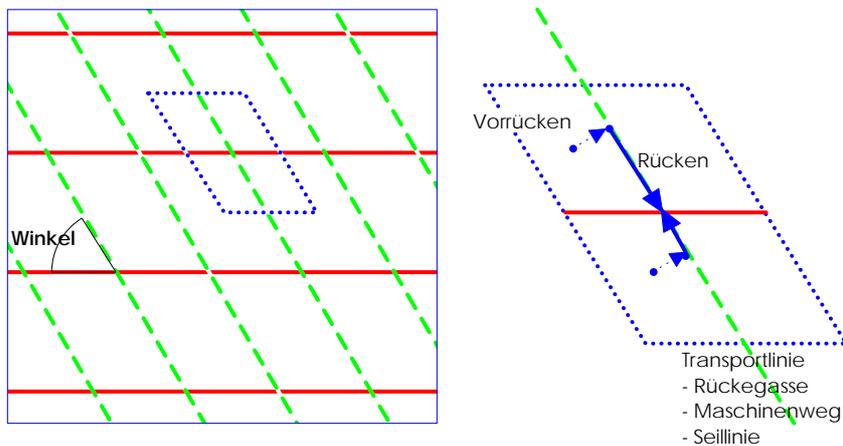
$$RD_{Modell} = \frac{SA}{4} = \frac{F}{L \cdot 4} = \frac{\tan(30^\circ)}{4} = 0.1443$$

$$RD_{Dreieck} = \frac{\tan(30^\circ)}{3} = 0.1925$$

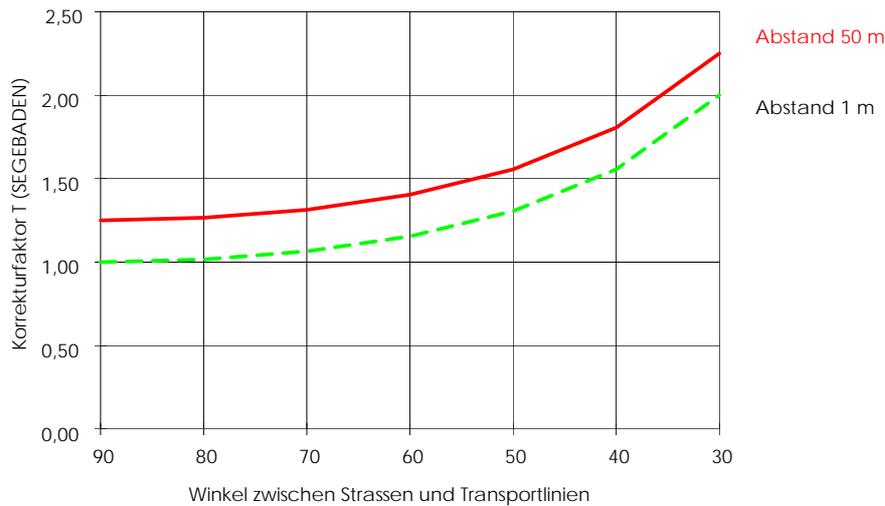


Sechseckförmige Anordnung des Strassennetzes.

**Modell mit zwei Klassen von Transportlinien**



Die Grundannahmen bleiben dieselben wie beim Basismodell, d.h. es wird ein paralleles Strassennetz ausgelegt. Der Transport im Gelände geschieht jedoch nicht mehr „querfeldein“, sondern wird auf sekundären Transportlinien abgewickelt, die im Idealfall senkrecht zu den Strassenlinien stehen. Die Rückedistanz setzt sich in diesem Fall aus zwei Teilen zusammen: (1) dem Vorrücken von jedem Punkt der Fläche bis an die nächstgelegene Transportlinie und (2) dem Rücken auf der Transportlinie.



Die Rückedistanz hängt ab von (1) dem Winkel zwischen den sekundären Transportlinien und den Strassen und (2) dem Abstand der sekundären Transportlinien. Die kleinst mögliche Rückedistanz gemäss Formel [3.4] dient als Vergleichsbasis. Der dargestellte Korrekturfaktor gibt das Verhältnis von effektiver Rückedistanz zur theoretischen Rückedistanz des Basismodells an.

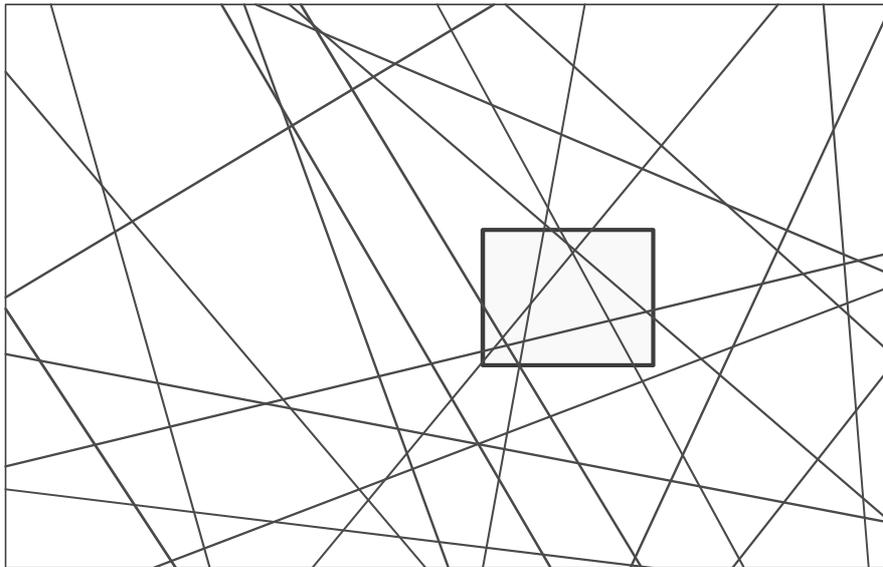
Damit lässt sich ein zweiter Korrekturfaktor definieren, mit dem das Basismodell angepasst werden kann. SEGBADEN (1964) bezeichnet diesen Faktor als Rückedistanz-Korrekturfaktor T:

$$\text{Rückedistanz-Korrekturfaktor } c_{\text{offr}} = \frac{RD_{\text{gewunden}}}{RD_{\text{senkrecht}}} \quad [3.8]$$

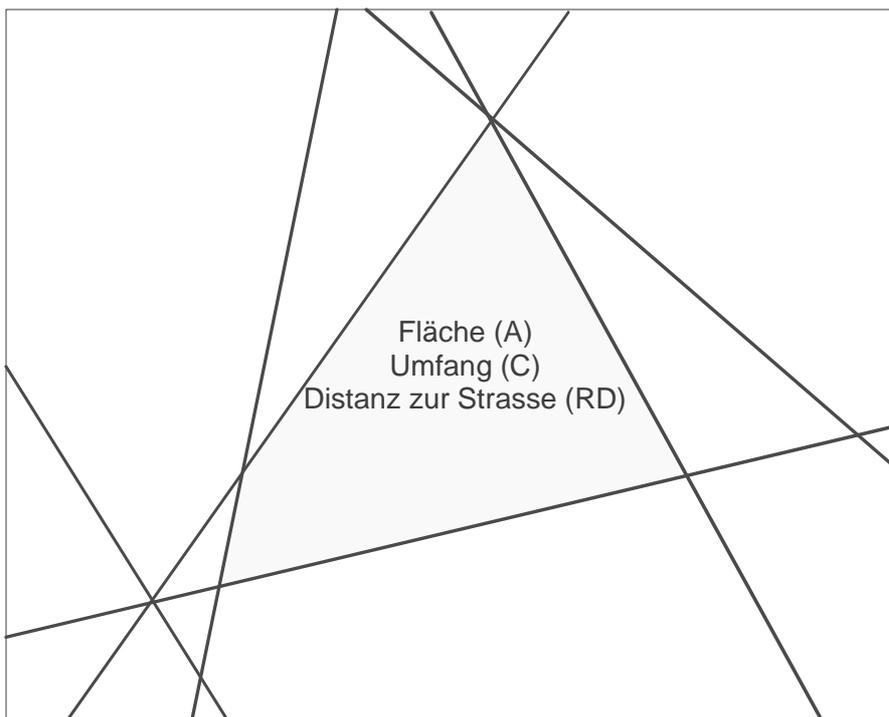
Der Rückedistanz-Korrekturfaktor T ist im Idealfall 1.0. Unter realen Bedingungen liegt er gemäss Untersuchungen von Abegg (1978) zwischen 1.15 und 1.65. Damit lautet die korrigierte Modellbeziehung:

$$RD_{\text{eff}} = \frac{SA}{4} \cdot c_{\text{net}} \cdot c_{\text{offr}} \quad [3.9]$$

### 3.2.2 Stochastische Anordnung der Transportlinien



Die stochastische Geometrie stellt eine einfache Methode zur Verfügung, um zufällig in der Ebene ausgelegte Geraden zu beschreiben, das sogenannte Poisson-Feld. Damit lässt sich das Problem mathematisch formulieren.



Ein Poisson-Feld erzeugt Teilflächen, die immer Polygone sind. Damit sich die für Erschliessungsnetze gewünschten Kenngrößen ermitteln lassen, müssen folgende Parameter bekannt sein: die zu erwartende Fläche, der zu erwartende Umfang und die zu erwartende Rückedistanz.

Aus der stochastischen Geometrie sind folgende Zusammenhänge bekannt:

$$E(C) = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad \text{Erwartungswert für den Umfang} \quad [3.10]$$

$$E(A) = \frac{\pi}{\lambda^2} \quad \text{Erwartungswert für die Fläche} \quad [3.11]$$

$$E(N) = 4 \quad \text{Erwartungswert für die Anzahl Seiten} \quad [3.12]$$

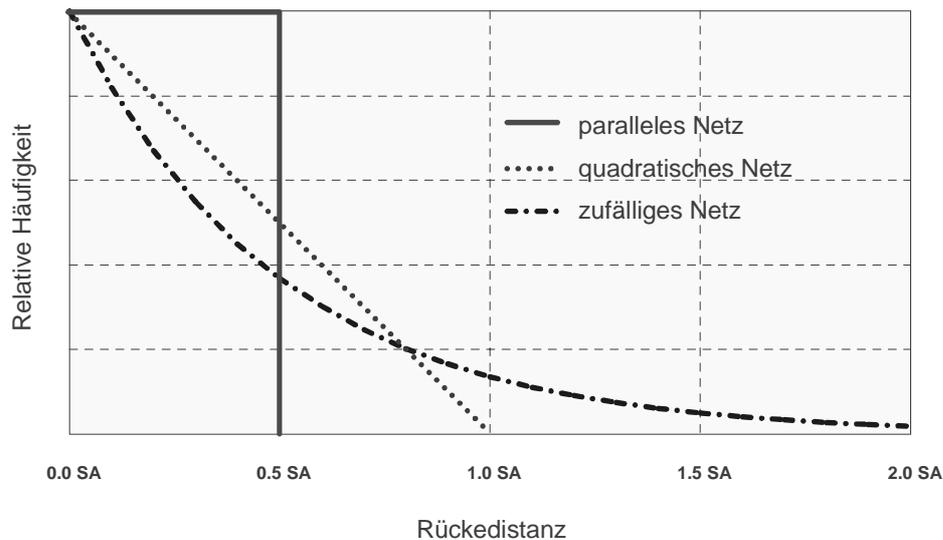
$$E(RD) = \frac{1}{2 \cdot \lambda} \quad \text{Erwartungswert für die Rückedistanz} \quad [3.13]$$

Damit lassen sich folgende Beziehungen berechnen

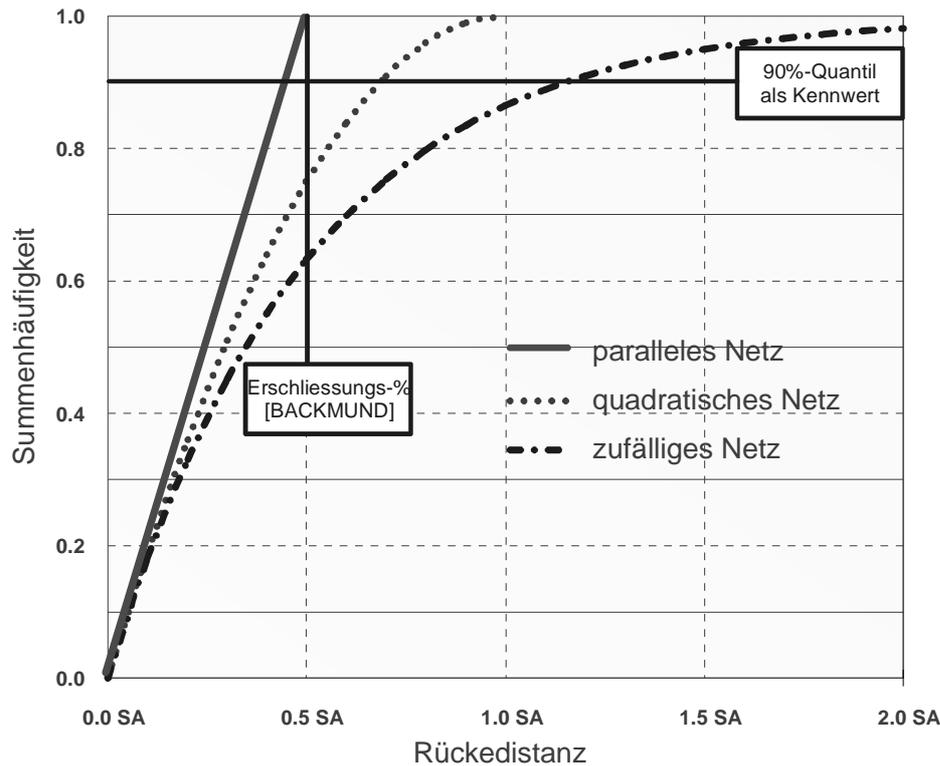
$$E(SD) = \frac{E(C)}{2 \cdot E(A)} = \frac{\pi \cdot \lambda^2}{\lambda \cdot \pi} = \lambda \quad [3.14]$$

Aus dem Vergleich der Ausdrücke [3.13] und [3.14] ist ersichtlich, dass der Netzkorrekturfaktor  $c_{\text{net}}$  für ein Poissonfeld genau 2 ist. Dieser Zusammenhang wurde von MATERN erstmals dargestellt und in SEGEBADEN (1964) für forstliche Erschliessungsnetze publiziert.

### 3.2.3 Variabilität der Rückedistanzen

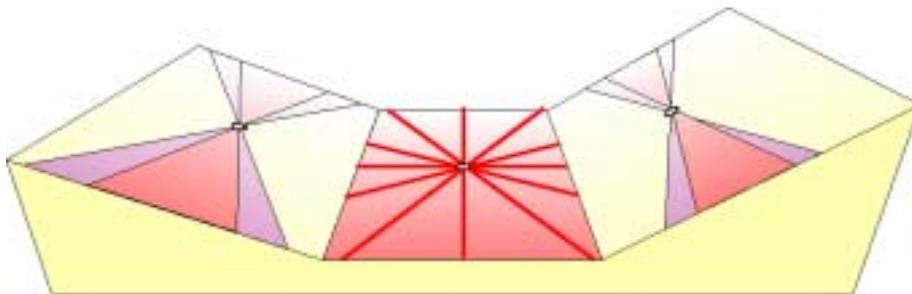


Dichtefunktionen beschreiben die zu erwartende Wahrscheinlichkeit für verschiedene theoretische Netzkonfigurationen. Für praktische Belange sind die maximal zu erwartenden Rückedistanzen massgebend, da sie die technische Machbarkeit prägen.

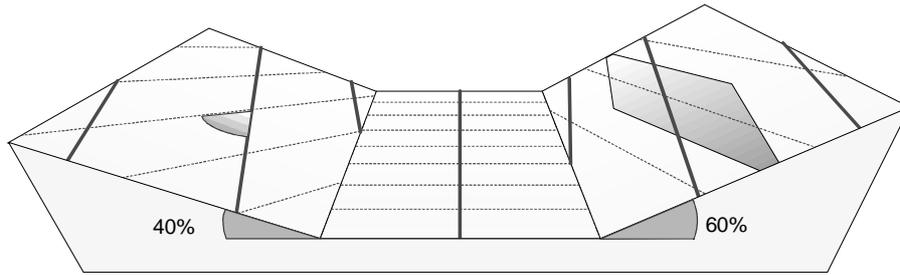


Die Summenhäufigkeit der Verteilung der Rückedistanzen erlaubt eine qualitative Beurteilung der räumlichen Variabilität. Backmund (1964) führte den Begriff des Erschliessungsprozentes ein, das jedoch als Qualitätsmass eine umstrittene Grösse ist. Besser wäre beispielsweise ein Quantilwert, der für die technische Machbarkeit aussagekräftiger ist.

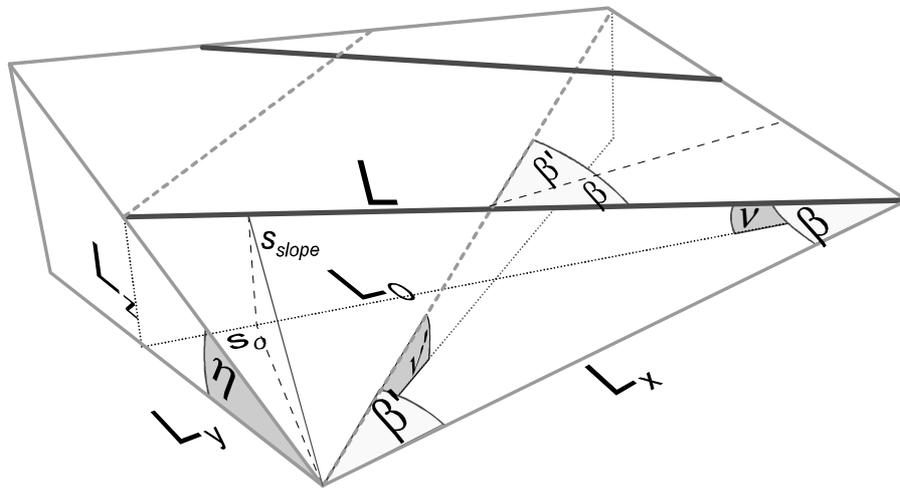
### 3.3 Modelle in Hanglagen



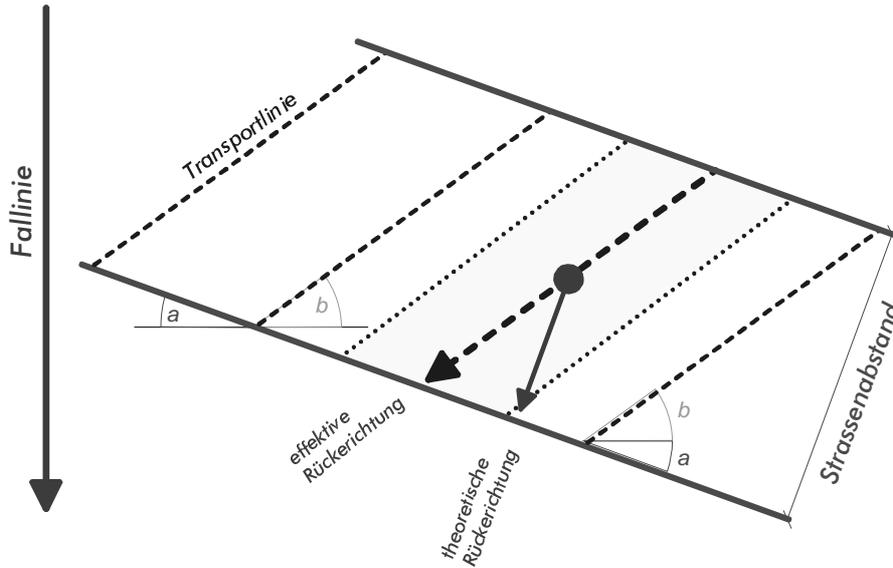
Während in ebenem Gelände Transportlinien in jeder beliebigen Richtung ausgelegt werden können, sind die geometrischen Möglichkeiten in Hanglagen beschränkt. Die maximale Längsneigung ist durch die Steigfähigkeit resp. Bremskapazität der Fahrzeuge begrenzt.



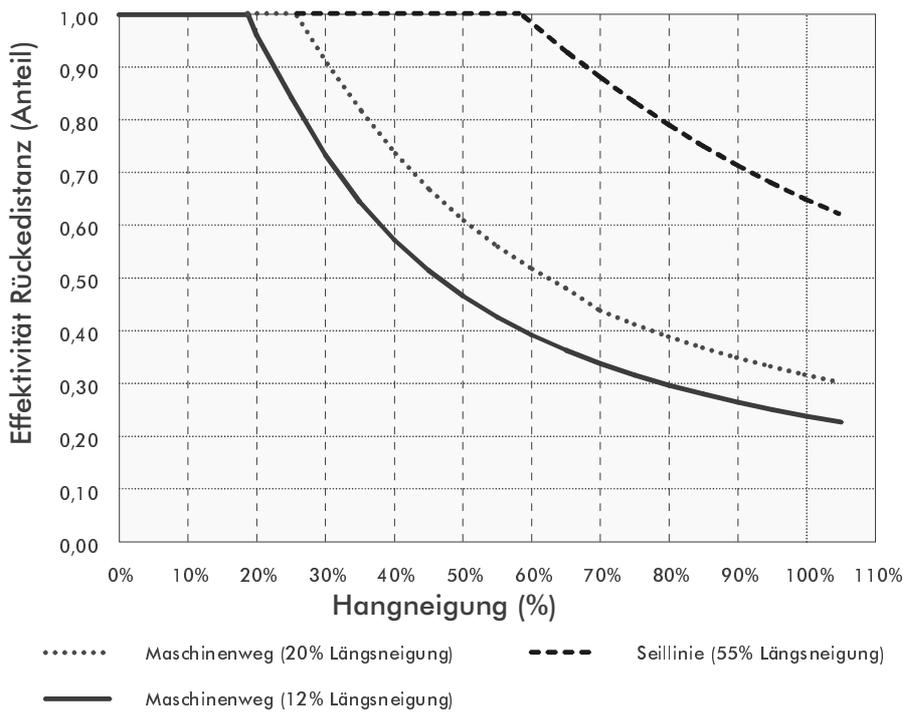
Aus transporttechnischer Sicht geht es darum, Strassen und Transportlinien senkrecht zueinander anzuordnen. Diese Forderung lässt sich mit zunehmender Hangneigung infolge der begrenzten Längsneigung von Strassen und Transportlinien nicht mehr verwirklichen. Der Winkel zwischen Strassen und Transportlinien wird mit zunehmender Hangneigung kleiner als  $90^\circ$ .



Strassennetze in Hanglagen können aus Linien in einem 3D-Raum beschrieben werden, die auf einer schiefen Ebene angeordnet sind. Damit lassen sich die Einflüsse der Hangneigung auf die Netzgestaltung untersuchen. (vgl. HEINIMANN 1998)



Die optimale Erschliessungswirkung wird erreicht, wenn Grob- und Feinerschliessungslinien senkrecht aufeinander stehen. Diese Forderung wird mit zunehmender Hangneigung eingeschränkt, so dass ein spitzer Winkel resultiert. Das Grundmodell dient für die Optimierung und Abgrenzung verschiedener Konzepte.



Strassen mit 12% Längsneigung werden kombiniert mit drei verschiedenen Feinerschliessungslinien. Solange die beiden Haupt- und Nebentransportlinien senkrecht aufeinanderstehen, ergibt sich eine minimale Rückedistanz. Mit zunehmender Hangneigung wird die Rückedistanz länger. Die Grafik zeigt das Verhältnis von theoretisch kürzester zu effektiver Rückedistanz, das ein Effektivitätsmass ist.

## 3.4 Ökonomische Optimierung von Erschliessungsmodellen

### 3.4.1 Kostenmodelle für Netze mit einer Klasse von Transportlinien

MATTHEWS (1942) formulierte erstmals ein Modell, mit dem der optimale Strassenabstand berechnet werden kann. Dabei ging er von folgenden Annahmen aus

$$C_{skid} = f_{skid} + \frac{SA}{4} \cdot k_{skid} \quad [3.15]$$

mit  $k_{skid}$  Variable Rückekosten  $[CHF m^{-3} \cdot m^{-1}]$

$f_{skid}$  Fixkosten Rücken pro Lastzyklus  $[CHF m^{-3}]$

$$C_{road} = \frac{k_{road} \cdot 10000}{V_{harv} \cdot SA} \quad [3.16]$$

mit  $k_{road}$  Strassenbaukosten  $[CHF m^{-1}]$

$V_{harv}$  Erntevolumen  $[m^3 ha^{-1}]$

MATTHEWS (1942) begründete den Zusammenhang [3.16] intuitiv, wobei er US-Dimensionen verwendete (acre, cords, feet), womit sich anstelle von 10000 eine andere Konstante ergibt. Aus der Addition von [3.15] und [3.16] ergibt sich die Kostenfunktion, für die wir ein Minimum suchen. Dies erreichen wir, indem wir die Kostenfunktion nach SA differenzieren und gleich Null setzen.

$$C_{tot} = f_{skid} + \frac{SA}{4} \cdot k_{skid} + \frac{k_{road} \cdot 10000}{V_{harv} \cdot SA} \quad [3.17]$$

$$C'_{tot} = \frac{1}{4} \cdot k_{skid} - \frac{k_{road} \cdot 10000}{V_{harv} \cdot SA^2} = 0 \quad [3.18]$$

$$SA = 2 \sqrt{\frac{k_{road} \cdot 10000}{k_{skid} \cdot V_{harv}}} \quad [3.19]$$

Mit Formel [3.19] errechnete MATTHEWS (1942) optimale Strassenabstände von 740 Fuss (225 m), woraus eine aus heutiger Sicht hohe Strassendichte von knapp 50 m<sup>3</sup>/ha resultierte. MATTHEWS' Formel hat sich im amerikanischen Raum in ihren Grundzügen bis heute gehalten, obwohl SEGEBADEN (1964) wesentliche Beiträge zur Transportgeometrie lieferte, welche mit den Korrekturfaktoren  $c_{net}$  und  $c_{offr}$  eine Anpassung an reale Verhältnisse ermöglichte. Zudem legte MATTHEWS die Annahme zugrunde, dass Strassenbau

und Ernte (Kahlschlag) in einem einzigen Zeitpunkt geschehen, und die Investition nicht aktiviert wird. Erweitert man [3.19] um die Korrekturfaktoren  $c_{net}$  und  $c_{offr}$  sowie einen Annuitätsfaktor  $a$ , so erhält man [3.20].

$$SA = 2 \sqrt{\frac{a \cdot k_{road} \cdot c_{net} \cdot 10000}{k_{skid} \cdot c_{offr} \cdot V_{harv}}} \quad [3.19]$$

Dabei ist zu beachten, dass  $a$  die Dimension  $a^{-1}$  hat, und  $V_{harv}$   $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ . In Europa wird in der Regel nicht der optimale Strassenabstand bestimmt, sondern die optimale Strassendichte. Setzt man in [3.17] anstellen von  $SA=10000/SD$  ein, so ergeben sich

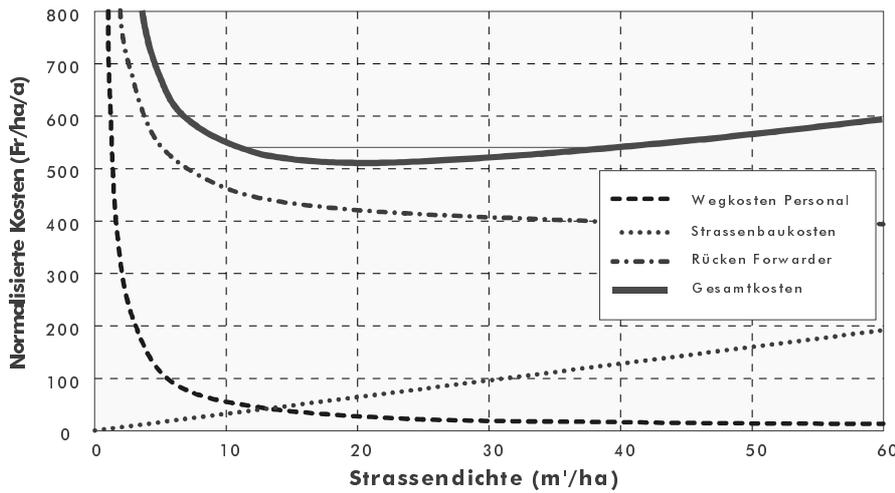
$$C_{tot} = f_{skid} + \frac{10000}{4 \cdot SD} \cdot k_{skid} + \frac{k_{road} \cdot SD}{V_{harv}} \quad [3.20]$$

$$C'_{tot} = -\frac{10000}{4 \cdot SD^2} \cdot k_{skid} + \frac{k_{road}}{V_{harv}} = 0 \quad [3.21]$$

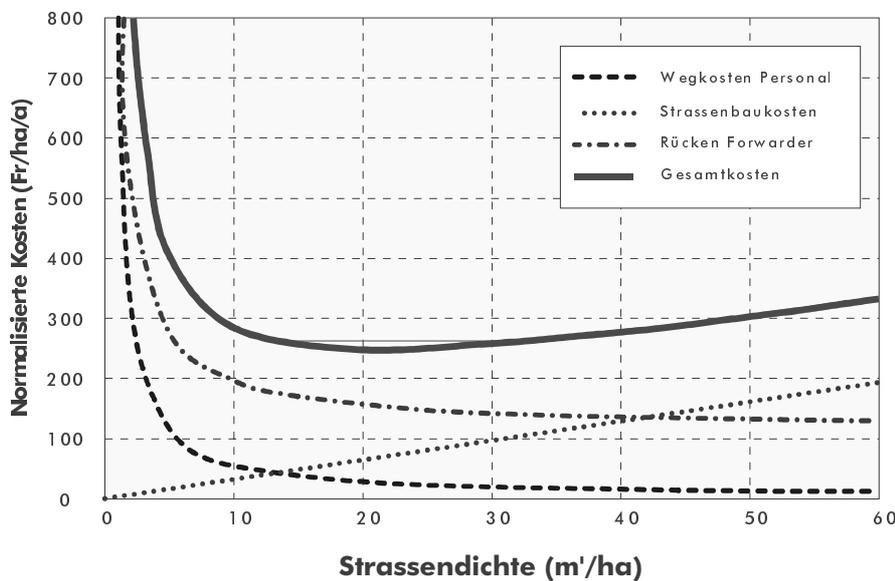
$$SD = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_{skid} \cdot V_{harv} \cdot 10000}{k_{road}}} \quad [3.22]$$

$$SD = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_{skid} \cdot c_{net} \cdot c_{offr} \cdot V_{harv} \cdot 10000}{a \cdot k_{road}}} \quad [3.23]$$

[3.19] und [3.23] ermöglichen eine grobe Abschätzung der Entwurfskriterien *Strassenabstand* und *Strassendichte*. Voraussetzung ist, dass die Rückekosten  $k_{skid}$  und die Strassenneubaukosten  $k_{road}$  bekannt sind.



Kostenmodell für ebene Verhältnisse und Geländetransport mit Schlepper. Die Kurve der Gesamtkosten verläuft im Bereich von etwa 15 bis 40 m' pro ha sehr flach. Ein rechnerisches Optimum kann zwar bestimmt werden. Betrachtet man jedoch die Modellunschärfe, so bewegt sich die optimale Strassendichte in einem Bereich, der durch die nicht-ökonomischen Optimierungskriterien weiter eingegrenzt werden muss. Für das Rücken mit Schlepper beträgt das Verhältnis von Rückekosten zu Strassenbaukosten etwa 5 zu 1, weshalb die Optimierung primär bei der Transporttechnologie ansetzen muss.



Die Aenderung der Transporttechnologie wirkt sich auch auf die Optimierung aus. Anstelle der Schlepper-Rückung liegt dieser Darstellung die Forwarder-Rückung zugrunde. Das Optimum liegt in einem ähnlichen Bereich wie bei der Schlepper-Rückung. Allerdings befinden sich die Gesamtkosten auf einem wesentlich tieferen Niveau. Die Rückekosten betragen nur etwa einen Drittel der Schlepper-Rückung..

### 3.4.2 Kostenmodelle mit zwei Klassen von Transportlinien

Die üblichen Erschliessungskonzepte basieren alle auf zwei Klassen von Transportlinien: (1) Strasse – Rückegasse, (2) Strasse-Maschinenweg, (3) Strasse-Seillinie, (4) Strasse-Fluglinie. Daraus ergeben sich zwei Transportphasen, die ein Kostenmodell berücksichtigen muss. Die einfachste Modellformulierung geht wiederum von linearen Kostenfunktionen aus.

Die Rückekosten für das Rücken ( $C^I_{skid}$ ) und das Vorrücken ( $C^{II}_{skid}$ ) sind

$$C^I_{skid} = \left[ f^I_{skid} + \frac{SA^I}{4} \cdot c^I_{offr} \cdot k^I_{skid} \right] \cdot V_{harv} \quad [3.24]$$

$$C_{skid}'' = \left[ f_{skid}'' + \frac{SA''}{4} \cdot c_{offr}'' \cdot k_{skid}'' \right] \cdot V_{harv} \quad [3.25]$$

mit  $k_{skid}$  Variable Rückekosten pro Transportphase [CHFm<sup>-3</sup>m<sup>-1</sup>]  
 $f_{skid}$  Fixkosten Rücken pro Transportphase [CHFm<sup>-3</sup>]  
 $V_{harv}$  Erntevolumen [m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>]

Die Kosten für die Strassen ( $C_{road}^I$ ) und die Transportlinien ( $C_{road}''$ ) betragen

$$C_{road}^I = \frac{c_{net}^I \cdot k_{road}^I \cdot 10000 \cdot a}{SA^I} \quad [3.26]$$

$$C_{road}'' = \frac{c_{net}'' \cdot k_{road}'' \cdot 10000 \cdot a}{SA''} \quad [3.27]$$

mit  $k_{road}$  Strassenbaukosten [CHFm<sup>-1</sup>]  
 $a$  Annuitätsfaktor [a<sup>-1</sup>]

Die Funktion der Gesamtkosten ergibt sich aus der Addition von [3.24] bis [3.27]. Diese Funktion hat zwei Variablen, die Abstände SA<sup>I</sup> und SA<sup>II</sup>. Das Minimum dieser zwei-parametrischen Funktion liegt an der Stelle, an der die beiden partiellen Ableitungen = 0 sind.

$$\frac{\partial C_{tot}}{\partial SA^I} = -\frac{c_{net}^I \cdot k_{road}^I \cdot a}{(SA^I)^2} + \frac{c_{offr}^I \cdot k_{skid}^I \cdot V_{harv}}{4} = 0 \quad [3.28]$$

$$\frac{\partial C_{tot}}{\partial SA''} = -\frac{c_{net}'' \cdot k_{road}'' \cdot a}{(SA'')^2} + \frac{c_{offr}'' \cdot k_{skid}'' \cdot V_{harv}}{4} = 0 \quad [3.29]$$

Setzt man [3.28] und [3.29] beide = 0 und löst sie simultan nach SA<sup>I</sup> und SA<sup>II</sup> auf so ergeben sich folgende Optimalabstände

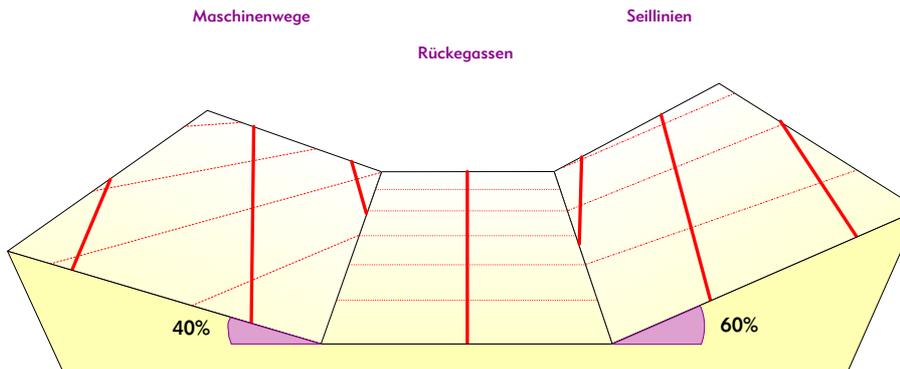
$$SA^I = 2 \sqrt{\frac{k_{road}^I \cdot c_{net}^I \cdot 10000 \cdot a}{k_{skid}^I \cdot c_{offr}^I \cdot V_{harv}}} \quad [3.30]$$

$$SA'' = 2 \sqrt{\frac{k_{road}'' \cdot c_{net}'' \cdot 10000 \cdot a}{k_{skid}'' \cdot c_{offr}'' \cdot V_{harv}}} \quad [3.31]$$

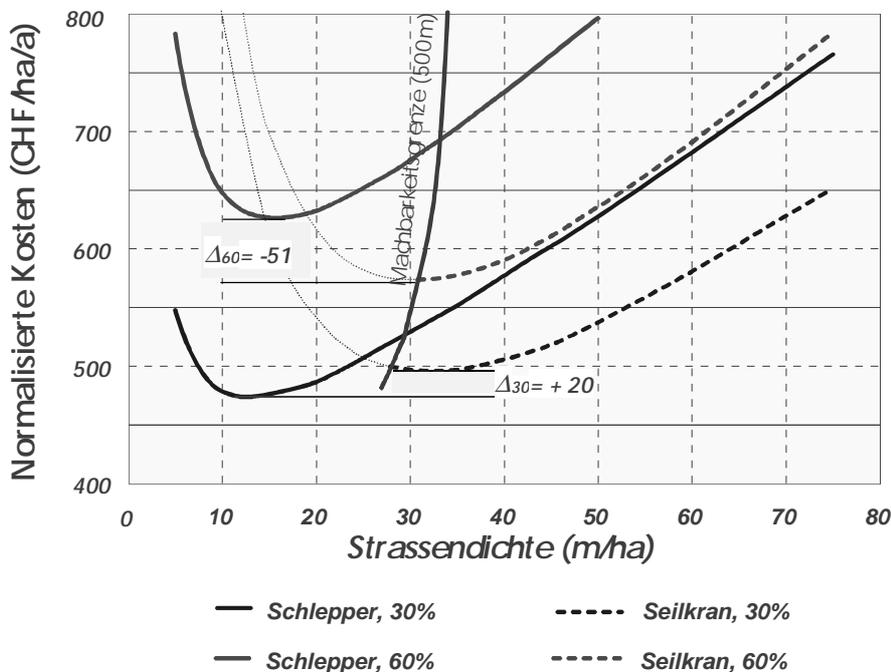
[3.30] entspricht [3.19]. SA<sup>II</sup> ist in einigen Fällen durch die technische Machbarkeit begrenzt, so beim Einsatz eines Harvester-Forwarder Systems, bei dem SA<sup>II</sup> der doppelten maximalen Kranreichweite entspricht

(ca 20m). Besondere Bedeutung kommt [3.30] und [3.31] beim Konzept Strasse-Maschinenweg zu. Dabei gilt es zu beachten, dass die Kosten für die Anlage von Strassen und Maschinenwegen mit zunehmender Hangneigung nicht-linear ansteigt.

### 3.5 Abgrenzung der Erschliessungskonzepte



Die Möglichkeiten, Transportlinien technisch anzulegen, bestimmen die grundlegenden Erschliessungskonzepte. In unseren Betrachtungen sind dies: (1) Rückegassen in flachem Gelände, (2) Maschinenwege in mässig geneigtem Gelände und (3) Seillinien im steileren Gelände. Fluglinien können die genannten Transportlinien ersetzen.



Mit zunehmender Hangneigung stösst das Konzept „Strasse - Maschinenweg“ an Grenzen und wird durch das Konzept „Strasse - Seilkran“ abgelöst. Die technischen Befunde spiegeln sich auch in einer wirtschaftlichen Betrachtung wieder, in dem das Konzept „Strasse - Seilkran“ oberhalb von etwa 50% Hangneigung dem Konzept „Strasse - Maschinenweg“ eindeutig überlegen ist.

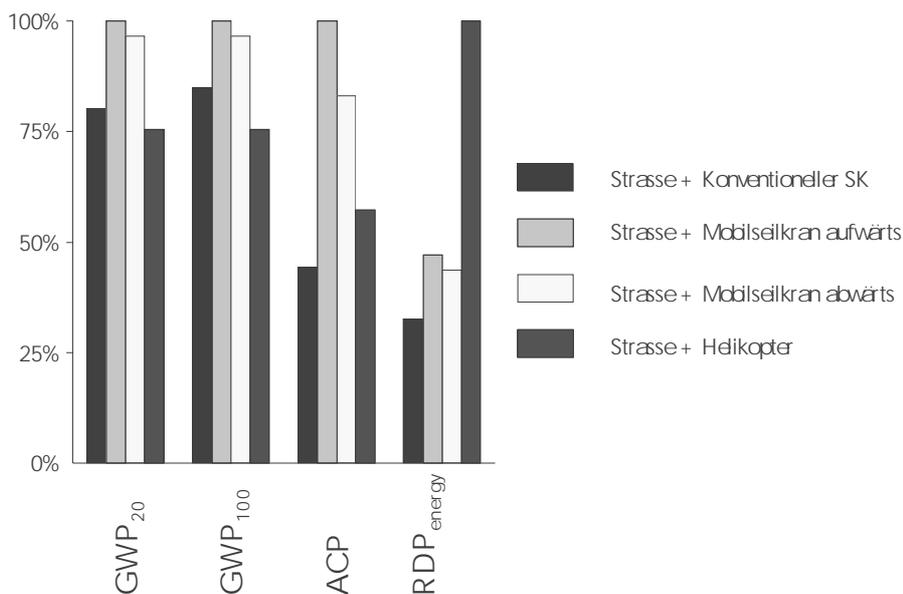
### 3.6 Oekologische Optimierung

Neuerdings spricht man auch von einer ökologischen Effizienz. Dabei geht es darum, den Verbrauch von Umweltgütern und die Produktion von Schadstoffen zu minimieren. Wichtige Input-Indikatoren, die betrachtet werden müssen, sind

- der Verbrauch nicht erneuerbarer Rohstoffe ( $RDP_{non}$ );
- der Verbrauch erneuerbarer Rohstoffe ( $RDP_{ren}$ );
- der Verbrauch von Wasser ( $RDP_{H_2O}$ );
- der Verbrauch von Energie ( $RDP_{energy}$ );
- der Verbrauch von Raum (Fläche,  $RDP_{area}$ ).

Daneben sind folgende Klassen von Output-Indikatoren zu berücksichtigen:

- Treibhausgas-Potential (GWP);
- Ozonschicht-Zerstörungspotential (ODP);
- Versauerungs-Potential (ACP);
- etc.



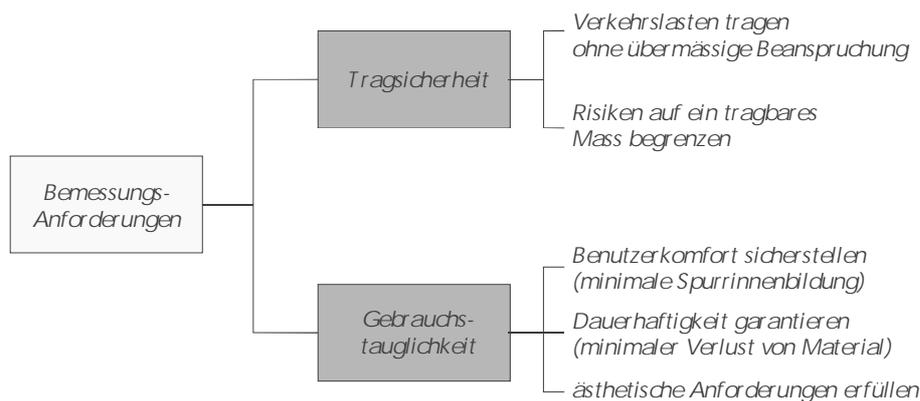
Die Methodik der Lebenszyklusanalyse (LCA, „Ökobilanz“) ermöglicht es, bestimmte Umweltrisiken zu analysieren. Für forstliche Problemstellungen stehen derartige Untersuchungen in einer Pilotphase. Sie ermöglichen es, das „ökologische Gefühl“ durch vergleichbare Zahlenwerte zu ersetzen.

## 4. Entwurfselemente für Wald- und Güterstrassen

Die Lage der Erschliessungsanlagen muss im Rahmen der Planung räumlich festgelegt werden. Dabei ist nach dem Grundsatz “nur soviel wie nötig” vorzugehen. Es geht darum:

- nur jene Kriterien festzulegen, welche die Lösungswahl massgebend einschränken;
- all jene Kriterien erst in der Phase der Detailprojektierung festzulegen, die den Handlungsspielraum nicht einschränken.

Die Gestaltung und Durchbildung erfolgt gemäss dem Bemessungskonzept der SIA-Norm 160. Kriterien für den Nachweis der Tragsicherheit werden hauptsächlich in der Phase der Detailprojektierung eingehender untersucht. Hingegen sind einige Kriterien, welche die Gebrauchstauglichkeit einer Anlage bestimmen, eingehender zu untersuchen.



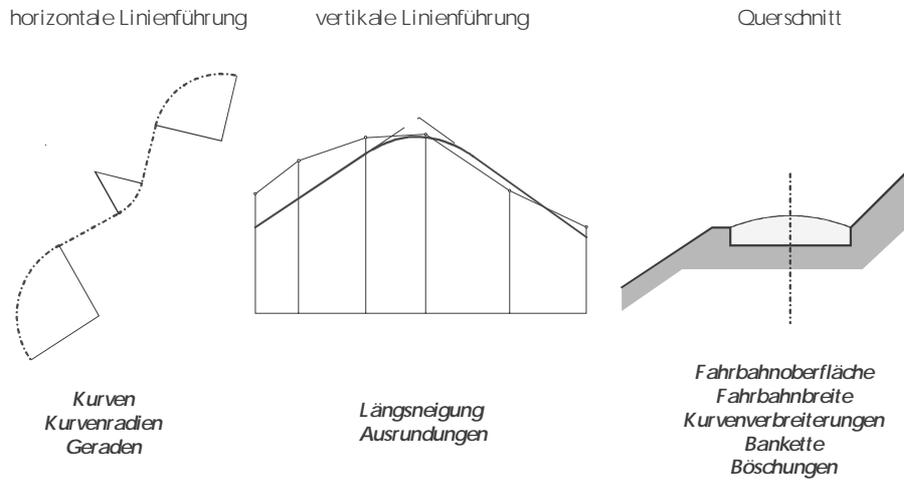
### 4.1 Definition einer Strasse im Raum

Es stellt sich die Frage, mit welchen geometrischen Elementen die Lage einer Strasse im Raum eindeutig definiert ist. Es werden dazu drei Projektions-Flächen verwendet:

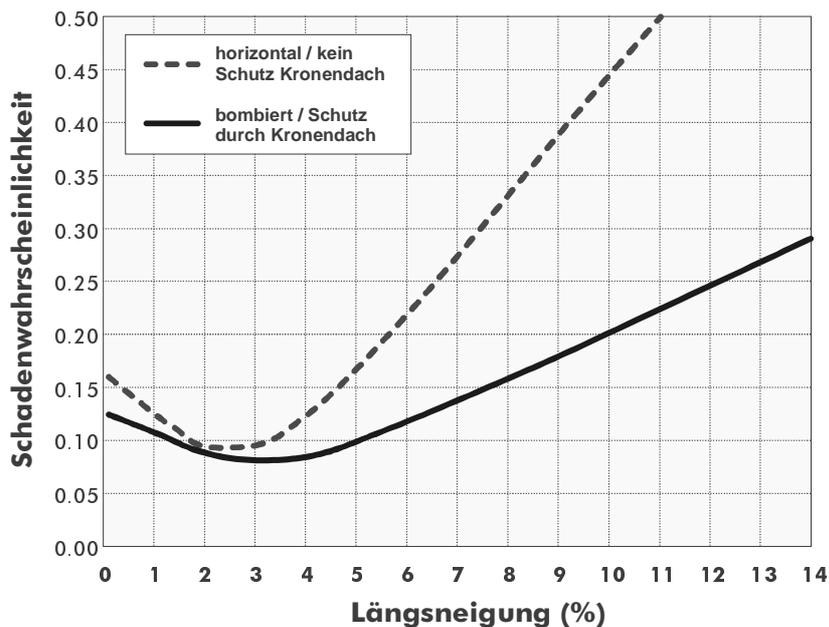
- die Projektion des Strassenkörpers auf die Grundfläche (“horizontale Linienführung”);
- die Projektion der Strassenachse auf eine Fläche, die senkrecht auf der Grundfläche steht und durch die Strassenachse führt. Es ist eine gewölbte Fläche, die in eine Ebene ausgerollt wird (“vertikale Linienführung”);

- die Projektion des Strassenkörpers auf Ebenen, die senkrecht zur Strassenachse verlaufen (“Querschnittsgestaltung”).

In allen drei Projektionen gibt es Grundregeln und Grenzen, die bei der Planung berücksichtigt werden müssen.



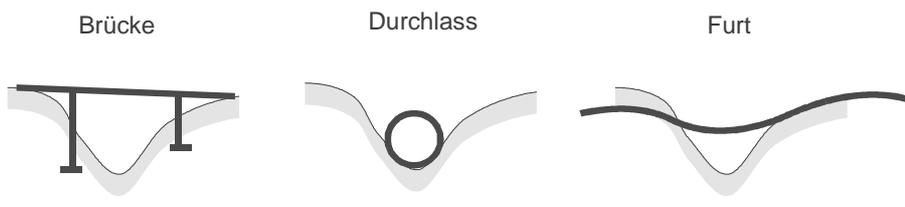
## 4.2 Entwurfselemente im Längsschnitt (vertikale Linienführung)



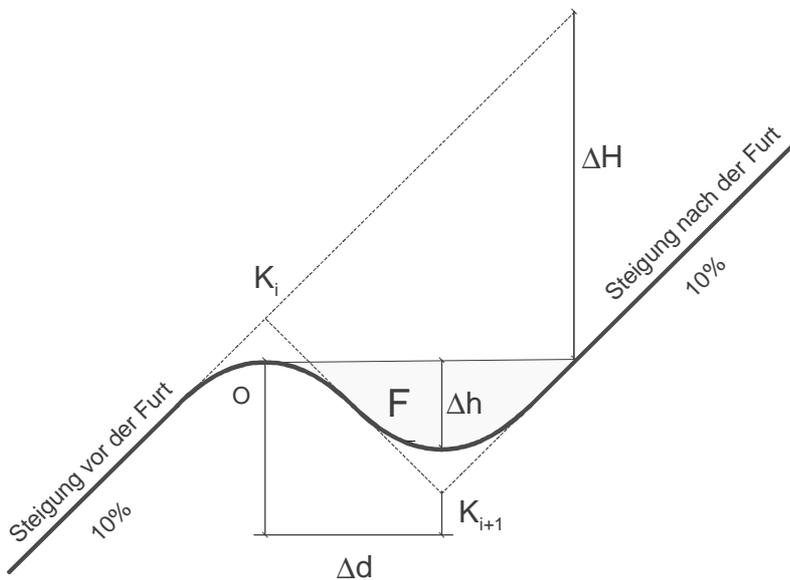
Die Gebrauchstauglichkeit von Wald- und Güterstrassen wird begrenzt durch Erosionsschäden am Belag. Bei ton-wasser-gebundenen Schichten (“Naturstrassen”) ergeben sich Abhängigkeiten von der Längsneigung. Auswertung aufgrund Daten von LIENERT (1983).

Haftung Fahrzeug-Strassenoberfläche	hoch (ausserhalb Frostzeit, griffige Oberfläche)	12	15	18
	mittel (ausserhalb Frostzeit)	10	12	15
	gering (ganzjährig befahren)	8	10	12
		mehrmals täglich	mehrmals wöchentlich	mehrmals jährlich
		Benutzungshäufigkeit		

Die zulässige Längsneigung ist das entscheidende Entwurfselement für Erschliessungsanlagen. Während bis vor kurzem 12% als Maximum verbindlich war, wird heute der Grenzwert risikoorientiert festgelegt.

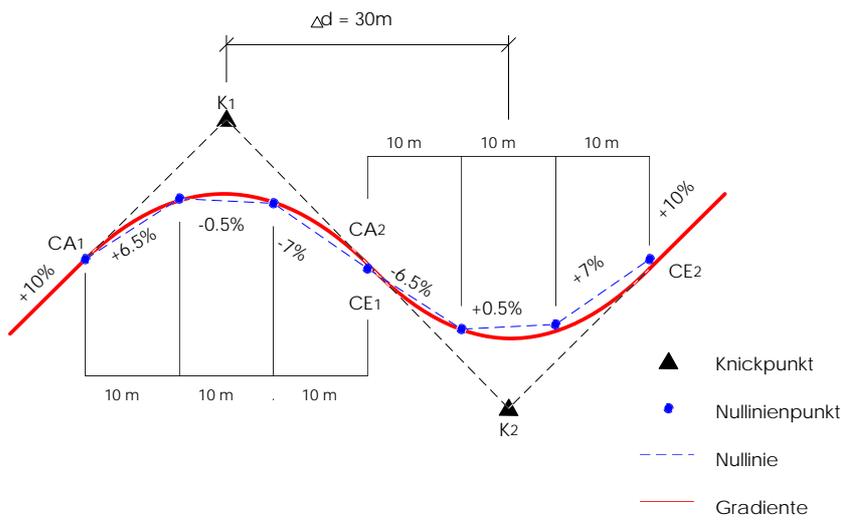
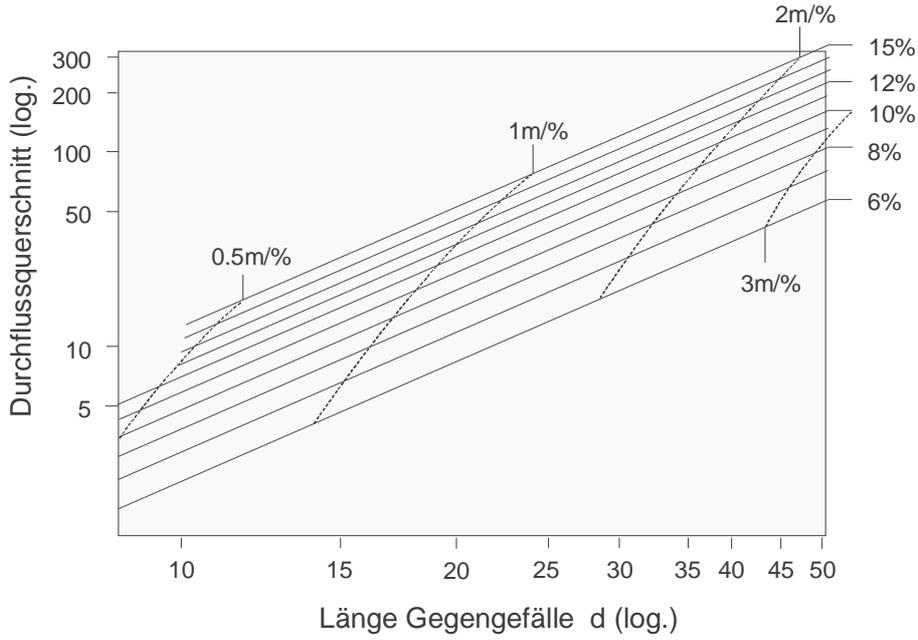


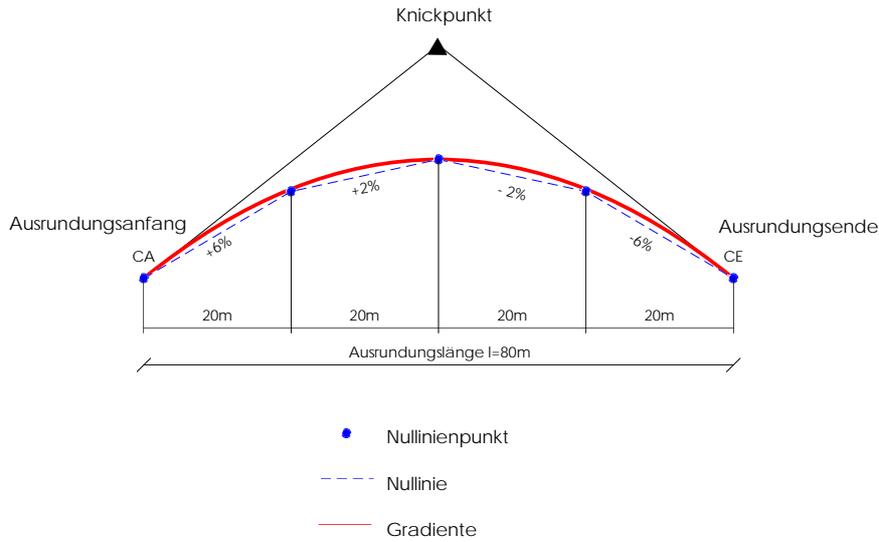
Die Querung von Bächen und Gräben beeinflusst die Geometrie massgeblich. Insbesondere der Entscheidung, wie eine Querung realisiert werden soll, muss sehr sorgfältig geprüft werden.



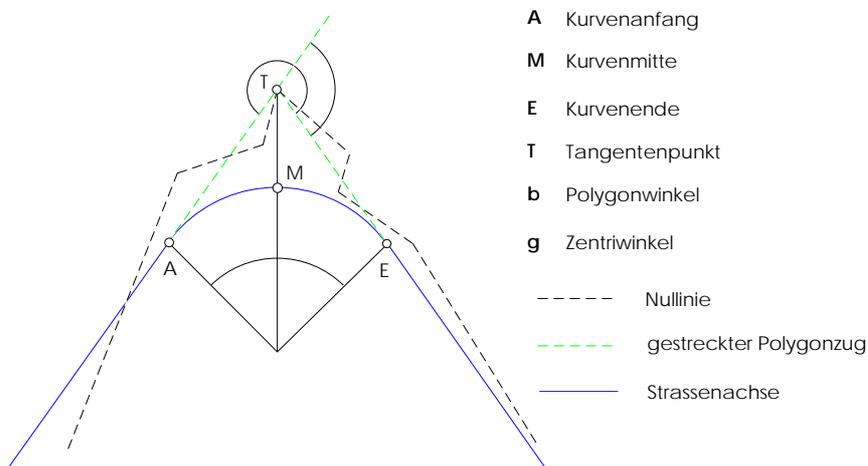
Durch das Gegengefälle in einer Furt entsteht ein "Höhenverlust", der schon bei der Grobplanung im Rahmen des Vorprojektes berücksichtigt werden muss.

bei 8% Steigung vor und nach der Furt

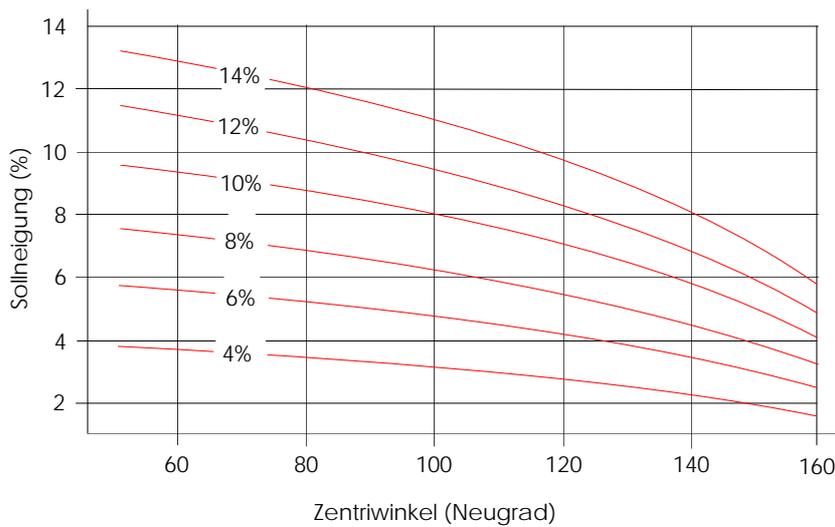




### 4.3 Entwurfs-elemente im Grundriss (vertikale Linienführung)

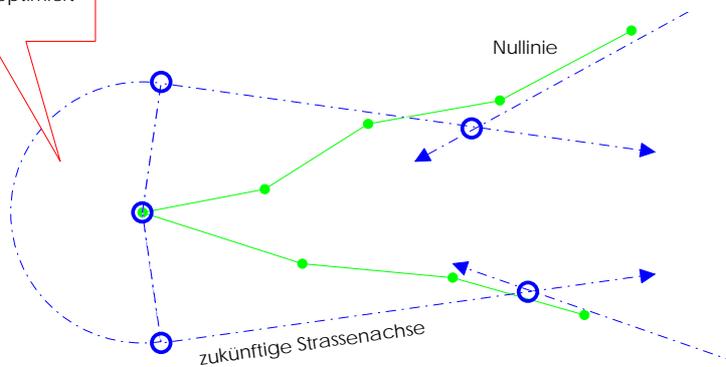


Die Linienführung von Wald- und Güterstrassen wird in der Regel mit Geraden und Kreisbögen definiert. Bei der Erschliessungsplanung wird im Gelände zuerst eine sogenannte Nulllinie abgesteckt, d.h. eine Linie, die eine vorgegebene Neigung aufweist. In einem zweiten Schritt (Detailprojektierung) wird die Strasse konstruktiv durchgebildet, indem der Nulllinienzug durch Geraden und Kreisbögen idealisiert wird. Minimalanforderungen ergeben sich an die Kurvenradien (10m für Zweiachs-LKWs, 18m für Langholz-Transporter). Details vgl. KUONEN (1983).



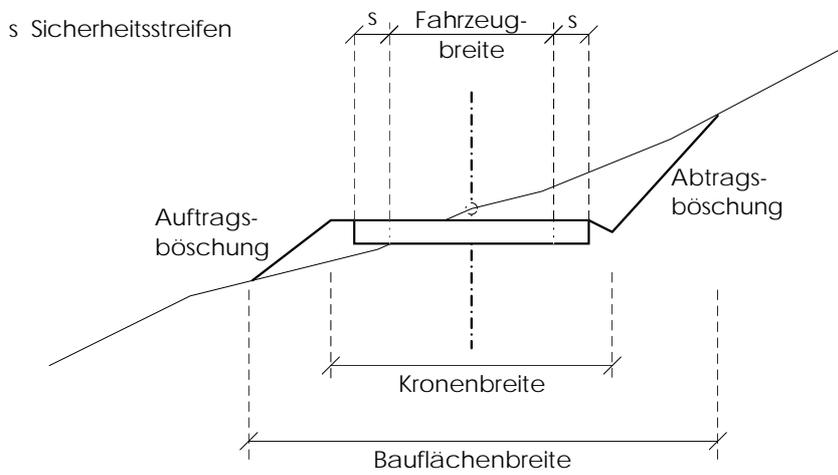
Bei grossen Richtungsänderungen wird die Kreisbogenlänge kürzer als die im Gelände abgesteckte Nulllinie. Um eine gegebene Höhendifferenz zu überwinden wird die Steigung der Strassenachse grösser sein als die Steigung der Nulllinie. Dieser Effekt ist schon bei der Erschliessungsplanung zu berücksichtigen. (Nach KUONEN, 1983)

Probleme:  
 - wo ist die optimale Lage der Wendeplatte?  
 - nach welchen Kriterien soll die Lage optimiert werden?

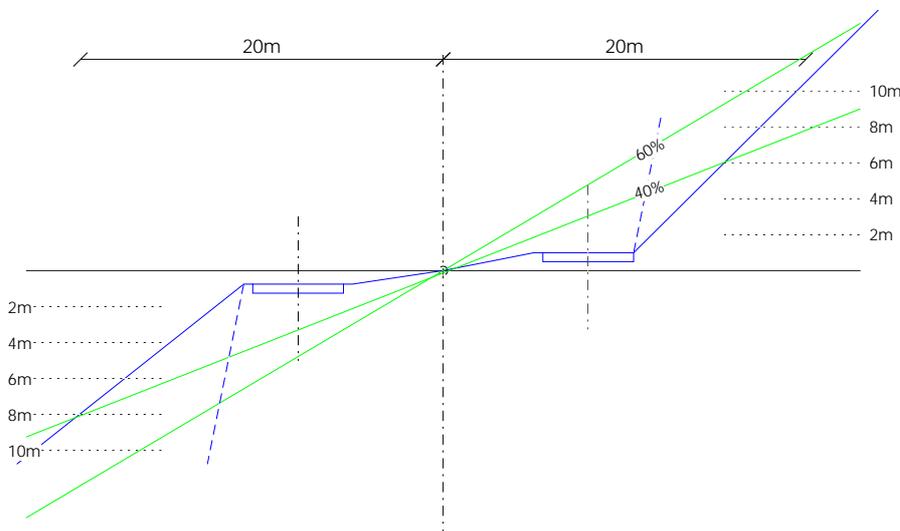


Wendeplatten sind Kehren, die eine grosse Richtungsänderung ermöglichen. Sie sind insbesondere in Steillagen schwierige, aufwendige Bauwerke, die schon bei der Erschliessungsplanung auf ihre technische Machbarkeit überprüft werden müssen.

### 4.4 Entwurfselemente im Querschnitt

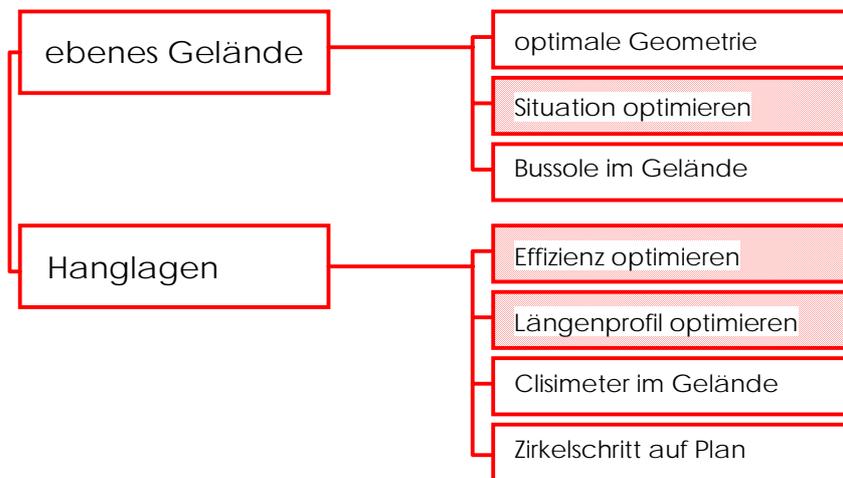


Ein Normalprofil legt die Standardanforderungen an die Querschnittsgestaltung fest. Die minimale Fahrbahnbreite ergibt sich aus der Fahrzeugbreite und einem Sicherheitszuschlag (2 mal 0,35 m), der bei höheren Geschwindigkeiten vergrößert werden muss.



Die Querschnittsgestaltung in Wendeplatten ist bereits bei der Erschließungsplanung zu berücksichtigen, da damit die definitiven Baukosten zu einem beträchtlichen Teil festgelegt werden.

## 4.5 Folgerungen für die Umsetzung

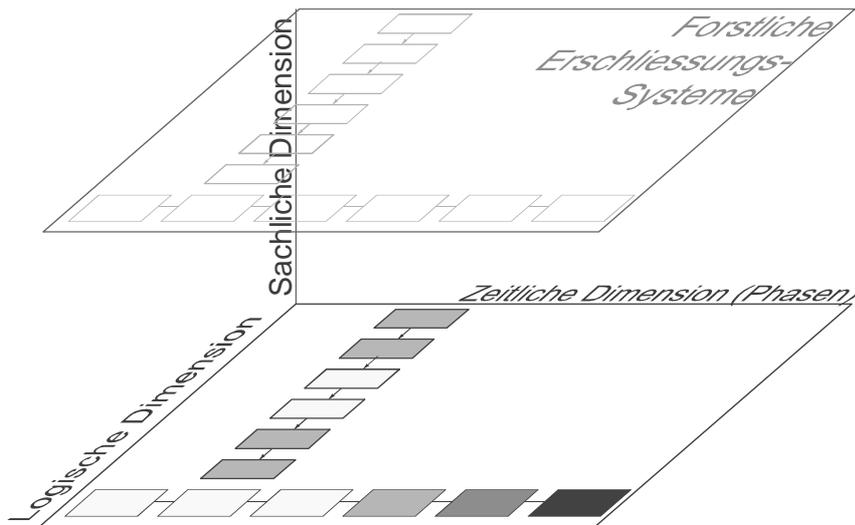


In ebenem Gelände geht es bei der Planung primär darum, die Linienführung im Grundriss zu optimieren. In Hanglagen dagegen ist primär die Linienführung im Längsschnitt und Querschnitt zu optimieren.

## 5. Planung von Erschliessungsnetzen

### 5.1 Übersicht

Bei der Planungsarbeit geht es darum, die Wirklichkeit gedanklich vorwegzunehmen. Das Hauptproblem, das sich stellt, ist, wie vorzugehen ist, um Bedürfnisse (in unserem Fall Transportbedürfnisse) in konkrete, machbare Lösungen umzusetzen.



HALL'S (1969) Konzept des System Engineering mit den drei Dimensionen (1) Lebenszyklus, (2) Logik und (3) Sachbezug.

Das Ziel technischen Handelns ist es, künstliche Systeme zu schaffen, die es ermöglichen, Bedürfnisse von Individuen zu befriedigen. Dabei stellt sich die Frage, wie man vom Bedürfnis zur Lösung kommt. *Systems Engineering* ist ein technisches Problemlösungskonzept, das drei Dimensionen aufweist (HALL 1969):

- Eine erste Dimension **Zeit**, welche den Lebenszyklus eines technischen Systems vom Entstehen bis zur Ausserbetriebsetzung in Lebensabschnittsphasen gliedert;
- Eine zweite Dimension **Logik**, welche eine Problemlösungsstrategie umschreibt und diese in Form von logischen Vorgehensschritten definiert;
- Eine dritte Dimension **Sache**, welche den Wissensschatz von Fakten, Modellen und Vorgehensweisen umfasst, die eine bestimmte Disziplin, eine Profession oder eine Technologie ausmachen.

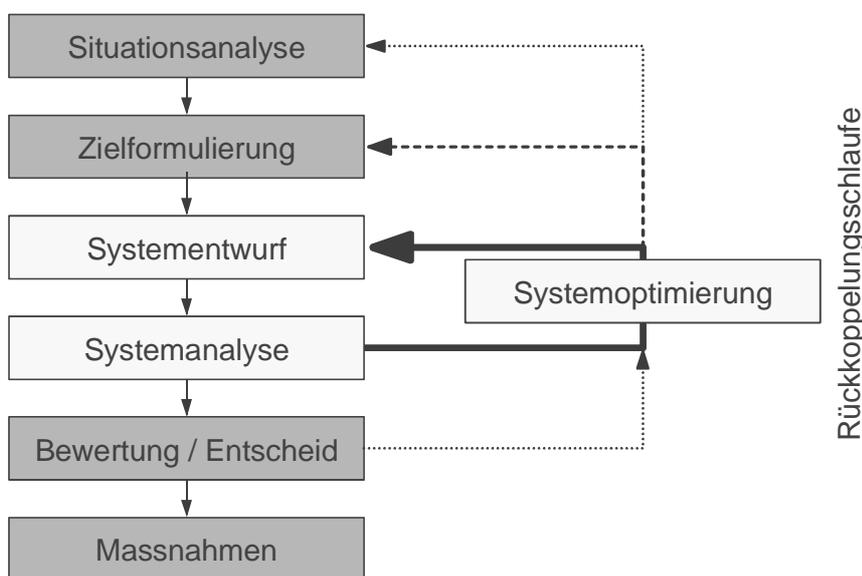
Die Kombination der *ersten beiden Dimensionen* erzeugt ein Modell der Methodik des *Systems Engineering* und definiert dieses unabhängig von Berufen und Fachdisziplinen.

Eine konkrete Projektsituation kann auf der logisch-sachlichen Ebene mit Hilfe der drei Dimensionen des Hall'schen Modells bearbeitet werden. Zusätzlich stellt sich jedoch die Frage, wie durch sinnvolle Arbeitsteilung und

–organisation ein Vorgehensprozess erzeugt werden kann, der die einzelnen Aktivitäten sinnvoll ordnet und während der Ausführung derart steuert, dass das Projektziel leistungs-, termin-, kosten- und qualitätsgerecht erreicht werden kann. Mit diesen organisatorischen Aspekten befasst sich das Wissensgebiet des *Projektmanagements*.

Das Entwerfen ist ein schöpferischer Prozess, der nicht vollständig in Form von Regeln abbildbar ist. Erfahrung und Intuition sind ebenso wichtig wie technisches Wissen. Es ist deshalb bis heute nicht gelungen, die Entwicklung technischer Lösungen vollständig mit Hilfe von Expertensystemen vorzunehmen.

## 5.2 Problemlösungszyklus



Eine systematische Lösungsentwicklung orientiert sich an einer Standardfolge von Tätigkeiten, die immer in derselben Reihenfolge durchlaufen werden. Ausgangspunkt ist stets eine Problemstellung. Eine klare Problemformulierung ist ganz entscheidend für eine erfolgreiche Lösung..

Die Definition des Problemlösungszyklus geht auf frühe Arbeiten von HALL zurück und umfasst in der Regel sieben logische Schritte (SAGE 1992):

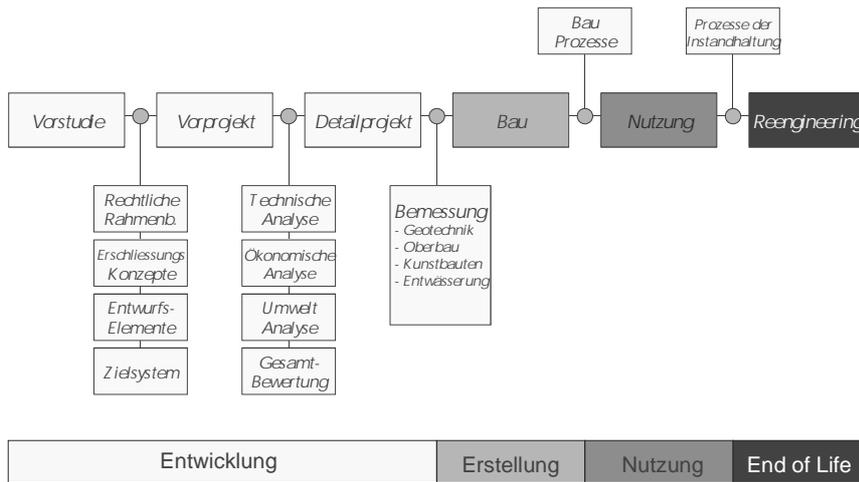
- Problemdefinition: herauschälen, quantifizieren und klären der Bedürfnisse, welche das Problem erzeugen;
- Beschreiben der Menge von Umweltfaktoren, welche mögliche Systementwicklungen einschränken;
- Analyse des Wert- und Zielsystems: auswählen und strukturieren einer Menge von Zielen, welche die Suche von Handlungsalternativen leiten. Aus dem Wertsystem werden jene Attribute abgeleitet, welche für die Auswahl des am besten geeigneten Systems verwendet werden (mehrdimensionales Attributsystem).
- Systementwicklung: Suche nach einer Menge von Handlungsalternativen; jede Handlungsalternative muss in einem genügenden Detaillierungsgrad beschrieben werden, nach welchem mögliche Wirkungen und Folgen der Umsetzung bezüglich der Ziele abgeschätzt werden können.

- **Systemanalyse:** Bestimmung spezifischer Folgen oder Konsequenzen für die verschiedenen Handlungsalternativen hinsichtlich der Dimensionen, wie sie im Wertsystem bezeichnet wurden.
- **Systemoptimierung:** Optimierung der Systemvariablen derart, dass die Systemziele möglichst gut erfüllt und die Einschränkungen eingehalten werden.
- **Entscheidungsfindung:** Bewertung der Folgen und Konsequenzen der verschiedenen Handlungsalternativen, wie sie in der Analyse ermittelt wurden bezüglich des Wertsystems. Dieser Schritt ermöglicht es, die Alternativen bezüglich ihres "Wertes" zu ordnen. Eine oder mehrere Alternativen werden ausgewählt für den nächsten Entwicklungs- oder Realisierungsschritt.
- **Massnahmenplanung:** Dokumentation und Kommunikation der Resultate; Planung der nächsten Entwicklungs- oder Realisierungsphasen; Beschaffung der für das weitere Vorgehen benötigten Ressourcen; Projektplanung für die nächste Realisierungsphase (Projektmanagement).

Der Problemlösungszyklus, wie er beispielsweise bei HABERFELLNER ET AL. (1992) beschrieben ist, geht auf die Arbeiten von HALL zurück und wurde teilweise abgeändert und angepasst.

### 5.3 Projektlebenszyklus

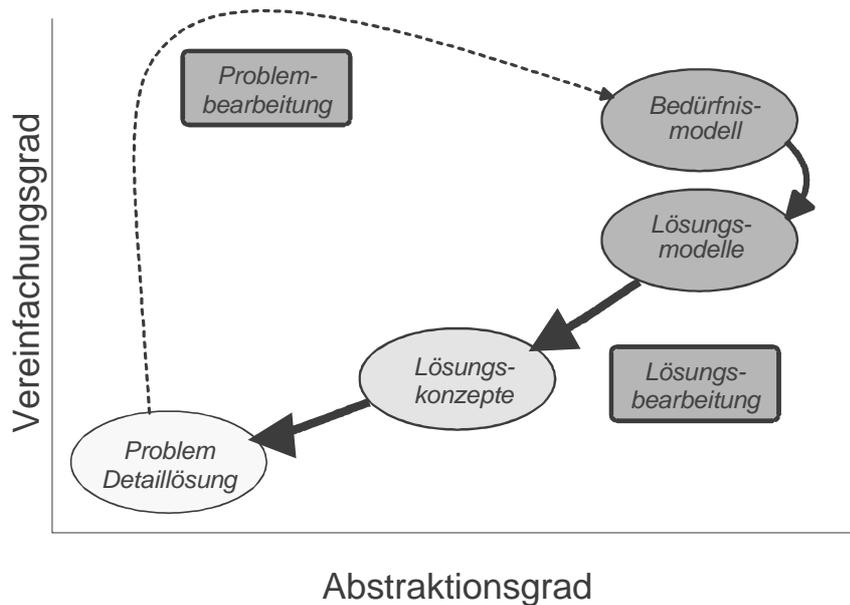
Projekt-Lebenszyklusmodelle beschreiben die Lebensphasen von Systemen zwischen der Entstehung und der Ausserbetriebsetzung (from "cradle to grave"). Generell lassen sich folgende Phasen unterscheiden: Konzeption, Entwurf, Implementierung, Benutzung, Ausserbetriebsetzung. Diese Phasen werden je nach Problemfeld weiter unterteilt. Vor allem für sehr komplexe Vorhaben der Software- und der Bauindustrie wurden verschiedene Lebenszyklusmodelle entwickelt, welche auch Feedbackschleifen enthalten und von einem rein linearen zu einem zyklischen Vorgehen überleiteten. Ein Beispiel dazu findet sich bei BOEHM (1988), der ein Spiralmodell für die Softwareentwicklung umschreibt.



Bauprojekte sind zwar in der Regel einmalige Vorhaben. Die Abwicklung erfolgt jedoch in standardisierten Phasen, die für alle Ingenieurdisziplinen gleichartige Bedeutung haben. Die Abwicklung von Bauprojekten ist in der Lohn- und Honorarordnung für Bauingenieure des SIA umschrieben (SIA-LHO 103). Für Bodenverbesserungsprojekte gibt die SIA-Empfehlung 406 eine gute Umschreibung der einzelnen Projektphasen.

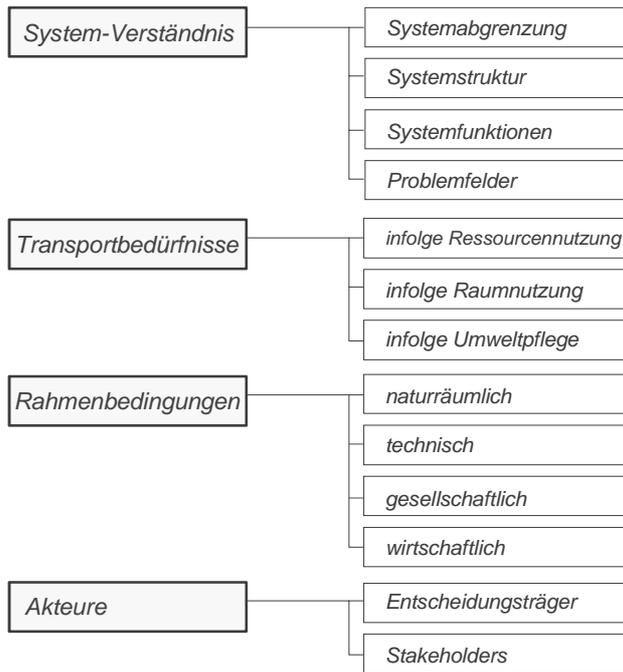
## 5.4 Projektentwicklung

### 5.4.1 Prinzipien und Leitideen

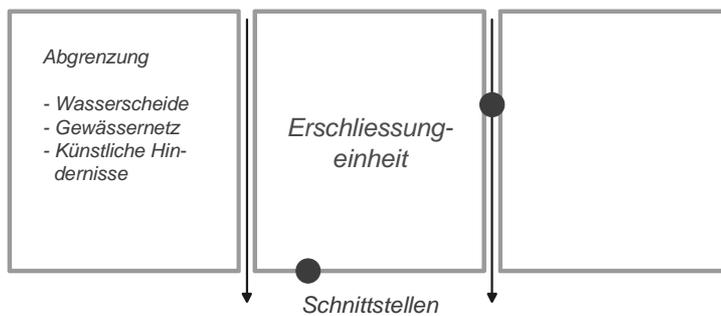


Um komplexe Probleme lösen zu können, muss die Wirklichkeit vereinfacht und abstrahiert werden. Modelle sind die zentralen Hilfsmittel, mit denen sämtliche Ingenieurdisziplinen arbeiten. Unter einem Modell versteht man eine vereinfachte Abbildung der Wirklichkeit, welche die wesentlichen Funktionen wenn möglich quantitativ beschreibt.

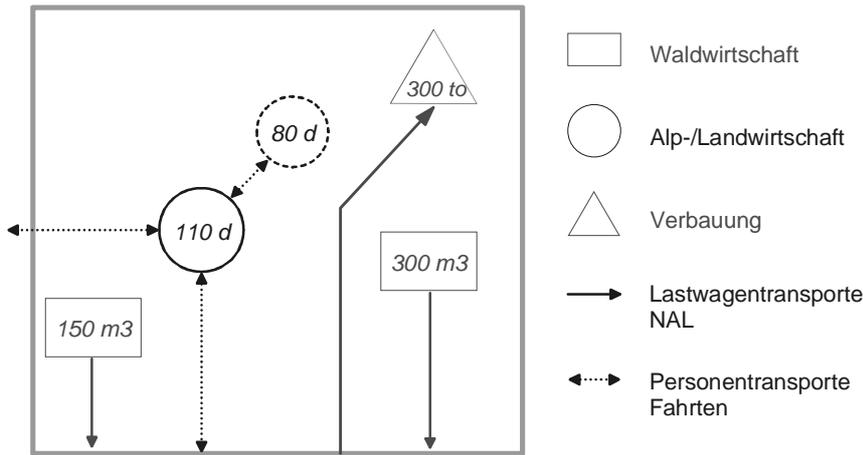
### 5.4.2 Situationsanalyse



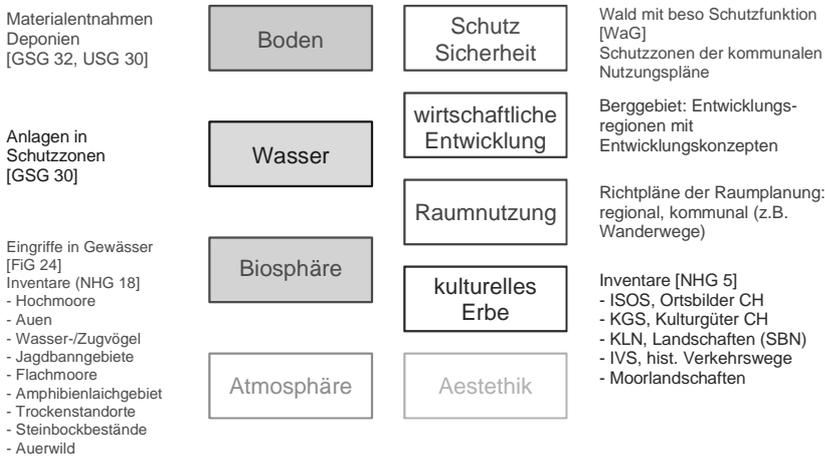
Ziel der Situationsanalyse ist es, die zu betrachtende Wirklichkeit abzugrenzen (was gehört zu unserem Problemfeld, in welchem Bereich ist die Lösung zu suchen), die Bedürfnisse zu klären (Bedarfsnachweis) und die Rahmenbedingungen (Restriktionen) zu klären.



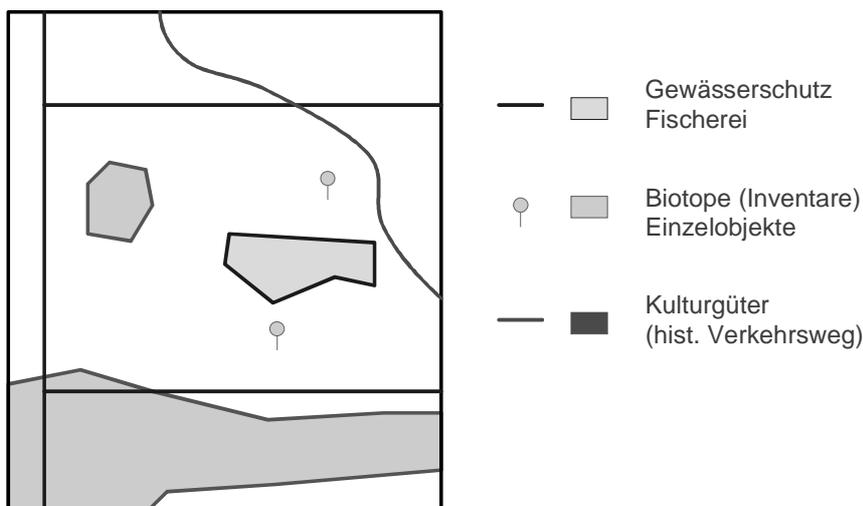
Die Systemabgrenzung versucht, das Gelände in Einheiten einzuteilen, welche natürlich oder künstlich klar begrenzt sind. Es empfiehlt sich, die hydrologische Gliederung eines Gebietes an den Anfang der Überlegungen zu stellen. Eine einzelne Einheit wird als Erschliessungseinheit bezeichnet, die klar definierte Schnittstellen zu benachbarten Einheiten aufweist. Bei einer Flächen-grösse über 400 Hektaren ist zudem eine förmliche Umweltverträglichkeitsprüfung UVP durchzuführen.



Eine vereinfachte Darstellung der Bedürfnisse (Bedürfnismodell) ist der Ausgangspunkt für das Entwickeln von Lösungen. Personen- und Gütertransportbedürfnisse sind getrennt darzustellen und zu quantifizieren.



Rahmenbedingungen ergeben sich vor allem aus den gesellschaftlichen Normen für den Umweltbereich. Geschützte und schützenswerte Objekte werden in Inventaren festgehalten. Da derartige Inventare noch im Aufbau begriffen sind, kommt man nicht darum herum, bei jedem Planungsvorhaben bei den zuständigen kantonalen Amtsstellen (Naturschutz, Gewässerschutz, Raumplanung, usw.) den aktuellen Stand der Inventarisierung zu erfragen.



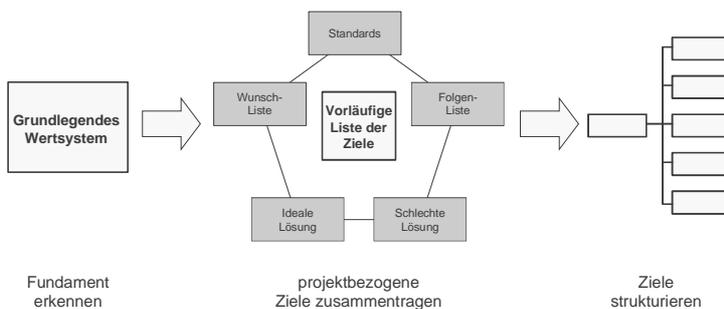
Alle bekannten Inventare sind auf einem Inventarplan darzustellen, der ein wesentlicher Bestandteil des Vorprojektes ist. Ziel des Inventarplanes ist es, die Umweltbedingungen vor der Realisierung irgendwelcher Vorhaben festzuhalten.

### 5.4.3 Zielanalyse und -formulierung

Ein Ziel ist eine Aussage über etwas, das man zu erreichen wünscht (KEENEY 1992). Damit Ziele formuliert werden können, sind drei Grundvoraussetzung zu beachten:

- Es braucht einen Entscheidungskontext, innerhalb dessen die Entscheidung zu treffen ist (z.B. Automobilkauf, das Erstellen einer Erschliessungsanlage usw.);
- Ein Objekt (Komponente, Systemteil wie z.B. Sicherheit, Wirtschaftlichkeit usw.) und
- eine Präferenzrichtung (maximieren, minimieren).

KEENEY (1992) unterscheidet zudem zwischen grundlegenden Zielen, welche die angestrebte Endwirkung umschreiben, und Mittel-Zielen (auch Formalziele genannt), welche den Grad der Erfüllung eines anderen Zieles beschreiben.

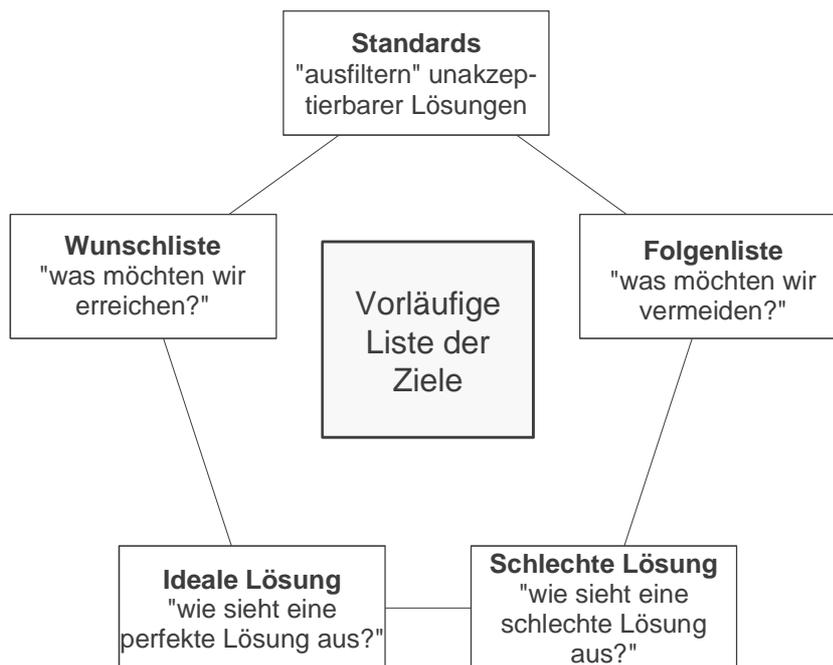


Zielanalyse und -formulierung ist ein normativer Vorgang, der die Leitlinien festlegt, an denen sich der Lösungsentwicklungsprozess zu orientieren hat. Es gibt keine wissenschaftliche Methodik, mit der man "objektive" Ziele herleiten kann. KEENEY (1992) schlägt ein Vorgehen in drei Phasen für die Zielanalyse und -formulierung vor:

- Das Identifizieren der grundlegenden Werthaltung der Entscheidungsträger. Das wirtschaftlich-technische Weltbild geht in der Regel von einer utilitaristischen Haltung aus, die annimmt, dass jene Lösung die beste ist, welche den grössten Nutzen für die grösste Anzahl der Betroffenen bewirkt. Sozusagen einen Gegenpol dazu bildet eine altruistische Grundhaltung, welche die allgemeine Wohlfahrt der Gesellschaft als Ganzes in den Vordergrund stellt, woran sich auch die Handlungen der Individuen auszurichten haben. In neuerer Zeit spricht man zunehmend von einem hedonistischen Weltbild, wonach die Menschen primär danach streben, Lust und Erfüllung in ihrem Leben zu maximieren. Im Zusammenhang mit dem Leitbild "Nachhaltige Entwicklung" wurde das sogenannte Equity Prinzip in den Vordergrund gestellt, wonach jedes Individuum das gleiche Grundrecht hat, Ressourcen zu verbrauchen und auch Nutzen zu beanspruchen. Vor allem in der westlichen Welt über-

wog in den letzten Jahrzehnten das utilitaristische Weltbild, was jedoch als Grundlage zunehmend in Frage gestellt wird.

- In einem zweiten Schritt geht es darum, eine ungeordnete, vorläufige Liste von Zielen zu erstellen. Ein Weg dazu ist, fünf Leitfragen nacheinander abzuarbeiten: (1) Gibt es Standards, mit denen unerwünschte Lösungen von vornherein ausgeschlossen werden können?, (2) Was möchten Sie mit einer Lösung erreichen?, (3) Was möchten Sie mit einer Lösung unbedingt vermeiden?, (4) Wie würde eine perfekte Lösung aussehen? und (5) wie würde eine schreckliche Lösung aussehen?
- Die vorläufige Zielliste muss strukturiert werden, damit übergeordnete Ziele von untergeordneten und grundlegende Ziele von Formalzielen unterschieden werden können. Die Graphentheorie bietet einen möglichen Ansatz, um bei diesem Prozess zu helfen. Die vorläufige Zielliste dient als Ausgangspunkt, und jedes Teilziel wird gemäss der Frage geprüft, welche der übrigen in der Liste vorhandenen Ziele dem betrachteten Teilziel übergeordnet sind. Daraus lässt sich eine "Vorgänger-Nachfolger"-Struktur herleiten, anhand der ein hierarchisches Zielsystem abgeleitet werden kann. Hinweise zur Strukturanalyse finden sich bei SAGE (1977) und bei BEROGGI (1998).



## Beispiel

Für die Beschaffung eines neuen Autos wird eine vorläufige Liste mit Zielen brainstormartig zusammengestellt. Dabei werden die Teilziele fortlaufend in einer Tabelle festgehalten.

	<i>Teilziel</i>	<i>Trägt zur Erreichung von Teilziel No. ... bei</i>	<i>Indikator</i>	<i>Grenzwert</i>
1	Anschaffungskosten minimieren	8	CHF	< 30 kFr
2	Benzinverbrauch minimieren	8, 9	l/100 km	< 7 l /100 km
3	Zuverlässigkeit maximieren	4	MTBF	
4	Funktionelle Bedürfnisse erfüllen			
5	Leistungsfähigkeit (performance) maximieren	4		
6	Nutzbaren Stauraum maximieren	4	Volumen l	>200 l
7	Sicherheit maximieren			
8	Ökonomische Effizienz maximieren			
9	Ökologisch ungünstige Wirkungen minimieren			

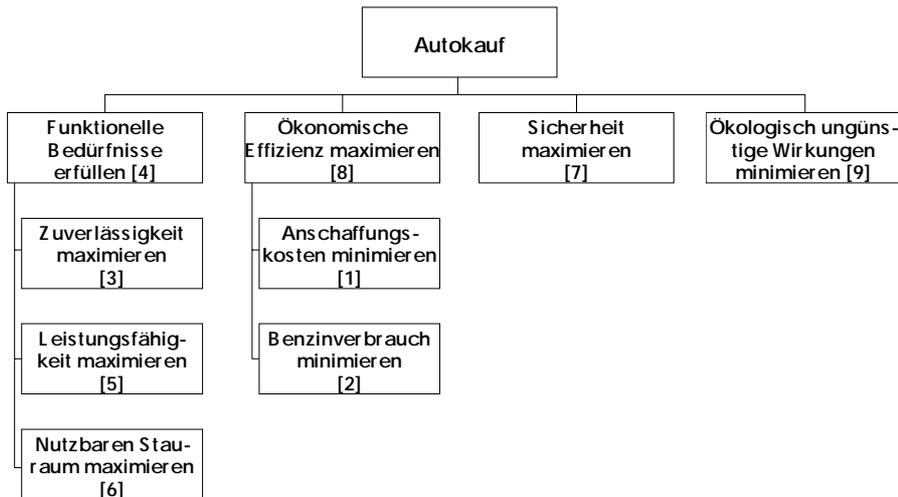
Das Zuordnen von übergeordneten Zielen (Spalte 3) ermöglicht es, eine hierarchische Zielstruktur zu erkennen. Jene Teilziele, die kein übergeordnetes Ziel besitzen, definieren die hierarchisch höchsten, grundlegenden Ziele. Es sind dies die Teilziele 4, 7, 8, 9. Die nächste Hierarchiestufe ist diejenige, welche die Teilziele 4, 7, 8, 9 als Vorgänger hat.

Die geschilderte Vorgehensweise ermöglicht es, Wechselwirkungen in komplexen Systemen zu erkennen. Dabei kann die Anzahl der zu betrachtenden Komponenten eines Systems so gross werden, dass formalisierte Verfahren erforderlich werden (vgl. SAGE 1977). Eine verbreitete Möglichkeit entstammt der Graphentheorie, indem eine Adjazenzmatrix ("Nachbarschafts"-Matrix) wie folgt definiert wird.

- die Knoten werden durchnummeriert von 1 bis n;
- die Beziehungen des Graphen werden in einer quadratischen Matrix dargestellt, d.h. mit  $i=1\dots n$  Zeilen und  $j=1\dots n$  Spalten
- Für jedes Element  $a_{ij}$  des Graphen wird geprüft, ob eine Relation  $v_i, v_j$  der Form "i ist dem Teilziel j direkt übergeordnet" vorhanden ist. Trifft dies zu, ist  $a_{ij}=1$ , andernfalls  $a_{ij}=0$ .

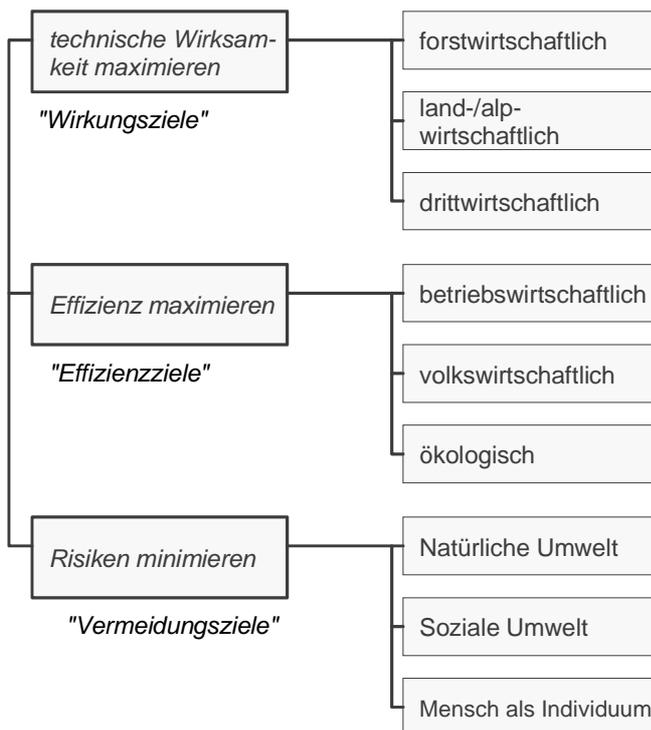
Für das obige Beispiel ergibt sich folgende Adjazenzmatrix:





Oberziele versuchen, den anzustrebenden Endzustand zu beschreiben. Detailziele umfassen Kriterien und Indikatoren, mit denen die Zielerreichung gemessen werden kann. Die Angabe der Präferenzrichtung (minimieren, maximieren) ist wichtig, damit eine Optimierung überhaupt möglich ist.

Die nachstehende Struktur ist exemplarisch für Problemstellungen rund um die Erschliessungsplanung.



**Literaturhinweise**

BEROGGI, G.E.G. (1998): Decision modeling in policy management. An introduction to the analytic concept. Kluwer. Boston u.a. 349 p.

BOEHM, B.W. (1988): A spiral model of software development and enhancement. IEEE Computer, 5, 5: 61 – 72.

HABERFELLNER et. al. (1992): Systems Engineering – Methodik und Praxis. (Hrsg. Daenzer, W.F., Huber, F.). 7. Aufl., neu bearb. + erg. Verlag Industrielle Organisation. Zürich. 618 S.

HALL, A.D. (1969): Three-dimensional Morphology of Systems Engineering. IEEE Transactions on systems science and cybernetics.

KEENEY, R. (1992): Value-focussed thinking.

SAGE, A.P. (1977): Methodology for large-scale systems. McGraw-Hill. New York u.A. 445 S.

SAGE, A.P. (1992): Systems Engineering. John Wiley & Sons. New York u.a. 606 p.

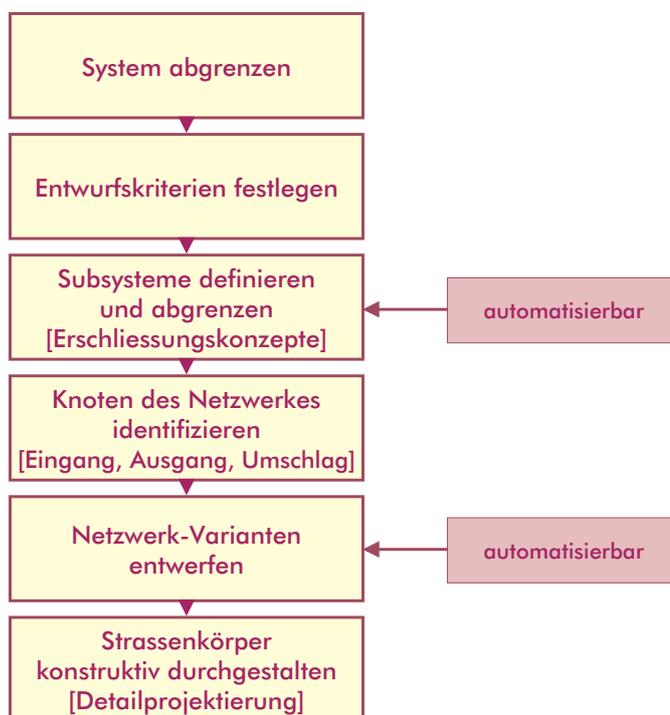
## 5.4.4 Systementwurf

Der Entwurf einer konkreten Lösung ist ein kreativer Prozess, der wie folgt abläuft:

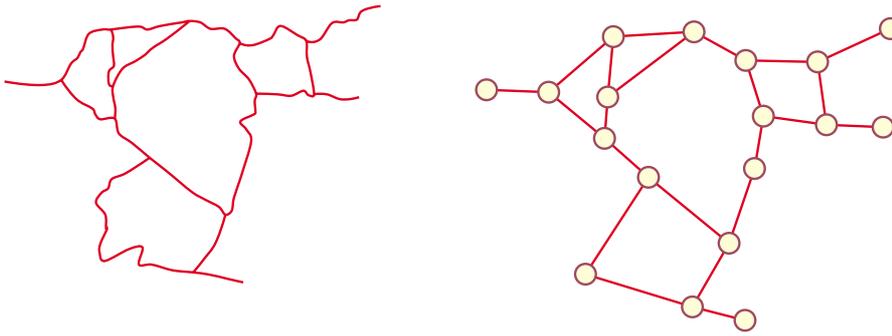
- Systemkomponenten auswählen, mit denen die geforderte Funktionsfähigkeit erreicht werden kann;
- einzelnen Komponenten räumlich anordnen;
- einzelne Komponenten funktionell aufeinander abstimmen;
- geometrische Abmessungen der einzelnen Komponenten bestimmen.

Die Lösungsentwicklung folgt dem Prinzip der schrittweisen Verfeinerung (hierarchische Dekomposition). Zuerst müssen aus der gesamten Palette der Lösungspfade ein oder mehrere Lösungskonzepte ausgewählt werden. Der zentrale Schritt, das Entwickeln eines Lösungskonzeptes definiert die Systemkomponenten, bringt sie in einen räumlichen Zusammenhang und stimmt sie aufeinander ab. Der letzte Schritt umfasst das konstruktive Durchgestalten der einzelnen Subsysteme und Komponenten (Bemessung).

### 5.4.4.1 Ablauf des Entwurfsprozesses



### 5.4.4.2 Formale Abbildung von Netzwerken



Netzwerke lassen sich als Graphen abbilden und mathematisch beschreiben. Die strukturbildenden Elemente sind Knoten und Kanten (Bögen). Es gibt eine Menge von mathematischen Verfahren, Probleme in Graphen zu lösen (z.B. shortest path Problem - Dykstra's algorithm)

### 5.4.4.2 Festlegen der Entwurfskriterien

<i>Zu treffender Entscheid</i>	<i>Entwurfskriterium</i>	<i>Einflussfaktoren</i>	<i>Vorgehen im Detail</i>
Erschliessungskonzepte festlegen (Subsysteme definieren und abgrenzen)	$v_{\text{befahrbar}} < 25\%$ $v_{\text{maschweg}} < 45\%$ $v_{\text{seil}} < 100\%$	Tragfähigkeit CBR, Fahrzeug Baukosten Nutzungsintensität	Kap 3.5
Grundzüge der Netzwerkgeometrie definieren	$SA_{\text{befahrbar}}$ $SA_{\text{maschweg}}$ $SA_{\text{seil}}$	Strassenbaukosten Kosten für den off-road Transport Nutzungsintensität	Kap. 3.4
Abmessungen des Strassenkörpers festlegen	$v_{\text{max}} < 12\%$ $b = 3.2 \text{ m}$ Ausbaustandard	Fahrzeuggeometrie	Kap. 4

Um aus der Vielfalt der technisch denkbaren Lösungen eine Auswahl zu treffen, muss eine Eingrenzung vorgenommen werden. Sie orientiert sich an folgenden Fragen:

- in welchen Geländeteilen ist vorzugsweise welches Lösungsmodell zu wählen (Erschliessungskonzepte „Strasse - Rückegasse“, „Strasse - Maschinenweg“, „Strasse - Seilkran“ ?
- welche Zonen sollen mit Erschliessungsanlagen (lineare Systemkomponenten) verbunden werden ?
- welche Zonen sind für Erschliessungsanlagen ungünstig ?

Entwurfskriterien sind "Standardwerte", welche als Input für den Entwurfsprozess dienen und die Lösungssuche in eine bestimmte Richtung leiten.

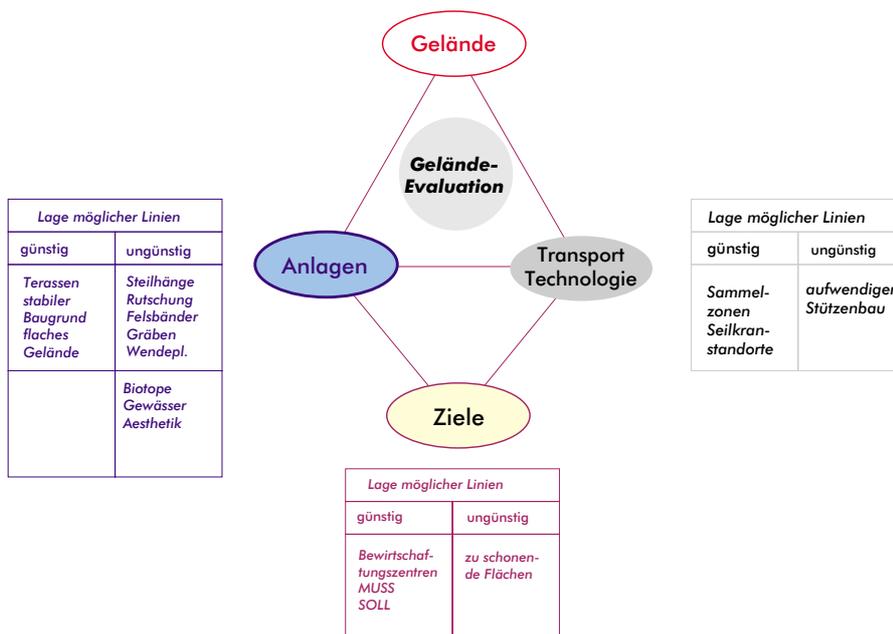
### 5.4.4.3 Subsysteme definieren und Abgrenzen

Eine erste, allerdings nur grobe Eingrenzung kann über die Hangneigung vorgenommen werden und führt zu folgender Ausscheidung:

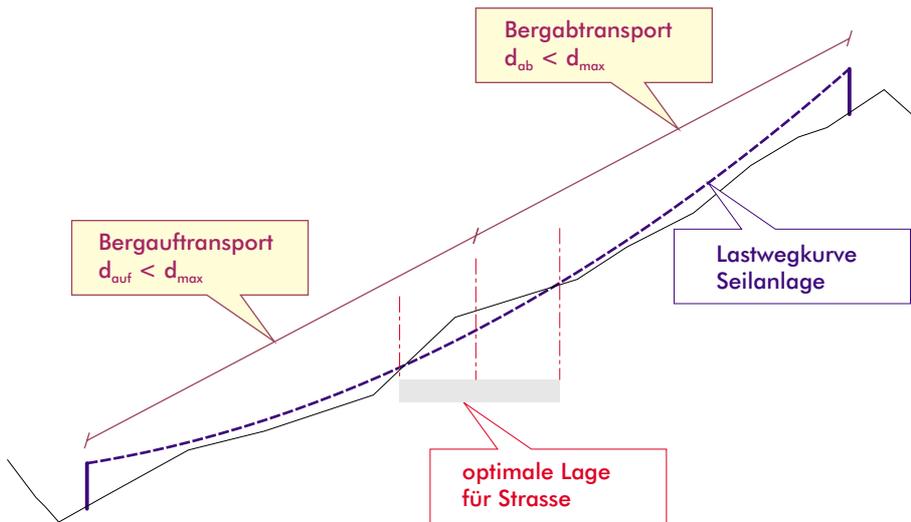
- Gelände, das direkt mit Fahrzeugen befahren werden kann. Als Ausscheidungskriterien sind zu betrachten: Hangneigung, Oberflächenrauigkeit, Bodentragfähigkeit, Fahrzeugmobilität.
- Gelände, in dem das Holz durch gezielte Krafteinwirkung (Schwerkraft, Seilzugkraft) über den Boden an eine Transportlinie geschleift werden kann. Ausscheidungskriterien: Hangneigung, Oberflächenrauigkeit.
- Gelände, in dem das Holz mit Hilfe von Seiltragwerken transportiert werden kann.
- Gelände, in dem ein Holztransport normalerweise nicht vorgenommen wird.

Der Güter- und Personenfluss folgt oft der hydrologischen Struktur eines bestimmten Geländes, weshalb die Einzugsgebiete von Gräben, Bächen und Flüssen die räumliche Struktur des Güterflusses charakterisieren.

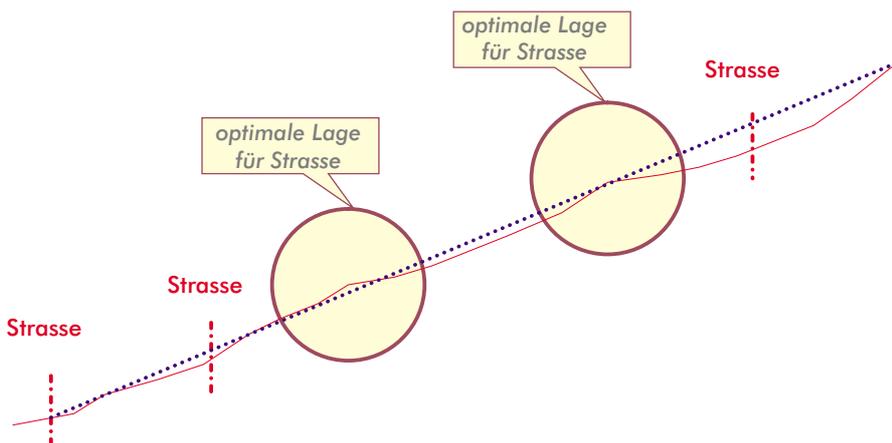
### 5.4.4.4 Definieren von Netzwerk-Knoten



Das Gelände, die Erschließungs-Ziele und die räumliche Struktur des Material- und Personenflusses bestimmen günstige Zonen („positive Fixpunkte“) und ungünstige Zonen („negative Fixpunkte“), die mit Erschließungsanlagen zu erreichen bzw. zu meiden sind. Primär ist von den zu erreichenden Sammelzonen auszugehen, sekundär sind die zu meidenden Geländeteile zu betrachten.

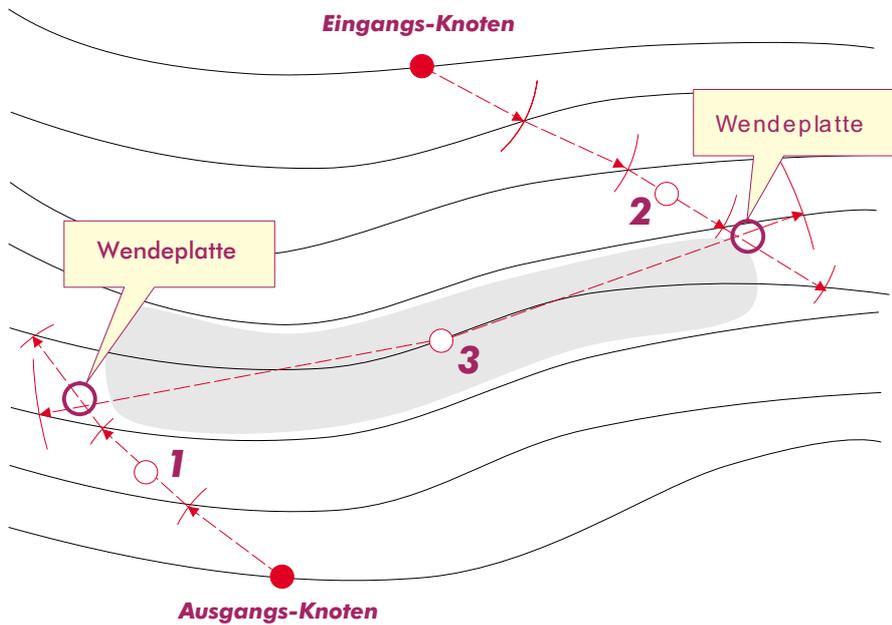


In Hanglagen kann der Materialfluss am besten anhand ausgewählter Hangprofile beurteilt werden. Beim Konzept „Strasse-Seilkran“ ist zusätzlich die Lage von Tragwerkelementen zu betrachten. Die Anzahl der Stützen ist bereits im Entwurfsprozess zu minimieren.



Durch eine ungünstige Lage der Strassen wird das Rücken des Holzes auf Dauer erschwert (Beispiel Hinterharder, Gemeinde Unterseen)

### 5.4.4.3 Suche der Linienführung



Sammelzonen sind durch ein Netzwerk derart zu verbinden, dass (1) die Länge des Netzes minimiert und (2) möglichst wenige „negative Fixpunkte“ tangiert werden.

### 5.4.5 Systemanalyse

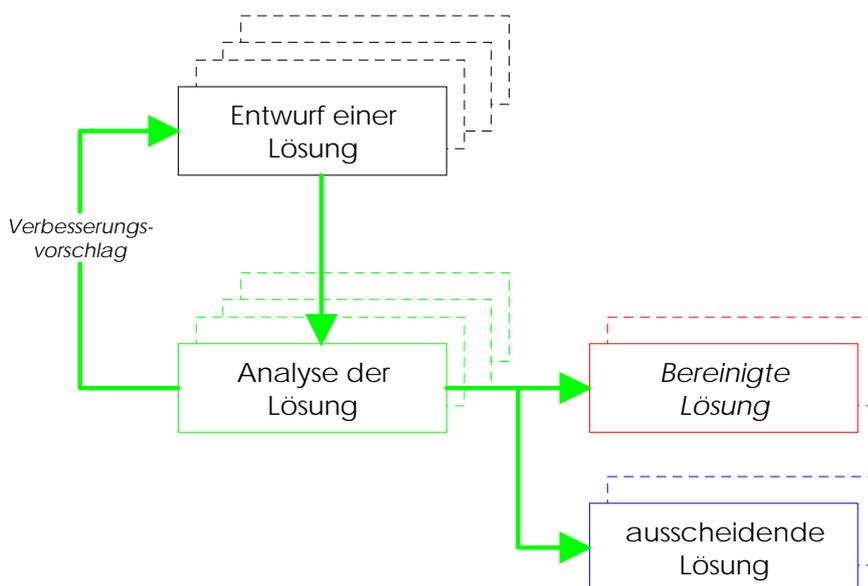
Die Systemanalyse umfasst Methoden zur Untersuchung und Gestaltung von Systemen, indem sie:

- Systeme in Subsysteme, Elemente und Verknüpfungen (Beziehungen) gliedert;
- für überschaubare, qualitativ und quantitativ erfassbare Teilbereiche Aussagen über Abläufe und Verhaltensweisen des gesamten Systems ermöglicht.

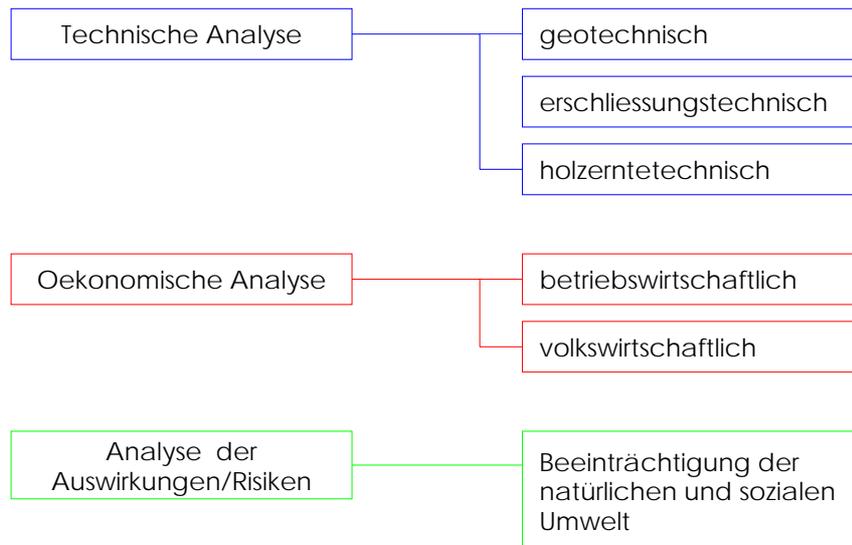
Die Analyse ist eine kritische Auseinandersetzung mit einem Sachverhalt, wobei alle Teilaspekte berücksichtigt werden sollen. Sie ist eine der Synthese entgegengesetzte Erkenntnismethode, welche versucht, Wirkungen auf Ursachen und Wirklichkeit auf Prinzipien und Gesetze zu reduzieren.

Die Phase der Analyse ist der kritischste Schritt innerhalb des Problemlösungszyklus. Es geht insbesondere darum,

- Lösungen systematisch zu prüfen, um Ansatzpunkte für Verbesserungen oder für ein allfälliges Ausscheiden zu finden;
- die Tauglichkeit (Machbarkeit) der Lösungen kritisch zu durchleuchten;
- die Lösungen einzeln zu betrachten und keine vergleichende Bewertung anzustellen.



Entwurf und Analyse erfolgen iterativ. Schwachstellen, die in der Analyse festgestellt werden fließen in einen erneuten Entwurf ein, um die Lösungen systematisch zu verbessern. Im gegenseitigen Zusammenwirken zwischen Analyse und Entwurf entstehen eine Teilmenge bereinigte, verbesserte Lösungen und eine Teilmenge auszuschneidende Lösungen.

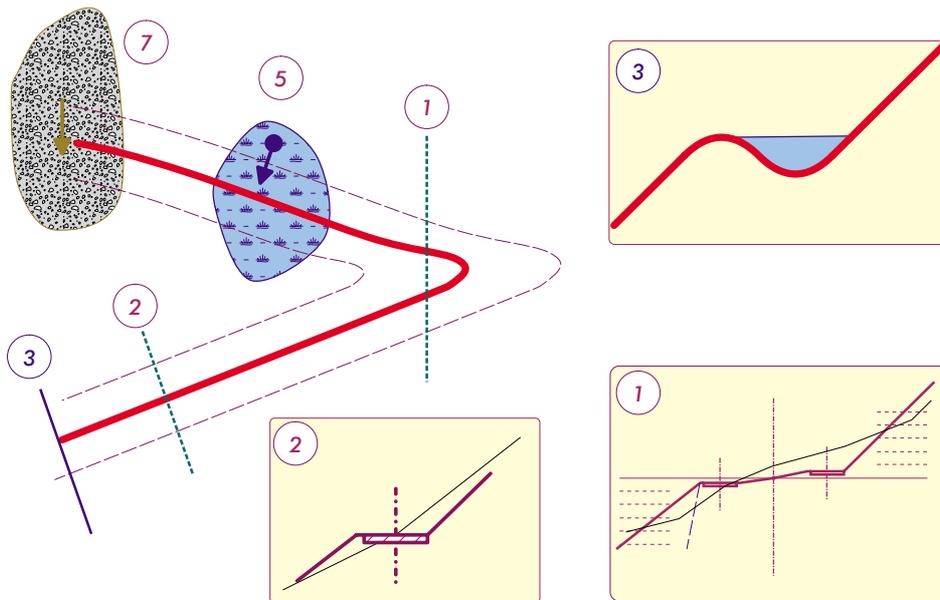


Die Analyse wird für verschiedenste Teilbereiche separat vorgenommen, dies, um die Problemsicht in überschaubaren Grenzen zu halten und um Kriterien und Indikatoren zu finden, welche es ermöglichen, die Zielerreichung einer einzelnen Lösung zu beurteilen und eine Rangreihenfolge für einzelne Aspekte festzulegen.

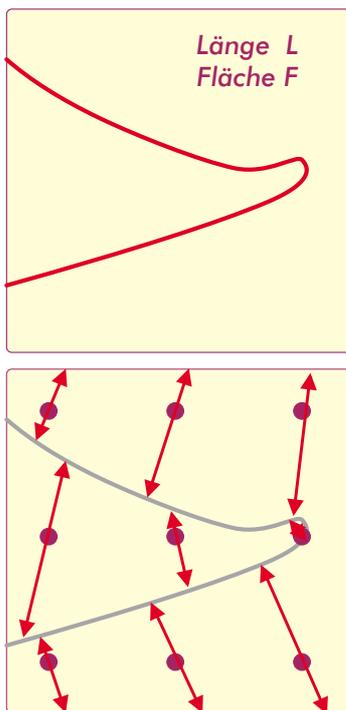
#### 5.4.5.1 Technische Analyse

Die technische Analyse versucht, die Aspekte „Funktionstauglichkeit“ und „Gebrauchstauglichkeit“ zu beurteilen. Folgende Bereiche sind eingehender zu betrachten:

- **Geotechnik:** Konstruktive Ausgestaltung von Schlüsselstellen (Wendepplatten, Bach- und Grabenquerungen, Durchstossen von Rippen); Machbarkeit der Linienführung; Hangstabilität im Bereich der Linie (Geologie?); Erosionsrisiko.
- **Erschliessungstechnik:** Wirksamkeit der Erschliessungsnetzes; räumliche Verteilung der Strassenabstände.
- **Rücke- und Holzerntetechnik:** Räumliche Verteilung verschiedener Rückeverfahren; Anteil nicht zugänglicher Fläche.



Die geotechnische Analyse wird durch eine Kartierung im Gelände und allenfalls durch ergänzende Expertenmeinungen (Geologen) vorgenommen. In einem Korridor entlang von geplanten Strassenzügen werden wesentliche Geländemerkmale kartiert. An besonders schwierigen Stellen empfiehlt es sich, Querprofile aufzunehmen, um die technische Machbarkeit zu überprüfen.

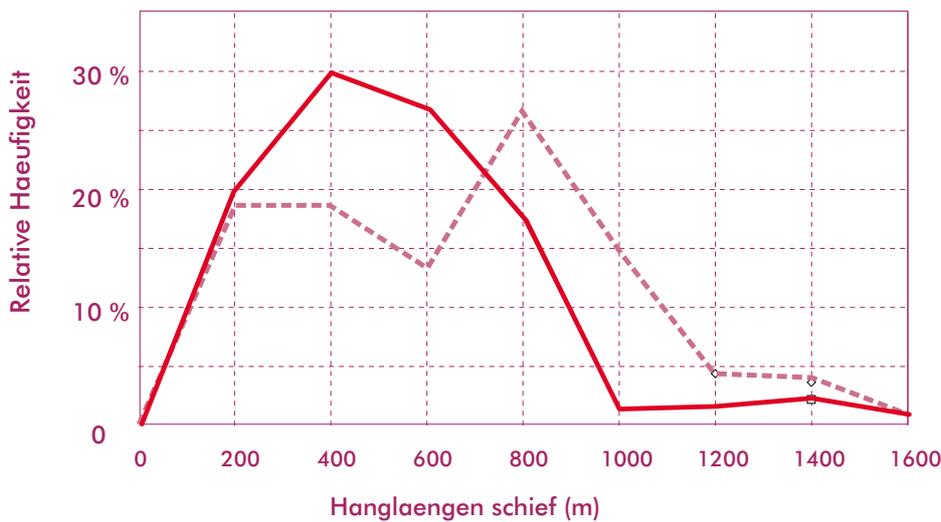


$$SD = \frac{L}{F}$$

$$\overline{SA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SA_i$$

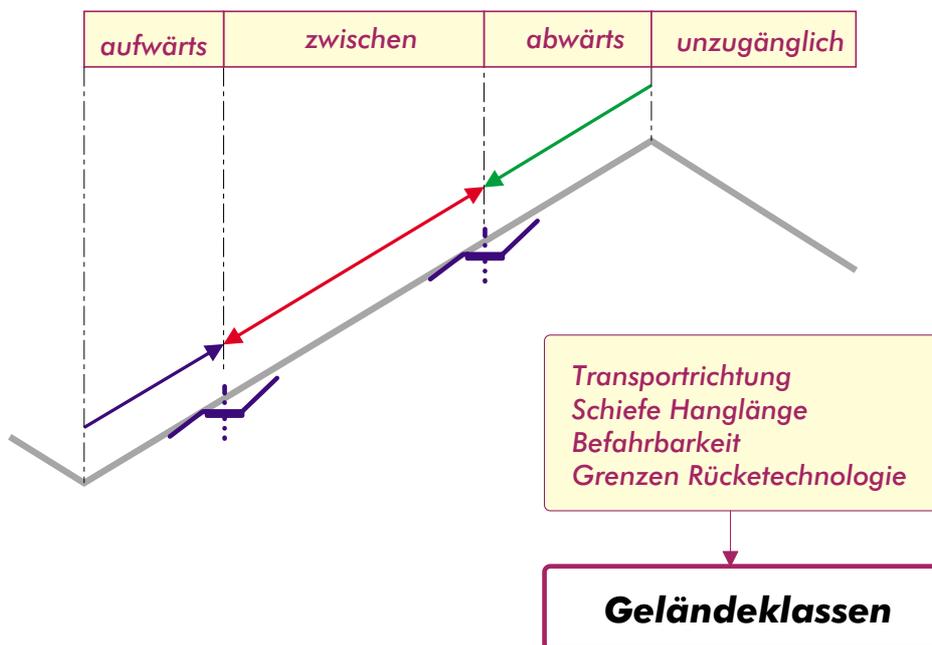
$$c_{net} = \overline{SA} \cdot SD$$

Die erschliessungstechnische Analyse versucht, die Wirksamkeit eines Erschliessungsnetzes mit einfachen Kennzahlen zu beschreiben. Die Strassendichte (m<sup>2</sup>/ha) und der durchschnittliche Strassenabstand werden für jede Variante bestimmt. Daraus lässt sich der Strassennetzkorrekturfaktor berechnen, der ein Mass für die Effektivität einer Lösung ist

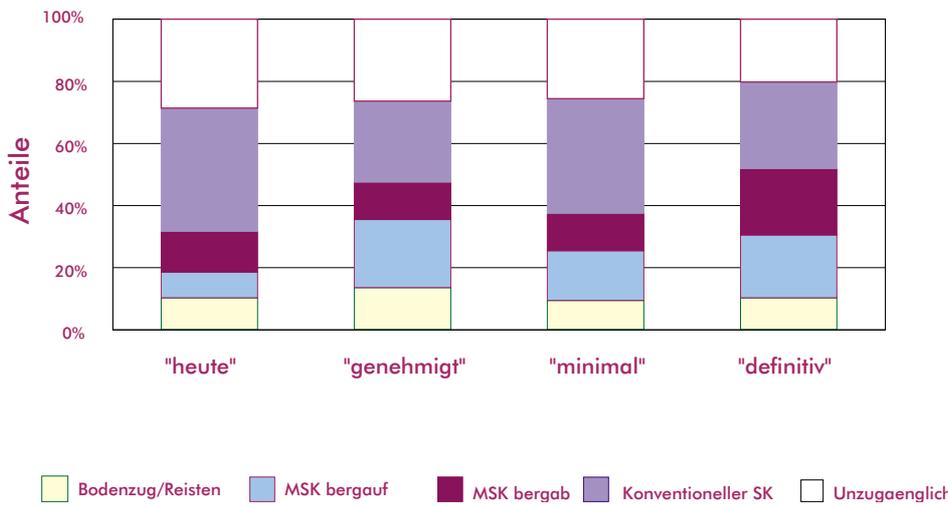


Mittelwerte (z.B. durchschnittlicher Strassenabstand) vermögen die Variabilität nicht zu charakterisieren. Die Häufigkeit der Strassenabstände ist ein gutes Mittel, um die Variabilität darzustellen.

----- Heutiger Zustand      — Geplant

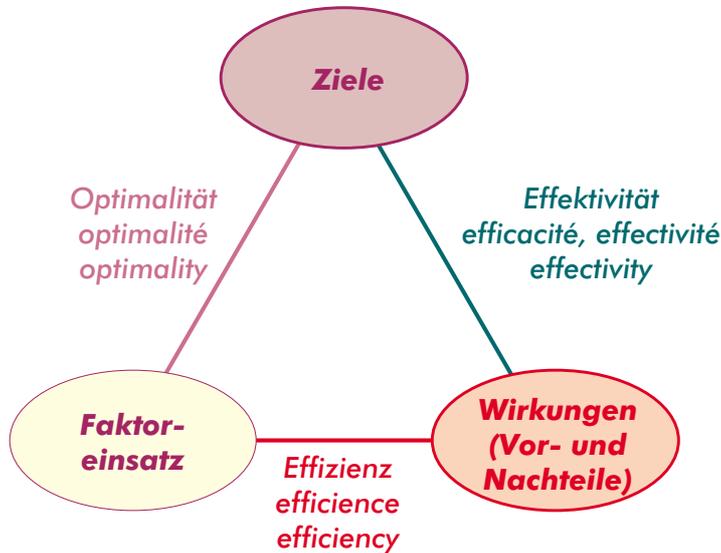


Ziel der holzerntetechnischen Analyse ist es, die räumliche Verteilung und das Ausmass verschiedener Rückeverfahren zu beschreiben. Mit einer einfachen Geländeklassifikation werden Klassen gebildet, deren räumliche Ausdehnung gemessen werden kann.

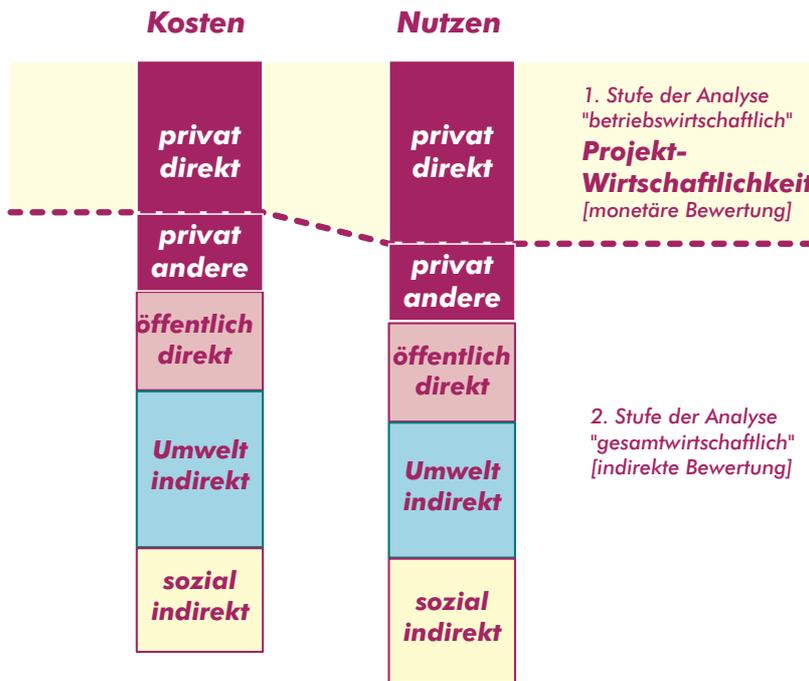


Eine graphische Darstellung der Flächenanteile verschiedener Rückecklassen erlaubt einen raschen, informativen Quervergleich verschiedener Erschliessungsvarianten.

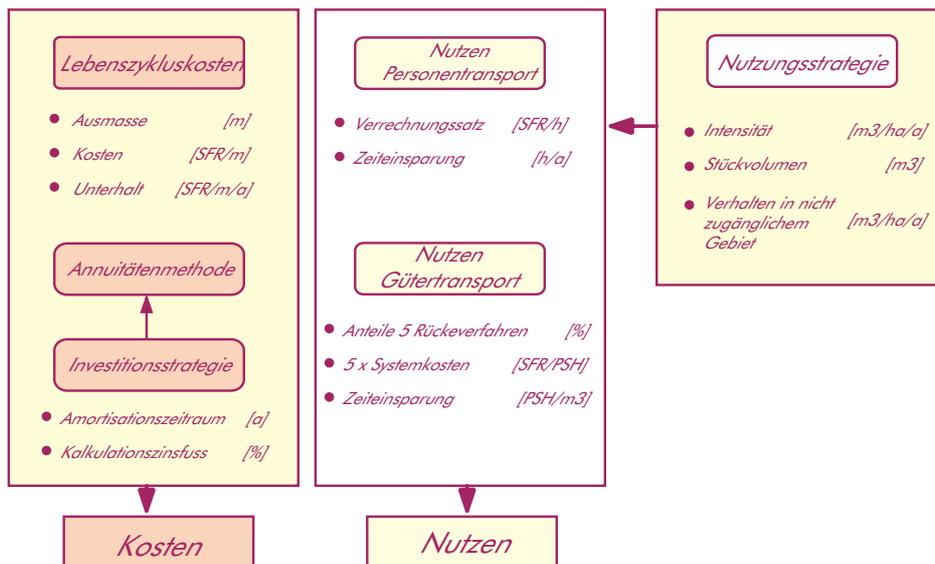
### 5.4.5.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse



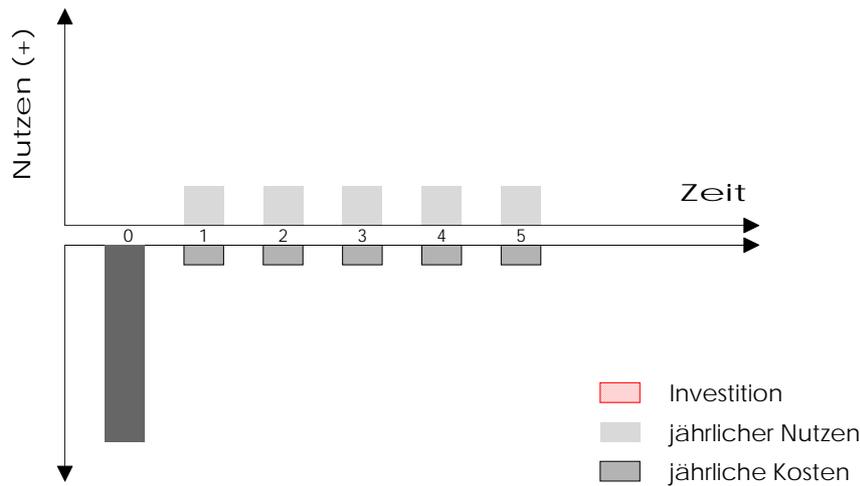
Die Ökonomie kennt drei unterschiedliche Kennziffern.



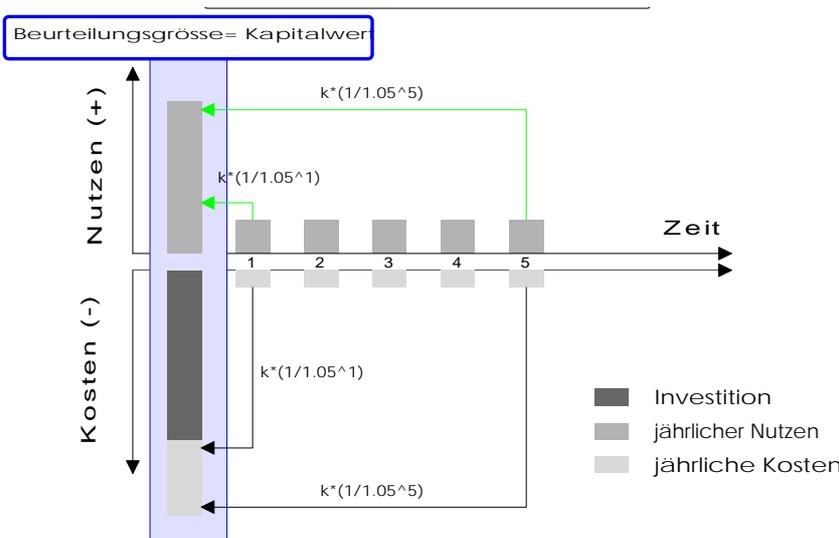
Die ökonomische Analyse kann verschiedene Stufen berücksichtigen. Zum einen können einander direkte Kosten und Nutzen gegenübergestellt werden, was aus Sicht der direkt Betroffenen Privatpersonen, der indirekt betroffenen Privatpersonen und der öffentlichen Haushalte vorgenommen werden kann (Pillet, 1996). Externalitäten lassen sich ebenfalls ökonomisch bewerten, was jedoch besondere Schwierigkeiten in sich birgt.



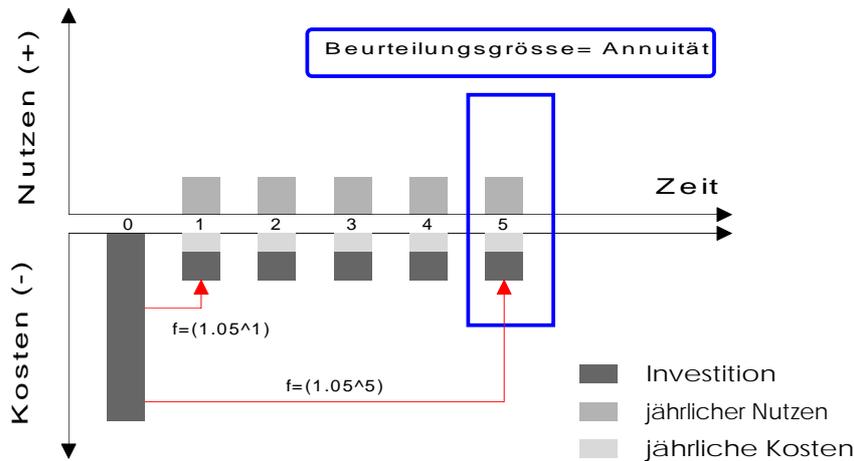
Das Wesentliche einer Wirtschaftlichkeits-Analyse ist das Analyse Modell, das in der Regel aus folgenden Teilmodellen besteht:



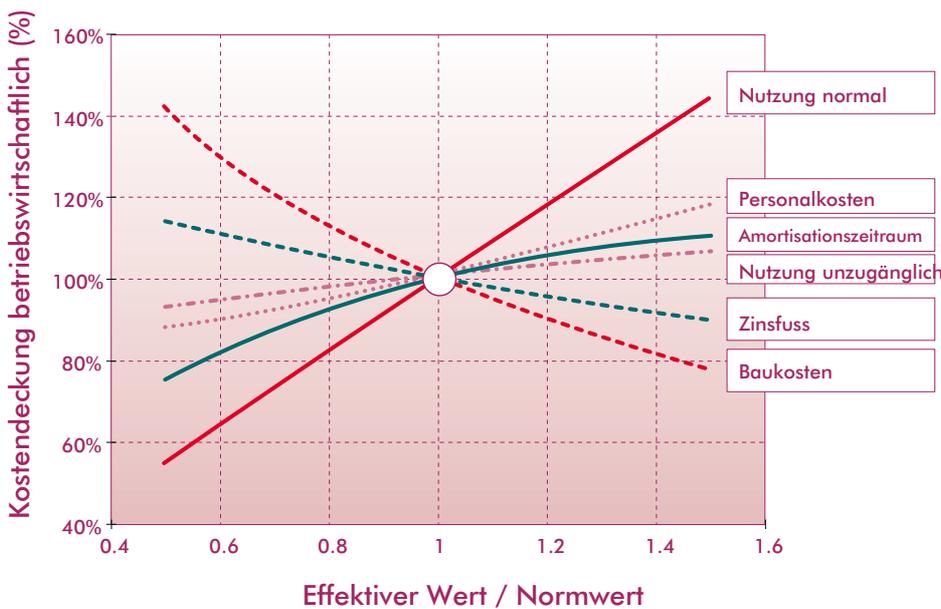
**Amortisationsmodell:** Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse stösst bei Erschliessungsvorhaben auf verschiedene Schwierigkeiten. Im Jetzt-Zeitpunkt wird eine Investition getätigt, die ihre Wirkungen (Nutzen, Unterhaltskosten) erst in Zukunft entfaltet. Kosten und Nutzen fallen in verschiedenen Zeitpunkten an, womit Methoden anzuwenden sind, welche diesen Zeiteffekt berücksichtigen können. Die entsprechenden ökonomischen Modelle nennen sich *dynamische Verfahren der Investitionsrechnung*.



Die Kapitalwertmethode rechnet alle in Zukunft anfallenden Nutzen und Kosten durch Abdiskontieren auf den Jetzt-Zeitpunkt um. Damit entstehen vergleichbare Masse für Kosten und Nutzen. Die Berechnung wird stark beeinflusst vom Amortisationszeitraum und von der Grösse des Zinsfusses



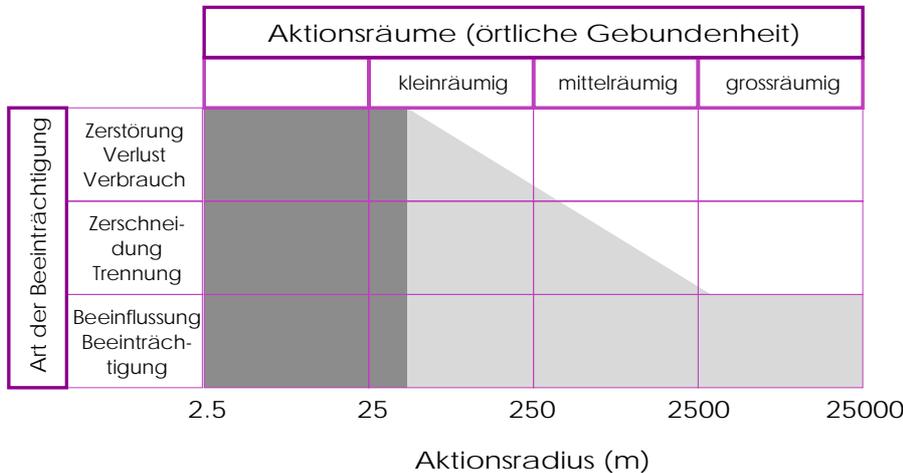
Die Annuitätenmethode rechnet den im Jetzt-Zeitpunkt zu tätigen Investitionsbetrag auf zukünftige, jährlich gleichmässige Beträge um. Die Resultate lassen sich für Probleme der Landnutzung relativ einfach interpretieren, da sie in direkte Beziehung zu Kennwerten der Landnutzung gesetzt werden können (Nutzung pro Jahr, Ertrag pro Jahr, ...)



Eine Sensitivitäts-Analyse ermöglicht es, den Einfluss der einzelnen Parameter, die geschätzt werden müssen und somit mit einer Unsicherheit verbunden sind, abzuschätzen. Ausgangspunkt der Ueberlegungen ist der kritische Kostendeckungsgrad von 100%, bei dem für jeden einzelnen Parameter abzuschätzen ist, ob ein 'Kippen' in den Bereich der Nicht-Wirtschaftlichkeit möglich ist.

### 5.4.5.3 Analyse der Auswirkungen auf die natürliche und soziale Umwelt

Neben Kosten und Nutzen sind auch die Risiken verschiedener Handlungsalternativen in die Ueberlegungen einzubeziehen.



Erschliessungsanlagen verursachen drei Arten von Wirkungen auf Natur und Umwelt. Die Zerstörung von Naturwerten ist die grösste Beeinträchtigung, der Zerschneidungs- oder Trennungseffekt führt zu einer verstärkten Fragmentierung der Biotope, während die Beeinträchtigung einzelne Systemfunktionen kurzfristig oder dauernd stören kann. Neben der Art der Beeinträchtigung ist die Mobilität der betroffenen Naturwerte zu berücksichtigen. Sie ist ein Mass dafür, wie gut die Natur den Störungen ausweichen kann.

Ziel einer analytischen Betrachtung ist es, die einzelnen Effekte mit Kriterien und Indikatoren für verschiedene Handlungsalternativen zu beschreiben. Eine allgemein anerkannte Liste mit Kriterien und Indikatoren für die Analyse von Wirkungen auf die Umwelt existiert zur Zeit nicht.

#### Indikatoren für die 'Messung' von Umweltwirkungen

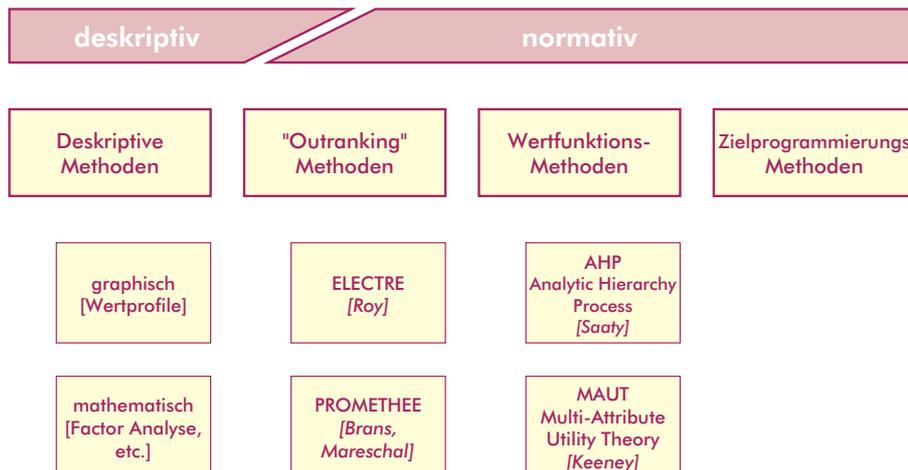
<i>Umwelt Element</i>	<i>Risiko</i>	<i>Indikator</i>	<i>Dimension</i>	<i>Präferenzrichtung</i>
<b>Boden</b>	Bodenverlust	Strassenfläche	m <sup>2</sup>	minimieren
	Erosion	Strassenfläche	m <sup>2</sup>	minimieren
	Störung der Lithosphäre	Bewegtes Erdvolumen	m <sup>3</sup>	minimieren
<b>Wasser</b>	Reduktion der Infiltration	Strassenfläche	m <sup>2</sup>	minimieren
	Austrocknen von Feuchtgebieten	Entwässerte Fläche	m <sup>2</sup>	minimieren
	Zerstörung von Quellen	Zerstörung von Gewässerschutzgebieten	m <sup>2</sup>	minimieren
<b>Biosphäre</b>	Habitat-Verlust	Zerstörte Fläche wertvoller Habitats	m <sup>2</sup>	minimieren
	Habitat-Störung	Strassenlänge pro Einheit wertvoller Habitats	m/m <sup>2</sup>	minimieren
	Störung von Wildtieren	Störungshäufigkeit	days / year	minimieren

<b>Atmosphäre</b>	Indirekte Wirkungen	Nicht berücksichtigt		minimieren
<b>Nutzung natürlicher Ressourcen</b>	Degradierung nicht-erneuerbarer Ressourcen	Genutztes Volumen	m <sup>3</sup> /year	minimieren
	Landnutzung für Wohnen, Industrie und Handel	Beanspruchte Fläche	m <sup>2</sup>	minimieren
	Verlust von 'offenen Flächen'	Zerstörte Flächen von Landwirtschafts-, Wald, etc	m <sup>2</sup>	minimieren
<b>Gerechtigkeit</b>	Risikoverteilung	Risikodichte pro Fläche		minimieren
<b>Sozio-ökonomische Bedingungen</b>	Veränderung der Beschäftigungsstruktur	Neue Arbeitsplätze Verlorene Arbeitsplätze	number number	minimieren
	Aenderung der Einkommensverhältnisse	Pro-Kopf Einkommen	currency	
	Aenderung der regionalen Oekonomie	Wertschöpfung pro Kopf	currency	minimieren
<b>Gesundheit und Sicherheit</b>	Aenderung der Besiedlung	Anzahl Haushalte	number	minimieren
	Berufsunfälle	Anzahl schwerer Unfälle	number	minimieren
	Privatunfälle Lärm	Anzahl schwerer Unfälle	number	minimieren minimieren
<b>Kulturelles Erbe</b>	Zerstörung von historischen (archäologischen) Objekten			minimieren
<b>Asthetik</b>	Visuelle Veränderungen			minimieren
	Unangenehme Gerüche			minimieren

### 5.4.6 Bewertung von Lösungsvarianten

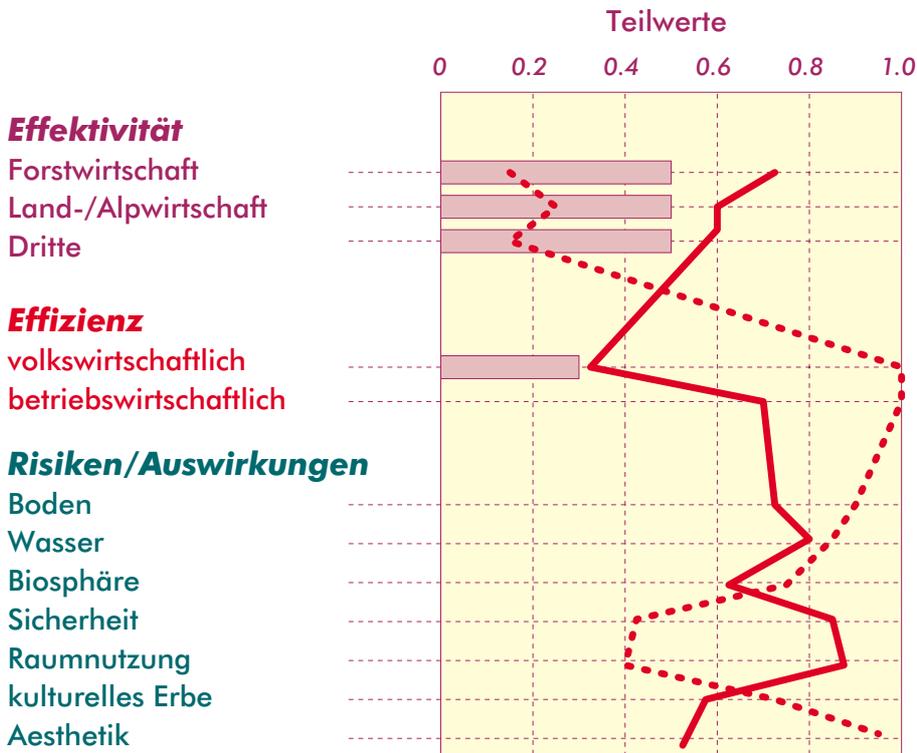
Ziel der Bewertung ist es, aus einer Menge von Handlungsalternativen jene zu finden, welche die grössten Vorteile und die geringsten Nachteile aufweist. Wie wir in der Analyse gesehen haben, hat jede Erschliessungsvariante eine Mehrzahl von Konsequenzen. Das Problem ist somit, wie diese Konsequenzen auf ein einziges Mass reduziert werden können. Es sind folgende grundsätzliche Möglichkeiten vorhanden, dieses Problem zu lösen.

- durch intuitive Auswahl der Bestvariante;
- durch einfache Auswahlregeln;
- durch Methoden des 'Multi-Criteria Decision Making MCDM' Methoden (siehe Abbildung).



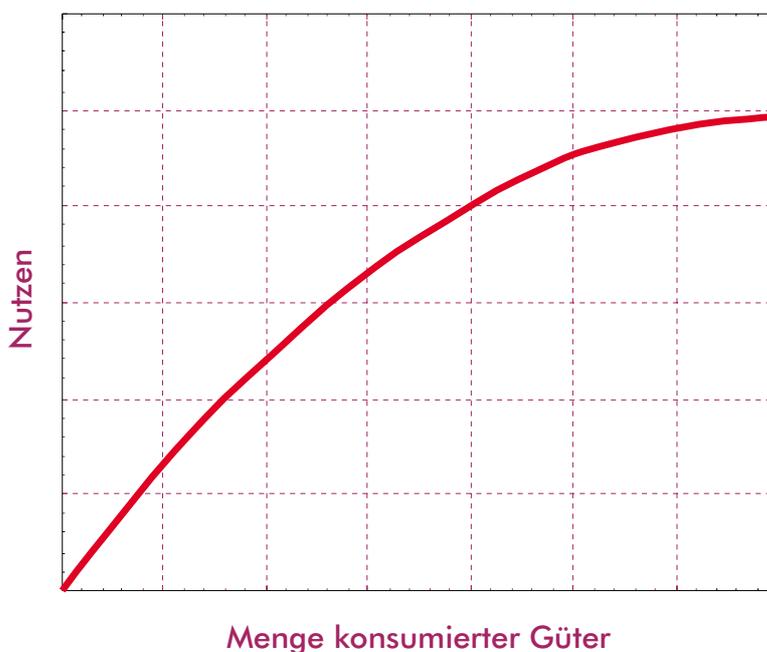
'Multi-Criteria Decision Making MCDM' umfasst formale Methoden, mit denen unpräzise Ziele mit einer Anzahl von Kriterien abgebildet und daraus aggregierte Information über die 'Güte' der einzelnen Alternativen hergeleitet werden können [Stewart, 1992].

### 5.4.6.1 Deskriptive Methoden

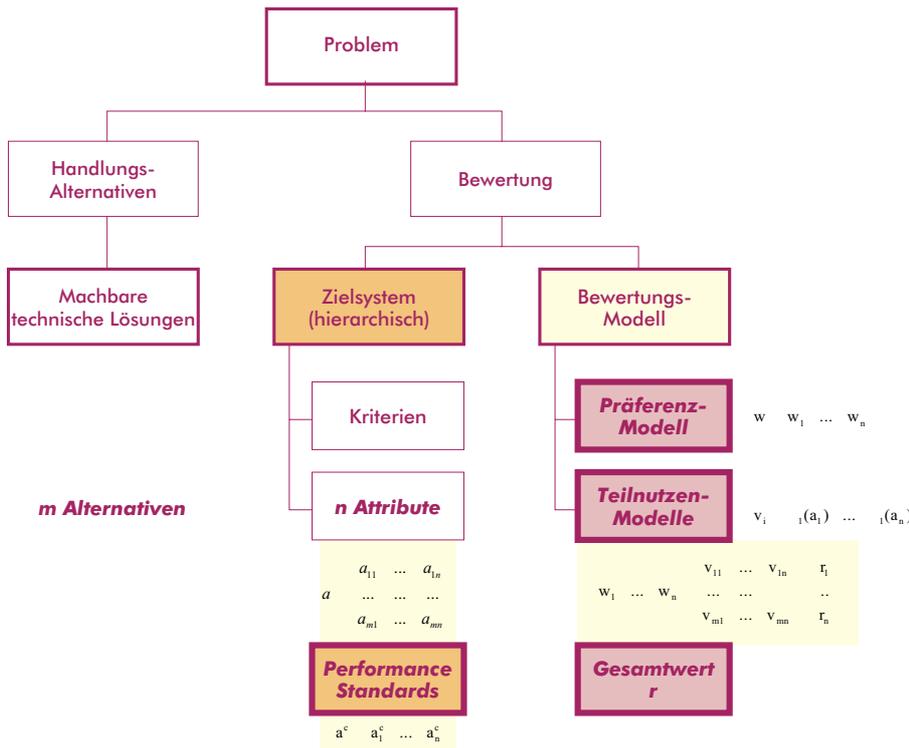


Wertprofile sind eine einfache, anschauliche Möglichkeit, die Teilwirkungen der Handlungsalternativen darzustellen. Sie lösen allerdings das Problem nicht, die Teilwirkungen so zu aggregieren, dass eine Aussage über die 'Gesamtgüte' der einzelnen Alternative möglich ist.

### 5.4.6.1 Nutzwert-orientierte Methoden

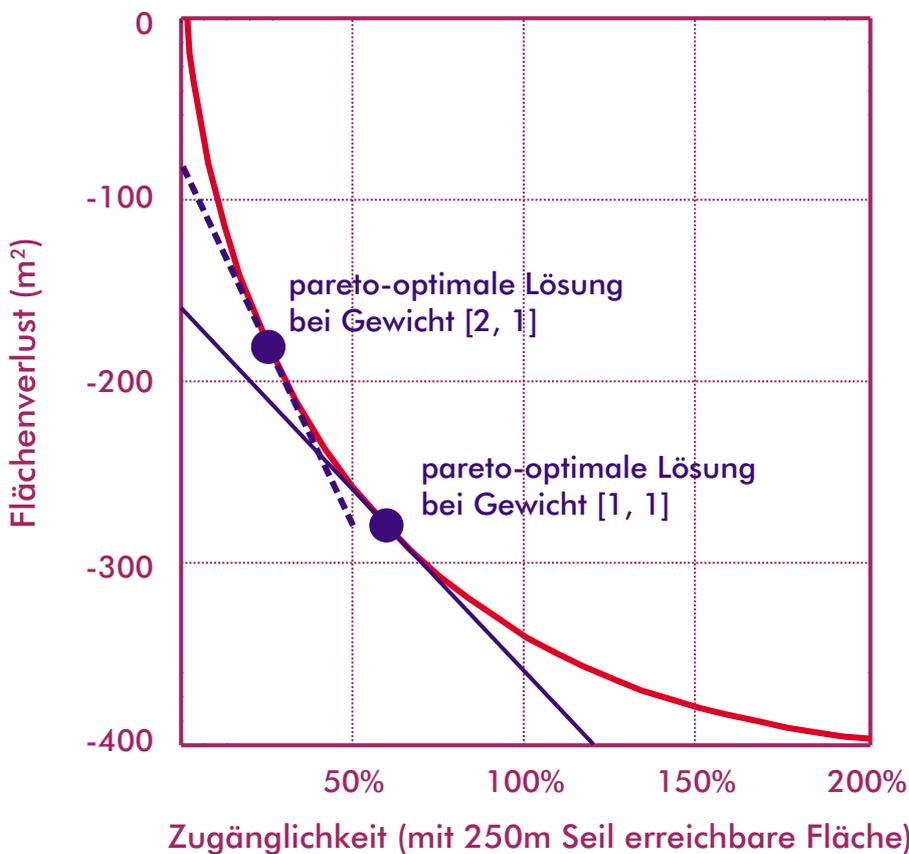


Nutzen ist ein Konzept der Ökonomie, das einerseits Vorteile, Freude oder Glück beinhaltet, andererseits Nachteile, Schmerz oder Unglück [vgl. z.B. Samuelson]. Allgemein geht man vom Prinzip des 'abnehmenden Grenznutzens' aus, womit der Zusammenhang zwischen der Menge konsumierter Güter und dem Nutzen nicht-linear ist..

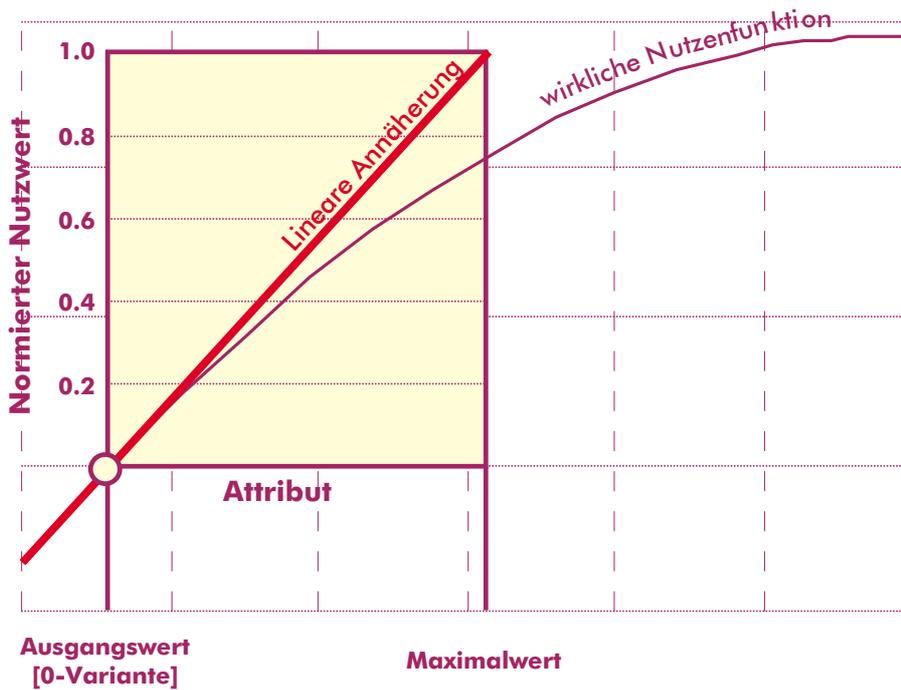


Die Quantifizierung des Nutzwertes im Sinne des MCDM basiert auf folgenden Komponenten:

- einer definierten Anzahl von Handlungsalternativen,
- einem Zielsystem, das mit einer Anzahl von Kriterien und Attributen abgebildet werden kann,
- einem Präferenzmodell, das die relative Wichtigkeit der einzelnen Teilziele wiedergibt,
- einem Teilnutzen-Modell, das den Nutzen pro Teilziel in Abhängigkeit der Attribute abbildet.



Für eine Analyse sind im allgemeinen nur die konfliktären Teilziele zu berücksichtigen. Aus der Annahme abnehmender Grenznutzen ergibt sich für zwei konfliktäre Ziele eine Indifferenzkurve, welche alle Lösungen mit gleichem Gesamtnutzen abbildet. Eine sogenannte pareto-optimale Lösung ist definiert durch die relative Wichtigkeit der beiden Teilziele zueinander.



Da die Nutzenfunktionen für die Teilziele nicht mathematisch-exakt definiert sind, müssen sie angenähert werden. Dabei werden zwei Vereinfachungen gemacht:

- es wird nur ein Ausschnitt betrachtet, dabei wird der Nullpunkt auf den 'Vor-Entscheidungs-Wert' gelegt,
- die Nutzenfunktion wird als linear angenommen.



Beispiel von Wertfunktionen für verschiedene Teilziele

60	52	44	36	28	20	Zugang Alp (min)
33	42	52	61	71	80	Holzernte (Quantil)
20	52	84	116	140	180	Kostendeckung BWS
0	5	24	42	61	80	Kostendeckung VWS
1	2	3	4	5	6	Auswirkungen (Note)