

Lehrstuhl für Leichtbau

## Methoden der Entscheidungsfindung zur ganzheitlichen Bewertung von Thermoplasten in der Pkw-Karosserie

Hans-Heiner Bruns

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor - Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heising  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Baier  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

Die Dissertation wurde am 17.06.2003 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 04.11.2003 angenommen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Die Herausforderung für die Automobilindustrie: Verringerung der CO <sub>2</sub> -Emissionen . . . . .	1
1.2	Ansätze zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches . . . . .	2
1.3	Leichtbaupotentiale der Pkw-Karosserie . . . . .	3
1.4	Problem: Entscheidungsfindung bei komplexen Systemen . . . . .	6
1.5	Aufgabenstellung: Methodik zur Analyse und Bewertung von Systeminnovationen . . . . .	9
1.6	Methodischer Ansatz und Aufbau der Arbeit . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Einordnung in die Konstruktionsmethodik</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>Analyse von Systeminnovationen</b>	<b>21</b>
3.1	Einführung in die Systemtheorie . . . . .	21
3.2	Logik des Systemkonzepts: Software-Prototyping zur Systemanalyse . . . . .	24
3.3	bOSSA als Prototyp zur Analyse von Systeminnovationen . . . . .	28
3.4	Komplexität von Systemen . . . . .	28
3.5	Dynamisches Verhalten von Systemen . . . . .	30
3.6	Systemmodelle der Technik und deren Bedeutung für diese Arbeit . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Entscheidungsfindung bei Systeminnovationen</b>	<b>37</b>
4.1	Logik der rationalen Entscheidungsfindung . . . . .	38
4.2	Vollständige Ordnung und Transitivität als Voraussetzung . . . . .	40
4.3	Bestimmung des kardinalen Nutzens für mehrkriterielle Entscheidungen . . . . .	41
4.3.1	Gliederung von Ergebniskriterien . . . . .	41
4.3.2	Beziehungen zwischen Ergebniskriterien . . . . .	43

4.3.3	Bewertung von quantitativen Entscheidungskriterien . . . . .	44
4.3.4	Bewertung von qualitativen Entscheidungskriterien . . . . .	45
4.4	Vom Bewerten zum Entscheiden: Entscheidungsverfahren für Karosserie- Leichtbau . . . . .	45
4.4.1	Das vereinfachte Entscheidungsfeld im Karosserie-Leichtbau . . .	46
4.4.2	Entscheidung im Karosserie-Leichtbau bei Sicherheit . . . . .	47
4.4.3	Entscheidung im Karosserie-Leichtbau bei Ungewissheit . . . . .	58
4.4.4	Entscheidung im Karosserie-Leichtbau bei Risiko . . . . .	60
4.4.5	Entscheidung im Karosserie-Leichtbau bei Unschärfe . . . . .	61
4.4.6	Bedeutung der Entscheidungsverfahren für die Arbeit . . . . .	65
4.5	Entscheidungsfindung durch bOSES . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Entscheidung: Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie</b>	<b>69</b>
5.1	Karosserie-Leichtbau als Sachsystem . . . . .	70
5.1.1	Funktionale Betrachtung der Pkw-Karosserie . . . . .	71
5.1.2	Kraftfluss . . . . .	73
5.1.3	Passive Sicherheit . . . . .	75
5.1.4	Gestaltungsfunktion Form und Oberfläche . . . . .	77
5.1.5	Relevante Umwelteinflüsse während der Nutzungsdauer . . . . .	79
5.1.6	Zusammenfassung der relevanten Attribute in bOSSA . . . . .	80
5.2	Hierarchische Betrachtung des Sachsystems Karosserie-Leichtbau . . . . .	82
5.2.1	Baugruppen der Selbsttragenden Karosserie . . . . .	83
5.2.2	Kombination der funktionalen und hierarchischen Systembetrach- tung . . . . .	86
5.3	Thermoplaste als Konstruktionswerkstoff für die Karosserie . . . . .	88
5.3.1	Allgemeine Eigenschaften von Thermoplasten . . . . .	90
5.3.2	Entscheidungssituation: Einsatzgebiete von unverstärkten Ther- moplasten in der Pkw-Karosserie . . . . .	92
5.3.3	Bewertung der Entscheidungskriterien . . . . .	94
5.3.4	Entscheidungsanalyse des Sachsystems . . . . .	100
5.4	Handlungssysteme der Automobilindustrie . . . . .	106
5.4.1	Produktion als Handlungssystem . . . . .	106
5.4.2	Vertrieb, Service & Instandsetzung . . . . .	114
5.4.3	Beseitigung . . . . .	115
5.4.4	Der Produktentstehungsprozess als Handlungssystem . . . . .	116

5.4.5	Entscheidungsanalyse der Handlungssysteme . . . . .	120
5.5	Entscheidungsempfehlung zur Leichtbau-Karosserie . . . . .	121
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>123</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>133</b>
	<b>Verwendete Formelzeichen</b>	<b>135</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>137</b>

## *Inhaltsverzeichnis*

# 1 Einleitung

## 1.1 Die Herausforderung für die Automobilindustrie: Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Das Automobil steht wie kein anderes technisches Produkt für den wirtschaftlichen Aufschwung in der Bundesrepublik Deutschland. Die damit ermöglichte individuelle Mobilität prägt heute entscheidend unsere Gesellschaft und das Landschaftsbild. So hat sich das Automobil in den reicheren Regionen der Welt als Massenverkehrsmittel und Teil der Lebensqualität etabliert.[77][140, S. 30 f.] Gleichzeitig wird das Automobil aber seit langem wegen seiner Umweltbelastungen stark kritisiert (vgl. Abbildung 1.1).[63, S. 5-18] Der berechtigte Wunsch nach individueller Mobilität auch in den sich entwickelnden

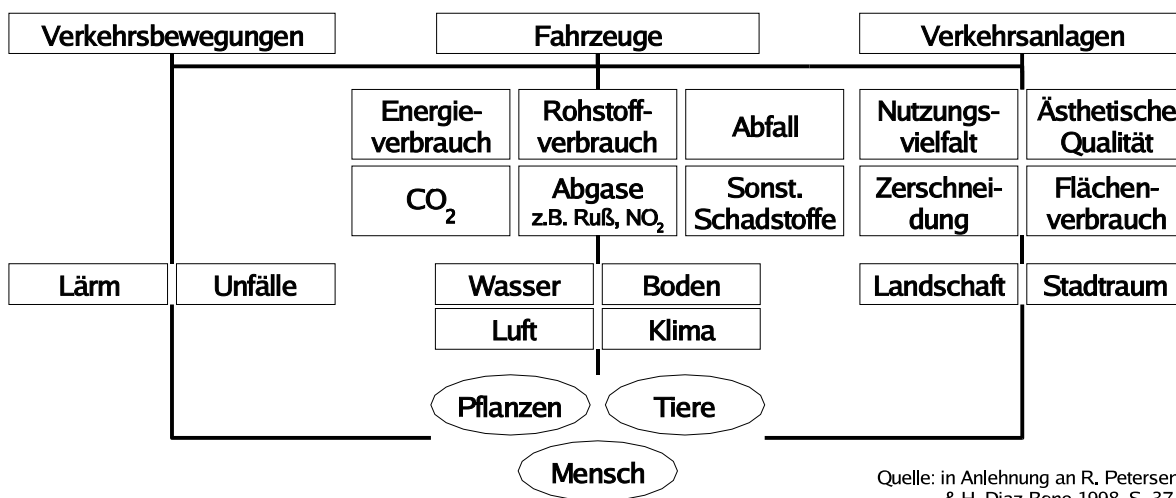


Abbildung 1.1: Umweltbelastungen durch Kfz-Verkehr [99, S. 37]

Volkswirtschaften lässt weiterhin hohe weltweite Wachstumsraten der Automobilindustrie erwarten.[63, S. 5] Die Prognosen für die weitere Zunahme der Umweltbelastungen sind entsprechend düster.[99, S. 13]

Große Fortschritte haben Techniker und Wissenschaftler in den vergangenen Jahrzehnten bei der Reduzierung des Ausstoßes gesundheits- und waldschädigender Schadstoffe mit Magergemischmotoren und Katalysatortechnik erzielt.[99, S. 41-44][63, S. 12-15][48, S. S2] Mit der Diskussion um weltweite Klimaveränderungen durch den Treibhauseffekt<sup>1</sup> verschiebt sich die Kritik auf das Kohlendioxid – dem wesentlichen Rückstandsbestandteil einer fossilen Verbrennung – und somit letztlich wie zurzeit der Ölkrise 1973/74 wieder auf den Kraftstoffverbrauch. Unabhängig von der wissenschaftlichen Diskussion besteht in der Weltgemeinschaft ein Konsens darüber, dass ein weiterer Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration durch internationale Verträge begrenzt werden soll. In Europa haben die Automobilhersteller deswegen in einer freiwilligen Selbstverpflichtung eine Reduzierung der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen neu zugelassener Fahrzeuge von 190 g CO<sub>2</sub>/km bis zum Jahr 2008 auf 140 g CO<sub>2</sub>/km zugesagt<sup>2</sup>. So wollen die Konzerne angedrohten und teilweise bereits umgesetzten staatlichen Lenkungsmechanismen begegnen.[62][117, S. 39 f.]

## 1.2 Ansätze zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches

Zur Verringerung des Kraftstoffverbrauches sind vielfältige Innovationen erforderlich. Ausgangspunkt der Überlegungen dazu ist der Zusammenhang zwischen dem Verbrauch eines Kraftfahrzeuges  $B_e$  und der Transportleistung<sup>3</sup>. Diese ist wiederum abhängig von den Fahrwiderständen  $F_x$ , dem Wirkungsgrad der Antriebs- und Getriebetechnik  $\eta$  und dem vorliegenden Fahrprofil.[26, S. 337]

Ansatzpunkt ist daher neben der Erhöhung des Wirkungsgrades  $\eta$  die Verringerung der Fahrwiderstände. Diese sind wie folgt zu bestimmen:

- Rollwiderstand [103, S. 109f]  $F_{Ro} = f_R \cdot m_g \cdot g$
- Luftwiderstand [103, S. 111ff]  $F_L = \frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot v^2$
- Steigungswiderstand[103, S. 115]  $F_{St} = m_g \cdot g \cdot \sin \alpha$

---

<sup>1</sup>Die Treibhaushypothese besagt, dass in der Atmosphäre enthaltene Stoffe [z. B. Wasserdampf (H<sub>2</sub>O), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) sowie halogenierte Kohlenwasserstoffe (HKW)] die Abstrahlung langwelliger Wärmestrahlen verhindern und so eine Erwärmung der Erdoberfläche bewirken. Mit der Zunahme der Konzentration dieser Treibhausgase in der Atmosphäre kommt es damit zu einem weiteren Temperaturanstieg.[6, S. 63][33]

<sup>2</sup>BMW wird ab 2008 einen Flottenverbrauch von 147 g CO<sub>2</sub>/km realisieren müssen.

<sup>3</sup>Neben der Transportleistung wird Kraftstoff auch in elektrische Energie für Hilfs- und Komfortmerkmale umgewandelt.



- Beschleunigungswiderstand[103, S. 115f]  $F_A = k_m \cdot m_g \cdot a_x$

Innerhalb der einzelnen Fahrwiderstände sind das Fahrzeuggewicht  $m_g$ , der Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$ , die angeströmte Stirnfläche  $A$  und der Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  bei einer konstruktiven Auslegung beeinflussbar. Die in diese Fahrwiderstände eingehenden Parameter des Streckenprofils wie Geschwindigkeit  $v$ , Beschleunigung  $a$  und Steigungswinkel  $\alpha$  sind nicht zu berücksichtigen.

Zusammenfassend ergeben sich damit die folgenden konstruktiven Ansätze zur Senkung des Kraftstoffverbrauches:

- Verbesserung des Wirkungsgrades der Antriebs- und Getriebetechnik,
- Verbesserung des Wirkungsgrades bei der Erzeugung und dem Verbrauch elektrischer Energie,
- Senkung des Fahrzeuggewichtes  $m_g$ ,
- Verringerung des Luftwiderstandes (Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$ , Stirnfläche  $A$ ) und
- Verringerung des Rollwiderstandes (Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$ ).

Für alle diese Bereiche werden in der Automobilindustrie intensiv neue Lösungen erarbeitet. Diese Arbeit behandelt Potentiale<sup>4</sup> und Realisierungsstrategien des Leichtbaus in der Rohkarosserie (im Folgenden oft nur als Karosserie bezeichnet) als einen Ansatz zur Verringerung des Kraftstoffverbrauches.

## 1.3 Leichtbaupotentiale der Pkw-Karosserie

Die *Pkw-Karosserie* – ein etablierter Begriff in der Technik für den Wagenaufbau [1, S. 31] – ist seit der Entwicklung der ersten selbstangetriebenen Fahrzeuge von Gottlieb Daimler und Karl Benz im Jahre 1886 das nach außen hin am meisten sichtbare Element des Personenkraftwagens.

War die Karosserie zunächst ein reiner Aufbau auf ein tragendes Fahrgestell, so ist heute die *Selbsttragende Karosseriebauweise* mit dem Werkstoff Stahl am verbreitetsten. Dabei

---

<sup>4</sup>Eine Gewichtsersparnis von 100 kg ermöglicht eine Verbrauchs-Reduzierung um 0,4 bis 0,7 l auf 100 km.[4][76][72, S. 1][26, S. 337][106, S. 42 - 58]

## 1 Einleitung

sind alle Funktionen, insbesondere die Aufnahmepunkte für den Motor und das Fahrge- stell, in die Karosserie integriert. Die Fahrgastzelle bildet hierbei die zentrale Einheit und ist mit Vorder- und Hinterwagen zu einer funktionalen Gesamteinheit verbunden.[1, S. 70 f.][101, S. 257 f.] Damit ist die Karosserie an fast allen Gesamtfahrzeugeigenschaften beteiligt.[27, S. 1][78, S.135] Ihre wesentlichen Hauptfunktionen werden in Abbildung 1.2 dargestellt.

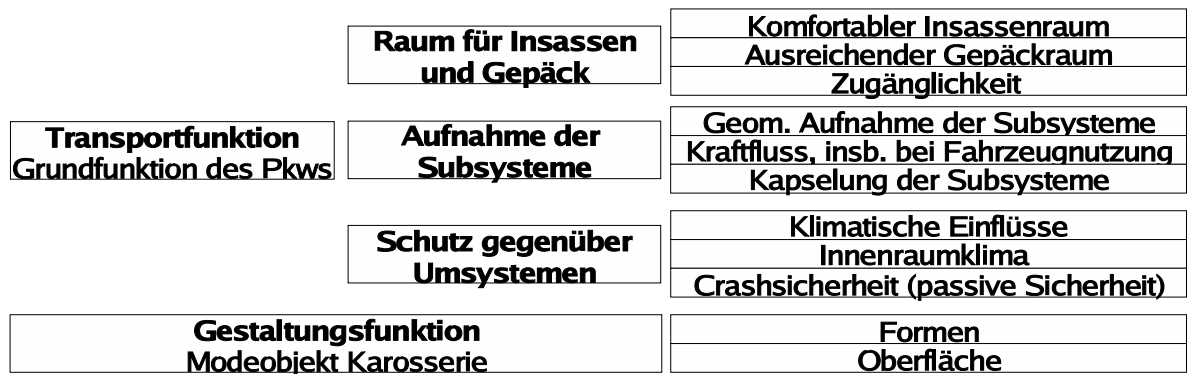


Abbildung 1.2: Grundfunktionen der Karosserie

Mit einem Anteil von ca. 22% am Fahrzeuggesamtgewicht (vgl. Abbildung 1.9) bietet die Rohkarosserie (also die reine Stahlkarosserie ohne Ausstattungsumfänge) ein bedeutendes Potential für eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauches. Neben den direkten Gewichtseinsparungen in der Rohkarosserie entstehen infolge der negativen Gewichtsspirale [94] – gleiche Fahrleistungen erfordern bei weniger Gewicht eine geringere Motorleistung – wiederum Sekundäreinsparungen im Fahrwerk und Antrieb mit bis zu weiteren 16%.

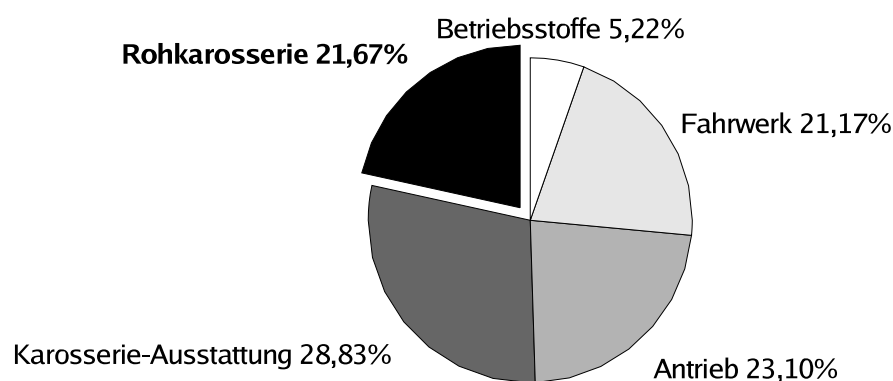


Abbildung 1.3: Gewichtsverteilung beim BMW 320i

Mit dem Begriff *Leichtbau* verbindet man allgemein ein möglichst geringes Baugewicht durch Optimierung der konstruktiven Auslegung (bessere Kräfteverteilung und Formgebung) und / oder durch Substitution spezifisch schwerer Werkstoffe durch leichtere und oder festere Werkstoffe<sup>5</sup>. [72, S. 1-3][1, S. 154 f.; 157-162]

In geringem Umfang wird diese Substitution von Stahlblech durch leichtere Werkstoffe bereits erprobt und teilw. praktiziert. Am gebräuchlichsten ist heute die Verwendung von Aluminium (z. B. BMW Z8, Audi A8 & A2) und faserverstärkten Duroplasten (z.B. Renault Scenic). [56][53][54][82][90]

Diese Arbeit betrachtet nur die werkstoffseitige Substitution durch unverstärkte Thermoplaste. Deshalb bezeichnet Karosserie-Leichtbau in den folgenden Ausführungen immer den Einsatz spezifisch leichter Werkstoffe – konkret unverstärkte Thermoplaste – anstelle der konventionellen Stahlblechwerkstoffe. Eine auch beim Einsatz von Thermoplasten erforderliche konstruktive Optimierung der Bauteile wird aus den weiteren Betrachtungen ausgeklammert.

*Thermoplaste* bilden neben Elastomeren und Duroplasten die Werkstoffgruppe der Kunststoffe (vgl. Abbildung 1.4).

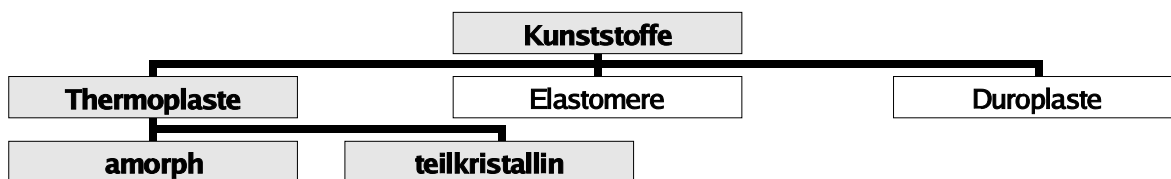


Abbildung 1.4: Kunststoffe

Sie unterscheiden sich von Elastomeren und Duroplasten in der fehlenden chemischen Verbindung der linearen Makromoleküle und lassen sich daher letztlich im Gegensatz zu Elastomeren und Duroplasten mit räumlich atomar vernetzten Molekülen wiederholt zum plastisch verformbaren Zustand erwärmen. [52, S.26-29]

Wichtigstes Argument für den Einsatz von Thermoplasten als alternativer Karosserie-Werkstoff ist die geringe Dichte von 0,9 bis 1,4 [g/cm<sup>3</sup>] im Vergleich zu Stahl (7,87) und Aluminium (2,7) und den guten Recyclingeigenschaften im Vergleich zu den Duroplasten. Andererseits ist ein Einsatz aufgrund der eher geringen mechanischen Eigenschaften begrenzt.

<sup>5</sup>Auch in der Verwendung von hochfesten Stählen liegt ein Leichtbaupotential, wenn sich dadurch die erforderliche Wandstärke und so letztlich auch das Bauteilgewicht signifikant reduziert. [54][90][132]

## 1 Einleitung

Die ebenfalls für bestimmte Karosserie-Bauteile interessanten faserverstärkten Thermoplaste mit wesentlich besseren mechanischen Eigenschaften, aber schlechterer Oberflächenqualität werden bewusst nicht weiter berücksichtigt.

Abbildung 1.5 verdeutlicht nochmals den in dieser Arbeit verfolgten Weg zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs durch den Einsatz von unverstärkten Thermoplasten in der Pkw-Karosserie.

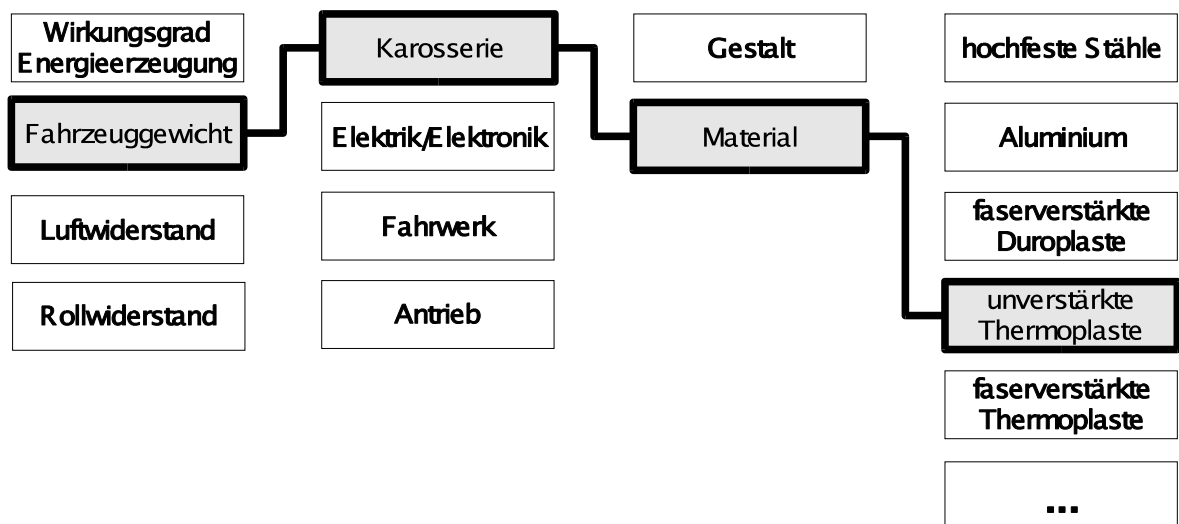


Abbildung 1.5: Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs durch den Einsatz von unverstärkten Thermoplasten in der Pkw-Karosserie

## 1.4 Problem: Entscheidungsfindung bei komplexen Systemen

Ingenieurwissenschaftliche Arbeiten gehen üblicherweise von der Technik und den dabei verwendeten Methoden aus, um diese fallweise zu vertiefen sowie zu ergänzen. Entsprechend ist hier der Technikbegriff Ausgangspunkt der weiteren Überlegungen.

Dieser hat seine inhaltlichen Wurzeln in der Anfertigung und Nutzung erster Werkzeuge. Der Begriff *Technik* beschränkt sich dabei nicht nur auf das künstliche, nutzenorientierte Gebilde, sondern bezieht ausdrücklich auch die Interaktion – sei es bei der Erstellung, der späteren Verwendung und schließlich auch der Beseitigung des Gebildes – mit ein.[111, S. 31][131, S. 2][118, S. 2] Diesem Technikverständnis folgt auch diese Arbeit, indem sie

das Wesen der Innovation – also der substantiellen, diskontinuierlichen Neuerung[67, S. 128-135] – nicht nur auf den Sachgegenstand Karosserie-Leichtbau beschränkt, sondern auch die Interaktion einbezieht (vgl. Abbildung 1.6).

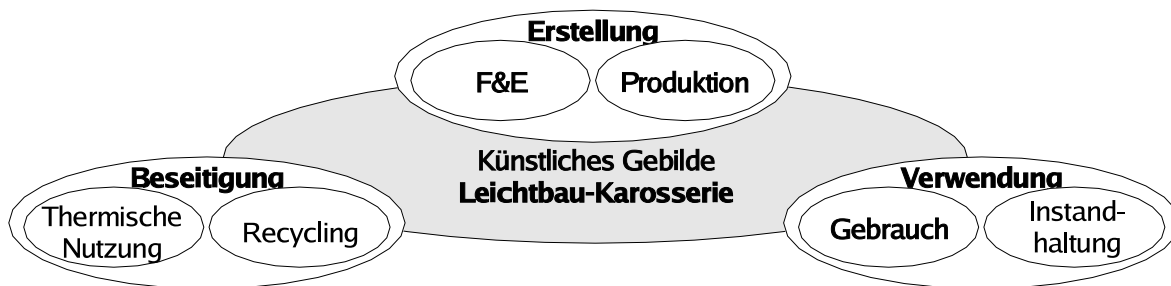


Abbildung 1.6: Technische Aspekte des Karosserie-Leichtbaus

Diese ganzheitliche Betrachtung ist in diesem Anwendungsfall von besonderer Bedeutung, da die Substitution des Stahlbleches durch unverstärkte Thermoplaste komplexe Veränderungen/Folgeinnovationen im gesamten System mit sich bringt. Es wird im Folgenden daher auch von einer *Systeminnovation* gesprochen.[118, S.163][115, S. 8]

Ausgehend von Abbildung 1.6 sind folgende Aspekte bei einer ganzheitlichen Betrachtung von Karosserie-Leichtbau als Systeminnovation zu berücksichtigen:

- Die allgemeine Forschung liefert den wesentlichen Kern einer Neuerung. In dieser Arbeit ist die Materialwissenschaft durch die Entwicklung geeigneter thermoplastischer Werkstoffe Auslöser der betrachteten Systeminnovation. Für die Arbeit wird dieser Aspekt weitgehend ausgeschlossen, da er als Eingangsvoraussetzung betrachtet wird.
- In der Produktentwicklung von Pkw-Karosserien führt die Verwendung von thermoplastischen Werkstoffen zu Veränderungen, obwohl der Karosseriebau auf Grund der langen Tradition auf relativ eindeutig erscheinenden Zielvorgaben beruht. Tatsächlich sind jedoch viele Zielvorgaben nicht präzise definiert. Neben der komplexen Geometrie der Einzelteile – oftmals bedingt durch Designvorgaben im Zusammenhang mit einer erforderlichen Craschauslegung – besteht eine besondere Schwierigkeit darin, subjektive bisher traditionell gelöste Kundenanforderungen kritisch zu hinterfragen und dann lösungsunabhängig neu zu formulieren. Neue Herausforderungen im Rahmen der Produktentwicklung sind die mit dem Werkstoffwechsel erforderlichen veränderten Konstruktionsmethoden, die sich zum

## 1 Einleitung

einem in anderen Gestaltungselementen (u. a. bedingt durch andere Werkstoffparameter und Fertigungsverfahren) und zum zweiten in der angepassten Produktab-sicherung durch den Versuch widerspiegeln.

- Mit jeder Festlegung innerhalb der Produktentwicklung werden produktionstechnische Prämissen – und damit die wesentlichen Produktkosten – festgelegt. [46, S. 8-13] In der konventionellen Stahlbauweise werden angelieferte Stahlbleche zu Karosserieblechen umgeformt (Presswerk) und meistens durch Schweißen zu Karosserie-Bauteilen und schließlich zur Karosserie verbunden. Thermoplastische Bauteile werden i. d. R. im Spritzgussverfahren erzeugt und mit Montageoperationen zusammengefügt. Durch die Substitution würde ein elementarer Wechsel der Ferti-gungsverfahren ausgelöst, für die die dazu erforderlichen Strukturen noch nicht aufgebaut sind.
- Im normalen Alltagsgebrauch wird sich eine Leichtbau-Karosserie von herkömmlichen Konstruktionen nicht wesentlich unterscheiden. Bei Wartung und Reparatur erfordert jedoch ein anderer Werkstoff andere Reparaturkonzepte. Das eher re-versible Verformungsverhalten von Thermoplasten ist günstig bei Bagatellschäden und erspart u. U. sogar Reparaturen (Ausbeulen). Ebenfalls positiv ist die fer-tigungsbedingte Demontierbarkeit für den Austausch beschädigter Bauteile. Vor dem Hintergrund, dass in der Automobilindustrie der Service ebenfalls ein Differen-zierungsangebot der Hersteller darstellt, muss dieser Abschnitt des Lebenszyklus im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung ebenfalls bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden.
- Nach dem Ende der Nutzungsdauer einer Leichtbau-Karosserie können die einge-setzten Materialien wiederverwertet werden. Mit der neuen Bestimmung zum Alt-autorecycling wird der Hersteller verstärkt in die Verantwortung – Rücknahme- und Verwertungspflicht<sup>6</sup> – genommen.[31, §3, §5] Das macht es schon heute erfor-derlich, dass dieser Aspekt des Karosserie-Leichtbaus ebenfalls in der Produktpla-nung zu berücksichtigen ist. Beim extrem belastungsoptimierten Leichtbau wird durch die Kombination mehrerer verschiedener Werkstoffe und Verfahren das Alt-autorecycling i. d. R. erheblich aufwendiger.[55] Der Einsatz von unverstärkten Thermoplasten als Karosserie-Werkstoff ist hingegen wegen der guten Recycling-möglichkeiten besonders attraktiv.

---

<sup>6</sup>Ab 2006 sind min. 85% des Altautos zu verwerten, davon sind min. 80% durch Wiederverwendung bzw. stofflich zu verwerten.[31, §5]

Entwicklungszeitraum (Vor - u. Serienentwicklung)	~ 5 J.
Modell-Lebenszyklus	≤ 7 J.
durchschnittliche Lebensdauer	12,4 J.
Nutzungszeitraum modellungebundener technischer Anlagen	10 – 25 J.
Nutzungszeitraum Gebäude	20 – 40 J.

Tabelle 1.1: Zeiträume einer Systeminnovation[25][24]

Nun ist es Aufgabe verschiedener Fachbereiche diese Teilaspekte einer Systeminnovation zu erarbeiten. Die besondere Problemstellung dieser Arbeit liegt dabei in der übergreifenden *Entscheidungsfindung*, d. h. die Berücksichtigung der relevanten Auswirkungen im Gesamtsystem bei einer Auswahlempfehlung zwischen den Alternativen Stahl und unverstärkter Thermoplast als Karosserie-Werkstoffe.

Diese Entscheidungsfindung – als Kernproblem dieser Arbeit – ist zudem mit einer weiteren Schwierigkeit verbunden: der Unsicherheit bei Erfassung und Bewertung der Alternativen.

Die Unsicherheit ist geprägt durch den zu betrachtenden Zeitraum (vgl. Tabelle 1.1) zwischen der Entscheidung und den später daraus folgenden Konsequenzen einer Umsetzung.

Da zum Zeitpunkt der Entscheidung nicht alle Umfelderscheinungen und deren Konsequenzen beim Einsatz der Innovation mit ausreichender Sicherheit zu erfassen und zu bewerten sind (vgl. Abbildung 1.7), müssen mehrere unterschiedliche Szenarien bzgl. der Ergebnisse (Werteausprägungen) und deren Bewertung (Wertmaßstäbe) für eine Entscheidungsempfehlung berücksichtigt werden.

## 1.5 Aufgabenstellung: Methodik zur Analyse und Bewertung von Systeminnovationen

Ausgangspunkt aller Überlegungen zu einer Entscheidungsfindung ist trotz der vielen Abhängigkeiten zu dem Gesamtsystem der Sachgegenstand Karosserie-Leichtbau:

Für die Entscheidungsfindung ist zu prüfen, inwieweit der Einsatz von unverstärkten Thermoplasten überhaupt eine Alternative zu Stahl sein kann. Basis dafür sind die erforderlichen Eigenschaften von Karosserie-Bauteilen und deren Erfüllung durch die Materialeigenschaften von Thermoplasten.

## 1 Einleitung

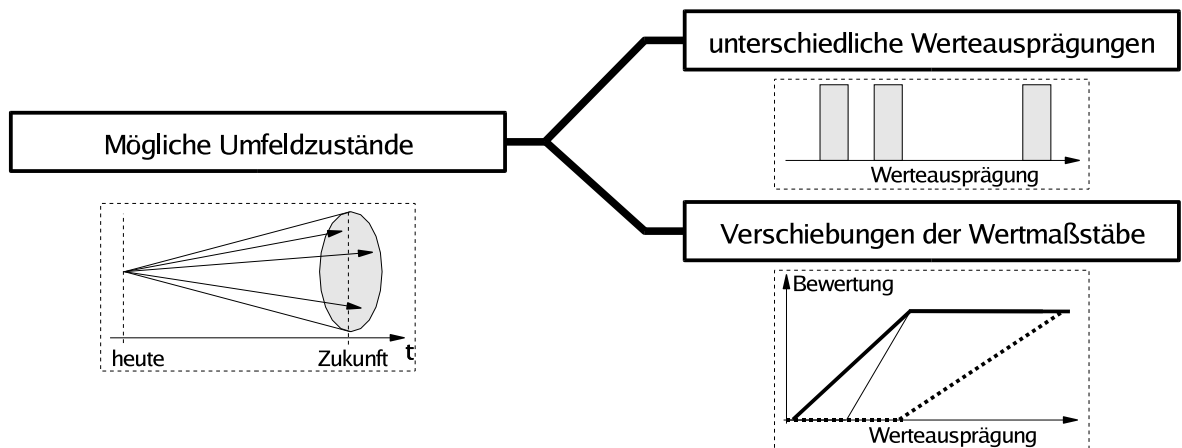


Abbildung 1.7: Auswirkungen der Unsicherheit auf Erfassung und Bewertung von Systeminnovationen

Neben dieser reinen sachtechnischen Betrachtungsweise müssen jedoch parallel für eine unternehmerische Entscheidungsfindung die Auswirkungen auf die Unternehmensprozesse (vgl. Abbildung 1.8) berücksichtigt werden.

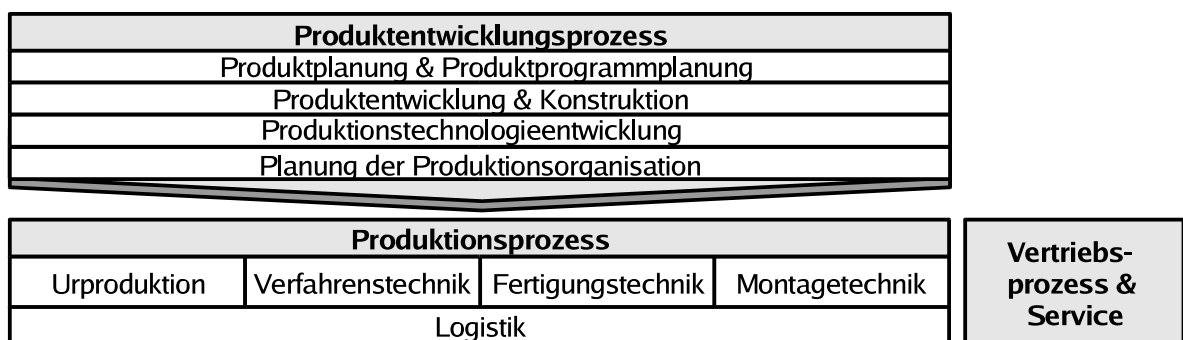


Abbildung 1.8: Kernprozesse in der Automobilindustrie

Es ist also zu klären, inwieweit der Einsatz von unverstärkten Thermoplasten auch unternehmerisch sinnvoll ist.

Aus diesen Aufgaben und aus der in der Problemstellung beschriebenen Schwierigkeit einer Entscheidungsfindung leitet sich der Bedarf nach einer methodischen Unterstützung bei der Entscheidungsfindung ab.



Kernaufgabe der Arbeit ist daher die Entwicklung einer geeigneten Methodik zur Analyse und Bewertung des Einsatzes von thermoplastischen Werkstoffen in der Rohkarosserie.

Dazu wird von vornherein das Ziel verfolgt, neben der reinen Beschreibung der Methodik diese gleichermaßen auch in einem Softwareprototyp zu realisieren, um somit das Entscheidungsproblem in seiner Komplexität überhaupt transparent machen zu können.

In der Anwendung versucht diese Arbeit, die für eine fundierte und rationale Entscheidungsfindung erforderlichen Informationen aus der umfassenden Analyse zu gewinnen, zu bewerten und zu gewichten und im Anschluss mit Hilfe einer geeigneten Entscheidungsregel eine Präferenzordnung als Empfehlung zu bestimmen (vgl. Abbildung 1.9).

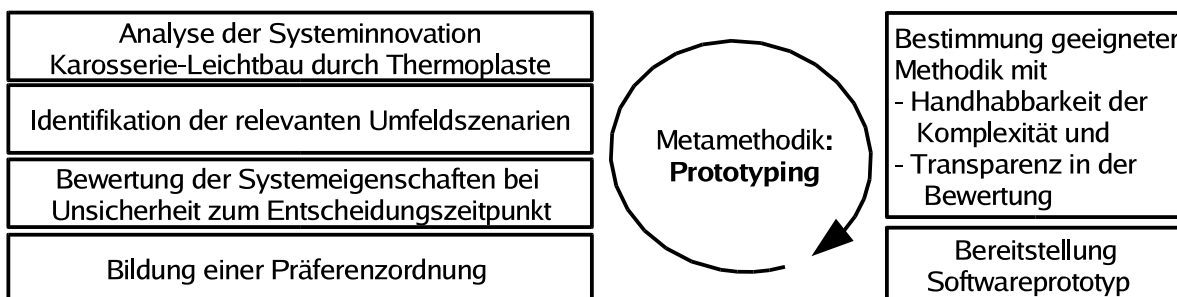


Abbildung 1.9: Zielsetzung der Arbeit – erwartete Erkenntnisse

Damit begrenzt sich diese Arbeit nicht nur auf die klassischen Betätigungsfelder der Ingenieurwissenschaften – Produkt und Produktionsprozess –, sondern integriert darüber hinaus auch betriebs- und volkswirtschaftliche Aspekte. Als Einschränkung sei an dieser Stelle schon gesagt, dass tatsächlich getroffene Entscheidungen subjektiv sind. Ohne die Kenntnis der genauen und oftmals persönlichen Motivation der Entscheider kann Entscheidungsverhalten nicht vorhergesagt werden.

## 1.6 Methodischer Ansatz und Aufbau der Arbeit

In den Grundüberlegungen zur Konstruktionstechnik (Kapitel 2) wird zunächst kurz auf die in den Ingenieurwissenschaften verwendeten Methoden eingegangen. Ziel dabei ist die inhaltliche Einordnung des Themas in die Ingenieurwissenschaften.

## 1 Einleitung

Im Kapitel 3 wird zur Vertiefung dazu die Systemtheorie dargestellt, die zusammen mit der Entscheidungstheorie (Kapitel 4) die methodischen Grundlagen der Arbeit bilden. In den Kapiteln 3 und 4 wird als Metamethodik Software Prototyping mit dem oben schon benannten Ziel verwendet, die Methode zur Entscheidungsfindung als Software anwendbar zu machen. Im Gegensatz zur sequentiellen Lösung entsprechend des klassischen Software-Life-Cycle-Modells ist Software Prototyping eine stark iterative Vorgehensweise. D.h., die erwarteten Eigenschaften werden mit einem sehr geringen Aufwand in einem einfach zu ändernden und zu erweiternden Software-Prototyp realisiert. Dadurch überlappen sich im prototyping-orientierten Phasenmodell Problemanalyse, Systemspezifikation und Entwurf, Implementierung sowie der Test.[102]

Für Software-Prototyping bieten sich grundsätzlich Interpreter-Sprachen an, weil sie zur Laufzeit des Programms Änderungen und Ergänzungen zulassen. Der Performance-Nachteil gegenüber Compiler-Sprachen spielt in einem Software-Prototyp keine Rolle. In dieser Arbeit werden die Interpretersprachen *Tcl*<sup>7</sup> und *Octave*<sup>8</sup> genutzt. *Tcl* (Tool command language) mit dem grafischen Tool-Kit *TK* von OUSTERHOUT und der Entwicklungsumgebung *Visual Tcl* von ALLEN ermöglicht eine rasche Umsetzung grafischer Dialoge mit zugleich umfangreichen Funktionen zur Bearbeitung von Datensätzen. Zudem ist *Tcl/TK* sowie auch *Visual TCL* plattformübergreifend frei verfügbar.[96] *GNU Octave* als „high-level interactive language for numerical computations“, ursprünglich von RAWLING und EKERDT entwickelt, besitzt hingegen umfangreiche mathematische Funktionen – der Einsatz ist allerdings auf das Betriebssystem Unix (inkl. Derivate wie Linux und Emulatoren wie Cygwin) beschränkt.

So wird schrittweise das Grundgerüst einer methodischen Vorgehensweise zur Bewertung von werkstoffseitigen Karosserieinnovationen gelegt, das in Kapitel 5 bei der Bewertung und Entscheidung konkret umgesetzt werden muss. In der abschließenden Zusammenfassung der Arbeit (Kapitel 6) erfolgt die Reflexion der gewonnenen wissenschaftlichen Ergebnisse und Methoden. Einen Überblick über die gesamte Arbeit und die Kernaussagen der Einleitung liefert die Abbildung 1.10.

---

<sup>7</sup>Neben den umfangreichen Quellen im Internet *www.tcl.tk* vgl. auch [96][88][3][65].

<sup>8</sup>Siehe *www.octave.org* und insbesondere das Manual von *Eaton*. [43]

Einleitung	Grundlagen: Entwicklung	Grundlagen: Systeme	Grundlagen: Entscheidung	Anwendung: Thermoplast	Schluss
<ul style="list-style-type: none"> <li>↗ Innovationen im Karosserie-Leichtbau sind erforderlich, um Kraftstoffverbrauch und Emissionen weiter zu verringern.</li> <li>↗ In dieser Arbeit wird als Alternative zur konventionellen Stahlblechbauweise die Verwendung von Thermoplasten in der Pkw-Karosserie-Außenhaut untersucht.</li> <li>↗ Durch diese Werkstoff-Substitution werden Folgeinnovationen ausgelöst. Insgesamt wird daher von einer Systeminnovation gesprochen.</li> <li>↗ Problemstellung der Arbeit ist die unternehmerische Entscheidungsfindung. Dazu wird auf Basis der Systemtheorie und der Entscheidungstheorie eine Methode entwickelt.</li> <li>↗ Die Methode wird mit Software-Prototyping konkretisiert und im Anwendungsfall verifiziert.</li> </ul>					

Abbildung 1.10: Überblick und Kernaussagen der Einleitung



## 2 Einordnung in die Konstruktionsmethodik

Wie schon in der Einleitung ausgeführt, liegt die zentrale Problemstellung in der Schwierigkeit, die verschiedenen Aspekte der Technik unter Berücksichtigung der zeitlichen Unsicherheit zu einer Entscheidungsempfehlung zusammenzuführen. Der folgende Abschnitt widmet sich der Frage, wie die Problemstellung in die Konstruktionsmethodik einzuordnen ist.

Die Konstruktionstätigkeit wird allgemein durch den kreativen Akt des Lösens technischer Probleme – also als Identifikation geeigneter Mittel – charakterisiert.[87, S. 4, 7][68, S.3][35, S. XVIII] Ausgangspunkt vieler Problemlösungen ist die Abstraktion bewährter Lösungen und die Variation bewährter Effekte zur Identifikation substanziiell neuer Lösungen.[113, S. 2][98, S. 64] Bei begrenzten Problemen kann der erfahrene Ingenieur dabei intuitiv akzeptable Lösungen finden. Neue, komplexe Probleme besitzen jedoch eine Vielzahl unterschiedlicher Anforderungen, deren einzelne Bewertung und Synthese kaum mehr mental lösbar ist.[29, S. vii]

Mit der Verwissenschaftlichung der Ingenieurwissenschaft wurde nach systematischen, methodischen Vorgehensweisen gesucht, um formulierte und vorausgesetzte Anforderungen in konkrete Lösungen umzusetzen.[107, S. 1] Theoretische Grundlage – für die bewusste Variation und systematische Identifikation bewährter Lösungen – ist in den Ingenieurwissenschaften die Systemtheorie in Form der Systemtechnik.

Die Ingenieurwissenschaft bedient sich deren analytischen Herangehensweise im Problemlösungsprozess (vgl. Abbildung 2.1) und nutzt die Begriffe der Systemtheorie für die gedankliche Modellbildung.[45, S. 77][97, 25][128, S. 3]

Ausgangspunkt des methodischen Problemlösens ist die Problemformulierung und damit die Definition von Zielen (die teilweise auch physikalische Zwänge darstellen), die später für die Entscheidungsfindung herangezogen werden können. Analog der hierarchischen

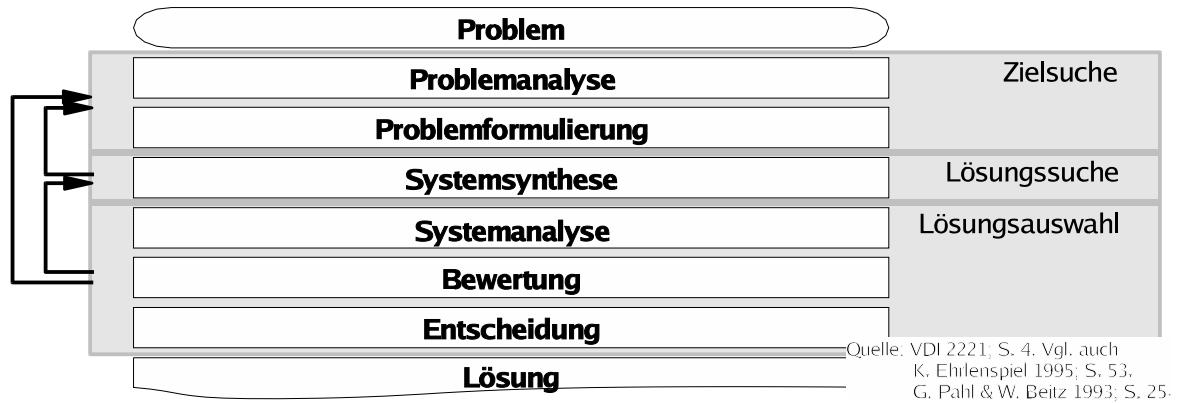


Abbildung 2.1: Systemtechnische Problemlösungsstrategie [45, S. 77][128, S. 3]

Systemanalyse wird dazu das Gesamtproblem in erkennbare Teil- und Einzelprobleme<sup>1</sup> unterteilt (vgl. Abbildung 2.2)[128, S. 4]. Dabei unterstützt eine exakte sprachliche Pro-

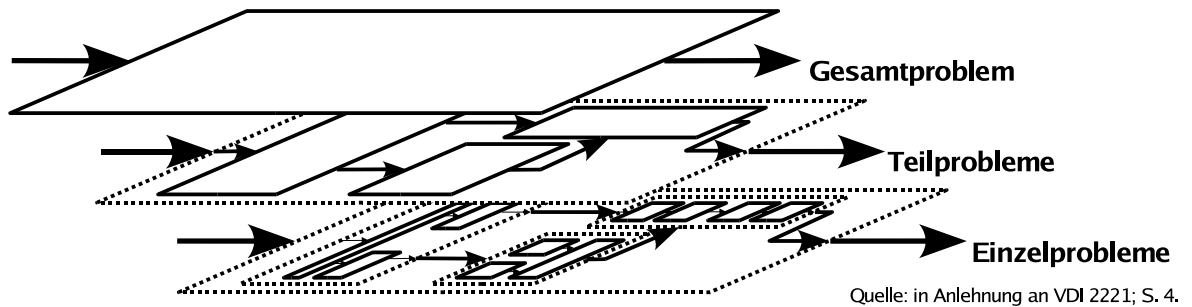


Abbildung 2.2: Hierarchische Analyse bei der Problemformulierung[128, S. 4]

blemformulierung den Bearbeiter im Bewusstseinsprozess der Analyse und gibt die Zielvorstellungen für die im Entwicklungsprozess zu treffenden Entscheidungen vor.[120, S. 15][81][129, S.10]

In dem heutigen Zeitwettbewerb der Automobilindustrie (vgl. [86][34][91][92]) mit einem etablierten, nachfragebestimmten Käufermarkt [59, S. 48] ist die Parallelisierung der Arbeitsabläufe im Produktentstehungsprozess durch die frühe Einbindung aller Instanzen der Prozesskette erforderlich. Für die hier untersuchte Systeminnovation Leichtbau-Karosserie können die erforderlichen Untersuchungen im straff organisierten Produktentwicklungsprozess (vgl. Abbildung 1.8) aufgrund des engen Zeitrasters nicht mehr

<sup>1</sup>In der Literatur werden oft analog zur Systemtechnik anstelle von Teil- und Einzelproblemen die Ausdrücke Teil- und Hilfsfunktionen verwendet.[113, S. 2, 24-26, 82-106 ][69, S. 14][128, S. 9]

geleistet werden.



Abbildung 2.3: Zeitstrahl des Karosserie-Leichtbaus

Deshalb ist die Entwicklung von werkstoffseitigen Systeminnovationen von der spezifischen Produktentwicklung zu trennen, also als Fahrzeugprojekt-unabhängige Vorentwicklung zu leisten. Die Arbeit ist demnach zeitlich (vgl. Abbildung 2.3) und inhaltlich der Vorentwicklung – mit dem Ziel eines Realisierungsvorschlages im Rahmen der Produktplanung[127, S. 6-8] – zuzuordnen.

Als theoretische Basis wird dazu nun die von EHRENSPIEL [45] propagierte *integrierte Produkterstellungsmethodik* (IP-Methodik) herangezogen. Zurückgreifend auf die Systemtheorie betrachtet die IP-Methodik die Instanzen des Produktentstehungsprozesses als Teilsysteme und nutzt eine verallgemeinerte Vorgehensweise (vgl. Abbildung 2.4) zur Lösung von fachspezifischen Detailproblemen.[45, S. 260-262]

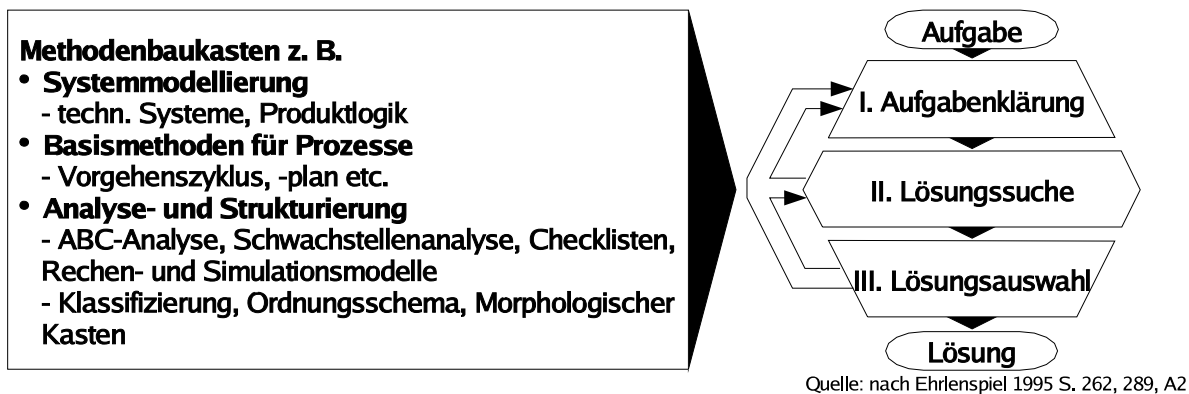


Abbildung 2.4: Vorgehenszyklus der integrierten Produktplanung[45, S. 262, 289]

Gegenstand dieser Arbeit ist die gesamthafte Lösung – konkret: Die Entscheidung, ob unverstärkte Thermoplaste Stahl als Karosserie-Werkstoff substituieren können und ob diese letztlich sogar gesamtunternehmerisch zu bevorzugen sind. Wie bereits bei der Betrachtung des Problemfeldes Karosserie-Leichtbau (vgl. Abbildung 1.6) deutlich wurde,

## 2 Einordnung in die Konstruktionsmethodik

ermöglicht erst das Zusammenwirken aller Akteure der betroffenen Unternehmensbereiche die Entscheidungsfindung.

Für eine Entscheidungsfindung auf der Makroebene des Managements von Systeminnovationen sind zwei Teilschritte in der IP-Methodik von Bedeutung:

- Innerhalb der Aufgabenklärung werden die heutigen und zukünftigen Anforderungen und Restriktionen für das Problemfeld Karosserie-Leichtbau bestimmt.
- Nachdem die Einzellösungen der Fachbereiche zusammengestellt sind, ist aufbauend darauf eine unternehmerische Lösungsauswahl erforderlich.

Im Vorgehenszyklus der integrierten Produktplanung bildet die Entscheidungsfindung somit eine koordinierende Klammer über die Lösungssuche in den einzelnen Fachbereichen<sup>2</sup> (vgl. Abbildung 2.5).

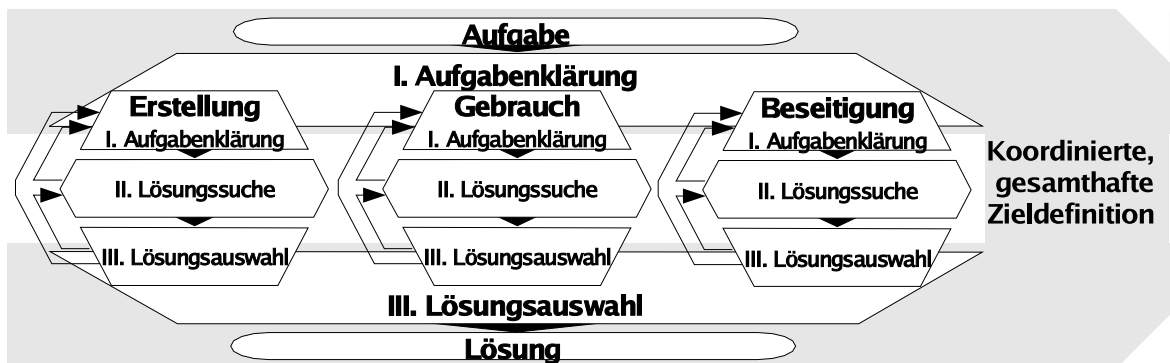


Abbildung 2.5: Lösungsschritte für das Problemfeld Karosserie-Leichtbau

Aufbauend auf diese thematische Einordnung ergibt sich nun die Notwendigkeit, die theoretische Basis für die inhaltliche Beantwortung der beiden zentralen methodischen Fragen zu erarbeiten:

- Wie bestimmt man für die Aufgabenklärung die heutigen und zukünftigen Anforderungen und Restriktionen für den Karosserie-Leichtbau?
- Wie bewertet man die zu betrachtenden Alternativen und kommt schließlich zu einer rationalen Entscheidungsfindung?

<sup>2</sup>Die Lösungssuche ist eine operative Tätigkeit der Fachbereiche und kann hier nicht in der notwendigen Ausführlichkeit behandelt werden. Hier wird auf die Kompetenz der Fachbereiche verwiesen.



Für das Kernproblem Entscheidungsfindung wurden innerhalb der Konstruktionswissenschaften verschiedene Ansätze erarbeitet (vgl. insbesondere die Ausführungen bei BREIING und KNOSALA [29, S. 227 - 256]), auf die in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird. Stattdessen wird neben der Systemtheorie die interdisziplinäre Entscheidungstheorie herangezogen: Mit der Systemtheorie werden die zu vergleichenden Alternativen Stahlblech bzw. Thermoplast analysiert und durch die Entscheidungstheorie alle bewerteten Daten zu einer Entscheidungsempfehlung zusammengefasst.

Die Kernaussagen dieses Kapitels werden abschließend nochmals in Abbildung 2.6 dargestellt.

<b>Einleitung</b>	<b>Grundlagen: Entwicklung</b>	<b>Grundlagen: Systeme</b>	<b>Grundlagen: Entscheidung</b>	<b>Anwendung: Thermoplast</b>	<b>Schluss</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>↗ Zielsetzung der Arbeit ist die Lösungsauswahl – Basis dafür ist die Zieldefinition. Die Lösungssuche ist eine operative Tätigkeit der beteiligten Fachbereiche und kann hier nicht in der notwendigen Ausführlichkeit behandelt werden.</li> <li>↗ Die in der Arbeit zu entwickelnde Methode bildet eine Klammer über die Lösungssuche der Fachbereiche. Sie ist zeitlich und inhaltlich der modellungebundenen Vorentwicklung zuzuordnen.</li> <li>↗ Die weiteren theoretischen Grundlagen sind die Systemtheorie und die Entscheidungstheorie.</li> </ul>					

Abbildung 2.6: Überblick und Kernaussagen Kapitel 2

## *2 Einordnung in die Konstruktionsmethodik*

# 3 Analyse von Systeminnovationen

Im vorherigen Kapitel wurde die Bedeutung der Systemtheorie bei der Lösung allgemeiner technischer Aufgabenstellungen bereits erläutert. In diesem Kapitel wird diese Theorie als Basis für die Analyse der Systeminnovation Karosserie-Leichtbau vertieft vorgestellt. Die Realisierung im Software-Prototyp bOSSA<sup>1</sup> liefert dann die Analyse-Methode und das Werkzeug.

## 3.1 Einführung in die Systemtheorie

Die Systemtheorie bildet dank der formalen, abstrakten Terminologie ein allgemein verwendbares Fundament für die Analyse. Die im Folgenden kurz dargestellten Begrifflichkeiten lassen sich zudem zweckorientiert modifizieren und so vielfältig einsetzen.[98, S. 2, 4][111, S. 88]

Allgemein liefert die Systemtheorie zusammen mit philosophischen, naturwissenschaftlich-mathematischen und empirischen Theorien eine formale Abbildungsvorschrift, mit der sich die Realität in Systemmodelle transferieren lässt. Die so erfassten Systemmodelle bilden dabei nicht die Wirklichkeit ab, sondern nur die Aspekte, die für den Ersteller und Benutzer des Modells wichtig sind und die innerhalb seines Wahrnehmungsbereichs liegen (vgl. Abbildung 3.1).[111, S. 84][134, S. 79]

Die Systemtheorie der Neuzeit – schon ARISTOTELES unterschied zwischen der Ganzheit und der bloßen Menge, bei der die Anordnung keinen Unterschied macht – basiert im Wesentlichen auf den Arbeiten von BERTALANFFY und WIENER. Ersterer [5, S. 25] hat ausgehend von der Biologie die allgemeine Systemtheorie begründet und dabei die Ganzheit durch das Zusammenspiel der Bestandteile und der Relationen bestimmt. WIENER [137] erstellte mit der Kybernetik für Maschinen und Lebewesen eine gemeinsame

---

<sup>1</sup>bOSSA steht für **O**pen **S**ource **S**ystem **A**nalyse und bezeichnet einen von mir für diese Arbeit entwickelten Software-Prototyp zur Systemanalyse.

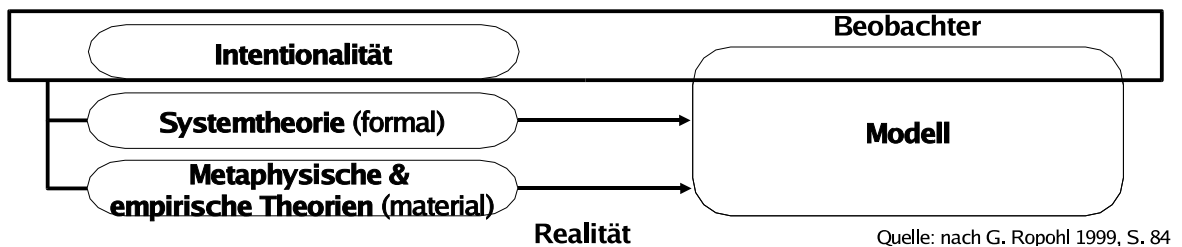


Abbildung 3.1: Zusammenhang zwischen Systemtheorie und Modelltheorie

Steuerungs-, Regelungs- und Informationstheorie, die in die heutige Systemtheorie integriert worden ist und damit die Analyse dynamischer Zusammenhänge ermöglicht. [111, S. 72 f.] [70, S. 76] [98, S. 10 f.]

Auf der Basis dieser Werke sind zahlreiche Definitionen zum Begriff System entstanden. Diese Arbeit baut auf die Definitionen von ROPOHL auf. Dieser unterscheidet in seiner Systemtheorie der Technik [111, S. 76] drei unterschiedliche Systemkonzepte (vgl. Abbildung 3.2):

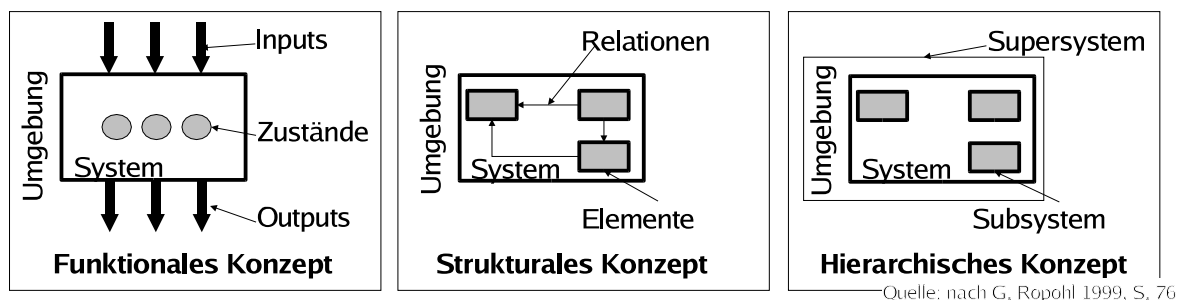


Abbildung 3.2: Konzepte der Systemtheorie [111, S. 75-77]

- Das *funktionale Konzept* beschränkt sich auf das *Verhalten des Systems als Ganzheit* in seiner Umgebung. Die von außen zu beobachtenden Eigenschaften werden klassifiziert und dem System so eine (Transformations-)Funktion zugeordnet. Der innere Aufbau des Systems wird von der Betrachtung ausgeklammert. Diese Vorgehensweise wird daher oft auch als Black-Box bezeichnet. [111, S. 75-77]

Wie bereits der Abschnitt 1.3 verdeutlicht, ist die Anwendung des funktionalen Systemkonzepts für die Entscheidungsfindung für den Einsatz von Thermoplasten in der Leichtbau-Karosserie von fundamentaler Bedeutung. Schließlich wird

durch den Vergleich zwischen den erforderlichen Funktionen und den tatsächlich bereitgestellten Zuständen die grundsätzliche sachtechnische Eignung bestimmt.

- Das *strukturele Konzept* betrachtet Systeme in Ihrer Ganzheit als *miteinander verknüpfte Elemente* – also den Aufbau eines Systems. Diese Betrachtungsweise impliziert das holoistische Prinzip, in dem erst die Verknüpfungen der Systemelemente das Gesamtsystem vervollständigen. Grundsatz ist, dass Systeme und deren Elemente nicht losgelöst betrachtet werden können, sondern immer im Kontext zu anderen Teilen zu sehen sind.[111, S. 75]

Bereits in der Problemstellung dieser Arbeit beruhte der Ausgangspunkt auf ein struktureles Systemverständnis: Für die unternehmerische Entscheidungsfindung zum Einsatz von Thermoplasten muss nicht nur der Sachgegenstand herangezogen werden, sondern ebenfalls dessen Auswirkungen auf die Unternehmenssysteme (vgl. ebenfalls Abschnitt 1.3).

- Das *hierarchische Konzept* betont die mögliche Verschachtelung von Systemen: Die Teile eines Systems können wiederum selber Subsysteme darstellen. Das System als Ganzes ist wiederum Teil eines Supersystems. [111, S. 77] Das hierarchische Systemkonzept stellt die *gliedernde Sichtweise* dar.

Da die Möglichkeiten eines Individuums, alle Elemente, Funktionen, Beziehungen und Zustände zu erfassen, letztlich doch sehr begrenzt sind<sup>2</sup>, wird die Analyse der Systeme nur durch das hierarchische Konzept beherrschbar (vgl. den noch folgenden Abschnitt 3.4).

---

<sup>2</sup>Im gängigen Gedächtnismodell der Denkpsychologie werden dem Kurzzeitgedächtnis – als menschlichen Arbeitsspeicher – nur etwa sieben ( $\pm$ zwei) Einheiten (engl. *chunks*) zugeordnet. Diese Chunks können dabei selbst komplex sein, solange sie durch ein Symbol repräsentiert werden.[83, S. 184][40, S. 6]

## 3.2 Logik des Systemkonzepts: Software-Prototyping zur Systemanalyse

Die drei verschiedenen Systemkonzepte von ROPOHL sind für diese Arbeit ganz konkret von Bedeutung. Die Handhabbarkeit der Systemtheorie als Methode soll nun durch die Umsetzung der formalen Logik in einem Software-Prototypen ermöglicht werden.

Die wesentliche Überlegung in der Systemanalyse ist die Definition der Systemgrenze. Mit der Systemgrenze werden alle diejenigen Inhalte einem System zugeordnet, die als Ganzheit beschrieben werden sollen. Dies impliziert zunächst die Vorgehensweise nach dem hierarchischen Systemkonzept – unabhängig davon, ob man ein real existierendes, ein gegenständliches oder ein gedankliches System untersucht. Ansatzpunkt für das hierarchische Systemkonzept ist die Mengenlehre:

So ist das System  $S$  mit den Elementen  $E_i$  eine Teilmenge des Allsystems  $\Omega$  :

$$S = \{E_1, E_2 \dots E_i\} \quad (3.1)$$

$$S \subset \Omega \quad (3.2)$$

Dann ist die Umgebung  $\Gamma$  die Teilmenge des Allsystems, die nicht System ist [111, S. 77, 313]:

$$\Gamma = \Omega \setminus S \quad (3.3)$$

Unter der Programmiersprache *Tcl* bieten sich zur Datenrepräsentation solcher Zusammenhänge analog der mathematischen Mengen *Listen* an. Die Liste

```
set Allsystem {System Umsystem}
set System {Element1 Element2 ... Element_i}
```

kann sehr einfach über ein *Listbox*-Widget (vgl. Abbildung 3.3) dargestellt werden. Tiefere Verschachtelungen mit einzelnen Subsystemen als Elemente  $E_i$  sind auch als *Tcl-Liste* darstellbar, da die Elemente einer Liste wiederum selber eine Liste sein können:

```
set Allsystem {{Element_1 Element_2 {Element_A Element_B}} Um-
welt}
```

Neben Listen bietet sich innerhalb von *Tcl* für die Darstellung solcher hierarchischer Informationen auch der Datentyp *Array* an. Dieser ermöglicht eine Trennung zwischen der Hierarchie-Ordnung und der Bezeichnung analog der Baumstruktur<sup>3</sup>:

```
set S(root) Allsystem
set S(root.0) System
set S(root.0.0) Element_1
set S(root.0.1) Element_2
set S(root.0.2) Subsystem
set S(root.0.2.0) Element_A
set S(root.0.2.1) Element_B
set S(root.1) Umwelt
```

Diese Informationen lassen sich übersichtlich in einer so genannten *tixScrolledHlist* (vgl. Abbildung 3.3) darstellen. Das fundamental bedeutsame hierarchische Systemkonzept

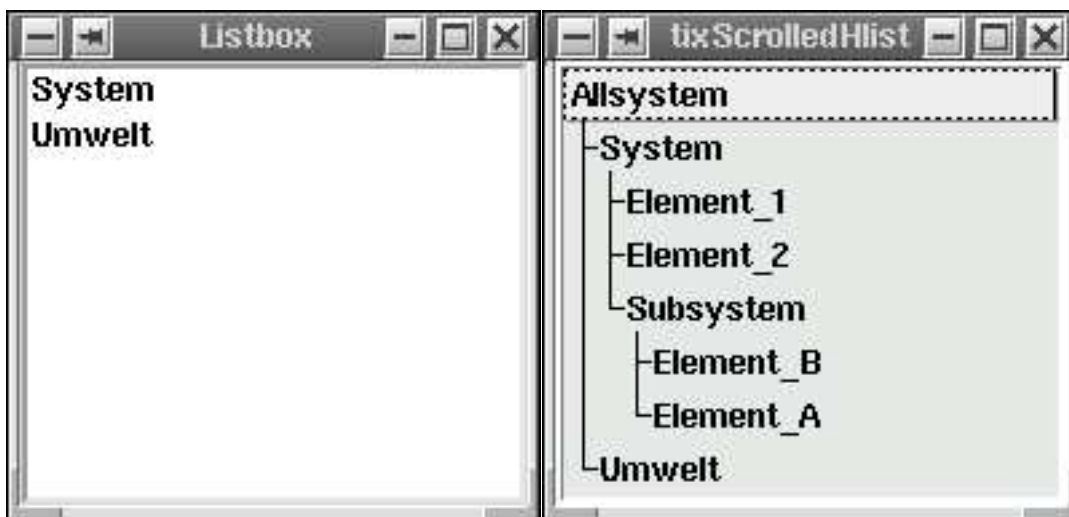


Abbildung 3.3: Hierarchische Gliederung von Systemen im Vergleich zur einfachen Auflistung

ist damit verhältnismäßig einfach in der Sprache *Tcl* umsetzbar.

Im strukturalen Konzept werden die Beziehungen  $B_{i,j}$  zwischen den Elementen  $E_i$  und  $E_j$  ausgewiesen. Dabei werden üblicherweise folgende Informationen berücksichtigt[119]:

<sup>3</sup>Die Baumstruktur ist eine übliche mathematisch-graphische Darstellungsform (Graphentheorie) von hierarchischen Informationen.[122, S. 47 f.]

### 3 Analyse von Systeminnovationen

- Das Vorhandensein einer Relation zwischen den Elementen  $E_i$  und  $E_j$ ,
- eine Wirkungsrichtung mit  $E_i \rightarrow E_j$  und
- die genaue Art der Wirkungsbeziehung.

Da keine Beziehung  $B_{ij}$  ohne die Elemente  $E_i$  bzw.  $E_j$  existieren kann, können die ausgehenden und eingehenden Beziehungen  $B_{ij}$  den Elementen  $E_i$  und  $E_j$  als Menge der eingehenden Relation  $R_{ein,i}$  bzw. der ausgehenden Relationen  $R_{aus,i}$  zugeordnet werden:

```
set Ausgehende_Relationen(Element_i) {Beziehung_1 Beziehung_2}  
set Eingehende_Relationen(Element_j) {Beziehung_1 Beziehung_5}  
set Art_Bezeichnung(Beziehung_1) Ortsrelation
```

Eine grafische Darstellungsform der Wirkbeziehungen erfolgt im *Canvas*-Widget (vgl. Abbildung 3.3). Bei vielelementrigen Systemen (vgl. Abschnitt 3.4) stößt diese Form der

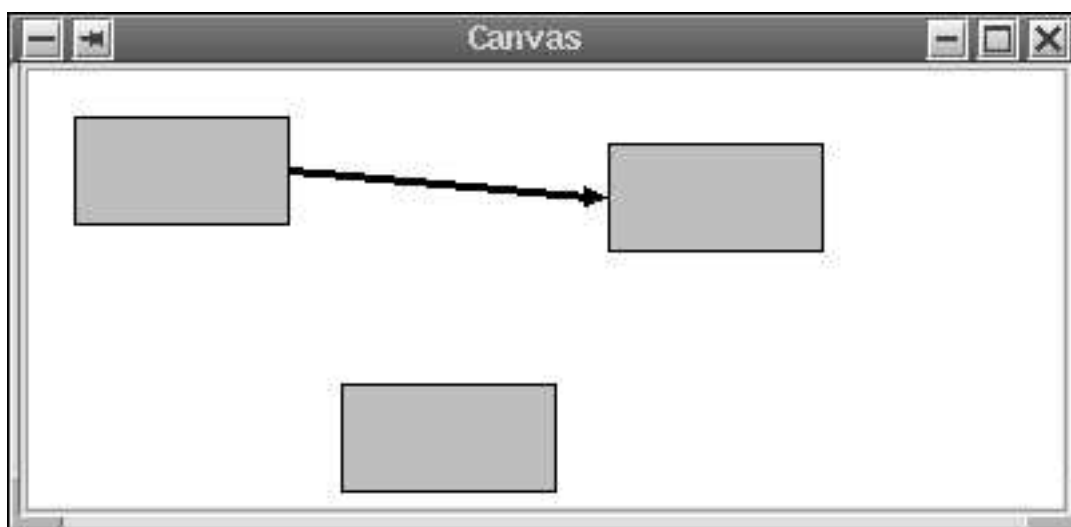


Abbildung 3.4: Canvas-Widget

Darstellung allerdings rasch an ihre Grenzen.

Noch größere Bedeutung als das strukturelle Konzept hat das funktionale Systemkonzept, bei dem den identifizierten Systemelementen  $E_i$  die Eigenschaften  $A_k$  zugeordnet werden. Auch hier können die Daten als *Array-Liste* abgelegt werden:



```
set Eigenschaften(System) {Eigenschaft_1 Eigenschaft_2 Eigen-
    schaft_3}
```

Neben der einfachen Bezeichnung einer Eigenschaft ist aber auch die Wertzuordnung von Bedeutung. Werte können dabei sowohl quantitativ als auch qualitativ sein. Die Wertzuordnung ist in dem Fall trivial, wenn der zugeordnete Wert unabhängig ist, also aus sich selbst heraus definiert werden kann. Häufig sind die Werte einer Eigenschaft jedoch abhängig von anderen Eigenschaften des betrachteten Elements bzw. sogar von Eigenschaften anderer Elemente, die mit diesem Element verknüpft sind.

In diesem Fall besteht eine funktionale Beziehung  $f_{kl}$  zwischen den Eigenschaften  $A_k$  und  $A_l$  im Sinne einer mathematischen Abbildungsvorschrift[112, S. 78ff]:

$$f : A_k \rightarrow A_l \quad (3.4)$$

*Tcl* bietet bedauerlicherweise keine der Mathematik entsprechende einfache Syntax. Stattdessen wird zur Abbildung solcher Wertzuordnungen in dieser Arbeit die Interpretersprache *Octave* genutzt. Diese Sprache ist speziell für die Verarbeitung von numerischen Ausdrücken entwickelt und besitzt dazu umfangreiche mathematische Funktionen.

```
Eigenschaft_1 = 100
Eigenschaft_2 = Eigenschaft_1 * sin(2)
```

Neben derart einfachen mathematischen Ausdrücken kann *Octave* auch Vektoren und Matrizen auswerten:

```
t = (0:5) # entspricht 0 1 2 3 4 5
M = [ 1,2; 3,4]
```

Die Realisierung des Prototyps in zwei unterschiedlichen Sprachen macht eine Client-Server-Struktur erforderlich, die die Funktionseingabe unter *Tcl*, die Ausdrucksberechnung unter *Octave* und die Ergebnisdarstellung wiederum unter *Tcl* ermöglicht. Dazu wird *Octave* als Prozess von *Tcl* (Client) gestartet, die Anweisungen werden dann an *Octave* (Server) übergeben, dort ausgeführt und die Ergebnisse wiederum nach *Tcl* importiert.

### 3.3 bOSSA als Prototyp zur Analyse von Systeminnovationen

Im vorangegangenen Abschnitt wurden alle drei Systemkonzepte einzeln im Prototyping realisiert. Es wurde dabei schon mehrfach angedeutet, dass die Systemkonzepte durchaus gleichzeitig zur Anwendung kommen. Der nachfolgend für diese Arbeit entwickelte Prototyp zur dialogorientierten Systemanalyse (bOSSA) nutzt alle drei Ansätze.

Ausgangspunkt bei der Analyse mit bOSSA ist die Systemhierarchie. Hier können – durch das Betätigen der entsprechenden Buttons – neue Elemente eingefügt, umbenannt und ggf. auch gelöscht werden. Jedem Element kann eine Notiz zugeordnet werden. Weitere – auf dem hierarchischen Konzept aufbauende – Spezifikationen eines Elementes bzw. eines Subsystems sind in den Relationen (struktureles Konzept) und den Eigenschaften (funktionales Konzept) möglich.

Ein Beispiel für die automatische Verknüpfung zwischen Systemhierarchie und den Relationen seiner Elemente untereinander liefert Abbildung 3.5. Im Relationsfenster können die einzelnen Elemente verschoben werden und mit „Verbindern“ verbunden werden. Diese Verbindere lassen sich auswählen und weiter spezifizieren.

Noch komplexere Möglichkeiten für die Systemanalyse bietet die Spezifikation von Eigenschaften. Diese Eigenschaften werden als Attribute zunächst benannt und ggf. beschrieben. Über das *Octave*-Fenster können diesen Attributen komplette Ausdrücke zugeordnet und anschließend im Octave-Math-Server berechnet werden. Dabei steht jede Zuordnung im globalen Kontext, d.h. ein Wert einer Eigenschaft des Elementes  $E_a$  kann für die Berechnung der Werteausprägung einer Eigenschaft des Elementes  $E_b$  herangezogen werden. Dazu müssen die eingesetzten Variablen aus dem Variablenfenster eingefügt werden. Denn nur dann werden diese auch in einer zusätzlichen Liste im Hintergrund als weitere Information zu den Attributen abgespeichert und können so für die Ausstellung eines Ursachen-Wirkungsbaums herangezogen werden.

### 3.4 Komplexität von Systemen

Als besondere Schwierigkeit bei der Entscheidungsfindung wurde die Komplexität von Systeminnovationen identifiziert (vgl. Abschnitt 1.4). Verwendet man die Systemtheorie um den Begriff Komplexität zu definieren, so lassen sich die Merkmale komplexer Sys-

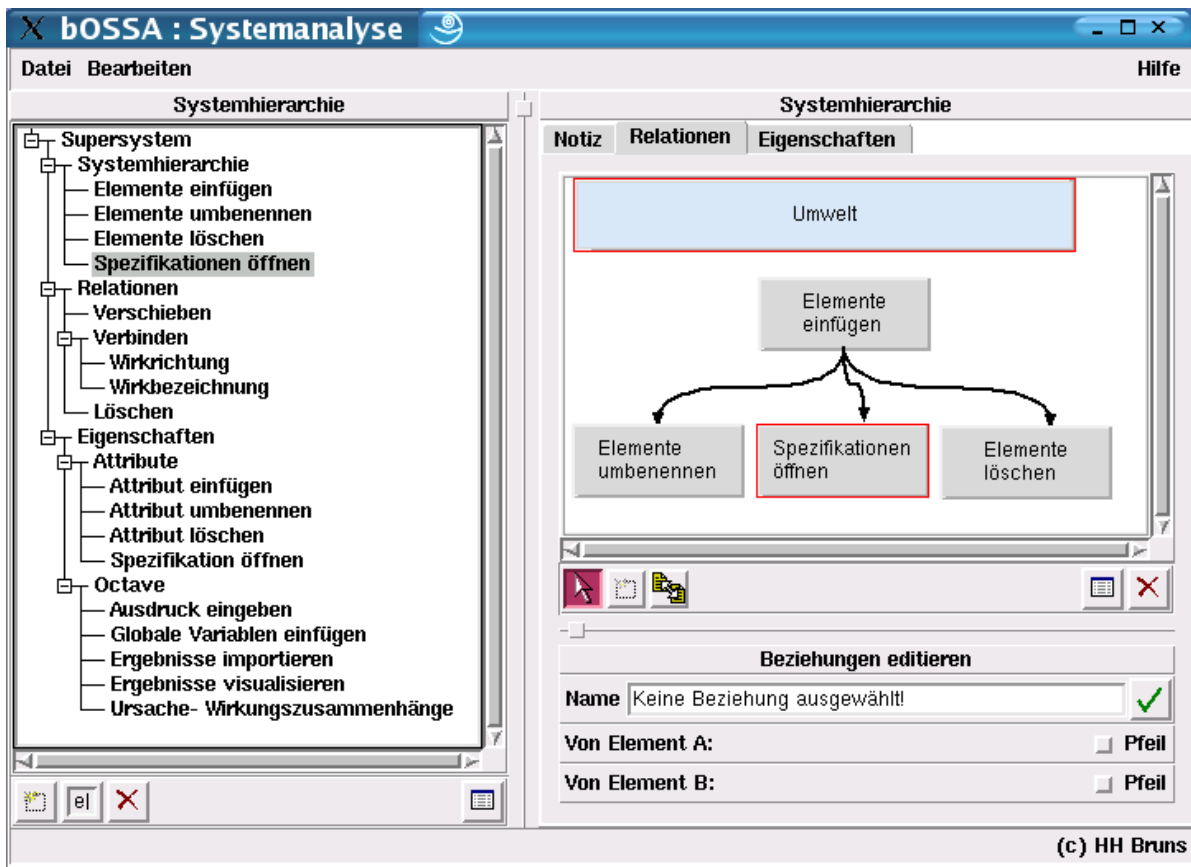


Abbildung 3.5: Systemhierarchie und Relationen in bOSSA

teme wie z. B. Überschaubarkeit, Umfang und Handlichkeit durch die Begriffe Varietät und Konnektivität erfassen (vgl. Abbildung 3.6).[7, S. 12]

Die Varietät eines Systems wird bestimmt durch die bloße Anzahl der Elemente und durch deren jeweiligen unterschiedlichen Arten und Zustände. Es kann daher auch von Elementenvielfalt und Elementenreichtum gesprochen werden.

Analog ist die Konnektivität die Anzahl und Vielfalt der Beziehungen zwischen den Elementen (Detailkomplexität [84, S. 350]) und den relevanten Umweltelementen (Komplexität im Außenverhältnis[34, S. 21]).[98, S. 22-25]

Mit diesen beiden Begrifflichkeiten lässt sich die Komplexität ausdrücken. So besteht die Karosserie des aktuellen BMW M3 (E46) aus etwa 700 Bauteilen (Variatät), die mit 4700 Schweißpunkten (Konnektivität) zusammengesetzt sind.

Diese wenigen Zahlen zeigen, dass bei der Modellierung bewusst und oft auch unbewusst die betrachteten Systeme durch Abstraktion und Reduktion vereinfacht werden müssen

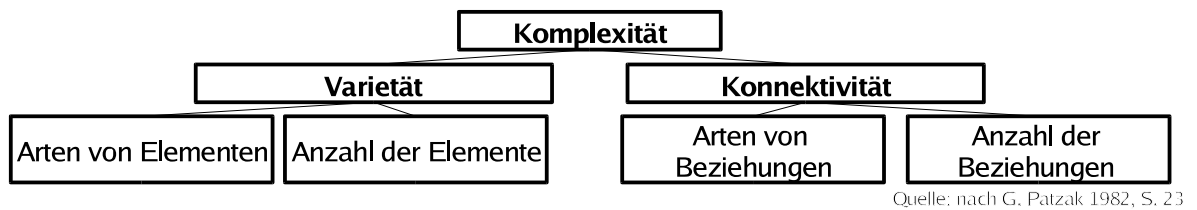


Abbildung 3.6: Definition der Komplexität [98, S. 23]

(vgl. Abbildung 3.7).[40, S. 14 f.]

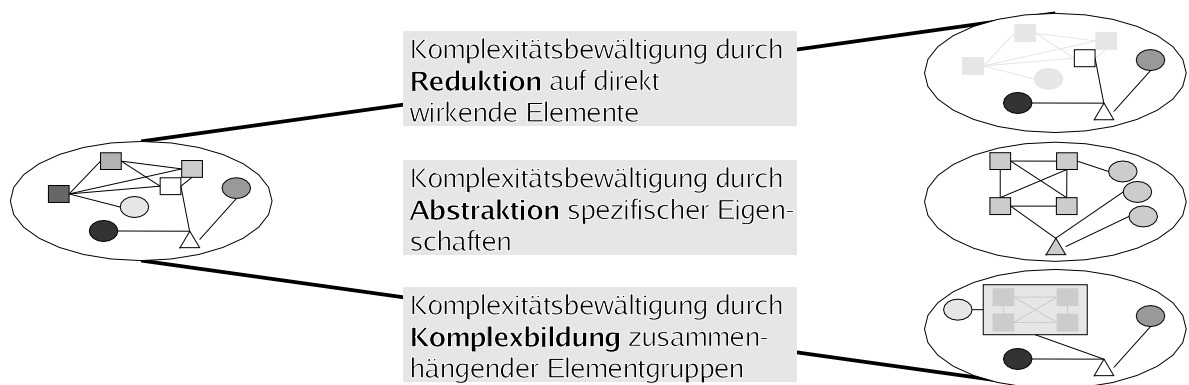


Abbildung 3.7: Komplexitätsbewältigung bei der Modellierung von Systemen

Bei der Analyse von Systemen mit BOSSA sind die obigen Gesichtspunkte zur Komplexitätsbewältigung insbesondere bei der Erstellung der Systemhierarchie zu beachten. Da einzelne Zweige in der Systemhierarchie beliebig ein- und ausgeblendet werden können, kann der Betrachtungsumfang fallweise reduziert werden. Deshalb ist es besonders ratsam zur Komplexitätsbewältigung Subsysteme (Komplexe) zu bilden und die Betrachtung der Wirkbeziehungen in weniger komplexe Subsysteme zu verlagern.

### 3.5 Dynamisches Verhalten von Systemen

Neben der statischen Betrachtung der Systeminnovation Karosserie-Leichtbau ist auch die Systemdynamik zu beachten. Unter Dynamik versteht die Systemtheorie ganz allgemein die Zeitabhängigkeit und damit Veränderlichkeit betrachteter Systeme.[109, S. 19][73, S. 4][60, S. 10][7, S. 12] Für die Beschreibung von dynamischen Systemen ist

daher auch die Zeit als erforderliche diskrete Variable – beschrieben in der Zeitmenge  $T$  – in die Systembetrachtungen einzubeziehen.[134, S. 82 f.]

Die Dynamik eines Systems kann sich sowohl in den zeitabhängigen Zuständen einzelner Elemente als auch im Zustand des gesamten Systems gegenüber seiner dynamischen Umwelt zeigen. Typische zeitabhängige Systemverhalten werden durch Verschleiß oder Alterungsprozesse im Bauteil ausgelöst. Üblicherweise wird im Rahmen des Automobilbaus dazu eine Lebensdauer von zehn Jahren veranschlagt.

Neben diesen zeitkontinuierlichen Systemen – also Systemen, die eine stetige Funktion der Zeit darstellen – gibt es auch ergebnisorientierte Systeme. Bei diesen Systemen kommt es entweder infolge von zufällig eintretenden äußeren Ereignissen oder einer Funktion des Momentanwertes zu einer Änderung des Zustandes. Ein besonderer Anwendungsfall für die Leichtbaukarosserie ist der Crash, der unter Umständen eintreten kann.

In sehr einfachen Systemmodellen wird eine lineare Beziehung zwischen Ursache und Wirkung als ausreichend empfunden. In komplexeren Systemen bestehen dagegen zwischen den einzelnen Elementen oft zirkuläre Wirkungsbeziehungen und damit ein nicht-lineares dynamisches Verhalten. Konkrete Zustände für die Zukunft anzunehmen, ist daher nur eingeschränkt möglich. Es eröffnen sich stattdessen mehrere Möglichkeiten, wie sich eine zukünftige Situation entwickeln könnte.[47, S. 91][57, S. 83][58, S. 96][51]

Wichtige Impulse für die Systemtheorie zur Behandlung dieser nichtlinearen dynamischen Aspekte liefert die Kybernetik. Die sowohl für Maschinen als auch Lebewesen einheitliche Steuerungs-, Regelungs- und Nachrichtentheorie ist die Grundlage für die Modellierung und Simulation von dynamischen Systemen, um dadurch Erkenntnisse über mögliche Systemzustände zu erhalten.[130] Analog einer Regelstrecke treten dabei als Grundphänomene mit der positiven Rückkopplung exponentielle Wachstumsprozesse und mit der negativen Rückkopplung eine Wertstabilisierung ein.

Mit der Methodik des vernetzten Denkens[61] werden die kausalen Kopplungsbeziehungen zwischen den unterschiedlichen Einflussgrößen<sup>4</sup> der Umwelt und des zu betrachtenden Systems aufgezeigt. Dazu wird zwischen lenkbaren Größen – i.d.R. Elemente des zu betrachtenden Systems – und nichtlenkbaren Größen unterschieden sowie gleichzeitig die Wirkungsrichtung und die Wirkintensität der gegenseitigen Beeinflussung ausgewiesen.[41, S. 64 f.][57, S. 89]

---

<sup>4</sup>Zur Bestimmung der Einflussgrößen wird oft auf so genannte Ishikawa-Diagramme (Ursache-Wirkungsdiagramme) zurückgegriffen.[41, S. 79] Diese stellen in einer Baumstruktur das Zusammenwirken einzelner Einflussgrößen (Ursachen) auf eine Hauptgröße (Wirkung) dar.[71, S. 100f.]

Dynamische Systeme werden modelliert über ihre Eigenschaften und deren Zustandsgrößen. Elementar für diese Zustandsgrößen sind die Flussraten, also die Beziehungen zwischen Systemelementen über die ein Stoffumsatz erfolgt und ggf. weitere Hilfsgrößen. Die Zustandsgrößen sind als Bestandsgrößen in einem System auch bei statischen Betrachtungen charakteristisch. Im Zeitverlauf akkumulieren sie die Differenz zwischen den Zufluss- und den Abflussraten.[134, S. 139 f.] Durch eine Informationskopplung sind wiederum auch die Flussraten durch die Zustandsgrößen zu beeinflussen.

### 3.6 Systemmodelle der Technik und deren Bedeutung für diese Arbeit

Aus der allgemeinen Systemtheorie leiten sich für die Technik (vgl. Kapitel 2) drei Systemmodelle und deren Beziehungen untereinander ab (vgl. Abbildung 3.8):

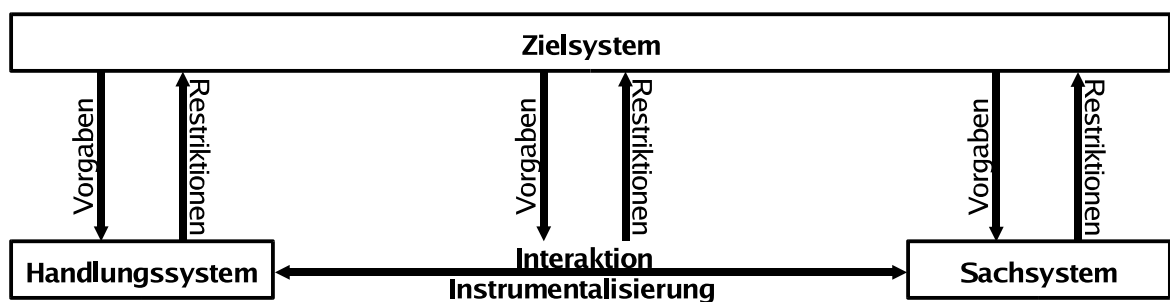


Abbildung 3.8: Wichtige Systemmodelle bei der Problemlösung

- Die Ingenieurwissenschaften beschäftigen sich offensichtlich mit *Sachsystemen*, die technische Produkte repräsentieren. Diese Objektsysteme sind ganz allgemein – für die Erfüllung bestimmter Zwecke – künstlich erzeugte Gebilde.[111, S. 120][98, S. 31-32][97, S. 36][45, S. 19, 21]  
Neben geometrisch-stofflichen Gebilden als technische Systeme im engeren Sinne [45, S. 21] gibt es auch immaterielle Systeme, die dennoch – wie z. B. Software – Sachsysteme darstellen.[97, S. 36]
- Da sich die Ingenieurwissenschaften auch den anderen Aspekten der Technik zuwenden, ist es nur konsequent, Systeme zu definieren, in denen Sachsysteme entstehen und verwendet werden. Hierfür ist in der Literatur der Begriff des *Hand-*

### 3.6 Systemmodelle der Technik und deren Bedeutung für diese Arbeit

lungssystemen geprägt und damit die Systemtheorie um eine Theorie des Handelns ergänzt worden.[111, S. 89][98, S. 31][45, S. 19]

- Zweckgerichtetes Handeln in Handlungssystemen und auch die Nutzenorientierung des Sachsystems erfordern die bewusste Bestimmung von Zielen bzw. Anforderungen. Auf der Managementebene wird dazu ein abstraktes *Zielsystem* verwendet, um Ziele zu strukturieren und hierarchisch (in Form einer Zielhierarchie aus Oberzielen, Zielen und Unterzielen) oder entsprechend ihrer Wichtigkeit sowie u. U. auch als zeitliche Folge von Teilzielen (Ablauf) einzuordnen.[111, S. 151 ff.][98, S. 31][45, S. 19] Andererseits besteht eine Rück-Beziehung in Form von Restriktionen aus dem Handlungs- und Sachsystem heraus. Diese Restriktionen begrenzen – insbesondere bei bereits bestehenden Strukturen – den möglichen Lösungsraum.



Abbildung 3.9: Systemtheoretischer Untersuchungsrahmen für Karosserie-Leichtbau

Damit ergibt sich der in Abbildung 3.9 dargestellte systemtechnische Untersuchungsrahmen mit folgenden betroffenen Systemen:

- Das Sachsystem *Karosserie-Leichtbau* ist zusammen mit dem Handlungssystem *Gebrauch* und der *technischen und natürlichen Umwelt* der Betrachtungsgegenstand des Handlungssystems *Forschung & Entwicklung*.

### 3 Analyse von Systeminnovationen

- Neben dem Handlungssystem *Forschung & Entwicklung* und den weiteren typischen unternehmensinternen Handlungssystemen *Produktion* und *Vertrieb*, *Beratung*, *Gebrauch* und *Service* wird als Folge der Altautoverordnung das Handlungssystem *Beseitigung* zu einem Bestandteil der unternehmerischen Leistung Karosserie-Leichtbau.
- Unternehmerische Entscheidungen sind jedoch weiterhin in einer *ökonomischen* (z. B. Rohstoffmarkt und Lieferanten, Konkurrenz und Kooperation, Kapitalbeschaffung und Anteilseigner) und *sozialen Umwelt* (z. B. Arbeitsmarkt, Staat und Gesellschaft) eingebunden. Zu prüfen ist deshalb auch, welche Auswirkungen mögliche unternehmerische Entscheidungen auf diese Umwelt haben und welche Rückbeziehungen daraus wiederum entstehen.
- Schließlich stellt das *koordinierende Zielsystem* die eigentliche Herausforderung dar, denn unternehmerische Entscheidungen sollten alle Aspekte des Komplexes Karosserie-Leichtbau berücksichtigen. Als weitere theoretische Grundlage wird deshalb im nächsten Kapitel die Entscheidungstheorie herangezogen.

Der systemtheoretische Untersuchungsrahmen ist sinnvollerweise in bOSSA durch das hierarchische Systemkonzept darstellbar (vgl. Abbildung 3.10). Vorteil dieser Betrachtungsweise ist es, dass durch die Bildung von Subsystemen die Komplexität einer Systeminnovation beherrschbar wird.

Die in Abbildung 3.11 zusammengefassten Kernaussagen dieses Kapitels liefern den systemtheoretischen Untersuchungsansatz dieser Arbeit.

Die Entscheidungsfindung beruht dabei auf ein zu erarbeitendes koordinierendes Zielsystem; dieses bildet dann quasi auch die Klammer um die betroffenen Fachbereiche (vgl. in diesem Zusammenhang auch Abbildung 2.9).



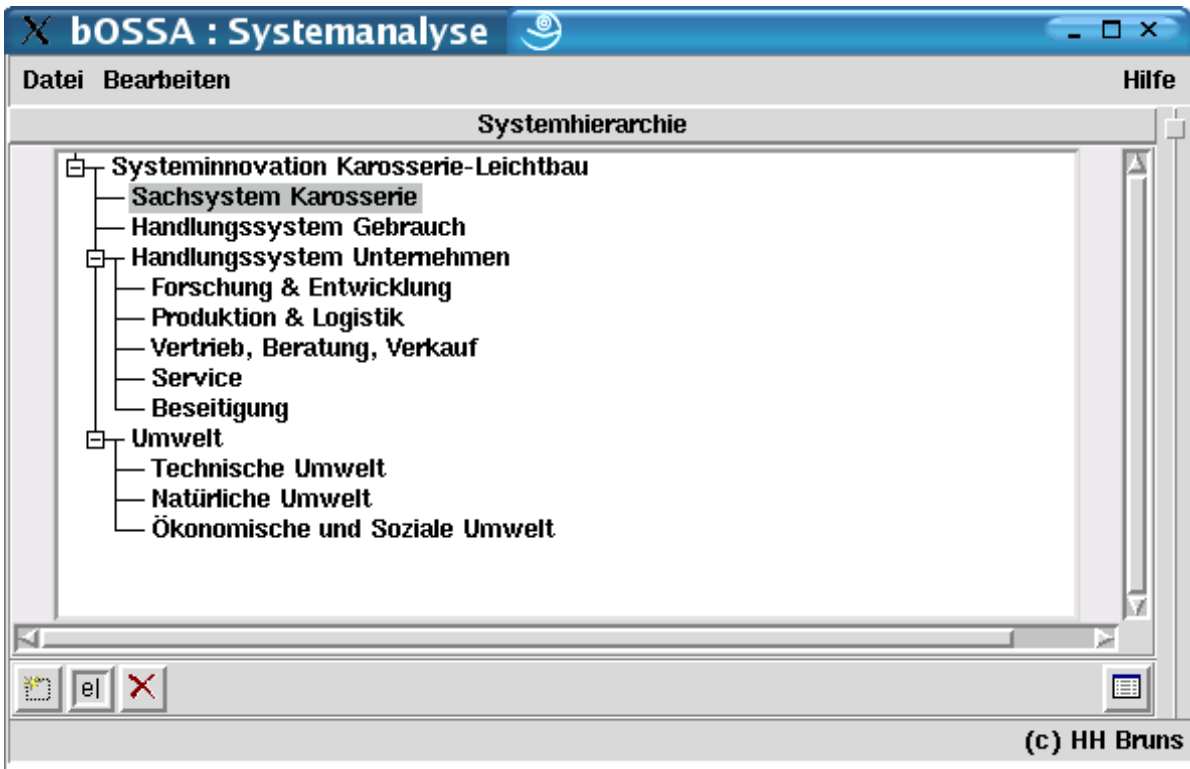


Abbildung 3.10: bOSSA: Übergeordnete Systemhierarchie

Einleitung	Grundlagen: Entwicklung	Grundlagen: Systeme	Grundlagen: Entscheidung	Anwendung: Thermoplast	Schluss
<ul style="list-style-type: none"> <li>↗ Basis der Analyse ist die Systemtheorie mit dem funktionalen, dem strukturalen und dem hierarchischen Konzept.</li> <li>↗ In dem Software-Prototyp bOSSA sind alle drei Systemkonzepte integriert; komplexe und dynamische Systeme können darin abgebildet werden.</li> <li>↗ Aus dem Technikverständnis leiten sich drei Systemmodelle ab: Sachsystem (Gebilde), Handlungssystem (Interaktion) und das Zielsystem (Koordination).</li> </ul>					

Abbildung 3.11: Überblick und Kernaussagen Kapitel 3



## 4 Entscheidungsfindung bei Systeminnovationen

Neben der Analyse von Systemen ist die Entscheidung zentraler Ansatzpunkt dieser Arbeit. Entscheiden – also der Vorgang, der zur Entscheidung führt – ist ein Wahlakt zwischen alternativen Vorhaben, Plänen oder Handlungen<sup>1</sup>. [69, S. 17][79, S. 4] Im betrachteten Fall der Substitution von Stahlblech durch unverstärkte Thermoplaste werden die Alternativen  $A_{\text{Stahlblech}}$  und  $A_{\text{Thermoplast}}$  untersucht.

In diesem Kapitel werden Überlegungen angestellt, wie Entscheidungen auf Basis der Logik *rational* – also im Sinne vernunftmäßig begründbar – getroffen werden können. Dazu liegt es nahe, auf die interdisziplinäre *Entscheidungstheorie* zurückzugreifen. Diese Theorie beschreibt sowohl tatsächliches Entscheidungsverhalten (deskriptive Entscheidungstheorie) als auch Verfahren zur Bildung einer rationalen Präferenzordnung von zu betrachtenden Alternativen (normative bzw. präskriptive Entscheidungstheorie). [85, S. 3][79, S. 1; 16][2, S. 1][114, S. 82][30, S.8]

In der Abgrenzung zur Ethik (siehe z. B. ROPOHL [110] oder auch ROHBECK [108]) versucht die Entscheidungstheorie nicht ein gesellschaftliches Optimum zu erreichen, sondern sie leitet die Entscheidung aus den subjektiven Zielvorstellungen des Entscheiders ab. [79, S. 3;59] Die rationale Lösung eines Entscheidungsproblems im Sinne der normativen Entscheidungstheorie ist damit nicht objektiv, es sei denn, anstelle der subjektiven Zielvorstellungen werden allgemein anerkannte Zielsetzungen vorgenommen.

Wie bereits im vorherigen Kapitel mit dem Tool bOSSA wird auch in diesem Kapitel mit bOSES<sup>2</sup> ein Software-Prototyp erstellt.

---

<sup>1</sup>Auch das Nichteingreifen – also die Beibehaltung des Status Quo – ist eine wählbare Alternative im Sinne der Entscheidungstheorie.

<sup>2</sup>bOSES steht für **O**pen **S**ource **E**ntscheidungs-**S**ystem, ein für diese Arbeit entwickelter Software-Prototyp zur Entscheidungsunterstützung.

## 4.1 Logik der rationalen Entscheidungsfindung

Ein Entscheidungsproblem basiert auf der Menge von Handlungsalternativen  $A$ , die Menge der möglichen Umweltzustände  $\Gamma$  und den daraus resultierenden Ergebnissen  $E(A, \Gamma)$  (vgl. Abbildung 4.1).[79, S.20][85, S. 17]

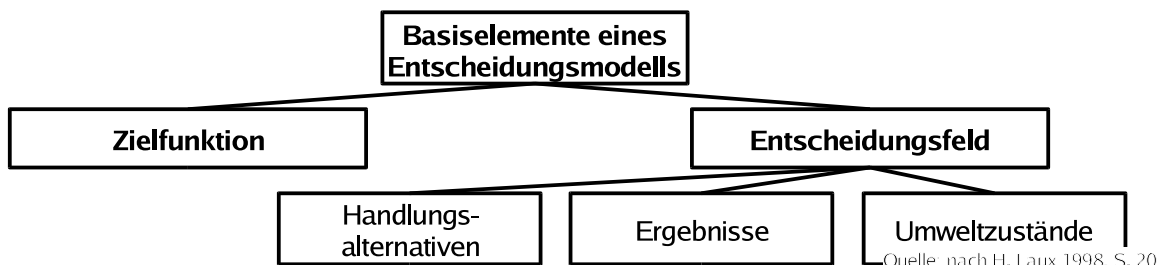


Abbildung 4.1: Basiselemente eines Entscheidungssystems [79, S.20]

Grundlösungsprinzip der mit diesen Elementen dargestellten Entscheidungssituation ist die Bildung einer *Präferenzordnung*  $\Phi(A)$  von allen Alternativen. Diese Ordnung entsteht aus der subjektiven Bewertung der Ergebnisse  $E(A, \Gamma)$  und gibt an, inwieweit der Entscheider eine Alternative gegenüber anderen Alternativen bevorzugt.

Im Allgemeinen gilt, dass der Entscheider versucht, die für ihn beste Lösung zu bestimmen. Die Lösung jeder Entscheidungssituation ist damit in der allgemeinen Präferenzfunktion

$$\Phi(A_a) \rightarrow Max \quad (4.1)$$

vorgegeben und lässt sich folgendermaßen in Worte fassen:

Gesucht ist das Element (bzw. die Elemente)  $A_a$  aus der Alternativmenge  $A$ , das den Wert der Präferenzfunktion  $\Phi$  maximiert. Damit ist die Alternative mit dem höchsten Präferenzwert die rationale Lösung des Entscheidungsproblems.[79, S.24, 25][50, S.13]

Für die Bewertung der Ergebnisse  $E(A, \Gamma)$  zur Bildung der Präferenzordnung hat sich in der Entscheidungstheorie der Begriff *Nutzen*  $N$  (eines Ergebnisses) etabliert:[124, S. 50-67][116, S. 44f.][98, S. 264][28, S. 135]

Der Nutzen  $N(E)$  eines Ergebnisses  $E(A, \Gamma)$  bestimmt den subjektiven Wert der Ausprägung für den Entscheider und besagt letztlich, welches Ergebnis

$E(A, \Gamma)$  einem anderen Ergebnis  $E(A, \Gamma)$  vorzuziehen ist. Die Präferenzordnung  $\Phi(A)$  entsteht mit der Verwendung von verschiedenen – noch darzustellenden – Entscheidungsverfahren aus dem Nutzen  $N(E)$  eines Ergebnisses.

Bei der Entscheidungssituation Karosserie-Leichtbau – also dem Auswahlproblem zwischen den Alternativen Stahl und Thermoplast – müssen in der geforderten ganzheitlichen Betrachtungsweise Ergebnisse aus dem Sachsystem und den tangierenden Handlungssystemen unter verschiedenen Umweltzuständen berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 4.2).

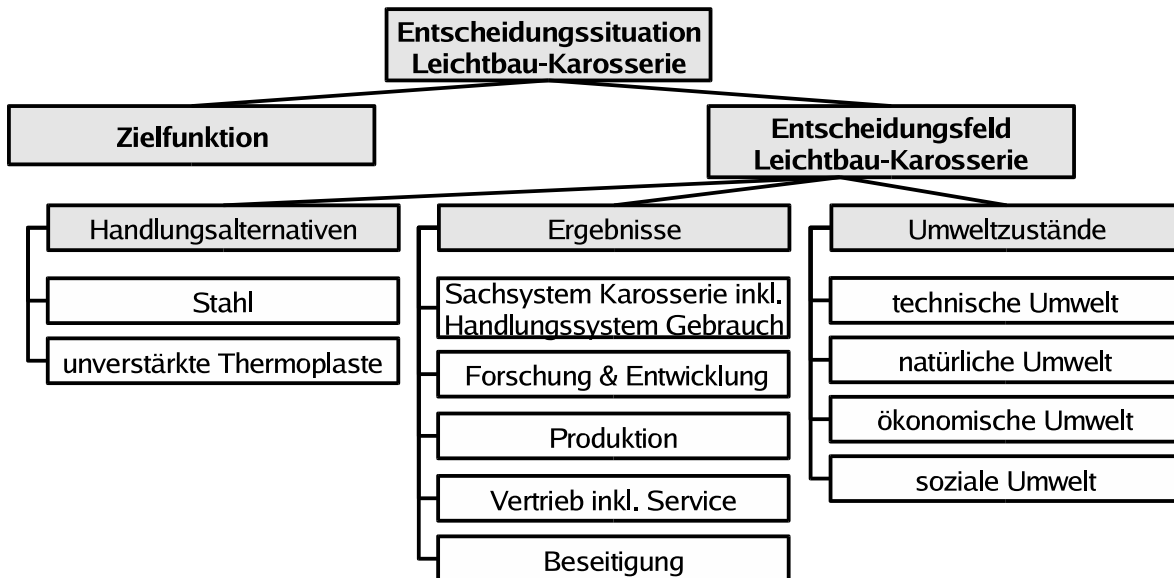


Abbildung 4.2: Entscheidungssituation Karosserie-Leichtbau

Die rationale Entscheidungsfindung bei diesem Auswahlproblem bildet also die Präferenzordnung der beiden Alternativen. Voraussetzung dafür ist die Bestimmung der Nutzen – also die Bewertung der Ergebnisse – bei den angenommenen Umweltzuständen.

In den folgenden Abschnitten werden dafür die entscheidungstheoretischen Grundlagen vorgestellt.

## 4.2 Vollständige Ordnung und Transitivität als Voraussetzung

Zentrale Voraussetzung für die rationale Entscheidungsfindung ist das Ordnungs- und das Transitivitätsaxiom.

Das *Ordnungsaxiom* besagt, dass der Entscheider jedes beliebige Ergebnispaar  $E_i$  zu  $E_j$  bewerten kann. D.h. der Entscheider ist in der Lage, alle Ergebnisse (*Vollständigkeit der Ordnung*) paarweise miteinander zu vergleichen und anzugeben, [79, S.31][85, S. 26]

- welches Ergebnis er einem anderen Ergebnis vorzieht, also ob für ihn  $[E_i \succ E_j]$  oder  $[E_i \prec E_j]$  gilt bzw.
- welche Ergebnisse für ihn gleichwertig also  $[E_i \sim E_j]$  sind.

Liegen mehr als zwei zu vergleichende Alternativen vor, so ist zur *konsistenten*<sup>3</sup> Bildung der Nutzenfunktion das *Transitivitätsaxiom* erforderlich. Es besagt: [85, S. 27][79, S.32]

- Wenn  $E_i \sim E_j$  und  $E_j \sim E_k$  gilt, dann gilt auch  $E_i \sim E_k$ .
- Wenn  $E_i \succ E_j$  und  $E_j \succ E_k$ , dann gilt auch  $E_i \succ E_k$ .
- Wenn  $E_i \succ E_j$  und  $E_j \sim E_k$ , dann gilt auch  $E_i \succ E_k$ .

Wenn in der Realität dennoch gelegentlich dieses Axiom verletzt wird, so lässt sich dieses mit einer Fühlbarkeitsschwelle bei kleinen Unterschieden erklären. D. h. die Ergebnisse  $E_i$  und  $E_j$  bzw.  $E_j$  und  $E_k$  erscheinen zunächst äquivalent, obwohl sie es bei genauer Nutzenwahrnehmung nicht sind. [79, S.33][85, S. 28 f.]

Mit Hilfe dieser beiden Axiome kann nun die Nutzenfunktion als Rangfolge der Ergebnisse durch den *paarweisen Vergleich* gebildet werden. Dazu wird für jedes Paar möglicher Ergebnisse  $E_i$  und  $E_j$  angegeben, ob  $E_i \succ E_j$ ,  $E_i \sim E_j$  oder  $E_i \prec E_j$  gilt. Mit dem Transitivitätsaxiom kann dann sowohl das beste Alternativen-Ergebnis identifiziert als auch – mit entsprechend höherem Aufwand – eine Rangfolge über alle Ergebnisse gebildet werden. [79, S.69-70]

---

<sup>3</sup>In diesem Zusammenhang bezeichnet Konsistenz im Sinne der mathematischen Logik Widerspruchsfreiheit. [122, S. 34]

Entscheidungen, die auf der Bewertung nur eines Kriteriums beruhen, können alleine durch die Anwendung des Ordnungs- und Transitivitätsaxioms getroffen werden, da in diesem Fall die Präferenzordnung der Alternativen  $\Phi(A_a)$  identisch mit der Nutzenfunktion  $U(E_a)$  der einzelnen Ergebnisse ist:

$$\Phi(A_a) = U(E_a) \quad (4.2)$$

Es ist dabei nicht wichtig, um wie viel höher der Nutzen einer Alternative im Vergleich zu einer anderen Alternative ist. Deshalb wird dabei vom *ordinalen Nutzen* gesprochen.[124, S. 50 f.]

## 4.3 Bestimmung des kardinalen Nutzens für mehrkriterielle Entscheidungen

In der Realität beruhen Entscheidungen jedoch auf mehreren unterschiedlichen Ergebniskriterien  $K_k$  und somit auf einem Ergebnisvektor  $\vec{E}_a$  je Alternative. Um zu einer Entscheidung zu kommen, müssen deshalb die Vektoren miteinander verglichen werden.

### 4.3.1 Gliederung von Ergebniskriterien

Ergebniskriterien können im Sinne einer hierarchischen Struktur untergliedert werden in Kriterientypen, Kriterienarten und Kriteriengruppen, in denen Einzelkriterien zusammengefasst werden (vgl. Abbildung 4.3).[28, S. 138]

Bei den Kriterientypen unterscheidet man zwischen Festkriterien (oder auch Musszielen) – also auf jeden Fall zu erfüllenden, in der Regel von Anfang an definierten binären Anforderungen – und tolerierten Kriterien – die innerhalb der Realisierung einen begrenzten Spielraum bieten.[28, S. 140]

Innerhalb der Kriterienarten wird zwischen qualitativen und quantitativen Kriterien unterschieden. Quantitativ erfassbare Werte (z. B. technische Zahlenwerte oder wirtschaftsspezifische Daten) sind durch dimensionsbehaftete, tolerierte oder relationale Zahlen festgelegt. Während rangmäßig beurteilbare, qualitativ beschreibbare Eigenschaften durch mathematisch-logische Aussagevariablen definiert werden.[104, S. 45][28, S. 139 f.]

Kriteriengruppen stellen eine inhaltliche Gliederung von Kriterienfamilien und Einzelkriterien da. So kann hier z.B. zwischen technischen, wirtschaftlichen oder psychologischen

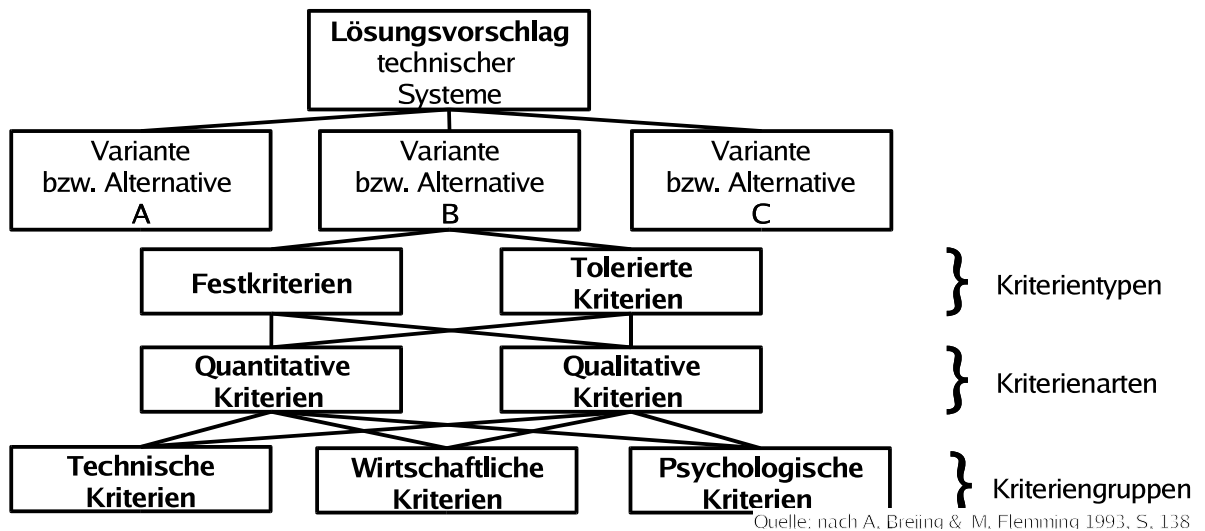


Abbildung 4.3: Hierarchie der Bewertungskriterien[28, S. 138]

Kriterien unterschieden werden.[28, S. 140] Dabei dominieren die so genannten *technischen* und *wirtschaftlichen* Kriterien, die in der Regel auch quantitativ einfacher zu bestimmen sind.

Innerhalb der Ingenieurwissenschaften werden die zu bewertenden Zielsetzungen in Zielkatalogen und Lastenheften dokumentiert.<sup>4</sup> Typisch für eine Bewertung in der Technik sind die folgenden Anforderungen:

- Funktionsanforderungen
- Betriebsanforderungen
- Gestaltungsanforderungen
- Anforderungen seitens der Herstellung
- Anforderungen zur Umweltentlastung
- Anforderungen seitens der Inbetriebnahme, Inbetriebhaltung und des Service
- und zunehmend auch seitens der Entsorgung.

<sup>4</sup>In der angelsächsischen Literatur wird in diesem Zusammenhang auch vom *Design for x* gesprochen.[29, S. 19]



Für die Darstellung von hierarchischen Informationen als Software kann wieder auf den bereits in Kapitel 3 mit der hierarchischen Systemanalyse vorgestellten Datentyp *array* und dem *TixScrolledList*-Widget (vgl. Abbildung 3.5) zurückgegriffen werden. Für das Entscheidungssystem bOSES werden diese Verfahren übernommen.

#### 4.3.2 Beziehungen zwischen Ergebniskriterien

Ergebniskriterien (also die einzelnen Elemente eines Ergebnisvektors) sind teilweise unabhängig voneinander (Neutralität), unterstützen sich (Komplementarität) oder verhindern sich (Konkurrenz). Diese Beziehungen untereinander lassen sich folgendermaßen charakterisieren:

**Neutralität:** Ergebniskriterien sind dann zueinander neutral, wenn die Maßnahmen zur Verbesserung des einen Kriteriums keinen Einfluss auf die Ausprägung der anderen Größe haben.[79, S. 65][66, S. 12] Bei Zielneutralität kann das Entscheidungsproblem in Teilprobleme, die jeweils nur ein Kriterium beeinflussen, unterteilt werden.

**Komplementarität:** Wenn Maßnahmen zur Verbesserung eines Kriteriums auch zu einem besseren Ergebnis eines anderen Kriteriums führen, bezeichnet man das als Komplementarität.[79, S. 65] Bei vollständiger Zielkomplementarität vereinfacht sich so das Entscheidungsproblem auf ein Kriterium, da die Alternative  $A_a$ , die bzgl. dieser Größe die besten Werte liefert, im Hinblick auf alle anderen Kriterien ebenfalls optimal sein muss.[79, S. 66][66, S. 12]

**Konkurrenz:** Ein Konflikt zwischen zwei Kriterien besteht, wenn Maßnahmen zur Verbesserung der einen Größe die andere Größe beeinträchtigen.[79, S. 65] In diesem - in der Realität sehr häufigen Fall - muss dann zwischen den Vor- und Nachteilen hinsichtlich der verschiedenen Zielgrößen abgewogen werden.[79, S. 66][66, S. 12][42, S. 21]

Die Analyse der Beziehungen zwischen Ergebniskriterien erfolgt mit dem paarweisen Vergleich. Diese Vorgehensweise wird im Abschnitt 4.4.2 bei der Gewichtung von Kriterien ab Seite 53 erläutert.

### 4.3.3 Bewertung von quantitativen Entscheidungskriterien

Wenn die Entscheidungskriterien aufgestellt worden sind und entsprechende Ergebnisse vorliegen, ist die kardinale Bewertung hinsichtlich ihres Nutzens für die Entscheidungsfindung erforderlich. Der Nutzen von quantitativ erfassbaren Werten (z. B. technischen Zahlenwerten oder wirtschaftsspezifischen Daten) wird mit Hilfe einer Bewertungsfunktion bestimmt.

Zentral ist die Zielformulierung  $Z$  für jedes Zielkriterium  $K$  (vgl. Abbildung 4.4 ). Im



Abbildung 4.4: Werte auf dem Zahlenstrahl

einfachsten Fall ist ein exakter Einzelwert – häufig auch als Minimum bzw. Maximum – anzustreben. In der Realität lassen sich solche exakten Werte nicht erzielen. Anstelle dessen wird mit Wertebereichen (Toleranzen) gearbeitet, innerhalb derer der Nutzen gewährleistet ist.

#### Binäre Bewertung

Im einfachsten Fall – den oben dargestellten Fest- oder Musskriterien – wird die Nutzenfunktion eines Ergebniskriteriums  $E_a$  binär mit den Ausprägungen  $[0, 1]$  dargestellt. Ist das Kriterium erfüllt, so wird das Ergebnis mit 1 bewertet, ansonsten mit 0. Erhält eine Alternative das Ergebnis 0, so scheidet sie zwangsläufig aus. Verbleiben mehrere gültige Alternativen, so ist eine abgestufte Bewertung im Bereich  $[0, 1]$  als differenziertere Aussage bzgl. des Nutzens erforderlich.

#### Kardinale Bewertung – tolerierte Kriterien

Für die Aufstellung einer solchen differenzierten Bewertungsfunktion eignet sich das *Direct Rating Verfahren*. Beim Direct Rating wird jeder möglichen Ausprägung ein Punktwert direkt zugeordnet. Entsprechend erhält man eine diskrete Werteskala. Das Verfahren ist aber auch dann anwendbar, wenn eine kontinuierliche Wertausprägung vorliegt. Dazu werden die charakteristischen Ausprägungen als Stützpunkte definiert, und

die Werte dazwischen bei Bedarf interpoliert.[89, S. 43 ff.] Der mögliche Wert 0 einer Nutzenfunktion  $U$  muss wie bei der binären Bewertung ein Ausschluss der Alternative bedeuten. Neben einer linearen Interpolation können durch die Stützpunkte auch Optimierungsfunktionen eingesetzt werden – vgl. dazu z.B. die Darstellungen bei der Bewertung technischer Systeme durch Wertfunktionen bei BREIING und KNOSALA.[29, S. 92 - 123]

In der Systemanalyse unter bOSSA werden die charakteristischen Systemeigenschaften und damit also auch die Wertausprägungen der Ergebniskriterien abgelegt. Daher erfolgt die Bewertung der Kriterien ebenfalls unter bOSSA und nicht in dem Software-Prototyp bOSES.

#### 4.3.4 Bewertung von qualitativen Entscheidungskriterien

Im Kapitel 1.1 wurde bereits die Schwierigkeit bei der Entscheidungsfindung angedeutet, unscharfe/unbestimmte Experteneinschätzungen zu berücksichtigen. Tatsächlich liegen die für unternehmerische Entscheidungen relevanten Werte oft nur qualitativ vor.

Auch qualitative Aussagen können mit Hilfe des Nutzenkonzeptes durch einen quantitativen Nutzen  $N$  ersetzt werden. Dafür ist es erforderlich, dass zuerst eine vollständige Menge von linguistischen ordnenbaren Ausdrücken (Termen)  $T$  zur gültigen Wert-Beschreibung des Kriteriums gebildet wird.

Typisch dafür sind z.B. Ausdrücke wie hoch, mittel und gering. Jedem dieser Terme kann dann ein konkreter Nutzenwert – der sich aus der sprachlichen Definition heraus erschließt – zugeordnet werden.[89, S. 43] Der ordinale Nutzen ist dabei grundsätzlich gewährleistet. Der für die Kombination mit anderen Ergebniskriterien erforderliche kardinale Nutzen ist jedoch argumentativ näher zu begründen.

### 4.4 Vom Bewerten zum Entscheiden: Entscheidungsverfahren für Karosserie-Leichtbau

In dem vorangegangenen Abschnitt wurden die theoretischen Grundlagen der systematischen Bewertung aufgezeigt. Dabei wurde deutlich, dass zur Entscheidungsfindung das Entscheidungsfeld und die Zielfunktion abgebildet werden müssen.

Das Entscheidungsfeld wird charakterisiert durch ein Systemmodell, das die Alternativen, die Umwelt und die resultierenden Ergebnisse beinhaltet. Die Zielfunktion – die schließlich eine Präferenzordnung der Alternativen ermittelt – stellt zunächst ein Bewertungsmodell des Zielsystems dar. Abbildung 4.5 zeigt den Zusammenhang zwischen Systemmodell und Bewertungsmodell (Zielsystem). Im Folgenden werden für die Bildung

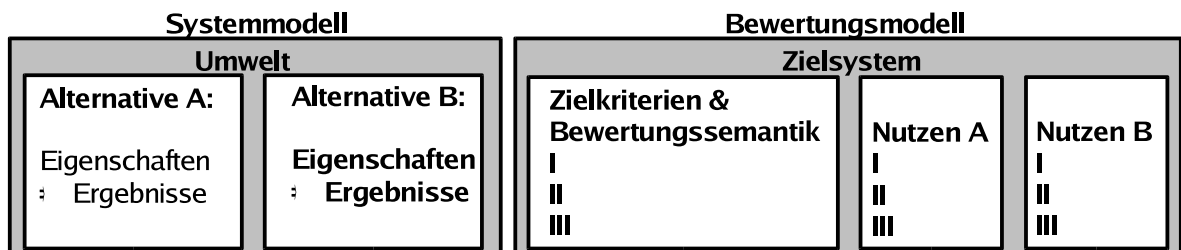


Abbildung 4.5: Systemmodell und Bewertungsmodell

einer Präferenzordnung verschiedene Verfahren vorgestellt. Dazu wird die zu analysierende Entscheidungssituation stark vereinfacht.

#### 4.4.1 Das vereinfachte Entscheidungsfeld im Karosserie-Leichtbau

Der erste Schritt zur Entscheidungsfindung ist – wie schon mehrfach dargestellt – die Aufstellung des Systemmodells mit den Handlungsalternativen und der Umwelt. Im Vorgriff auf Kapitel 6 wird im Folgenden dazu als Beispiel ein Flächenbauteil aus Stahlblech mit der Alternative Thermoplast verglichen.

Um die Entscheidungssituation zu vereinfachen, wird im Folgenden zunächst davon ausgegangen, dass sich beide Alternativen nur bezüglich ihres Eigengewichts und des Spaltmaßes unterscheiden (vgl. Tabelle 4.1).

Systemelement	Eigenschaft	Wertausprägung
Stahlblech	Gewicht	2,5 kg
	Spaltmaß	gut
Thermoplast	Gewicht	1,5kg
	Spaltmaß (20°C)	gut
	Spaltmaß (70°C)	ausreichend
	Spaltmaß (100°C)	ungenügend

Tabelle 4.1: Wertevergleich der Alternativen

Für das Gewicht wird zur Bewertung die physikalische Größe herangezogen. Mit dieser quantitativen Aussage ist dieses Kriterium direkt vergleichbar.

Das Spaltmaß hingegen beinhaltet nicht nur den realen Abstand zwischen zwei benachbarten Bauteilen, sondern auch die Parallelität und wird deshalb nur qualitativ erfasst. Der Term gibt so einen Gesamteindruck des Betrachters in Abhängigkeit von der Temperatur wieder.

Für die Systembeschreibung wird in dieser Arbeit das im vorigen Kapitel entwickelte Instrument bOSSA genutzt. Die Zuordnung der in Tabelle 4.1 festgelegten Eigenschaften unter bOSSA ist nun als Systemmodell abzulegen (vgl. Abbildung 4.6 ).

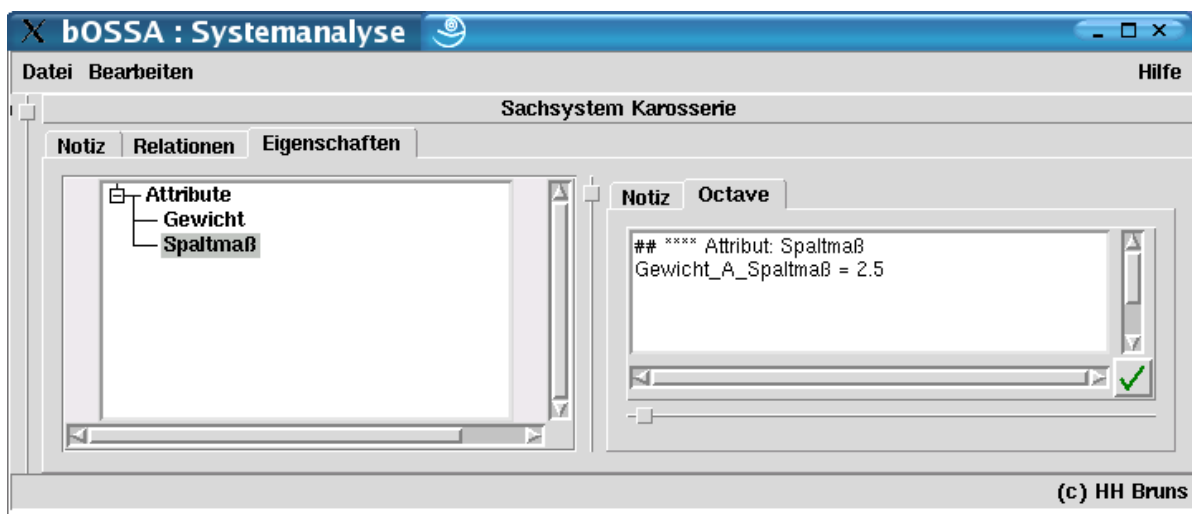


Abbildung 4.6: Zuordnung von Eigenschaften in bOSSA

#### 4.4.2 Entscheidung im Karosserie-Leichtbau bei Sicherheit

Beim Kriterium Gewicht ist jeder Handlungsalternative genau ein Ergebnis zugeordnet. Eine solche Entscheidungssituation ist also unabhängig von Umweltzuständen und wird deswegen mit dem Terminus *Sicherheit* klassifiziert.[85, S. 25][2, S. 38][79, S. 61]

Wenn für eine Entscheidungsfindung nur das Kriterium Gewicht herangezogen wird, so ist es offensichtlich, dass das Gewicht für einen maximalen Nutzen möglichst zu minimieren ist. Damit entspricht die direkte Reihenfolge der Ergebnisse dem umgekehrten Nutzen  $N$  und so auch der Präferenzordnung  $\Phi$ . Die Entscheidungsregel lautet also:

$$\Phi_{\text{Gewicht}} = \max N_{\text{Gewicht}} = \min E(A) \quad (4.3)$$

#### 4 Entscheidungsfindung bei Systeminnovationen

Dementsprechend ist – wenn nur das Gewicht als Entscheidungskriterium herangezogen wird – die Alternative Thermoplast gegenüber Stahlblech vorzuziehen.

Da es aber weitere Kriterien gibt, ist es von Bedeutung, um wie viel vorteilhafter der Nutzen des Gewichts bei Thermoplast gegenüber der Alternative Stahlblech eingeschätzt wird. Das macht die Bildung einer *kardinalen Nutzenfunktion* für das Kriterium Gewicht erforderlich.

Nun ist bereits im Abschnitt 1.2 ersichtlich, dass der Kraftstoffverbrauch – als eigentliches Minimierungsziel – proportional zum Fahrzeuggewicht ist. Damit ist die einfache lineare Straffungsfunktion auf der Basis von  $y = mx + b$  für eine rationale Nutzenbewertung geeignet. Dazu werden zunächst die charakteristischen Stützpunkte definiert: Das absolute Minimum (0 kg) wird mit 1 bewertet. Der zweite charakteristische Stützpunkt basiert auf der Bewertung der Alternative Stahlblech, dem konventionellen Karosserie-Werkstoff. An dieser Stelle wird auf Basis von Experteneinschätzungen das Gewicht des Stahlbleches mit dem Wert 0,3 festgelegt.[20]

Mit den definierten Stützpunkten kann dann für die Bewertung die Funktion  $y = -0,28x + 1$  bestimmt werden. Entsprechend mit *Ocatve*:

$$\text{Alternativen\_Nutzen\_Gewicht} = -0.28 * \text{Alternativen\_Werte\_Gewicht}$$

So wird der Alternative Thermoplast mit dem Gewicht 1,5 kg ein kardinaler Nutzwert von 0,58 zugewiesen.

Das zweite Kriterium – die Bewertung des Spaltmaßes – ist ein qualitatives Kriterium. Anders als das Kriterium Gewicht ist das Spaltmaß abhängig von dem Umweltzustand Temperatur. Wenn der Umweltzustand mit einer Temperatur von 20°C festgeschrieben wird – also eine *Entscheidung bei Sicherheit* vorliegt oder mit anderen Worten, der Entscheidungsträger den Alternativen genau ein Ergebnis zuordnen kann[85, S. 25] – werden beide Alternativen bzgl. des Spaltmaßes mit *gut* und damit als gleichwertig beurteilt (vgl. Tabelle 4.2).

Alternative	Bewertung Gewicht	Bewertung Spaltmaß
Stahlblech	0,3	gut
Thermoplast	0,57	gut

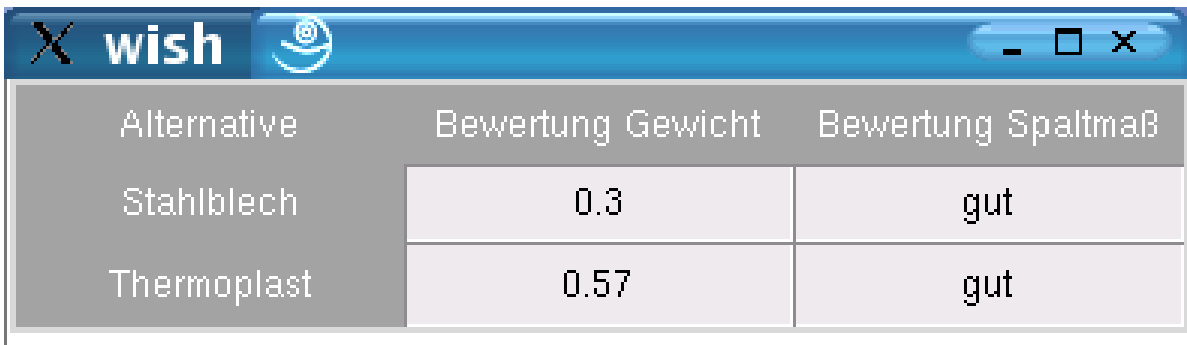
Tabelle 4.2: Entscheidungsmatrix bei Sicherheit bzgl. der Temperatur 20°C

#### 4.4 Vom Bewerten zum Entscheiden: Entscheidungsverfahren für Karosserie-Leichtbau

Die als Tabelle 4.2 eingeführte *Entscheidungsmatrix* ist ein Grundmodell der Entscheidungstheorie. Für den Software-Prototyp bOSES besitzt *Tcl* mit den Datentyp *array* eine geeignete Datenrepräsentation.

```
e_matrix(0,0) Alternative
set e_matrix(1,0) Stahlblech
set e_matrix(2,0) Thermoplast
set e_matrix(0,1) "Bewertung Gewicht"
set e_matrix(0,2) "Bewertung Spaltmaß"
set e_matrix(1,1) "0.3"
set e_matrix(2,1) "0.57"
set e_matrix(1,2) gut
set e_matrix(2,2) gut
```

Zur Darstellung solcher Tabellen-*Arrays* steht für *Tcl/TK* das *table*-Widget zur Verfügung (vgl. Abbildung 4.7):



Alternative	Bewertung Gewicht	Bewertung Spaltmaß
Stahlblech	0.3	gut
Thermoplast	0.57	gut

Abbildung 4.7: *table*-Widget als Entscheidungsmatrix

```
table .ematrix -variable e_matrix -rows 3 -cols 3
```

Bei der vorgegebenen Temperatur  $20^{\circ}\text{C}$  ist eine Lösung des Entscheidungsproblems damit offensichtlich: Der Ergebnisvektor der Alternative Thermoplast *dominiert* den Ergebnisvektor der Alternative Stahlblech, d. h. bzgl. aller Zielgrößen hat der dominierende Vektor  $\vec{E}_{\text{Thermoplast},20^{\circ}\text{C}}$  ebenso hohe Werte und im Hinblick auf eine Zielgröße einen höheren Wert als  $\vec{E}_{\text{Stahlblech},20^{\circ}\text{C}}$ . [79, S. 77][42, S. 14 ff.] Damit ist bei einer Temperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  die Alternative Thermoplast die rationale Lösung des Entscheidungsproblems.

#### 4 Entscheidungsfindung bei Systeminnovationen

Solche dominierenden Ergebnisvektoren sind allerdings die Ausnahme. Wird nämlich – wie in diesem Fall möglich – ein anderer Temperaturbereich angenommen, so ist die Lösung nicht mehr mit dem *Dominanzprinzip* als Entscheidungsregel lösbar.

Bei 70°C – wiederum als Entscheidung bei Sicherheit – sind beide Alternativen bzgl. des Kriteriums Spaltmaß unterschiedlich bewertet: Das Ergebnis des Kriteriums Spaltmaß ist beim Stahlblech mit der Bewertung *gut* dem Ergebnis bei Thermoplast mit der Bewertung *ausreichend* vorzuziehen.

Bei 70°C sind also beide Alternativen *effizient*<sup>5</sup> [79, S. 77], weil sie

1. zulässig sind – also realisierbare Alternativen darstellen – und
2. keine andere Alternative existiert, die bzgl. aller Zielgrößen ebenso hohe Nutzwerte und im Hinblick auf eine Zielgröße einen höheren Wert bietet.

Für eine Entscheidungsfindung bei 70° ist deshalb die Überführung der qualitativen Ergebnisse für das Kriterium Spaltmaß ebenfalls in kardinale Nutzenwerte erforderlich.

Die Bewertung des Spaltmaß ist als Termmenge  $T$  vollständig sprachlich definiert durch die Ausdrücke *sehr gut*, *gut*, *befriedigend*, *ausreichend*, *mangelhaft* und *ungenügend*.

Entsprechend der Logik dem besten Ausdruck dem Nutzen 1 zuzuweisen und allen nicht akzeptablen Werten den Begriff 0, können folgende Zuordnungen dargestellt werden:

<i>sehr gut</i>	1
<i>mangelhaft</i>	0
<i>ungenügend</i>	0

Schwieriger ist die Zuordnung von quantitativen Werten für die Ausdrücke *gut*, *befriedigend*, *ausreichend*. Alle drei Aussagen erfüllen ein Minimalziel (Mussziel) – es geht also darum, wie der Kunde dieses Kriterium abgestuft beurteilen würde. Der Einfachheit halber wird nun davon ausgegangen, dass jeder Leistungsgewinn linear honoriert wird. So werden den Ausdrücken *ausreichend* der Wert 0,25, *befriedigend* 0,5 und *gut* 0,75 zugewiesen. Das Entscheidungsfeld bei 70°C kann nun mit den ermittelten Werten in der Entscheidungsmatrix (Tabelle 4.3) dargestellt werden. Beide der zur Auswahl stehenden Alternativen sind gültig – sie verletzen also kein Ausschlusskriterium – und sind, wie schon dargestellt, effizient.

---

<sup>5</sup>Da eine optimale und damit rationale Lösung immer eine effiziente Alternative voraussetzt, sind alle nicht effizienten – also dominierten – Alternativen nach dem Dominanzprinzip nicht weiter zu betrachten.



#### 4.4 Vom Bewerten zum Entscheiden: Entscheidungsverfahren für Karosserie-Leichtbau

Alternative	Bewertung Gewicht	Bewertung Spaltmaß
Stahlblech	0,3	0,75
Thermoplast	0,57	0,25

Tabelle 4.3: Entscheidungsmatrix bei Sicherheit bzgl. der Temperatur 70°C

Wenn der Entscheider indifferent bzgl. der Zielkriterien ist, können vor allem zwei Verfahren zum Einsatz kommen:

Bei der *Maximierung der minimalen Zielerreichungsgrade* wird jede Alternative durch die jeweilige minimale Zielerreichung klassifiziert und so eine Rangfolge bzgl. der Nutzwerte ermittelt.[2, S. 51] Der Entscheider bevorzugt also die Alternative, dessen minimaler Nutzen am größten ist:

$$\Phi(A_a) = \min [N]_{i=1}^n \quad (4.4)$$

Es gilt also in beiden Ergebnisvektoren den minimalen Wert zu identifizieren. Dazu steht in *Octave* die `min`-Funktion zur Verfügung.

```
Nvektor_Alt_TP = [0.57 0.25]
Nvektor_Alt_Stahl = [0.3 0.75]
Praferenz_Name = [Thermoplast Stahl]
Praferenz_Werte = [min(Nvektor_Alt_TP) min(Nvektor_Alt_Stahl)]
```

Im diskutierten Beispiel ist danach die Alternative Stahlblech mit einem Minimum von 0,3 bei der Bewertung Gewicht der Alternative Thermoplast mit einer Bewertung von 0,25 beim Spaltmaß zu bevorzugen.

Alternativ lassen sich die Ergebnisvektoren zu Skalaren je Alternative als Summe  $S$  aufaddieren bzw. durch den *ungewichteten arithmetrischen Mittelwert*  $M$  ersetzen. Die Präferenzordnung  $\Phi(A_a)$  entspricht dann der Summe  $S$  der Einzelnutzen  $N_i$

$$\Phi(A_a) = S = \sum_{i=1}^n N_i \quad (4.5)$$

bzw. mit der gleichen Aussagekraft dem Mittelwert  $M$ .

$$\Phi(A_a) = M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (4.6)$$

#### 4 Entscheidungsfindung bei Systeminnovationen

Unter *Octave* stehen dafür die Funktionen `sum()` und `mean()` zur Verfügung.

```
Praeferenz_Summe = [sum(Evektor_Alt_TP) sum(Evektor_Alt_Stahl)]  
Praeferenz_Mittel = [mean(Evektor_Alt_TP) mean(Evektor_Alt_Stahl)]
```

Für diesen Fall lässt sich der Alternative Stahlblech ein Mittelwert von 0,525 (alternativ eine Summe von 1,05) und der Alternative Thermoplast ein Präferenzwert von 0,41 (bzw. die Summe 0,82) zuweisen. Damit wäre für eine Temperatur von 70°C die Alternative Stahlblech der Alternative Thermoplast vorzuziehen.

Häufig sind dem Entscheider die Kriterien jedoch unterschiedlich wichtig. Im Extremfall bevorzugt er ein Ziel derartig, dass es alleine zur Auswahlentscheidung herangezogen wird und alle anderen Kriterien lediglich als Mindestziele berücksichtigt werden. Dieses Verfahren wird als *Zielunterdrückung* bezeichnet.[79, S. 92 f.][85, S. 31] Im diskutierten Beispiel könnte das Gewicht allen anderen Kriterien gegenüber bevorzugt werden; mit der Konsequenz, dass die Alternative Thermoplast ausgewählt wird (vgl. Seite 48).

Sind mehrere Alternativen bzgl. der wichtigsten Zielgröße gleichwertig, so wird zusätzlich die zweitwichtigste Zielgröße zur weiteren Auswahl herangezogen.[79, S. 92 f.] Über diese *Lexikographische Ordnung* wird sichergestellt, dass zumindestens eine effiziente Lösung ausgewählt wird. Diese ist allerdings nur dann eine optimale Lösung, wenn ein marginaler Vorteil bei den wichtigsten Zielgrößen einer Alternative nicht durch andere Größen kompensiert werden kann, egal wie viel vorteilhafter diese bei den anderen Alternativen ist.[79, S. 94]

Sollen alle Zielkriterien mit unterschiedlicher Relevanz für die Entscheidung herangezogen werden, ist der ermittelte Nutzenvektor  $\vec{N}$  je Alternative durch einen Gesamtnutzen  $G$  zu ersetzen.

Sind alle Zielgrößen durch eine Änderung einer Zielgröße kompensierbar, können alle Kriterien durch paarweisen Vergleich auf eine einzige Größe transformiert werden – das *Transformationskonzept*[79, S. 80-86]. In unserem Beispiel könnte der Entscheider aussagen, dass ein ebenfalls gutes Spaltmaß für Thermoplast dem Entscheider ein weiteres Gewicht von 0,5 kg wert wäre. Man erhält also anstelle der realen Alternative Thermoplast die hypothetische Alternative Thermoplast\*, die bis auf das Gewicht die gleichen Werte wie Stahlblech aufweist (vgl. Tabelle 4.4). Die hypothetische Alternative Thermoplast\* hat mit einem Gewicht von 2 kg = 0,44 einen höheren Rang als die Alternative Stahlblech mit 2,5 kg = 0,30. Somit ist die Alternative Thermoplast der Alternative

#### 4.4 Vom Bewerten zum Entscheiden: Entscheidungsverfahren für Karosserie-Leichtbau

Alternative	Bewertung Gewicht	Bewertung Spaltmaß
Stahlblech	0,3	0,75
Thermoplast*	0,44	0,75

Tabelle 4.4: Transformationskonzept zur Lösung von Entscheidungsproblemen [Entscheidungsmatrix 70°C]

Stahlblech vorzuziehen. Die Anwendbarkeit dieses Konzeptes stößt jedoch bei mehreren Alternativen schnell an seine Grenzen, da jeder Einzelnutzen jeder Alternative und ggf. bei jedem denkbaren Umweltzustand durch den paarweisen Vergleich zu transformieren wäre.

Deshalb hat sich in der Entscheidungspraxis das gewichtete Mittelwert-Verfahren durchgesetzt. Es setzt allerdings streng genommen eine perfekte Substitution der Kriterien voraus.

Das Verfahren geht davon aus, dass der Entscheider bestimmen kann, um wie viel wichtiger ihm ein Kriterium im Vergleich zu einem anderen ist. Die Präferenzordnung der Alternativen ergibt sich aus dem *arithmetrischen Mittel* der *gewichteten* Einzelnutzen.

$$\Phi(A_a) = M(A_a) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i N_i \quad (4.7)$$

[79, S. 98]

Die Bestimmung *konsistenter* Gewichtungsfaktoren  $g_i$  erfolgt durch den paarweisen Vergleich der Kriterien untereinander. Dazu werden paarweise Gewichtungsfaktoren  $p_{ab}$  und  $p_{ba}$  bestimmt, die angeben, in welchem Verhältnis die Kriterien zueinander stehen.

Mit der Vorgabe, dass man 100% auf die beiden Kriterien verteilt, werden sie zu 1 normiert. [29, S. 160] <sup>6</sup> Es gilt also:

$$p_{ba} + p_{ab} = 1 \quad (4.8)$$

Die Ermittlung aller paarweisen Gewichtungen führt dann zu einer Gewichtungsmatrix (vgl. Tabelle 4.5), die für die Darstellung des Transitivitätsaxioms um das Entscheidungskriterium Festigkeit ergänzt wurde.

<sup>6</sup>Alternativ kann für die Bildung konsistenter Gewichtungsfaktoren auch auf verhältnismäßige Wichtigkeiten zurückgegriffen werden. Die dazu erforderlichen Zusammenhänge werden bei BREIING und KNOSALA [29, S. 163 - 168] ausführlich dargestellt.

#### 4 Entscheidungsfindung bei Systeminnovationen

	a) Gewicht	b) Spaltmaß	c) Festigkeit
a) Gewicht	0	$p_{ab} = 0,75$	$p_{ac} = 0,66$
b) Spaltmaß	$p_{ba} = 0,25$	0	$p_{bc}$
c) Festigkeit	$p_{ca} = 0,33$	$p_{cb}$	0

Tabelle 4.5: Paarweiser Vergleich mit auf 1 normierten Gewichtungen

Mit dem Transitivitätsaxiom gelten für die paarweisen Gewichtungen  $p_{cb}$  und  $p_{bc}$  folgende Zusammenhänge[29, S. 160 ff.]:

1. Das Verhältnis der Kriterien  $a$  zu  $b$  ist gleich dem Verhältnis der paarweisen Gewichtungen  $p_{ab}$  zu  $p_{ba}$ .

$$\frac{a}{b} = \frac{p_{ab}}{p_{ba}} = \frac{0,75}{0,25} \quad (4.9)$$

2. Gleichzeitig ergibt sich das Verhältnis von  $b$  zu  $c$  aus  $\frac{b}{a}$  zu  $\frac{c}{a}$  und so aus  $\frac{p_{ba}}{p_{ab}}$  und  $\frac{p_{ca}}{p_{ac}}$ .

$$\frac{b}{c} = \frac{\frac{b}{a}}{\frac{c}{a}} \iff \frac{p_{bc}}{p_{cb}} = \frac{\frac{p_{ba}}{p_{ab}}}{\frac{p_{ca}}{p_{ac}}} \quad (4.10)$$

3. Mit  $p_{bc} = 1 - p_{cb}$  und  $p_{cb} = \frac{\frac{p_{ca}}{p_{ac}}}{\frac{p_{ba}}{p_{ab}}} * p_{bc}$  folgt schließlich:

$$p_{bc} = 1 - \left( \frac{\frac{p_{ca}}{p_{ac}}}{\frac{p_{ba}}{p_{ab}}} \right) p_{bc} \quad (4.11)$$

4. Mit dem Ergebnis  $p_{bc} = 0,4$  nach

$$p_{bc} = \frac{1}{1 + \left( \frac{\frac{p_{ca}}{p_{ac}}}{\frac{p_{ba}}{p_{ab}}} \right)} = 0,4 \quad (4.12)$$

Dieser Zusammenhang lässt sich verallgemeinern, so dass jeweils alle Kriterien nur einmal zu einem – willkürlich gewählten – Basiskriterium  $a$  (in der Regel die 1. Zeile/Spalte) verglichen werden müssen. Dazu sei  $n$  die Anzahl der paarweise zu vergleichenden Kriterien,  $i = i$  – te Zeile und  $j = j$  – te Spalte einer Gewichtungsmatrix [29, S. 162]:

$$p_{ij} = \frac{1}{1 + \left( \frac{p_{ja}}{p_{aj}} \frac{p_{ai}}{p_{ia}} \right)} \text{ mit } i, j = 1, \dots, n \quad (4.13)$$

#### 4.4 Vom Bewerten zum Entscheiden: Entscheidungsverfahren für Karosserie-Leichtbau

Wenn alle paarweise normierten Wichtigkeiten auf dieser Weise festgelegt worden sind, so bestimmen sich die Gewichtungsfaktoren  $g_i$  für jedes Kriterium aus der Zeilensumme. Aus diesen können wiederum die zu 1 normierten Gewichtungsfaktoren  $g_{i_{norm}}$  abgeleitet werden[29, S. 165 ff.]:

$$g_i = \sum_{j=1}^n p_{ij} \quad (4.14)$$

$$g_{i_{norm}} = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (4.15)$$

Im betrachteten Beispiel ist also die Gewichtungsmatrix (vgl. 4.5) um die ermittelten Gewichtungsfaktoren  $g_i$  und  $g_{i_{norm}}$  zu ergänzen (vgl. Tabelle 4.6). So kann für jedes Kriterium der genormte Gewichtungsfaktor  $g_{i_{norm}}$  bestimmt werden, diese bilden zusammen den genormten Gewichtungsvektor  $\vec{G}$ .

	a) Gewicht	b) Spaltmaß	c) Festigkeit	$g_i$	$g_{i_{norm}}$
a) Gewicht	0	$p_{ab} = 0,75$	$p_{ac} = 0,67$	$g_a = 1,42$	0,472
b) Spaltmaß	$p_{ba} = 0,25$	0	$p_{bc} = 0,4$	$g_b = 0,65$	0,216
c) Festigkeit	$p_{ca} = 0,33$	$p_{cb} = 0,6$	0	$g_c = 0,93$	0,31

Tabelle 4.6: Gewichtungsmatrix mit Gewichtungsfaktoren

Für den Software-Prototyp ist die Bestimmung der genormten Gewichtungsfaktoren als Funktionen in *Tcl* erforderlich. Ausgangspunkt dazu sind zwei *table*-Widgets für den paarweisen Vergleich und getrennt dazu die Darstellung der Gewichtungsfaktoren.

Der paarweise Vergleich beruht auf einer Referenzzeile aus der alle anderen Werte errechnet werden. Durch eine *for*-Schleife wird mit der Gleichung 4.8 eine Referenzspalte abgeleitet:

```
for {set il $g_row} {$il <= $v_icol} {incr il} {
    set gew($il,$g_row) [expr 1 - $gew($g_row,$il)] }
# mit g_row = 1. Wertspalte
```

Aus Referenzzeile und Referenzspalte ergeben sich durch zwei verschachtelte *for*-Schleifen dann alle Einzelwerte:

```
for {set il $g_row} {$il <= $v_icol} {incr il} {
    for {set jl $g_row} {$jl < $v_icol} {incr jl} {
```

```

    set ba $gew($il,$g_row)
    set ab [expr 1 - $ba]
    set bc $gew($jl,$g_row)
    set cb [expr 1 - $bc]
    if {$bc > 0.0 && $ab > 0.0} {
        set ac [expr (1/(1+((($cb*$ba)/($bc*$ab)))))]
    } else {
        set ac 1
    }
    set gew($il,$jl) [expr 1- $ac]
}
}

```

Mit zwei weiteren *for*-Schleifen werden dann die Zeilensummen und daraus die normierten Gewichtungsfaktoren bestimmt:

```

for {set il $g_row} {$il < $v_icol} {incr il} {
    set sum 0
    for {set jl $g_row} {$jl < $v_icol} {incr jl} {
        set sum [expr $sum + $gew($il,$jl)]
    }
    set ze [expr $il - $g_row + 1]
    set sp [expr $g_row + 1]
    set gew_d($ze,$g_row) $sum
    set gew_d($ze,$sp) [expr $sum/($v_icol - $g_row)]
}

```

Abbildung 4.8 zeigt die Realisierung der Bestimmung von Gewichtungsfaktoren im Software-Prototyp bOSES.

Mit den Ergebnissen der Alternativen bei 70°C – dargestellt in der Entscheidungsmatrix 4.3 und ergänzt um das Kriterium Festigkeit (Nutzwert 1) – ergibt sich mit den gewichteten Nutzen  $N_{gewichtet,a} = g_{i,norm} * N_a$  die gewichtete Entscheidungsmatrix 4.7.

Die Präferenzspalte der Entscheidungsmatrix zeigt mit den arithmetrischen Mittelwerten  $M_a$  nun die Präferenzwerte  $\Phi_a$  der Alternativen  $A_a$ . Mit einem so ermittelten Präferenzwert für Thermoplast (0,633) und Stahlblech (0,614) ist Thermoplast bei 70°C der Alternative Stahlblech vorzuziehen.

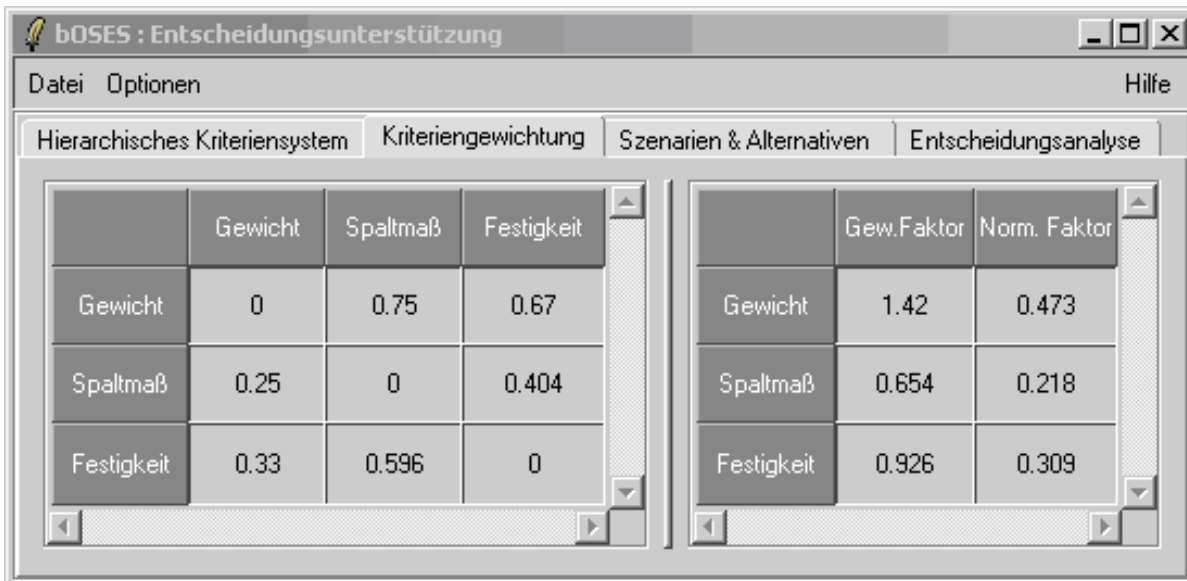


Abbildung 4.8: Bestimmung von Gewichtungsfaktoren in bOSES durch paarweisen Vergleich

Alternative	Gewicht	Spaltmaß	Festigkeit	$\Phi_a = M_a$
Gewichtungsfaktor	0,472	0,216	0,311	
Stahlblech	0,142	0,164	0,309	0,614
Thermoplast	0,270	0,055	0,309	0,633

Tabelle 4.7: Gewichtete Ergebnismatrix und Präferenzwerte

Bei einer Temperatur von 100°C wird bei der Alternative Thermoplast das Spaltmaß mit ungenügend bewertet. Die Alternative Thermoplast ist, weil sie ein Ausschlusskriterium verfehlt, ungeeignet. Deswegen muss zusätzlich zum arithmetischen Mittelwert jedes Kriterium daraufhin geprüft werden, ob eine mindestens ausreichende Bewertung vorliegt. Dazu gilt zusätzlich der Zusammenhang:

$$\Phi_a = 0 \text{ wenn } N_{a,i} = 0 \quad (4.16)$$

Im Abschnitt 4.4.1 wurden drei verschiedene Umweltzustände definiert: 20°C, 70°C und 100°C. Mit dem gerade vorgestellten arithmetischen Mittel lassen sich die Präferenzen für die anderen Temperaturen in der Ergebnismatrix 4.7 darstellen.

Weil verschiedene Umweltzustände (Temperaturen) vorliegen können, die das wichtige Entscheidungskriterium Spaltmaß beeinflussen, liegt *Unsicherheit* bzgl. der Ergebnisse

	$\Gamma_{20^\circ\text{C}}$	$\Gamma_{70^\circ\text{C}}$	$\Gamma_{100^\circ\text{C}}$
Stahlblech	0,614	0,614	0,614
Thermoplast	0,742	0,633	0

Tabelle 4.8: Ergebnismatrix bei Unsicherheit

und schließlich des Nutzens vor. Nun ist es offensichtlich, dass bei einer Entscheidung zur Substitution von Stahlblech durch Thermoplast alle möglichen Temperaturen zu berücksichtigen sind. Diese Unsicherheit muss also bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden.

Dazu muss weiter differenziert werden zwischen *Ungewissheit* (*Unsicherheit i. e. S.*) und *Risiko*. Bei Unsicherheit i. e. S. können lediglich die möglichen Zustände angegeben werden. Mit der Bildung von Eintrittswahrscheinlichkeitsurteilen zu den jeweiligen Zuständen spricht man von Risiko.[79, S.23][85, S. 35][42, S. 11]

#### 4.4.3 Entscheidung im Karosserie-Leichtbau bei Ungewissheit

Die Ergebnismatrix 4.8 im vorigen Abschnitt liefert zwar Aussagen über die möglichen Zustände, ordnet diesen aber keine Eintrittswahrscheinlichkeiten zu - damit liegt Ungewissheit vor. Für diese Situation werden nun einige Entscheidungsverfahren dargestellt. Die *Maximin*- oder auch *Minimax*-Regel beruht auf dem jeweils ungünstigsten Umweltzustand und wählt dann daraus diejenige Alternative, die dabei noch das beste Ergebnis aufweist.[85, S. 37]

$$\Phi(A_a) = \min_s M_{as} \quad (4.17)$$

Sie entspricht also der schon dargestellten Maximierung der minimalen Zielerreichungsgrade, mit dem Unterschied, dass nicht unterschiedliche Kriterien, sondern Umweltzustände herangezogen werden. Damit gibt sie eine extrem pessimistische Einstellung des Entscheiders wieder – der also auf „Nummer Sicher geht“. Diese Vorgehensweise ist bei einer „feindseligen“ Umgebung gerechtfertigt. Für unternehmerische Entscheidungen ist sie jedoch oft überzogen.[79, S.103] Folgt man bei diesem Beispiel der Minimax-Regel, so wird die Alternative Stahlblech mit dem sicheren Ergebnis 0,614 der Alternative Thermoplast mit möglichen Ergebnis 0 vorgezogen.

Der Gegensatz zur Maximin-Regel ist die *Maximax-Regel* – für die Entscheidung wird nur die jeweils beste Werteausprägung herangezogen und damit seitens des Entscheiders



ein unverhältnismäßiger Optimismus angenommen.[85, S. 37]

$$\Phi(A_a) = \max_s M_{as} \quad (4.18)$$

Das Ergebnis einer Entscheidung ist also ebenfalls direkt aus der Ergebnismatrix ersichtlich: Die Alternative Thermoplast ist bei einem Wert von 0,742 auszuwählen. Die Maximax-Regel ist nur dann sinnvoll anzuwenden, wenn die Umwelt mit Sicherheit den für den Entscheider günstigsten Fall annimmt – damit also streng genommen keine Ungewissheit mehr bzgl. der Umweltzustände besteht.[79, S.107]

Das *Hurwicz-Prinzip* verbindet die Aussagen der Maximin- und Maximax-Regeln. Die jeweiligen Werte werden mit einem Optimismusindex  $\alpha$  (mit  $0 \leq \alpha \leq 1$ ) bzw. Pessimismus-Index  $(1 - \alpha)$  multipliziert. Die Summe bildet dann den Wert des Hurwicz-Prinzips [85, S. 37][79, S.107]:

$$\Phi(A_a) = \alpha * \max_s M_{as} + (1 - \alpha) * \min_s M_{as} \quad (4.19)$$

Damit beruht das Hurwicz-Prinzip auf der Bestimmung des Optimismus-Indexes durch den Entscheider. Eine solche – zugegeben doch recht abstrakte – Festlegung gelingt den Entscheidungsträgern i. d. R. jedoch nicht.[85, S. 37]

Für eine diskursive Entscheidungsfindung kann das Hurwicz-Prinzip jedoch auch umgedreht werden. D. h. gesucht wird der Optimismus-Index, bei dem es zu einem Alternativenwechsel kommt, also zwei Alternativen gleichwertig sind.[85, S. 38] Die graphische Darstellung der so ermittelten Intervalle (vgl. Abbildung 4.9) kann dann dem Entscheider zur Entscheidung vorgelegt werden. Im betrachteten Beispiel wird ab dem Schwellenwert 0,827 die Alternative Thermoplast bevorzugt, was eine optimistische Erwartungshaltung voraussetzt.

Da der Entscheider bei Ungewissheit den möglichen Umweltzuständen keine Wahrscheinlichkeiten zuordnen kann oder will, wird in der *Laplace-Regel* die gleichverteilte Wahrscheinlichkeit<sup>7</sup> angenommen. Daher lassen sich die Präferenzwerte als Summe bzw. als Mittelwert der Nutzen darstellen (vgl. 4.9).

$$\Phi(A_a) = \sum_1^s M_{as} \quad (4.20)$$

Die Laplace-Regel bevorzugt mit einem Wert von 1,842 die Alternative Stahlblech.

<sup>7</sup>Es gibt keinen Grund davon auszugehen, dass die Umweltzustände mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten eintreten.

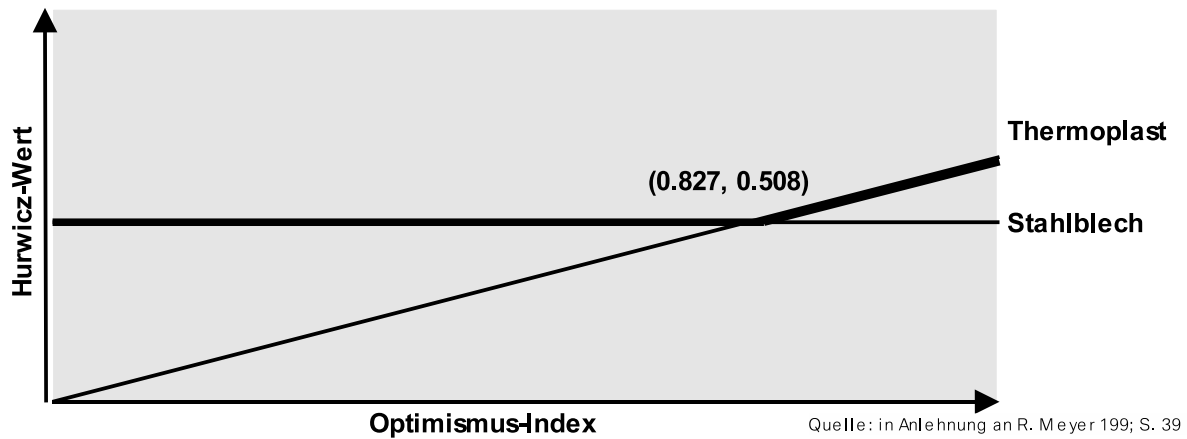


Abbildung 4.9: Diskursive Entscheidungsfindung auf Basis des Hurwicz-Prinzips [85, S. 39]

	$\Gamma = 20^\circ\text{C}$	$\Gamma = 70^\circ\text{C}$	$\Gamma = 100^\circ\text{C}$	$\Phi(A_a) = \sum_1^s M_{as}$
Stahlblech	0,614	0,614	0,614	1,842
Thermoplast	0,742	0,633	0	1,375

Tabelle 4.9: Laplace-Regel

Im Gegensatz zum Hurwicz-Prinzip und der Maximin- bzw. der Maximax-Regel werden bei der Laplace-Regel alle Umweltzustände gleichermaßen berücksichtigt und nicht nur der maximale bzw. minimale Nutzen.[85, S. 40] Die Laplace-Regel stellt damit eine ausgeglichene Bewertung dar und unterstellt ein risikoneutrales Entscheidungsverhalten.

#### 4.4.4 Entscheidung im Karosserie-Leichtbau bei Risiko

Die Laplace-Regel setzt faktisch gleichverteilte Erwartungsstrukturen voraus.[85, S. 40] Werden nun explizite – aber letztlich dennoch subjektive – Erwartungsstrukturen  $w(\Gamma_u)$  hinsichtlich der möglichen Umweltzustände  $\Gamma_u$  gebildet, liegt eine Entscheidung bei Risiko vor (vgl. Tabelle 4.21).

	$\Gamma = 20^\circ$	$\Gamma = 70^\circ$	$\Gamma = 100^\circ$
Erwartungsstruktur	$w(20^\circ) = 65\%$	$w(70^\circ) = 30\%$	$w(100^\circ) = 5\%$

Tabelle 4.10: Erwartungsstruktur

Das Erwartungswert-Kriterium ist das einfachste Verfahren zur Entscheidungsfindung

#### 4.4 Vom Bewerten zum Entscheiden: Entscheidungsverfahren für Karosserie-Leichtbau

unter Risiko. Der Erwartungswert  $EW$  für jede Alternative  $A$  berechnet sich aus der Summe, der mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten  $w_i$  gewichteten Nutzen  $N_i$ . [85, S. 48]

$$EW = \sum_{i=1}^n w_i * N_i \quad (4.21)$$

Mit diesem Erwartungswertkriterium ergibt sich die Ergebnismatrix 4.11.

Wahrscheinlichkeit [ $w$ ]	$\Gamma = 20^\circ$ 65%	$\Gamma = 70^\circ$ 30%	$\Gamma = 100^\circ$ 5%	Erwartungswert $\sum_{i=1}^n w_i * N_i$
EW Stahlblech	0,399	0,184	0,031	$EW(A_{St}) = 0,614$
EW Thermoplast	0,482	0,190	0	$EW(A_{TP}) = 0,672$

Tabelle 4.11: Erwartungskriterium

Nach dem Erwartungswert-Kriterium wird unter den angegebenen Wahrscheinlichkeiten die Alternative Thermoplast ausgewählt.

Das Erwartungswert-Kriterium unterstellt seitens des Entscheiders ein risikoneutrales Verhalten, d.h. die Wahrscheinlichkeit eines Ergebnisses hat keinen Einfluss auf die Nutzenbewertung des Ergebnisses. [85, S. 57] Zurückkommend auf das beschriebene Beispiel bedeutet die Auswahl der Alternative Thermoplast, dass mit 5-prozentiger Wahrscheinlichkeit eine wichtige Eigenschaft – nämlich das Spaltmaß – nicht gewährleistet ist. Deshalb muss überprüft werden, inwieweit ein solches Ereignis zu einer ungünstigen Alternative führen muss.

Mit dem *Erwartung-Nutzen-Prinzip* (Bernoulli-Prinzip) wird in der Entscheidungstheorie versucht das Risikoverhalten des Entscheiders zu berücksichtigen. Es wird also berücksichtigt, inwieweit sich der Entscheider vom Risiko und deren Ergebnisschwankungen beeinflussen lässt. Dazu wird empirisch eine Risikonutzenfunktion ermittelt, und die Werte werden damit zum Erwartungsnutzen transformiert. [42, S. 46][85, S. 53]

In der vorliegenden Arbeit spielt das Erwartungs-Nutzen-Prinzip in der Entscheidungsfindung keine Rolle, da die individuelle Bildung einer Risikonutzenfunktion für die Entscheider nicht erarbeitet werden konnte (vgl. bereits Abschnitt 1.5).

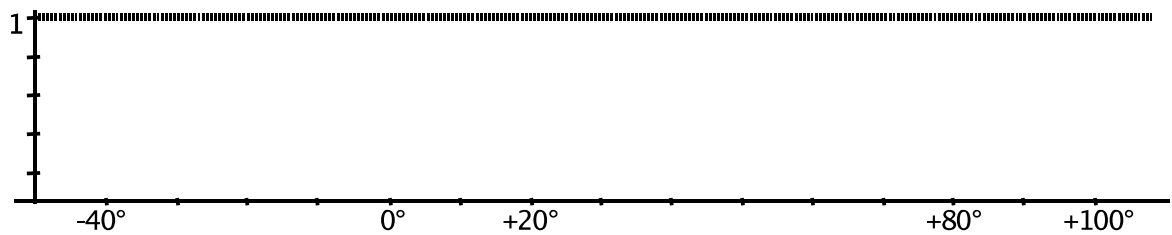
#### 4.4.5 Entscheidung im Karosserie-Leichtbau bei Unschärfe

In dem vorliegenden Entscheidungsproblem weist die Alternative Stahlblech im gesamten Wertebereich eine *gute* Beurteilung für das Spaltmaß auf, während für die Alternative

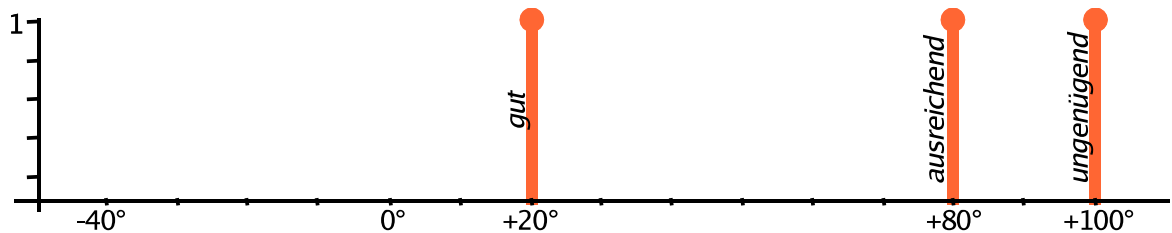
#### 4 Entscheidungsfindung bei Systeminnovationen

Thermoplast drei unterschiedliche Werturteile abgegeben wurden (vgl. Abbildung 4.10).

Alternative Stahlblech: Im gesamten Wertebereich mit „gut“ bewertet



Alternative Thermoplast: Scharfe Zuordnung der Wertzuweisungen



Alternative Thermoplast: Unschärfe Zuordnung der Wertzuweisungen

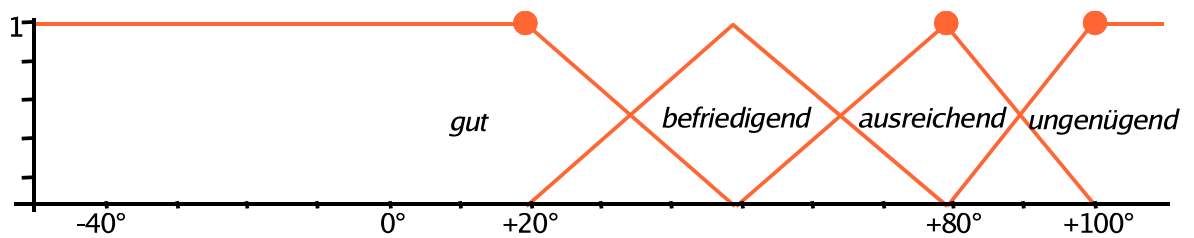


Abbildung 4.10: Linguistische Variable Spaltmaß

So lange bei der Entscheidung die berücksichtigte Temperatur genau eine Bewertung trifft, liegt eine eindeutige – also eine scharfe – Bewertung vor. Alle anderen Temperaturen sind deshalb streng genommen als unscharfe Bewertungen zu behandeln.

Um trotzdem zu einer Entscheidung zu kommen, kann nun die *Theorie unscharfer Mengen* (auch bekannt als Fuzzy Set Theorie) angewandt werden.[66, S.1; 9] Die Theorie unscharfer Mengen beruht auf der Verallgemeinerung der klassischen Mengenlehre, indem sie die Zuordnung zu einer Menge nicht im dualen Kontext bezieht (also im Sinne von  $x \in A$  bzw.  $x \notin A$ ), sondern dazu einen Zugehörigkeitsgrad  $\mu(x)$  im Wertebereich  $[0, 1]$  verwendet.

Eine unscharfe Menge  $\tilde{U}$  ist in der Menge  $X$  mathematisch definiert durch [66, S.18 f.]:

$$\tilde{U} = \{(x, y) \in X \times [0, 1] : y = \mu(x)\} \quad (4.22)$$

Der *Zugehörigkeitsgrad*  $\mu(x)$  gibt dabei an, inwieweit ein Element  $x \in X$  die Eigenschaften der als unscharf definierten Menge  $\tilde{U}$  besitzt. Als Zugehörigkeitsfunktion kommen Optimierungsfunktionen zum Einsatz.[41, S. 71][139]

Auf die definierten unscharfen Mengen lassen sich die für die konventionelle Mengenlehre eingesetzten Verfahren übertragen.[49, S. 72][66, 20-21; 49-60][121, S. 191-198]

Ein Anwendungsbereich der Fuzzy Logik ist die Quantifizierung qualitativer Aussagen durch *linguistische Variablen*. [136, S. 250] Eine solche linguistische Variable besteht aus [66, S. 22 f.]

- der *Basisvariable*( $B$ ), als Bezeichnung der Variablen (Beispiel Produktqualität),
- der *Termmenge*( $T$ ), linguistische, ordnenbare Ausdrücke zur Beschreibung der Variablen (z.B. gering, mittel, hoch)
- dem *Definitionsbereich*( $D$ ), konventionelle Menge als Abbildungsebene und
- der *Semantik*( $S$ ), den unscharfen Mengen, die die Bedeutung der Termmenge im Definitionsbereich beschreiben.

Die Verwendung einer solchen linguistischen Variablen wird im Folgenden an dem Beispiel Spaltmaß näher erläutert. Das Spaltmaß ist also als linguistische Variable (Basisvariable) zu beschreiben.

Neben den ausdrücklich genutzten Termen *gut*, *ausreichend* und *ungenügend* ist die Termmenge um die Ausdrücke *sehr gut* und *befriedigend* zu ergänzen. Damit stellt sich die Termmenge also wie folgt da:

$$T = \{\text{sehr gering, gering, mittel, hoch, sehr hoch}\}$$

Der Definitionsbereich  $D$  umfasst den bei einer Verwendung möglichen Temperaturbereich von  $-40$  bis  $+80^\circ\text{C}$  also  $D = [-40, +80]$ . [13]

Nun besteht die Schwierigkeit für die Alternative Thermoplast darin, den gesamten Wertebereich sinnvoll abzudecken. Dazu werden geeignete Zugehörigkeitsfunktionen verwendet.

#### 4 Entscheidungsfindung bei Systeminnovationen

Da es keine Aussage darüber gibt, wie das Spaltmaß bei Temperaturen unter 20°C zu beurteilen ist, wird dieser Wertebereich gleichmäßig mit *gut* beurteilt. Zwischen 20° und 80°C ist ein Übergangsbereich, der mit *befriedigend* zu kennzeichnen ist. Über 100°C wird das Spaltmaß immer mit *ungenügend* gekennzeichnet sein. Dazu wird im Folgenden als Beispiel die Zugehörigkeitsfunktion unter *octave* für *gut* abgebildet:

```
function ergebnis_gut = TP_Spaltmaß_Zugehoerigkeit_gut (temp)
    if temp <= 20
        ergebnis_gut = 1
    elseif <= 50
        ergebnis_gut = 1 - 1/30*(temp-20)
    else
        ergebnis_gut = 0
    endif
endfunction
```

Analog müssen für das Kriterium Spaltmaß auch die anderen Zugehörigkeitsfunktionen definiert werden. Die gesamte Semantik *S* mit den unscharfen Mengen ergibt sich dann mit folgender Funktion:

```
function ergebnis = TP_Spaltmaß_Zugehoerigkeit (temp)
    ergebnis = [
        TP_Spaltmaß_Zugehoerigkeit_gut(temp)
        TP_Spaltmaß_Zugehoerigkeit_befriedigend(temp)
        TP_Spaltmaß_Zugehoerigkeit_ausreichend(temp)
        TP_Spaltmaß_Zugehoerigkeit_ungenügend(temp)
    ]
endfunction
```

Somit ist die linguistische Variable für das Spaltmaß bei Thermoplasten vollständig in Form von unscharfen Mengen definiert.

Wird für die vorliegende Entscheidungssituation die Präferenzordnung für eine Temperatur von 80°C gebildet, liegt wieder eine Entscheidungssituation unter *Sicherheit* vor. Nun sind zwei Zugehörigkeitsfunktionen betroffen:

```
ergebnis_ausreichend und ergebnis_ungenügend.
```

Zu  $\frac{2}{3}$  kann  $80^{\circ}\text{C}$  noch dem Bereich *ausreichend* zugeordnet werden, während  $\frac{1}{3}$  bereits als *ungenügend* zu bewerten ist.

Für diese Arbeit ist die Theorie der unscharfen Mengen nicht relevant, da die Entscheidungssituation auf wenige Alternativen und Szenarien reduziert werden soll. Mit dem Risikokonzept liegt zudem eine Möglichkeit vor, auch Unsicherheiten bzgl. Wertzuweisungen als einzelne Szenarien zu betrachten und somit auch die *Unschärfe* von Aussagen zu berücksichtigen. Daher wird die Fuzzy Set-Theorie im Weiteren nicht verwendet.

#### 4.4.6 Bedeutung der Entscheidungsverfahren für die Arbeit

Die in den vorherigen Abschnitten dargestellten Entscheidungsverfahren (vgl. Abbildungen 4.11 und 4.12) sind – wie auch schon das stark vereinfachte Beispiel – für die Entscheidungsfindung bei Systeminnovationen unterschiedlich relevant. Die Entsch-

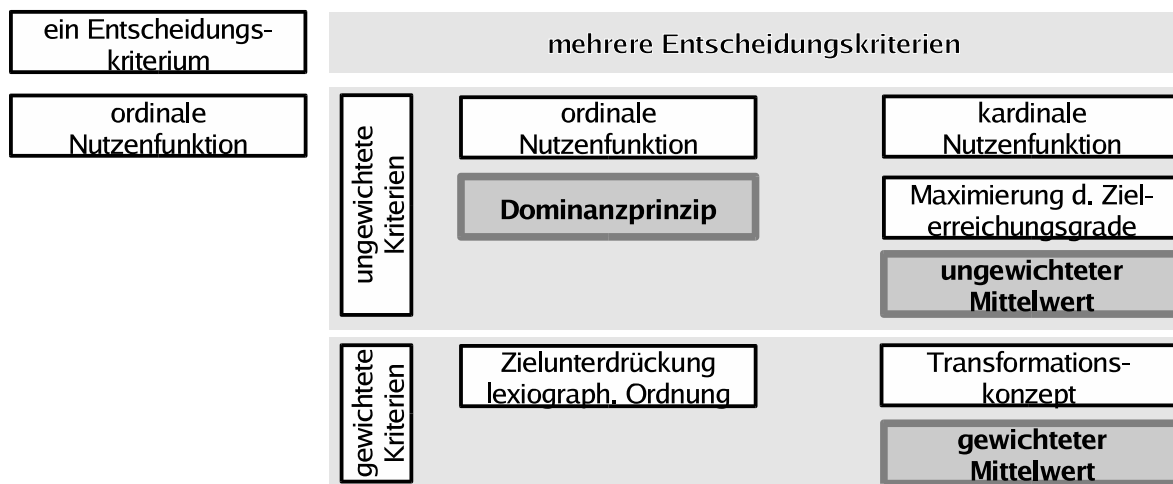


Abbildung 4.11: Mehrkriterielle Entscheidungsverfahren

ungsfindung bei Systeminnovationen und insbesondere die Substitution von Stahl durch unverstärkte Thermoplaste beruht i. d. R. auf mehrere Entscheidungskriterien. Die Entscheidungssituation ist dabei meistens nicht trivial durch das Dominanzprinzip lösbar.

Zielführend für die Lösung der Entscheidungssituation ist die Bildung eines Gesamtnutzens durch ein Mittelwertverfahren. Für die Aufgabenstellung wird das gewichtete Mittelwertverfahren ausgewählt, weil es zu dem noch eine Wichtung der Gewichtungsfaktoren zulässt. Wenn kein Unterschied in der Wichtung zwischen Kriterien vorliegt (Ausgangssituation), so ist der Gewichtungsfaktor gleich groß (0,5).



Abbildung 4.12: Entscheidungsverfahren bei Unsicherheit

Da die Ergebnisse von Innovationen in der Zukunft liegen und daher nicht mit Sicherheit zu bestimmen sind, liegt eine Entscheidungsfindung unter Unsicherheit vor. Als Entscheidungsverfahren wird in dieser Arbeit dabei die Bestimmung des Erwartungswertes präferiert. Die Laplace-Regel stellt dabei einen Sonderfall des Erwartungswertes für die Fälle dar, bei denen keine Erwartungsstruktur gebildet werden kann.

## 4.5 Entscheidungsfindung durch bOSES

In den Software-Prototyp bOSES werden nun diese relevanten Konzepte der Entscheidungsfindung integriert. Der Software-Prototyp beruht zunächst auf der Festlegung des hierarchischen Zielsystems (vgl. Abbildung 4.13). Die Darstellungsform ist äquivalent der Vorgehensweise in der Systemanalyse.

Wie bereits in Abbildung 4.8 dargestellt ist das zweite wesentliche Element von bOSES die Ermittlung von Gewichtungsfaktoren durch den paarweisen Vergleich der Entscheidungskriterien. Dabei ist jeder paarweise Vergleich editierbar. Die Werteingabe wird dann auf eine Referenzzeile zurückgeführt, die die Basis für die Ableitung aller anderen Werte darstellt.

Als Verbindung zwischen der Systemanalyse mit bOSSA und der Entscheidungsempfehlung mit bOSES dient die Eingabe der in bOSSA ermittelten Nutzenwerte je Szenario/Alternative in ein *table*-Widget (siehe Abbildung 4.14). In diesem Arbeitsschritt wird also das hierarchische Zielsystem mit den Handlungsalternativen und den verschiedenen Szenarien zum Entscheidungssystem als Voraussetzung für die Entscheidungsanalyse zusammengeführt.

In der Entscheidungsanalyse wird schließlich der erwartete Gesamtnutzen je Alternative ermittelt (vgl. Abbildung 4.14). Bedeutsam ist dabei noch, dass abhängig von den be-



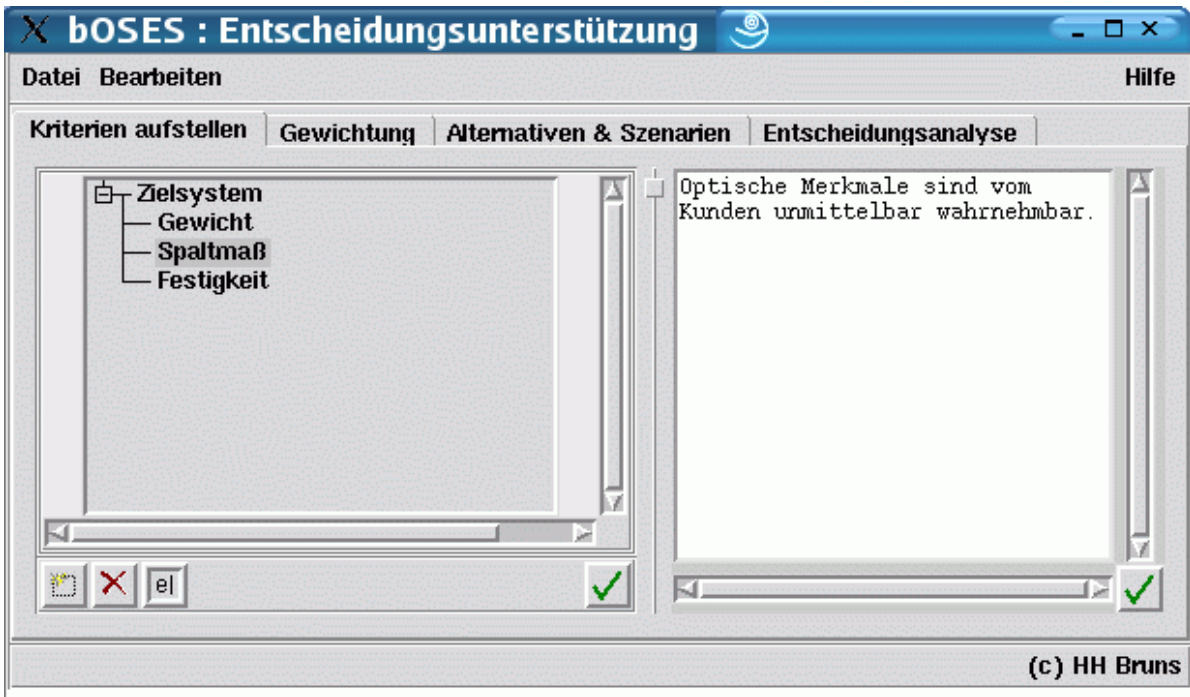


Abbildung 4.13: Hierarchisches Zielsystem in bOSES

trachteten Alternativen – wie im vorliegenden Beispiel – verschiedene Szenarien eintreten können. Abbildung 4.15 fasst die Erkenntnisse aus der Entscheidungstheorie nochmals abschließend zusammen.

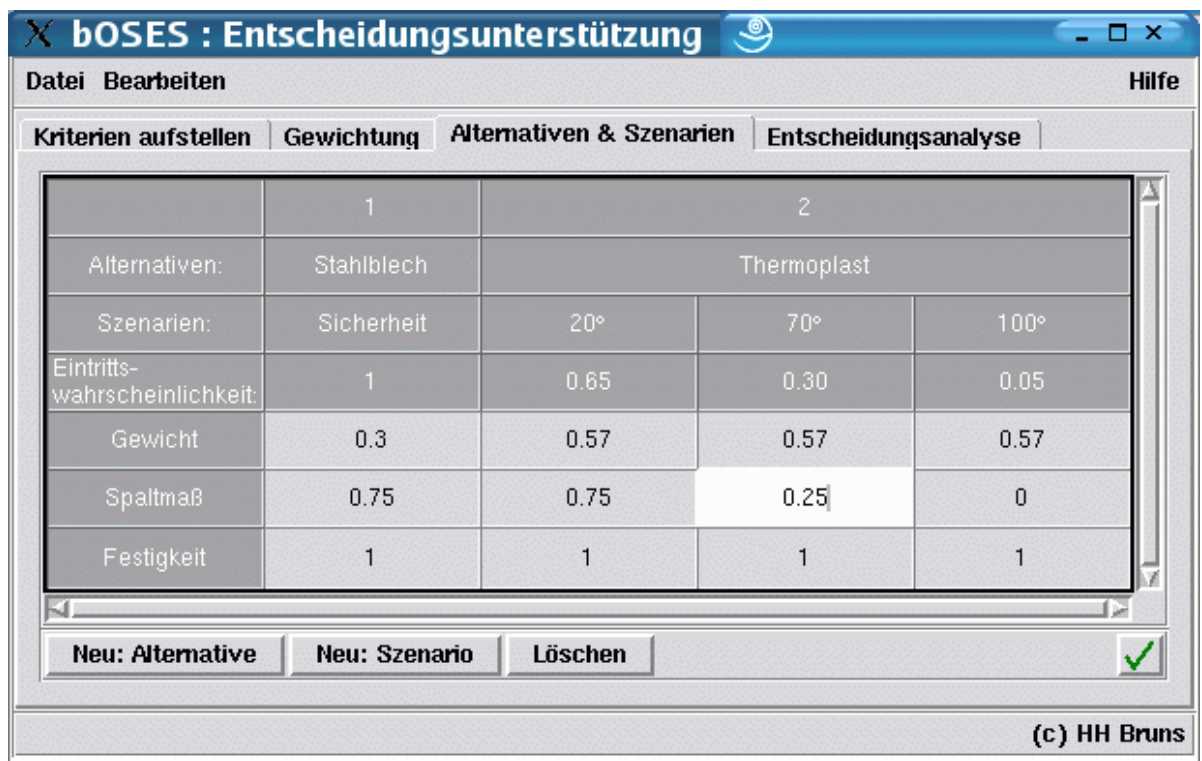


Abbildung 4.14: Alternativen und Szenarien in bOSES

Einleitung	Grundlagen: Entwicklung	Grundlagen: Systeme	Grundlagen: Entscheidung	Anwendung: Thermoplast	Schluss
<ul style="list-style-type: none"> <li>⤵ Die normative Entscheidungstheorie liefert Verfahren zur Bildung einer rationalen Präferenzordnung.</li> <li>⤵ Grundlage ist die Bestimmung des kardinalen Gesamtnutzens, als Bewertung der aus einer Entscheidung resultierenden Ergebnisse.</li> <li>⤵ In der Realität sind Entscheidungen risikobehaftet, d. h. zum Zeitpunkt der Entscheidung liegen nur Erwartungsstrukturen bzgl. der Ergebnisse und deren Bewertung vor.</li> <li>⤵ Im Prototyp bOSES können mehrkriterielle Entscheidungssituationen unter Risiko abgebildet werden.</li> </ul>					

Abbildung 4.15: Überblick und Kernaussagen Kapitel 4

# 5 Entscheidung: Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie

Grundsätzlich lassen sich die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln in einer technologieorientierten bzw. einer komponentenbezogenen Herangehensweise (vgl. Abbildung 5.1) nutzen.

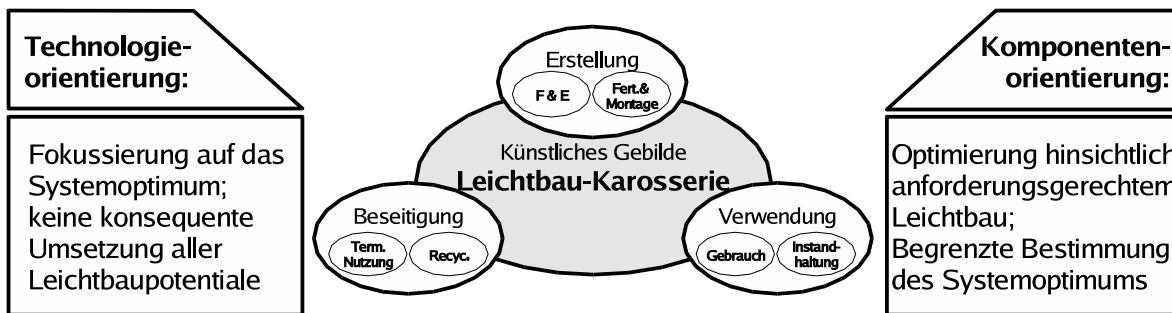


Abbildung 5.1: Technologieorientierung vs. Komponentenorientierung bei der Bewertung von Thermoplastischen Werkstoffen

Die Komponentenorientierung hat den unumstrittenen Vorteil einer anforderungsgerechten Optimierung einzelner, ganz spezifischer Bauteile. D. h., ausgehend von der betrachteten Komponente wird für diese eine optimale Lösung – hier also für die (Teile der) Rohkarosserie ein optimaler Werkstoff – gesucht.

Bei der Technologieorientierung liegt der Untersuchungsfokus auf der Bestimmung möglicher Einsatzgebiete einer spezifischen Technologie<sup>1</sup>. In dem hier betrachteten Fall sind das die Einsatzmöglichkeiten von unverstärkten Thermoplasten. Mit dem möglichen Einsatz in mehreren Bauteilen können unternehmerische Skaleneffekte eintreten und genutzt

<sup>1</sup>Technologie ist in dieser Arbeit im Sinne von Anwendungswissen über naturwissenschaftliche Zusammenhänge zur Lösung praktischer Probleme zu verstehen. In Abgrenzung dazu bezeichnet Technik die Anwendung dieses Wissens in Produkten oder Verfahren.[138, S. 4]

werden. In diesem Fall wird daher stärker das unternehmerisch-wirtschaftliche Optimum gesucht, das sich von bauteilspezifischen Optima unterscheiden kann.

Für die konkrete Entscheidungsfindung in diesem Kapitel wird insofern eine Mischung zwischen diesen beiden Herangehensweisen verwendet, da zum einen mit dem Karosserie-Leichtbau eine komponentenorientierte Vorauswahl getroffen wurde, und zum anderen nur die Technologie unverstärkter Thermoplaste gegenüber der Referenz Stahl berücksichtigt wird. Es werden dabei folgende Punkte bearbeitet:

1. Bezugnehmend auf die Aufgabenstellung der Arbeit (siehe Abschnitt 1.5) wird geklärt, ob der Einsatz von Thermoplasten in der Pkw-Karosserie überhaupt sachtechnisch eine Alternative zu Stahl sein kann. Basis dafür sind die erforderlichen Eigenschaften von Karosserie-Bauteilen (funktionale Systembetrachtung) und deren Erfüllung durch die Materialeigenschaften von Thermoplasten.
2. Zeitgleich – in dieser Arbeit allerdings im Anschluss an die funktionale Betrachtung des Sachsystems dargestellt – sind durch die Analyse der relevanten Handlungssysteme (struktureles Systemkonzept) die Auswirkungen eines Technologiewechsels zu identifizieren.
3. Für die Entscheidungsfindung werden beide Ergebnisse dann durch den Gesamtnutzen (gewichteter Mittelwert; Erwartungsnutzen) zusammengefasst und damit bestimmt, ob die Substitution von Stahl durch unverstärkte Thermoplaste in der Karosserie nach den spezifischen Kriterien des Unternehmens letztlich sinnvoll ist.

Um diese Zielsetzungen zu erreichen, kommen die Methoden und Werkzeuge der Systemtheorie und der Entscheidungstheorie zum Einsatz. Abbildung 5.2 zeigt das Zusammenspiel der im Folgenden eingesetzten Methoden zur Entscheidungsfindung im Karosserie-Leichtbau.

### 5.1 Karosserie-Leichtbau als Sachsystem

Für den ersten Schritt – der grundsätzlichen Prüfung von Thermoplasten als Werkstoff in der Leichtbau-Karosserie – werden die sachtechnischen Anforderungen an eine Karosserie bestimmt. Ausgangspunkt ist die funktionale Betrachtung des Sachsystems im Kontext mit dem Handlungssystem Gebrauch und der relevanten Umwelt (vgl. Systemmodelle der

Zielsetzung	Methode	Mittel
<b>Analyse des Sachsystems:</b> Grundsätzliche Eignung der Alternativen	funktionale Systembetrachtung hierarchische Systembetrachtung binäre Bewertung (Ausschlusskriterien) Effizienz gewichtete Bewertung Erwartungswert (Risiko)	bOSSA  bOSES
<b>Analyse Handlungssysteme:</b> Auswirkungen & Eignung der Alternativen	strukturelle Systembetrachtung funktionale Systembetrachtung binäre Bewertung (Ausschlusskriterien) Effizienz gewichtete Bewertung Erwartungswert (Risiko)	bOSSA  bOSES
<b>Entscheidungsfindung:</b> Unternehmerische Bewertung	Entwicklungsszenarien gewichtete Bewertung Erwartungswert (Risiko)	bOSES

Abbildung 5.2: Verwendete Methoden

Technik im Abschnitt 3.6). D. h., es werden konkret jene Eigenschaften des Sachsystems Karosserie-Leichtbau untersucht, die während der Gebrauchsphase – unter verschiedenen Umwelteinflüssen – für den Nutzer von Bedeutung sind.

### 5.1.1 Funktionale Betrachtung der Pkw-Karosserie

Die funktionale Betrachtungsweise (vgl. die Erläuterungen zum funktionalen Systemkonzept im Abschnitt 3.1) geht vom dem Sachsystem als Ganzes aus und weist diesem übergeordnete Funktionen zu.

Im Ursprung stellt das System Pkw ein Transportmittel für Insassen und Gepäck mit einem eigenen Antrieb dar. Die Karosserie muss also alle *Subsysteme aufnehmen*, die zur gesteuerten Fortbewegung erforderlich sind, und zugleich den *Insassen* (ggf. mit Gepäck) *ausreichend Raum zur Verfügung* stellen. In Kombination mit den Umsystemen – z. B. Klima oder Verkehrsteilnehmer – und dem Anspruch, die Insassen weitgehend davor zu schützen, besitzt die Karosserie eine *Schutzfunktion* vor Wiedereinflüssen und ggf. Unfällen. Heute sind neben diesen Grundattributen auch *Gestaltungsfunktionen* der Karosserie besonders wichtig.

Die bereits in der Einleitung als Abbildung 1.2 gezeigten Funktionen lassen sich in dem Prototyp zur Systemanalyse bOSSA mit ihren Unterfunktionen dem Sachsystem Karos-

serie als Blackbox-Modell zuordnen (vgl. Abbildung 5.3). Da diese Arbeit sich auf die mögliche Substitution des Karosseriewerkstoffes konzentriert, beschränkt sich die weiterführende Diskussion auf die Funktionen, die durch eine Werkstoffsubstitution und damit durch veränderte Werkstoffeigenschaften betroffen sein könnten.

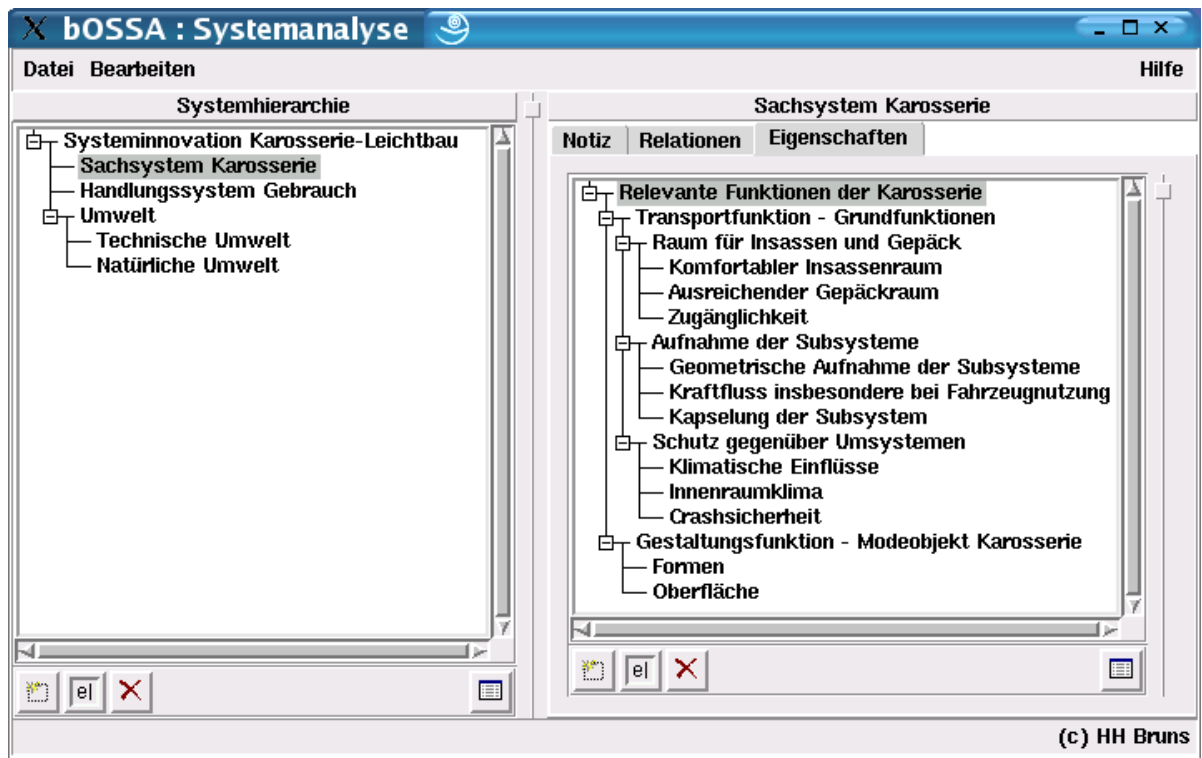


Abbildung 5.3: Relevante Funktionen des Sachsystems Karosserie

Diese Arbeit unterscheidet dazu zwischen mechanischen Werkstoffeigenschaften, thermischen Werkstoffeigenschaften, Oberflächeneigenschaften, der Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien und sonstigen Eigenschaften.

Die in Abbildung 5.3 beschriebenen Grundfunktionen sind unterschiedlich stark von diesen Werkstoffeigenschaften abhängig. Dieser Zusammenhang zwischen Werkstoff und Grundfunktionen ist übersichtlich in einer Matrix darstellbar (vgl. Abbildung 5.4).

Ausgehend von dieser Matrix kann die Anzahl der zu betrachtenden Grundfunktionen weiter reduziert werden. Besonders relevant für die weitere Analyse sind demnach die folgenden Grundfunktionen:

1. Kraftfluss, ausgelöst durch die Aufnahme von Subsystemen und durch verschiedene Fahrzustände,

		mech. Eigenschaften			therm. Eigenschaften			Oberfläche			Beständigkeit			sonst. Eigenschaften		
		Festigkeit	Steifigkeit	spez. Gewicht	Wärmeleitfähigkeit	Wärmekapazität	Längenausdehnung	Oberflächengüte	Oberflächenhärte	Farbe	Zeitabhängigkeit	Temperaturabhängigkeit	Beständigkeit gegen Umwelt	elektrische E.	magnetische E.	physiologische E.
Raum für Insassen und Gepäck	Insassenraum	△	△													●
	Gepäckraum	△	△													△
	Zugänglichkeit	△	△													
Aufnahme der Subsysteme	Aufnahme Subsystem	△	△	△									△	△		
	Kraftfluss	●	●	○			●				●	●	●			
	Kapselung	○	○	●	△		△					△		△	△	
Schutz vor Umssysteme	klimatische Einflüsse				○		△					△				
	Innenraumklima				○	○										
	Passive Sicherheit	●	●	○							●	●	●			
Gestaltungsfunktion	Formen	○	○	△			●				○	○	○			
	Oberfläche							●	●	●	●	●	●			




 schwacher Zusammenhang     
  mittlerer Zusammenhang     
  starker Zusammenhang

Abbildung 5.4: Beziehungen zwischen Grundfunktionen und Werkstoffeigenschaften

2. Passive Sicherheit und
3. Formen und Oberflächen zur Erzielung von Gestaltungsfunktionen.

Diese relevanten Systemeigenschaften (Attribute) des Sachsystems müssen während der gesamten Nutzungszeit bei allen denkbaren Betriebszuständen zuverlässig gewährleistet sein. Dafür müssen auch die relevanten Attribute der technischen oder natürlichen Umwelt bestimmt und die funktionalen Abhängigkeiten aufgezeigt werden.

### 5.1.2 Kraftfluss

Auf die Karosserie werden während der Fahrt Kräfte über Achsen, Getriebe und Motor eingeleitet. Sie entstehen als Folge der Zuladung (Personen, Gepäck, Dachlast) oder infolge besonderer Betriebszustände wie bei der Benutzung des Wagenhebers, dem Abschleppen des Fahrzeuges, Anhängerlasten usw. Als Lastfälle treten dabei Biegung und Torsion auf [101, S. 280-285][1, S. 137-140][37]:

## 5 Entscheidung: Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie

- Strukturbelastungen durch Eigengewicht, Einbaumassen, Insassen und Zuladung (Biegung) im Fahrzeugstillstand,
- Radlaständerung in einer Fahrzeugachsquerebene (Torsion),
- Strukturbelastung durch vertikale Fahrbahnstöße (Biegung) bei stationärer Geradeausfahrt,
- Strukturbelastungen durch Längskräfte und Triebwerksreaktionsdrehmoment (Biegung und Torsion) bei Längsbeschleunigung,
- Strukturbelastungen durch Längskräfte (Biegung und Torsion) bei einer Vollbremsung (Längsrichtung),
- Strukturbelastung durch Querkräfte (Biegung und Torsion) bei stationärer Kurvenfahrt und
- ggf. Biegung, Torsion bei auftretenden Windlasten (betrifft insbesondere Anbauteile wie z. B. Klappen).

Bei der Karosserieauslegung wird dabei nicht nur die Betriebsfestigkeit, um einen Versagensfall zu verhindern, sondern auch die plastische Verformung und – um die Funktion einzelner Subsysteme gewährleisten zu können – die elastische Verformung berücksichtigt. Die statisch auftretenden Lastfälle sind für normale Betriebszustände, wie sie im alltäglichen Gebrauch auftauchen können, als Mussziele zu sehen. Mit einer Verschiebung des Einsatzzweckes z. B. in Richtung Gelände sind die Anforderungen aus den zu erwartenden Lastfällen dabei deutlich höher.

Aus diesen – in der Praxis kombiniert auftretenden – Lastfällen resultieren neben den statischen Beanspruchungen auch Biege- und Torsionsschwingungen. Diese beeinträchtigen ebenfalls Fahrsicherheit und Komfort. Je steifer eine Karosserie ist, also je geringer sie Verformungen im Fahrbetrieb zulässt, desto besser kann sich das Fahrwerk den jeweiligen Gegebenheiten der Fahrzustände anpassen.

Die Schwingungen des Gesamtfahrzeugs im Frequenzbereich von 1-25 Hz werden je nach Richtung, Dauer und Amplitude von den Insassen als mehr oder weniger starke Belastung empfunden und beeinflussen die Konditionssicherheit. Deshalb orientiert sich die Karosserieauslegung neben der Dauerfestigkeit auch an das Komfortempfinden der Fahrzeuginsassen während des Fahrbetriebes. Für die Beurteilung des Komfortempfindens



kann analog zum bewerteten Schalldruckpegel, die in der VDI-Richtlinie 2057 definierte frequenzbewertete Schwingungsstärke K verwendet werden.[126]

Neben diesen Gesamtfahrzeugschwingungen führen eingeleitete statische Kräfte auch zu Schwingungen einzelner Bauteile. Solche Bauteil-Vibrationen ebenso wie daraus möglicherweise entstehende Geräusche (Klappern, Knarzen) werden heute von den Kunden als störend wahrgenommen und nicht mehr akzeptiert.

### 5.1.3 Passive Sicherheit

Die Erhöhung der Passiven Sicherheit<sup>2</sup> – also Maßnahmen zur Minderung möglicher Unfallfolgen[74, S. 3] – ist eines der Hauptziele in der Karosserieauslegung, schließlich sind allein in der Bundesrepublik Deutschland 1998 bei 2.257.649 gemeldeten Unfällen 7.792 Personen getötet und 497.319 Personen verletzt worden[93].

Die Passive Sicherheit hat immer zwei Seiten (vgl. Abbildung 5.5)[74, S. 142]:

<b>Passive Sicherheit</b>		
	<b>äußere Sicherheit</b>	<b>innere Sicherheit</b>
<b>Zielsetzung</b>	<b>Partnerschutz</b> insbesondere Fußgänger und Radfahrer: Verletzungsschwere durch geeignete Gestaltung der Kontaktzonen mildern	<b>Insassenschutz:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrenzung der auf die Insassen wirkenden Kräfte und Beschleunigungen</li> <li>• Überlebensraum sichern</li> <li>• Insassenbefreiung gewährleisten</li> </ul>
<b>Einflussfaktoren</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformationsverhalten der Karosserie</li> <li>• Karosserieaußenform</li> <li>• glatte Oberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformationsverhalten der Karosserie</li> <li>• Festigkeit der Fahrgastzelle und Größe der Überlebensraums</li> <li>• Rückhaltesysteme</li> <li>• Aufschlagbereich</li> <li>• Lenksystem</li> <li>• Insassenbefreiung</li> <li>• Brandschutz</li> </ul>

Abbildung 5.5: Passive Sicherheit

- den seit langem verfolgten Insassenschutz und

<sup>2</sup>Aktive Sicherheit bezeichnet im Gegensatz dazu das Sicherheitsniveau zur Verhinderung eines Unfalls und umfasst Fahrsicherheit, Konditionssicherheit, Wahrnehmungssicherheit und Bedienungssicherheit.[26, S. 726]

## 5 Entscheidung: Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie

- den zunehmend wichtiger werdenden Partnerschutz, insbesondere von Fußgängern und Radfahrern.

Zielsetzung des Insassenschutzes ist es, die auf den Insassen wirkenden *Kräfte* und *Beschleunigungen* *niedrig zu halten* und einen *Überlebensraum* – inkl. *Brandschutz* durch *Dichtigkeit der Kraftstoffanlage* – sowie die Möglichkeit der *Insassenbefreiung* zu *gewährleisten*. [101, S. 185]

Die auf den Insassen wirkenden Kräfte und Beschleunigungen werden durch Crashversuche ermittelt und mit Grenzwerten verglichen. [74, S. 102-132][1, S. 279] Zentrale Größe der Karosserieauslegung ist das Energieabsorptionsvermögen der Karosserie durch den Geschwindigkeitsabbau entlang des Verformungsweges.

Am häufigsten ist der Frontcrash – also der Frontalaufprall, der linke und rechte Offsetcrash – mit einem Anteil von 64% am Unfallgeschehen (vgl. Abbildung 5.6). [26, S. 728][74, S. 28-31][39]

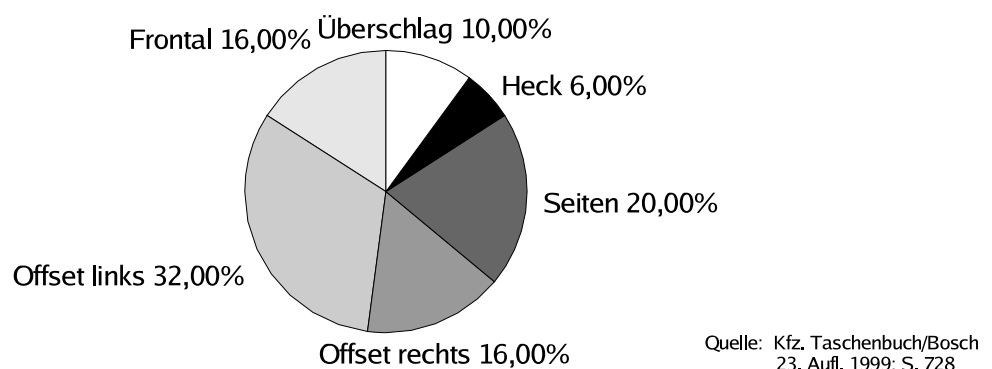


Abbildung 5.6: Unfallverteilung auf Kollisionsarten

Die volle Überdeckung im Frontaufprall – also der Frontalzusammenstoß – tritt seltener auf als die teilweise Überdeckung im so genannten Offsetcrash. Durch die kleinere Krafteintrittsfläche im Offsetcrash steigt die strukturelle Belastung der Karosserie und infolge die Gefährdung des Überlebensraums.

Die Auslegung für den Seitenaufprall ist wegen des geringen möglichen Verformungswegs und der hohen strukturellen Belastungen eine besondere Herausforderung. [101, S. 194-195] Zusätzliche Crashversteifungen können zwar die Innenraumintegrität erhöhen, bieten aber keinen Abbau von Beschleunigungskräften.

Bei den selteneren Heckkollisionen ist die Belastung der Insassen durch auftretende Beschleunigungen weniger kritisch, da i. d. R. am Heck ein ausreichender Verformungsbereich zur Verfügung steht und die Insassenbeschleunigung über den Sitz (Kopfstütze) niedriger als die Fahrzeugverzögerung ist.

Der größte Anteil der Unfälle ereignet sich jedoch bei niedrigeren Geschwindigkeiten und führt daher nur zur geringen Gefährdung der Fahrzeuginsassen. Um die Instandsetzungskosten und gleichermaßen auch Versicherungskosten (Einstufung in die Vollkasko) bei Bagatellschäden zu mindern, wird der Fahrzeugschutz bei der Karosseriekonstruktion ausdrücklich berücksichtigt. Grundkonzept ist der Schutz reparaturkostenintensiver (oder im Ersatz teurer) Bauteile, indem gezielt auswechselbare Deformationselemente eingesetzt werden.

Neben dem Insassenschutz wird der Partnerschutz immer bedeutender. Partnerschutz bezieht sich dabei sowohl auf das Crashverhalten bei unterschiedlichen Fahrzeugmassen (Unfallkompatibilität) als auch zunehmend auf externe Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Radfahrer. Diese sind im Verkehrsgeschehen besonders gefährdet. Rund 80 % aller verletzten Fußgänger kollidieren mit einem Pkw. Unfälle mit Geschwindigkeiten über 50 km/h verlaufen in der Regel tödlich.

Die Unfallfolgen können für Fußgänger durch folgende Maßnahmen vermindert werden[74, S. 205-209]:

- Eine niedrige erste Kontaktstelle (Schienbein) ermöglicht das Aufschaukeln des Fußgängers.
- Glattflächige Fahrzeugaußenflächen ohne harte überstehende Anbauteile verringern die Verletzungsgefahr.
- Nachgiebige Aufschlagflächen übernehmen beim Aufprall Kraftspitzen.

### 5.1.4 Gestaltungsfunktion Form und Oberfläche

Mit der Entwicklung des Kulturgutes Automobil in den vergangenen 100 Jahren ist auch ein ausdifferenziertes Anspruchsniveau der Kunden entstanden. Heute müssen neben den ursprünglichen Basisanforderungen ästhetische Ansprüche berücksichtigt werden.[119, S. 1f.][78, S. 139]

## 5 Entscheidung: Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie

Dieser individual-ästhetische Anspruch ist in seiner Bedeutung stark gestiegen, denn der durchschnittliche Kunde ist heute nur noch bedingt in der Lage die technischen Unterschiede zwischen den Modellen unterschiedlicher Anbieter zu erfassen. Deshalb versuchen die Automobilhersteller sich durch charakteristische Gestaltungsmerkmale von den anderen Wettbewerbern abzuheben und dabei einen markenbildenden Wiedererkennungseffekt zu etablieren.[78, S. 140][1, S. 53]

Die Karosserie wird von den Kunden dabei am stärksten wahrgenommen. In dieser Arbeit geht es nicht darum, gutes oder schlechtes Design zu bewerten, sondern die Designmöglichkeiten, die eine Werkstoff/Verfahrenskombination bietet, aufzuzeigen. Dabei kann grundsätzlich zwischen Form und Oberfläche unterschieden werden.

Bei der Form geht es um die möglichen zu erzielenden Formen. Formelemente sind Radien und Flächen/Wandstärkenverhältnisse. Mit kleinen Radien lassen sich die charakteristischen Fahrzeuglinien deutlich herausarbeiten. Für große Außenhautflächen benötigt man ein großes Flächen/Wandstärkenverhältnis. Neben den Materialkennwerten (Spannungsrissempfindlichkeit, (Beul-)Steifigkeit) sind auch verfahrenstechnische Gegebenheiten ausschlaggebend für die geometrischen Designmöglichkeiten. In dem hier betrachteten Fall wird Stahlblech durch Tiefziehen und Thermoplaste durch Spritzgießen um bzw. urgeformt.

Im Zusammenspiel mit angrenzenden Bauteilen sind vor allem die Übergänge – was sich z.B. im so genannten Spalt- oder Fugenmaß [1, S. 56] widerspiegelt – zu beachten. Hier zählt neben der präzisen konstruktiven Bauteilabstimmung auch die Möglichkeit der späteren Anpassung eine bedeutende Rolle.

Für die Bewertung der Oberfläche sind neben der Gleichmäßigkeit (Welligkeit und Oberflächenfehler) auch Farbe/Farbglanz charakteristisch.

Erschwert werden diese Anforderungen im direkten Vergleich bei angrenzenden Bauteilen (Colormatching). In der Automobilindustrie hat sich dazu der Begriff Class-A-Oberflächenqualität etabliert, der den höchsten Anspruch an eine Automobiloberfläche in der Karosserie-Außenhaut charakterisiert. Zurzeit ist der Maßstab für die Oberflächenqualität die lackierte Stahlblechauten.[105, S. 4-5;17-19][78, S. 142-144][9] [36, S. 312]

### 5.1.5 Relevante Umwelteinflüsse während der Nutzungsdauer

Die in den vorhergehenden Abschnitten dargestellten Grundfunktionen einer Pkw-Karosserie sollen innerhalb der gesamten Nutzungsdauer unter den verschiedenen Einsatzbedingungen gewährleistet werden. Als Nutzungsdauer wird üblicherweise eine Lebensdauer von zehn Jahren bei einer Laufleistung von 200.000 km veranschlagt.<sup>3</sup> Man unterscheidet bei der Lebensdauerbetrachtung folgende Stressfaktoren:

- mechanischer Stress,
- klimatischer Stress (Feuchte, Sonneneinstrahlung, thermischer Stress),
- Schadgase und Chemikalien sowie
- biologische Einflüsse.

Unter mechanischem Stress versteht man alle Belastungsarten, die in ihren Grundzügen auf mechanischen Einflüssen basieren. Ursache für mechanische Belastungen sind die bereits als Kraftfluss genannten Zusammenhänge, die aufgrund ihrer lang anhaltenden Einwirkdauer auch zu einem Langzeitversagen führen können. Neben statischen Kräften sind vor allem dynamische Belastungen für die Bauteilbelastung kritisch.

Klimatischer Stress wird durch den Feuchtegehalt der Luft, die Sonneneinstrahlung und schließlich durch die Umgebungstemperatur ausgelöst. Durch den Feuchtegehalt der Luft kann es zu *Absorption* (Einlagerung von Wassermolekülen in die Molekülstruktur), *Adsorption* (Anlagerung von Wassermolekülen aufgrund von Adhäsionskräften an der Oberfläche) und *Betauung* (Bildung eines Wasserfilms bei Unterschreiten des Taupunktes) kommen. Hohe Feuchtigkeit ist aber auch eine Ursache für *Korrosions*prozesse, bei denen ein energiereicher Stoff in einen energieärmeren Stoff umgewandelt wird.

Die *Sonne* mit der kurzwelligen UV-Strahlung hat einen zerstörerischen Einfluss auf organische Materialien. Bei Kunststoffen kann es zum Aufbrechen der Makromoleküle kommen, was sich äußerlich als Auskreiden zeigt und gleichzeitig auch die mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit und Elastizität herabsetzt.

Die langwelligen Anteile der Sonnenstrahlung sorgen abhängig von der Lackierung (vgl. Tabelle 5.1) für eine Erwärmung der bestrahlten Körper und führen dadurch zu besonders hohem thermischem Stress. Die *Längenausdehnung* der Bauteile führt durch ein

<sup>3</sup>Heute hält ein Fahrzeug im Schnitt 12,4 Jahre mit einer durchschnittlichen Laufleistung von 240.000 km.

mechanisch überbestimmtes System oft zu einem Fehlermechanismus. Der dabei wirksame werkstoffabhängige Ausdehnungskoeffizient ist wiederum selber temperaturabhängig.

Farbe	Oberflächentemperatur [C°]
schwarz	80°
braun	76°
blau	72°
grün	71°
rot	64°
weiß	52,5°

Tabelle 5.1: Einfluss der Lackierung auf die Oberflächentemperatur [64, S. 107]

Während des Nutzungszeitraums kommen Karosserien mit unterschiedlichen *Schadgasen* in Berührung. Die höchste Belastung tritt in Städten und industriellen Ballungsräumen auf. Schädigende Stoffe sind dabei *Schwefeldioxid* (SO<sub>2</sub>), *Schwefelwasserstoff* (H<sub>2</sub>S), Bodennahes *Ozon* (O<sub>3</sub>), *Stickoxide* (NO<sub>x</sub>) und das hochgiftige *Chlor* (Cl<sub>2</sub>)

Neben diesen Gasen kommt die Karosserie oftmals mit flüssigen Chemikalien (Mineralöl, Benzin, Benzol, Diesel, Alkohol, starke Säuren und Laugen) z. B. in Form von Reinigungsmitteln in Kontakt. Angestrebt wird die ausreichende chemische Beständigkeit der Bauteile im späteren Einsatz gegenüber den wahrscheinlich auftretenden, aggressiven Medien.

Auch biologische Einflüsse wie z. B. Schimmelpilze, Insekten und Nagetiere können technische Erzeugnisse schädigen. Schimmelpilze benötigen zu ihrem Wachstum Wasser und als Nahrung organische Verbindungen. Einige Schimmelpilze sind dabei sogar in der Lage Kunststoffe abzubauen. Insekten und Nagetiere können durch Verbiss Schäden an technischen Systemen anrichten.

In der Realität treten die Stressfaktoren häufig gleichzeitig auf. In umfangreichen Versuchsanordnungen wird das Bauteilverhalten daher kombiniert simuliert.

### 5.1.6 Zusammenfassung der relevanten Attribute in bOSSA

Die in den vorherigen Abschnitten für eine Entscheidungsfindung bei einer Werkstoffsubstitution dargestellten relevanten Attribute sind in ihrer Vollständigkeit alle gleichermaßen in den Fachbereichen zu berücksichtigen (siehe dazu nochmals Kapitel 2 Abbildung 2.5).

Für eine übergeordnete Entscheidungsfindung muss diese Detailkomplexität jedoch deutlich reduziert werden, d. h. die Fachbereiche aggregieren ihre Detailschätzungen zu zusammenfassenden Begrifflichkeiten, die wiederum zu Gruppen geordnet werden (vgl. Komplexitätsbewältigung durch Reduktion und Komplexbildung in Abbildung 3.7, Abschnitt 3.4). Abbildung 5.7 zeigt diese wesentlichen Attribute der Gesamtkarosserie.

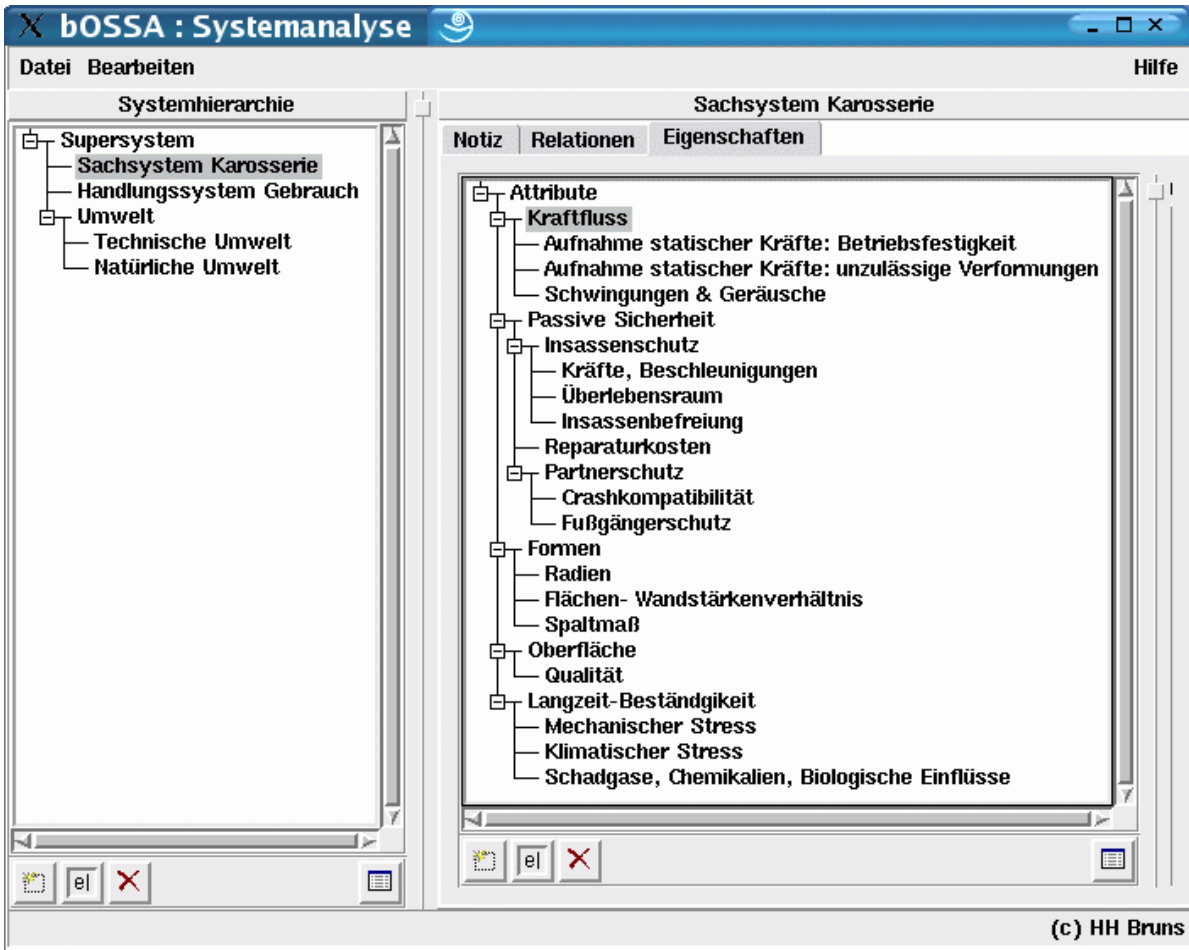


Abbildung 5.7: Für eine Entscheidungsfindung relevante Attribute des Sachsystems Karosserie in bOSSA

Weil die Anforderungen in den verschiedenen Subsystemen der Karosserie jedoch höchst unterschiedlich zu bewerten sind, kann eine rein funktionale Betrachtung der Gesamtkarosserie für die Werkstoffauswahl alleine nicht geeignet sein.

Deshalb wird im nächsten Abschnitt das hierarchische Systemkonzept eingesetzt, um einzelne Systemelemente des Sachsystems und deren Beziehungen untereinander zu identifizieren und diesen dann ein spezifisches Eigenschaftsprofil zuzuweisen.

## 5.2 Hierarchische Betrachtung des Sachsystems Karosserie-Leichtbau

Die hierarchische Betrachtung des Sachsystems (vgl. dazu Abschnitt 3.1) liefert den inneren Aufbau der Karosserie mit den verschiedenen Subsystemen. Als Voraussetzung der hierarchischen Analyse muss zunächst zwischen den verschiedenen Karosserie-Bauweisen unterschieden werden:

### **Chassis-Bauweise**

Ursprünglich wurde im Automobilbau die Chassis-Bauweise verwandt. Dabei bilden das Fahrgestell und die Karosserie zwei unabhängige Einheiten. Das Fahrgestell nimmt alle wesentlichen Fahrzeugteile wie Antriebsaggregat, Radaufhängungen und Lenkung auf und ist durchaus auch ohne Karosserie fahrfähig. Die Hauptkarosserie hat kaum eine tragende Funktion. Heute findet die Chassis-Bauweise noch Anwendung bei Nutzfahrzeugen (wegen der flexiblen Aufbauten) und bei Geländewagen (wegen der erforderlichen hohen Torsionssteifigkeit).[1, S. 70][101, S. 255 f.]

### **Mittragende Bauweise**

Dieses Konstruktionsprinzip kam nur kurzzeitig zur Anwendung. Im Gegensatz zum durchgehenden Fahrgestell in der Chassis-Bauweise werden bei dieser Ausführung zwei nicht direkt miteinander verbundene Vorder- und Hinterrahmenteile an der Karosserie befestigt. Die mittragende Bauweise ist heute zu vernachlässigen.[1, S. 70][101, S. 259]

### **Selbsttragende Bauweise**

Heute wird im Automobilbau überwiegend die Selbsttragende Karosserie eingesetzt. Alle Funktionen, insbesondere die Aufnahmepunkte für den Motor und das Fahrgestell, sind in die Karosserie integriert. Die Fahrgastzelle bildet hierbei die zentrale Einheit und muss mit dem Vorder- und Hinterwagen zu einer funktionalen Gesamteinheit verbunden werden. Heutige Karosseriekörper stellen bei der Selbsttragende Bauweise eine Kombination von verschiedenen Struktur- und vor allem Schalenkomponenten dar. Deshalb wird sie oftmals auch als Schalenbauweise bezeichnet. Während die Fahrgastzelle besonders formstabil ausgelegt ist, übernehmen die Front- und Heckpartie die Funktion von Knautschzonen.[1, S. 70 f.][101, S. 257 f.]



## **Skelettbauweise**

Bei dieser Bauweise bildet ein Strukturskelett ein solides Karosseriegerippe, auf das die sekundären und tertiären Karosserieteile wie Dach, Seitenwände oder Türen befestigt werden. Dieses Konstruktionsprinzip findet heute mit der so genannten (Alu-) Space-Frame-Technologie neue Verbreitung. Die Space-Frame-Karosserie setzt sich aus geschlossenen, geraden oder gebogenen Strangpressprofilen zusammen, die durch hochbeanspruchte Eck- und Verbundpunkte – so genannte Knoten – miteinander verbunden werden. An diesem Strukturskelett sind die Außenhautflächen befestigt, ohne dass diese noch tragende Funktionen übernehmen müssen.[1, S. 71 f.][101, S. 272 f.]

Die weitere Systemanalyse wird aufgrund des heute vorherrschenden Einsatzes auf die Selbsttragende Bauweise begrenzt, auch wenn die Space-Frame-Technologie den Einsatz verschiedener Materialien im Strukturskelett und der Außenbeplankung zulässt und deshalb besonderes Leichtbau-Potential besitzt.

### **5.2.1 Baugruppen der Selbsttragenden Karosserie**

#### **Fahrgastzelle**

Zentrale Bedeutung für einen Pkw hat die stabile Fahrgastzelle (zur Insassenaufnahme), die den Überlebensraum auch bei schweren Unfällen sicherstellen muss. Dazu werden stabile und entsprechend ihrer Belastungsart optimierte Trägersysteme im Stirnwand-, Bodengruppen-, Seitenrahmen- und Dachbereich integriert. Bei der heute üblichen Selbsttragenden Karosserie-Bauweise muss die Fahrgastzelle zudem auch die statische und dynamische Steifigkeit gewährleisten.

Die Bodengruppe inkl. Kardantunnel ist praktisch das Rückgrat der Gesamtkarosserie. Bei der konstruktiven Formgebung müssen geometrische Anforderungen wie Innenraumgestaltung, Abgas- und Antriebsstrang, Bremsflüssigkeits- und Treibstoffleitungen und aerodynamische Anforderungen des Unterbodens sowie akustische Anforderungen berücksichtigt werden. Aber vor allem die Aufnahme von Crashkräften – insbesondere beim Seitencrash – erfordert umfangreiche Versteifungen. Die Bodengruppe unterliegt keinen hohen gestalterischen Ansprüchen. Für die erforderliche Steifigkeit müssen bei der Vielzahl der geometrischen Restriktionen jedoch komplexe Formen realisiert werden.[1, S. 77 f.]

Der Seitenrahmen enthält die A-, B- und C-Säule sowie den Dachrahmen und den Schwel-  
ler. Der Seitenrahmen unterliegt im Wesentlichen Biegebeanspruchungen und Verdrehbe-  
lastungen. Beim Seitencrash müssen die in die Tür eingeleiteten Kräfte über die Säulen  
gleichmäßig in die Bodenanlage und die Dachstruktur eingeleitet werden, wodurch sehr  
hohe Torsionsbelastungen auftreten können. Kritisch ist zudem auch der Überschlag. Ne-  
ben diesen Anforderungen seitens des Kraftflusses und der Passiven Sicherheit unterliegt  
der Seitenrahmen – trotz der nur kleinen Flächen – Design-Anforderungen. Insbesondere  
das Zusammenspiel mit der großflächigen Tür ist dabei kritisch.[1, S. 75 f., 92]

Auch die Dachkonstruktion muss Kräfte, insbesondere Crashkräfte, übertragen. Für das  
große horizontale Bauteil ist gleichzeitig eine hohe Eigensteifigkeit notwendig, die durch  
eine Dachwölbung erreicht wird. Zudem sind beim Dach durch die große sichtbare Ober-  
fläche auch gestalterische Ansprüche zu berücksichtigen. Die horizontale Lage bewirkt  
eine starke Sonneneinstrahlung mit entsprechenden Temperaturen.[1, S. 79 f.]

Die Stirnwand nimmt bei einem Frontalunfall nur wenig Energie auf und schottet den  
Motorraum vom Innenraum ab. Sie bietet trotz zahlreicher Durchbrüche durch die Ein-  
bindung zwischen Bodenblech, A-Säule und einem massiven Querträger der Instrumen-  
tentafel eine sehr verwindungssteife Einheit.[1, S. 74]

## **Vorderwagen**

Die Vorderwagenstruktur besteht im Wesentlichen aus den beiden Radhäusern mit den  
Federbeinaufnehmern, den beiden Motorlängsträgern und den vorderen Quertraversen.  
Sie dient i. d. R. zur Aufnahme des Motors. Durch die relative Häufigkeit des Frontal-  
crashes ist vor allem die Craschauslegung des Vorderwagens ein zentrales konstruktives  
Problem.[133, S. 31][1, S. 80 f.]

Für das Deformationsverhalten beim Frontalcrash sind insbesondere die Motorlängsträ-  
ger von Bedeutung. Um eine kontrollierte, mit zunehmender Verformung überproportio-  
nal größer werdende Deformationsarbeit zu erreichen, werden Querschnittsänderungen  
(mitunter auch eine zunehmende Materialstärke) vorgesehen. Kritisch ist zudem der  
Übergang vom Motorlängsträger zur Fahrgastzelle.[1, S. 81 f.]

Die Radhäuser besitzen die komplizierteste Geometrie im Vorderwagen. Mit zusätzlichen  
Verstrebungen wird eine hohe Verwindungssteifigkeit der Radhäuser erreicht, um die  
durch das Fahrwerk eingeleiteten Kräfte an den Federbeinen aufnehmen zu können und  
eine hohe Karosseriesteifigkeit zu gewährleisten.[1, S. 83]

Die Frontklappe und vordere Seitenwand (auch als Kotflügel bezeichnet) sind die großen Außenhautbauteile des Vorderwagens und unterliegen hohen Designansprüchen. Auf die Biege- und Torsionssteifigkeit der Karosserie haben sie keinen Einfluss. Die Frontklappe benötigt allerdings – genauso wie das Dach – als horizontales, üblicherweise großflächiges Bauteil eine hohe Eigensteifigkeit und insbesondere Verwindungssteifigkeit. Die vordere Seitenwand ist besonders gefährdet für kleinere Unfallschäden und muss deshalb auch nach reparaturfreundlichen Prinzipien ausgelegt werden.[1, S. 85 f.]

Im Falle eines Crashes müssen diese Bauteile nur eine sehr geringe Energie aufnehmen. Trotzdem ist ein definiertes Verformungsverhalten erforderlich. Beide Bauteile dürfen nicht in den Überlebensraum eindringen. Zudem muss nach einem Crash das Öffnen der Türen möglich sein. Zunehmende Aufmerksamkeit erhält bei der Gestaltung der Frontklappe und der Seitenwand der Fußgängerschutz. So muss die Klappe stoßnachgiebig gestaltet sein und im hinteren Bereich mindestens die Scheibenwischerachsen abdecken.

Das Frontend integriert heute als Modul zumeist auch den Stoßfänger. Aus Kunststoff gefertigt muss er bei Unfällen mit niedrigen Geschwindigkeiten (4 bis 8 km/h) die Crashenergie ohne Beschädigung aufnehmen können.

### **Hinterwagen**

Im Gegensatz zum Vorderwagen ist der Hinterwagen mit der Profilierung der Streben, Träger und Verstärkungen verhältnismäßig einfach konstruiert. Die Heckstruktur basiert vereinfacht auf einem geschlossenen Kasten. Damit ist die Stabilität für Kraftfluss und den Heckcrash allgemein ausreichend berücksichtigt. Für die Abstützung des hinteren Stoßfängersystems werden häufig zwei Längsträger analog dem Motorlängsträger eingesetzt.[1, S. 86 f.]

I. d. R. sind die hinteren Seitenwände in den Seitenrahmen (vgl. Fahrgastzelle) integriert. Für die hinteren Seitenwände gelten grundsätzlich ähnliche Anforderungen wie für die vorderen Seitenwände. Sie unterliegen also ebenfalls hohen gestalterischen Ansprüchen und sind nicht für die Karosserie-Steifigkeit relevant.

In Abbildung 5.8 ist das hierarchische Sachsystem Karosserie für den E46 M3 in bOSSA dargestellt. Hier zeigt sich besonders der Vorteil der Komplexbildung zur Bewältigung der Komplexität bei 700 verschiedenen Karosserie-Bauteilen. Im Folgenden wird diese hierarchische Systembetrachtung mit der funktionalen Systembetrachtung kombiniert, um die bauteilspezifischen Funktionserfordernisse zu ermitteln.

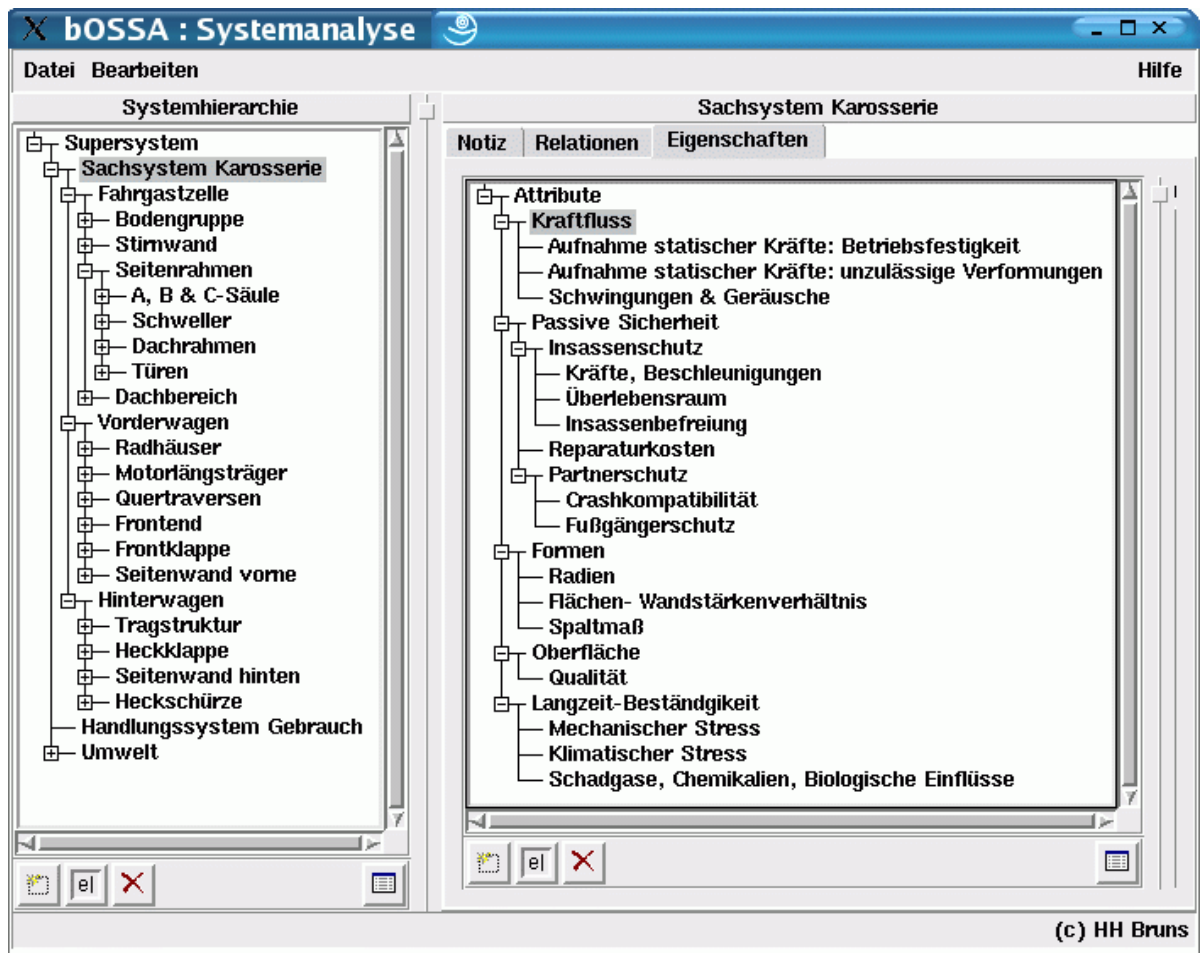


Abbildung 5.8: Das hierarchische Sachsystem Karosserie

## 5.2.2 Kombination der funktionalen und hierarchischen Systembetrachtung

Die Kombination der funktionalen und der hierarchischen Systembetrachtung erfolgt nur auf der Ebene der Subsysteme (Module) und nicht separat für jedes einzelne Bauteil. Dieser Detaillierungsgrad ist zum einen noch anforderungsspezifisch und zum anderen bereits allgemeingültig und damit weitgehend unabhängig von einem Fahrzeugmodell.

Die Zuordnung kann in BOSSA erfolgen. Besonders übersichtlich ist jedoch eine Matrixbeziehung zwischen den Subsystemen und den für die Entscheidungsfindung ermittelten Attributen. Wie in der Abbildung 5.9 ersichtlicht werden die in der funktionalen Systembetrachtung erläuterten Funktionen von verschiedenen Subsystemen der Karosserie unterschiedlich wahrgenommen.

## 5.2 Hierarchische Betrachtung des Sachsystems Karosserie-Leichtbau

		Fahrgastzelle					Vorderwagen				Hinterwagen				
		Stirnwand	Bodengruppe	Seitenrahmen	Türen	Dach	Motorträger	Federbein aufnehmer	Radhäuser	Front- Läppel	Seiten- wände	Trag- struktur	Radhäuser	Heck- klappe	Seiten- wände
Kraftfluss	Aufnahmen statischer Kräfte, Betriebsfestigkeit	●	●	●	◐	◐	●	●	●	○	○	●	●	○	○
	Auf. statischer Kräfte, Verformung	●	●	●	●	◐	●	●	●	○	○	●	●	○	○
	Schwingungen	●	●	●	●	◐	●	●	●	●	○	●	●	●	○
Insassenschutz	Kräfte/Beschleunigungen	●	●	●	●	●	◐	●				●	●		
	Überlebensraum	●	●	●	●	●	◐	◐	●	●	●	●	●	●	◐
	Insassenbefreiung	○	○	◐	●	◐				○	◐	○		○	◐
	Reparaturkosten	◐	◐	◐	●	◐	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐	●	●
Partnerschutz	Crashkompatibilität					◐	◐	◐	○	○	◐	◐	○	○	
	Fußgängerschutz				◐			○	●	◐					
Formen	Spaltmaß			●	●	◐				●	●			●	●
	Radien			●	●	◐				●	●			●	●
	Flächen/Wandstärkenverhältnis			○	◐	●				●	◐			◐	◐
Oberflächen	Qualität			●	●	●				●	●			●	●
Lebensdauer-betrachtung	Mechanischer Stress	●	●	●	◐	◐	●	●	●	○	○	●	●	○	○
	Klimatischer Stress	○	○	◐	◐	●	○	○	○	●	◐	○	○	◐	◐
	Schadgase, Chemikalien	◐	◐	●	●	●	◐	◐	◐	●	●	◐	◐	●	●

○ Niedrige Anforderung    ◐ Mittlere Anforderung    ● Hohe Anforderung

Abbildung 5.9: Funktionen und Subsysteme der Karosserie

Grundsätzlich lässt sich dabei eine Unterscheidung treffen zwischen stärker belasteten (Kraftfluss, Insassenschutz) und eher optisch ansprechenden (Form und Oberfläche) Elementen:

### 1. Tragende Strukturmodule

- Bodengruppe
- Stirnwand
- Motorträger

## 5 Entscheidung: Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie

- Radhäuser
- Seitenrahmen

### 2. Außenhautbauteile

- Dach
- Türen (Türäußenhaut)
- Frontklappe
- Heckklappe
- Seitenwand

### 3. Anbauteile

- Stoßfänger
- Schwellerverkleidung
- Spoiler
- Kühlergrill

In der Skelettbauweise sind diese Unterscheidungen zwischen dem tragenden Strukturskelett und den sekundären Außenhautelementen noch stärker ausgeprägt.

## 5.3 Thermoplaste als Konstruktionswerkstoff für die Karosserie

Nachdem bislang die allgemeinen Anforderungen an die Pkw-Karosserie und deren Subelemente identifiziert wurden, wird es nun erforderlich, diesen die Potentiale von Thermoplasten gegenüberzustellen. Im folgenden Abschnitt werden dazu die allgemeinen Grundlagen dargestellt und darauf aufbauend die anforderungsspezifischen Ableitungen.

Thermoplaste sind künstliche organische und hochmolekulare Werkstoffe und unterscheiden sich von Elastomeren und Duroplasten in der fehlenden chemischen – also atomaren – Verbindung der Makromoleküle. Der Zusammenhalt des Werkstoffes – also zwischen den verschiedenen Molekülen – wird durch Nebenvalenzbindung aufrecht erhalten. Diese

### 5.3 Thermoplaste als Konstruktionswerkstoff für die Karosserie

Nebervalenzkräfte werden durch Wärmeenergie überwunden, so dass die Molekülbeweglichkeit im Werkstück mit steigender Temperatur zunimmt. Letztlich lassen sich Thermoplaste im Gegensatz zu Elastomeren und Duroplasten mit räumlich atomar vernetzten Molekülen wiederholt zum plastisch verformbaren Zustand erwärmen.[52, S.26-29]

Thermoplaste untergliedern sich durch ihren molekularen Aufbau in amorphe und teilkristalline Thermoplaste. Amorphe Thermoplaste bestehen aus völlig ungeordneten Kettenmolekülen. Bei teilkristallinen Thermoplasten liegt teilweise eine örtliche Ordnung der Makromoleküle vor. Diese kristallinen Bereiche sind wiederum durch amorphe Bereiche miteinander gekoppelt. Neben den Homopolymeren – also Thermoplaste aus gleichartigen Makromolekülen – können auch unterschiedliche Makromoleküle in einem Werkstoff kombiniert werden (vgl. Abbildung 5.10).

<b>Homopolymere</b>	<b>Gleichartige Monomereinheiten</b>
<b>Copolymere</b>	<b>Monomereinheiten durch Hauptvalenzkräfte gebunden</b>
<b>Polymermischungen</b>	<b>Monomereinheiten durch Nebervalenzkräfte verbunden</b>

Abbildung 5.10: Verknüpfte Thermoplaste

Bei Copolymeren werden zwei oder mehrere Monomere gemeinsam polymerisiert. Diese Monomere sind dann über atomare Bindungskräfte miteinander verbunden. Im Gegensatz dazu bestehen zwischen den Monomeren bei Polymermischungen keine atomaren Bindungen.

Durch das Einbringen von Hilfs-, Zusatz-, Füll- oder Verstärkungsstoffe können die Eigenschaften innerhalb eines weiten Rahmens modifiziert werden. Hilfsstoffe dienen dem Verarbeitungsprozess, indem sie z.B. die vorzeitige Polymerisation verzögern oder die Fließeigenschaften erhöhen. In den Polymeren beigemischte Weichmacher verringern die Bindungskräfte zu den Makromolekülen und setzen dadurch die Erweichungstemperatur und somit die Sprödigkeit herab. Die elektrischen Eigenschaften von Kunststoffen sind für die Karosserie-Außenhaut nur sekundär von Bedeutung. Sie lassen sich zudem über Füllstoffe modifizieren.[80, S. 97 ff.]

Andere chemische Eigenschaften werden durch weitere Zusatzstoffe wie Farbstoffe, Antistatika, Stabilisatoren und Flammenschutzmittel verändert. Über Füllstoffe können sowohl teure Monomere substituiert als auch die Festigkeit erhöht werden.

Verbundwerkstoffe, also Thermoplaste mit Verstärkungsstoffen wie Glas, Kohlefaser und

Aramid, besitzen mit der höheren Festigkeit zwar ein sehr interessantes Eigenschaftsprofil. Sie werden für diese Arbeit jedoch explizit ausgeklammert (vgl. dazu die Einschränkung im Abschnitt 1.3).

### 5.3.1 Allgemeine Eigenschaften von Thermoplasten

Hauptargument für den Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie ist die geringe spezifische Dichte von 0,9 bis 1,4 [g/cm<sup>3</sup>] im Vergleich zu Stahl (7,87). Andererseits ist ein Einsatz aufgrund der eher geringen allgemeinen mechanischen Eigenschaften begrenzt. So liegt die Zugfestigkeit unverstärkter Thermoplaste mit 2 - 70 N/mm<sup>2</sup> erheblich unter den von normalen Karosserieblechen (300-340 N/mm<sup>2</sup>). Analog ist auch die Dehnung  $\varepsilon$  mit 3,3 bis 80 % bei 100 N/mm<sup>2</sup> wesentlich größer als beim Stahl (0,05%) und das Elastizitätsmodul mit 100 zu 10.000 N/mm<sup>2</sup> wesentlich kleiner als bei Stahlblechen mit 200.000 N/mm<sup>2</sup>. Die Druckfestigkeit von Thermoplasten ist im Bereich von 80 bis 140 N/mm<sup>2</sup> nur unwesentlich schlechter als bei Stahl (350-420 N/mm). Neben den allgemein schlechteren mechanischen Eigenschaften verhindert ebenfalls das schlechte Zeitstandsverhalten (Kriechverhalten) den Einsatz von Thermoplasten für hochbelastete Konstruktionselemente.[52, S.30-32]

Eine der grundlegenden Eigenschaften der Thermoplaste ist das bereits genannte thermische Verhalten. Dabei lassen sich vier Temperaturbereiche unterscheiden:

- Unterhalb der Glasstemperatur  $T_g$  sind Thermoplaste hartelastisch. Dabei versprödet der Werkstoff mit abnehmender Temperatur zunehmend.[52, S.84]
- Bei teilkristallinen Thermoplasten erweichen oberhalb der Glasstemperatur  $T_g$  zunächst die amorphen Bereiche, während die kristallinen Bereiche bis zur Kristallitschmelztemperatur  $T_m$  weiterhin fest und formsteif bleiben. In diesem Temperaturbereich sind teilkristalline Thermoplaste zugleich flexibel und zäh.[52, S.85]
- Mit dem Aufschmelzen aller Phasen oberhalb der Glasstemperatur  $T_g$  (bei amorphen Thermoplasten) bzw. der Kristallitschmelztemperatur  $T_m$  (bei teilkristallinen Thermoplasten) erreicht der Werkstoff einen weichelastischen, plastischen Zustand.[52, S.88]
- Oberhalb der Zersetzungstemperatur  $T_z$  kommt es zum Aufreißen der Hauptvalenzbindungen und damit zur dauerhaften Zerstörung des Werkstoffes.[52, S.89]



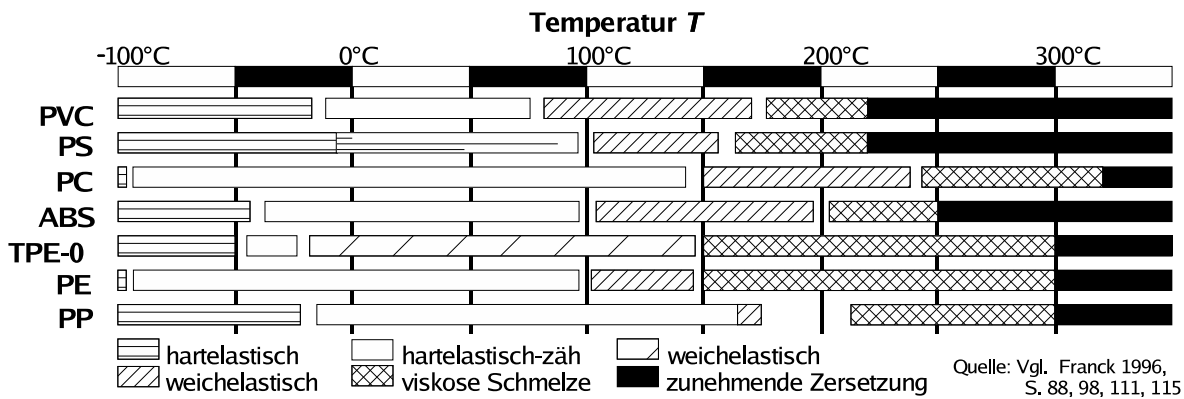


Abbildung 5.11: Eigenschaftsbereiche einiger Thermoplaste[52, S.88]

Der i. d. R. hartelastische Anwendungsbereich von Thermoplasten wird durch die geringe Temperaturbandbreite eingeschränkt (vgl. Abbildung 5.11). Andererseits ermöglicht die niedrige Erweichungstemperatur aber vergleichsweise einfache und stabile Produktionsprozesse und somit die Herstellung von komplexen Geometrien bei einer guten Oberflächenqualität.

Neben der zu berücksichtigenden Temperaturabhängigkeit im Anwendungsbereich der mechanischen Eigenschaften muss für eine konstruktive Auslegung generell auch die große thermische Längenausdehnung von 0,5 bis  $2,2 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1} \left[ \frac{\Delta L}{\Delta T \cdot L_0} \right]$  im Vergleich zu Stahl (0,13) berücksichtigt werden. Zudem ist auch die geringe Wärmeleitfähigkeit  $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$  0,37 bis 1,47 (Stahl 210) und Wärmekapazität [%] 33-50 (Stahl 85) zu beachten, die bei einer lokalen Erwärmung durch eine örtlich begrenzte Wärmeeinwirkung zu großen Temperaturunterschieden und damit zu inneren Spannungen im Material führen kann.[52, S.33] [135, S. 31]

Um als Werkstoffe in der Karosserie eingesetzt werden zu können, müssen die eingesetzten Thermoplaste gegenüber Witterung und weiteren aggressiven Medien beständig sein. Kritisch ist z.B. für viele Thermoplaste die energiereiche UV-Strahlung. Diese kann unmittelbar chemische Bindungen im Kunststoff aufspalten. Ähnlich empfindlich verhalten sich einige Kunststoffe gegenüber Säuren, Laugen und Heißwasser. Diese Zerfallsprozesse können jedoch durch geeignete Stabilisatoren reduziert werden.[75, S. 3-18, 43-53]

Die dargestellten Materialeigenschaften zeigen, dass der Einsatz von Thermoplasten einerseits vorteilhaft sein könnte (bessere Ausprägung von Eigenschaften), andererseits aber einige Ausprägungen von Stahl nicht erreicht (insbesondere bei den mechanischen Eigenschaften).

In der Entscheidungstheorie wurde der Begriff *Dominanz* für Alternativen eingeführt, die andere Alternativen dominieren – also die bei jedem Kriterium einen gleich guten und zumindestens bei einem Kriterium einen besseren Wert aufweisen (vgl. dazu Abschnitt 4.4.2). Im vorliegenden Fall sind beide Alternativen *effizient*, d. h. keine Alternative wird durch eine andere dominiert. Daher ist es für eine rationale Entscheidungsfindung erforderlich, die Auswirkungen dieser Materialeigenschaften konkreter für die Subsysteme der Karosserie zu bewerten.

### 5.3.2 Entscheidungssituation: Einsatzgebiete von unverstärkten Thermoplasten in der Pkw-Karosserie

Um die Entscheidungssituation zu vereinfachen (d. h. die Anzahl der zu betrachtenden Karosserieumfänge zu reduzieren) wird von den kritischen Materialwerten, den mechanischen Eigenschaften und dem begrenzten Temperaturbereich als Ausschlusskriterien (vgl. Musskriterien in Abschnitt 4.3.1 und binäre Bewertung in Abschnitt 4.3.3) ausgegangen. Abbildung 5.12 zeigt die Bewertung der Subsysteme bzgl. dieser beiden Ausschlusskriterien.

	Fahrgastzelle						Vorderwagen					Hinterwagen				
	Stirnwand	Boden- gruppe	Schweller- verkleidung	Seiten- rahmen	Türen	Dach	Frontend	Motorträger	Federbein- aufnahme	Radhäuser	Front- klappe	Seiten- wände	Trag- struktur	Radhäuser	Heck- klappe	Seiten- wände
Mechanische Eigenschaften	●	●		●	●	●		●	●	●	○		●	●	○	
Temperatur- bereich					○		○			○					○	

○ Risiko                      ● Ausschluss

Abbildung 5.12: Ausschlusskriterium: mechanische Eigenschaften

Aufgrund der geringen mechanischen Eigenschaften können Thermoplaste nicht als Strukturbauteile in der Karosserie Verwendung finden. Neben den bereits häufiger genutzten Anbauteilen (Schweller, Frontend etc.) ist aber ein Einsatz von unverstärkten Thermoplasten in flächige, vertikale (hängende) Außenhautteile wie Seitenwänden und einer Türaußenhaut (die Türrahmenkonstruktion inkl. Seitenaufprallschutz muss in einem anderen Werkstoff realisiert werden) gut denkbar. Große horizontale Flächen wie Frontklappe, Dach oder eine große Heckklappe sind nur mit einem höheren Risiko realisierbar. I. d. R. wird hier die erforderliche Beulsteifigkeit durch Thermoplaste nicht

erreicht und aufgrund der Erwärmung durch Sonneneinstrahlung ist die Befestigung auf eine Tragstruktur schwierig. Deshalb wird im Folgenden nur noch der Einsatz von Thermoplast für die Seitenwände und als Türaußenhaut zusätzlich zu den bislang schon praktizierten Umfängen untersucht.

Diese Abschätzung der Realisierbarkeit ist für eine Entscheidungsfindung allerdings noch nicht hinreichend, weil noch nicht dargestellt wurde, inwieweit eine Innovation des Sachsystems technisch vorteilhaft ist.

Deshalb ist es erforderlich, die Entscheidungssituation weiter zu analysieren. Dazu werden die erarbeiteten Sollfunktionen (vgl. Abbildung 5.9) als Zielsystem definiert. Daraus ergeben sich folgende Hauptkriterien (vgl. Abbildung 5.13):

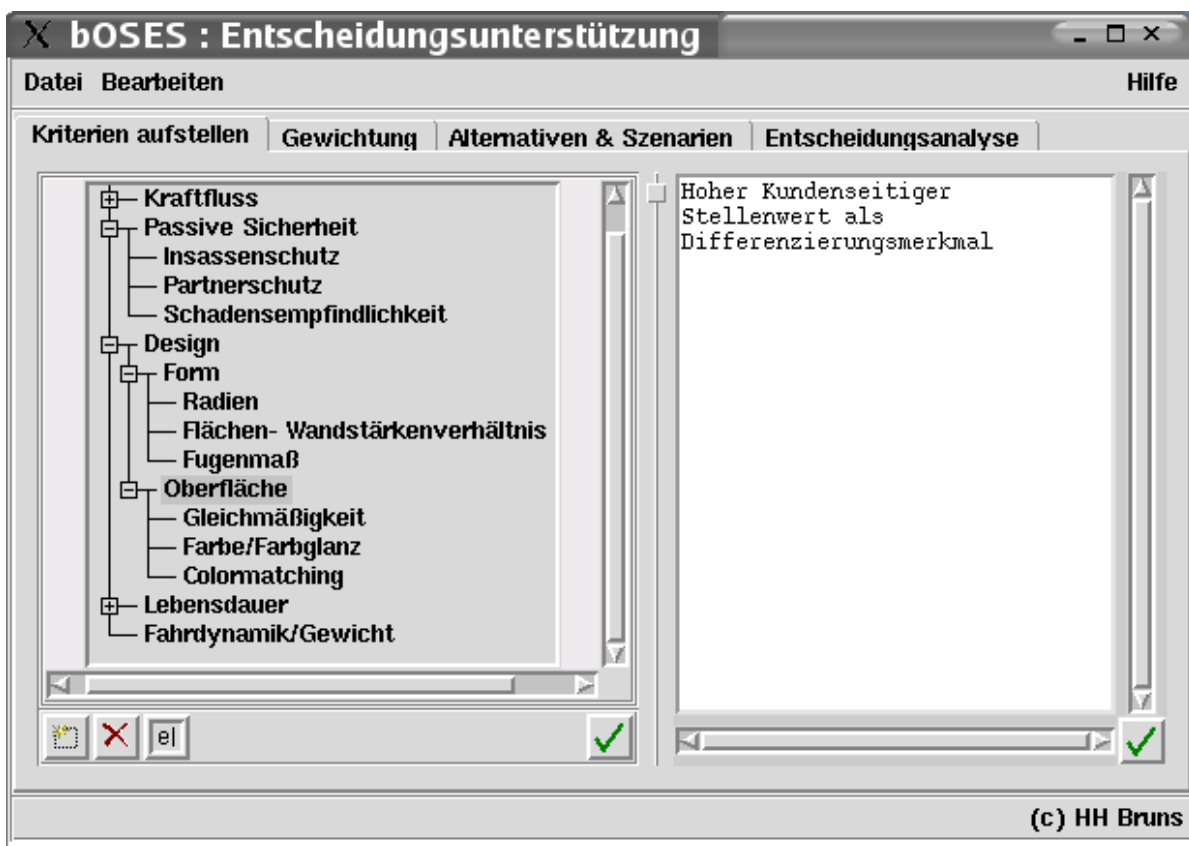


Abbildung 5.13: Entscheidungskriterien für vertikale Außenhautbauteile

- Kraftfluss
- Passive Sicherheit

- Design
- Lebensdauer
- Fahrdynamik/Gewicht

Alle diese Kriterien sind als Musskriterien zu definieren, d. h. alle Kriterien der betrachteten Alternativen müssen mindestens ausreichend erfüllt werden.

### 5.3.3 Bewertung der Entscheidungskriterien

Wie bereits im Abschnitt 2.3 „IP Methodik in der Makroebene Systeminnovation“ formuliert, bewegt sich das zu lösende Entscheidungsproblem auf der Managementebene und beruht dabei auf der Beurteilungs- und Lösungskompetenz der Fachbereiche.

Die sachtechnischen Umfänge werden durch die Fachbereiche Karosserie-Entwicklung und Gesamt-Fahrzeug bewertet. Neben grundsätzlichen Überlegungen ist die Basis für Bewertungen die Versuchsdurchführung an Erprobungsträgern (vgl. Tabelle 5.2).

Wie bereits im Kapitel 4 am Beispiel erläutert wurde, ist die Bewertung der Eignung von Thermoplasten in Einzelkriterien von der Bauteil-Temperatur abhängig, was zu angepassten Versuchsdurchführungen führen muss. Entsprechend erfolgt hier eine Bewertung unter Risiko. Zu betrachten ist ein Temperaturbereich von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis hin zu  $85^{\circ}\text{C}$ . Dazu werden für die Einsatztemperatur die in Tabelle 5.3 dargestellten Temperaturen und deren Eintrittswahrscheinlichkeit angenommen.

Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Prüfwert [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Eintrittswahrscheinlichkeit [%]
-40 bis -20	$-40^{\circ}$	2
-20 bis 0	$-20^{\circ}$	23
0 bis +20	20	50
+20 bis +50	$50^{\circ}$	23
+50 bis +85 $^{\circ}$	$85^{\circ}$	2

Tabelle 5.3: Einsatztemperatur und deren Verteilung

Neben den normalen klimatischen Erprobungen wie Klimawechseltest müssen auch für die anderen Kriterien entsprechende Aussagen innerhalb des gesamten Temperaturspektrums erfolgen. Teilweise sind deshalb zusätzliche Versuchsaufbauten notwendig.

Bei der Bewertung der Kriterien können für Thermoplaste folgende Aussagen getroffen werden:

### 5.3 Thermoplaste als Konstruktionswerkstoff für die Karosserie

Kriteriengruppe	Kriterium	Versuche
Kraftfluss	Statische Belastungen	statische Beulsteifigkeit /Festigkeit (Kugelkalottentest)[21]
	Dynamische Belastungen	dynamische Beulsteifigkeit/Festigkeit (Fallturmtest)[21] Steinschlagprüfung (Multischlag)[11] Schwingungsprüfung (Shaker)[17]
Passive Sicherheit	Insassenschutz	Frontcrash (US-NCAP, 56 km/h, starre Barriere)[123][10] Heckcrash (Heckcrash links, 40% Offset, 50km/h, starre Barriere)[10] Seitencrash (Pole to Car rechts, 40km/h, stehendes Fahrzeug, Pfahldurchmesser 250mm)[10]
	Partnerschutz Schadensempfindlichkeit	Prüfkörperaufprall [10] Crashreparaturtest [10]
Design	Form: Radien	Auditierung im Zusammenhang mit Sonnensimulation (s.u.)
	Form: Fläche/Wandstärke Form: Fugenmaß	Berechnung; anhängig von der Wölbung  Auditierung im Zusammenhang mit Sonnensimulation (s.u.) Thermische Längendehnung bei Grenztemperatur
	Oberfläche: Gleichmäßigkeit Oberfläche: Farbe/Farbglanz Oberfläche: Colormatching	Auditierung; Oberflächenstruktur (wave-scan) [14] Auditierung  Auditierung
Lebensdauer	Mechanischer Stress	s.o. Kraftfluss
	Klimatischer Stress	Klimaprüfung [15] Sonnensimulation [16] Temperaturwechseltest [11] Feuchtekälte Beständigkeit [11] Kondenswasserkonstantklima [11]
	Schadgase, Chemikalien etc.	Chemikalische Beständigkeit [125]; Spannungsrisssbeständigkeit [38]

Tabelle 5.2: Exemplarische Versuche [18][21][19]

### Kraftfluss

Für den Einsatz von unverstärkten Thermoplasten kommen aufgrund der niedrigen mechanischen Eigenschaften von Thermoplasten nur Anbauteile und hängende Außenhautbauteile in Betracht. (s.o. Abbildung 5.12). Bei Außenhautbauteilen wie Seitenwand oder Türaußenhaut konnten am Prototyp-Bauteilen bei allen Temperaturen in der Nutzungsphase die Anforderungen bzgl. statischer und dynamischer Belastungen erfüllt werden. Die Unterschiede sind bei Raumtemperatur gering, bei Temperaturen über 50°C geringfügig höher (vgl. Tabelle 5.4).

Temperatur [°C]	Nutzwert Stahl	Nutzwert Thermoplast
-40 bis -20	0,6	0,5
-20 bis 0	0,6	0,5
0 bis +20	0,6	0,5
+20 bis +50	0,6	0,5
+50 bis +85°	0,6	0,4

Tabelle 5.4: Bewertung Kraftfluss [20] bei verschiedenen Einsatztemperaturen

### Insassensicherheit

Da die verbleibenden Außenhaut-Bauteile keine Crashenergie aufnehmen und in die Struktur ableiten müssen, ist weiter nur der nach einem Crash vorliegende Bauteilzustand zu beachten. Damit ist der Abbau von Kräften und Beschleunigungen unkritisch.

Sowohl Thermoplaste als auch die Stahlbleche müssen die Bauteilintegrität sicherstellen, d. h. im Einzelnen, dass die Bauteile am Fahrzeug bleiben und weder in den Fahrzeuginnenraum eindringen, noch sich scharfe Bruchkanten bilden.

Prototypenteile aus Thermoplasten zeigen konzeptionelle, aber letztlich beherrschbare Schwächen bei der Befestigung (Ausreißen der Befestigungsclipsse). Die hohe Deformation der Elemente führt bei Raumtemperatur (20°C) zu keinem Bruch. Bei niedrigen Temperaturen (< 10°C) sind jedoch Brüche zu erwarten. Tabelle 5.5 zeigt die Nutzenbewertung der Alternativen bzgl. der Insassensicherheit in Abhängigkeit von der Einsatztemperatur.

Temperatur [°C]	Nutzwert Stahl	Nutzwert Thermoplast
-40 bis -20	0,5	0,3
-20 bis 0	0,6	0,4
0 bis +20	0,6	0,5
+20 bis +50	0,6	0,5
+50 bis +85°	0,6	0,5

Tabelle 5.5: Bewertung Insassensicherheit [20] bei verschiedenen Einsatztemperaturen

### Partnerschutz und Schadensempfindlichkeit

Der große Bereich der voll reversiblen Verformung bei Thermoplasten kann sowohl beim Partnerschutz als auch bei der Schadensempfindlichkeit gegenüber Stahlblech als Vorteil bewertet werden. Beide Bewertungen sind aber genauso wie die Insassensicherheit temperaturabhängig.

Daher werden zur Bewertung die in Tabelle 5.6 dargestellten Maßzahlen angenommen.

Temperatur [°C]	Stahl		Thermoplast	
	Partner	Schaden	Partner	Schaden
-40 bis -20	0,4	0,3	0,4	0,3
-20 bis 0	0,4	0,3	0,4	0,4
0 bis +20	0,4	0,3	0,6	0,7
+20 bis +50	0,4	0,3	0,6	0,7
+50 bis +85°	0,4	0,3	0,6	0,7

Tabelle 5.6: Bewertung Partnerschutz und Schadensempfindlichkeit[20] bei verschiedenen Einsatztemperaturen

### Design

Im Rahmen des Designs überzeugen Thermoplaste durch die großen Gestaltungsmöglichkeiten, die deutlich besser als bei Stahl sind (Radien, Wandstärken-Sprünge, Funktionsintegration). Andererseits besitzt Stahl mit der höheren Steifigkeit ein besseres Wandstärken/Flächenverhältnis und aufgrund der thermischen Längendehnung sind Thermoplaste im Fugensbild schlechter zu bewerten: konstruktiv müssen größere Spaltmaße<sup>4</sup> und

<sup>4</sup>Die Problematik kann teilweise konstruktiv vermieden werden, indem die Fixpunkte an der Spalte gesetzt werden und die Längendehnung in Richtung ohne Spalte erfolgt (evtl. überlappen der Btl.).

## 5 Entscheidung: Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie

eine Fest-Loslagerung berücksichtigt werden, um die Längendehnung zu ermöglichen. Verspannte Bauteile bei fehlerhafter Auslegung zeigen oft auch nach dem Abkühlen nichttolerierbare sichtbare Verformungen. Tabelle 5.7 zeigt die Bewertungen der Gestaltungsmöglichkeiten.

	Stahl			
	Radien	Wandstärke	Fugenmaß	Integration
Maßzahlen	0,4	0,7	0,7	0,3

	Thermoplast			
	Radien	Wandstärke	Fugenmaß	Integration
-40 bis -20	0,6	0,3	0,3	0,7
-20 bis 0	0,6	0,3	0,3	0,7
0 bis +20	0,6	0,3	0,4	0,7
+20 bis +50	0,6	0,3	0,3	0,7
+50 bis +85	0,6	0,3	0,3	0,7

Tabelle 5.7: Bewertung Gestaltungsmöglichkeiten[20] bei verschiedenen Einsatztemperaturen

Die hohe Oberflächengüte (Gleichmäßigkeit) bei spritzgegossenen Thermoplasten ist mit Stahl vergleichbar. Eine ggf. erforderliche Nacharbeit ist allerdings aufwendiger. Ausgelöst durch Temperaturschwankungen (Temperaturwechseltest) können allerdings bestehende Oberflächenfehler wie z. B. Fließlinien, Bindenähte, Abzeichnungen oder Welligkeiten im Bauteil noch verstärkt werden.

Farbe- und Farbglanz sind abhängig vom Decklack. Mit entsprechender Bauteilbehandlung sind die gleichen Decklacke bei Stahl- und Thermoplast-Bauteilen verwendbar.

Mit der Integration der Bauteile in die Karosserie-Lackieranlage (Partiell-On-Line Lackierung vgl. Abschnitt 5.4.1) stellt Colormatching<sup>5</sup> kein Problem dar. Anders verhält es sich jedoch beim Off-Line-Verfahren bei einer separaten Lackiererei. Tabelle 5.8 zeigt die Bewertungen für die Oberfläche im Partiell-On-line-Verfahren.

<sup>5</sup>Neben Farbnuancen kann bei benachbarten Bauteilen aber auch die Lackstruktur (Kurz- bzw. Langwelligkeit) unterschiedlich sein.



### 5.3 Thermoplaste als Konstruktionswerkstoff für die Karosserie

	Stahl	
	Gleichmäßigkeit	Colormatching
Maßzahlen	0,6	0,6

	Thermoplast	
Temperatur [°C]	Gleichmäßigkeit	Colormatching
40 bis -20	0,4	0,6
-20 bis 0	0,5	0,6
0 bis +20	0,6	0,6
+20 bis +50	0,5	0,6
+50 bis +85°	0,4	0,6

Tabelle 5.8: Bewertung Oberflächenqualität [20] bei verschiedenen Einsatztemperaturen

#### Beständigkeit

Die Beständigkeit von Thermoplasten wird mit 0,7 geringfügig schlechter eingeschätzt als Stahl (0,8).[20] Die guten Bewertungen werden durch geeignete Oberflächenbehandlungen erzielt. Bei Thermoplasten vermindern diese den Alterungsprozess durch klimatische Einflüsse und beim Stahl reduzieren sie die Korrosionsproblematik. Eine mechanische Beanspruchung ist bei den betrachteten Anbauteilen zu vernachlässigen.

#### Gewichtsvorteil

Ausgangspunkt der Überlegungen war der große Gewichtsvorteil von Thermoplast im Vergleich zum Stahl. Mit der viel geringeren Dichte bei Thermoplasten können trotz erforderlichen stärkeren Wandstärken um 30% niedrigere Bauteilgewichte erzielt werden. Damit ergibt sich eine Bewertung von 0,6 für Thermoplaste und 0,3 für Stahl.

#### Zusammenfassung der Entscheidungssituation

Im Hinblick auf die Abbildungen 4.11 und 4.12 im Abschnitt 4.4.6 können folgende Aussagen zur Entscheidungssituation getroffen werden:

1. Mit elf differenten Bewertungskriterien liegt eine *mehrkriterielle Entscheidungssituation* vor.

## 5 Entscheidung: Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie

2. Für die betrachteten vertikalen (hängende) Außenhautbauteilen wird bei beiden Alternativen Thermoplasten und Stahl kein Kriterium mit Null bewertet: d. h., es liegen zwei *gültige Alternativen* vor.
3. Es wird keine Alternative *dominiert*: damit sind beide betrachteten Alternativen *effizient*.
4. Mit der Temperaturabhängigkeit von Thermoplasten und den angenommen Eintrittswahrscheinlichkeiten liegt eine *Entscheidung unter Risiko* vor.

### 5.3.4 Entscheidungsanalyse des Sachsystems

Unter der Annahme, dass alle Kriterien gleichgewichtet sind (vgl. Abschnitt 4.4.2), ergibt sich für die in Abschnitt 5.3.3 bewerteten Kriterien ein Erwartungswert für Thermoplaste (Partiell-On-Line) mit 0,5338 im Vergleich zu Stahl mit 0,5228 (vgl. Abbildung 5.14). Entsprechend muss aus sachtechnischer Sicht die Alternative Thermoplast (Partiell-On-Line) ausgewählt werden.

Ausschlaggebend dafür sind die wesentlich besseren Bewertungen für Thermoplaste bei den Kriterien

- Partnerschutz und Schadensempfindlichkeit,
- Funktionsintegration und
- Gewicht.

Im Abschnitt 4.4.2 wurde bereits die Bedeutung der Gewichtung für die Entscheidungsfindung hergeleitet. Das geschieht mit dem System bOSES auf Basis des in Abschnitt 4.4.2 erläuterten paarweisen Vergleichs.

Zentrale Annahme für die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren ist in dieser Arbeit die Bedeutung des Entscheidungskriteriums als kundenwertiges Differenzierungsmerkmal. Die Abstufung im paarweisen Vergleich orientiert sich daher an dem Kano-Modell (vgl. Abbildung 5.15).

Als Orientierung für die Gewichtung wurden folgende Festlegungen getroffen:

### 5.3 Thermoplaste als Konstruktionswerkstoff für die Karosserie

bOSES : Entscheidungsunterstützung

Datei Optionen Hilfe

Hierarchisches Kriteriensystem | Kriteriengewichtung | Szenarien & Alternativen | Entscheidungsanalyse

	0	1		2				
Alternativen:		Stahl		Thermoplast				
Gesamtwert:		0.522734		0.538836				
Szenarien		< -20°C	> -20°C	-40 bis -20°C	-20 bis 0°C	0 bis 20°C	20 bis 50°C	50 bis 85°C
Erwartungswert:		0.010292	0.512442	0.009462	0.11454	0.27805	0.125994	0.01079
Kraftfluss		0.000996	0.048804	0.00083	0.009545	0.02075	0.009545	0.000664
Insassensicherheit		0.00083	0.048804	0.000498	0.007636	0.02075	0.009545	0.00083
Partnerschutz		0.000664	0.032536	0.000664	0.007636	0.0249	0.011454	0.000996
Schadensempfindlichkeit		0.000498	0.024402	0.000498	0.007636	0.02905	0.013363	0.001162
Gestalt	Radien	0.000664	0.032536	0.000996	0.011454	0.0249	0.011454	0.000996
	Wandstärke	0.001162	0.056938	0.000498	0.005727	0.01245	0.005727	0.000498
	Fugenmaß	0.001162	0.056938	0.000498	0.005727	0.0166	0.005727	0.000498
Oberfläche	Funktions-Integration	0.000498	0.024402	0.001162	0.013363	0.02905	0.013363	0.001162
	Oberflächengüte	0.000996	0.048804	0.000664	0.009545	0.02075	0.009545	0.00083
	Colormatching	0.000996	0.048804	0.000996	0.011454	0.0249	0.011454	0.000996
Beständigkeit		0.001328	0.065072	0.001162	0.013363	0.02905	0.013363	0.001162
Gewicht		0.000498	0.024402	0.000996	0.011454	0.0249	0.011454	0.000996

(c) HH Bruns

Abbildung 5.14: Entscheidungsanalyse in bOSES mit ungewichteten Kriterien

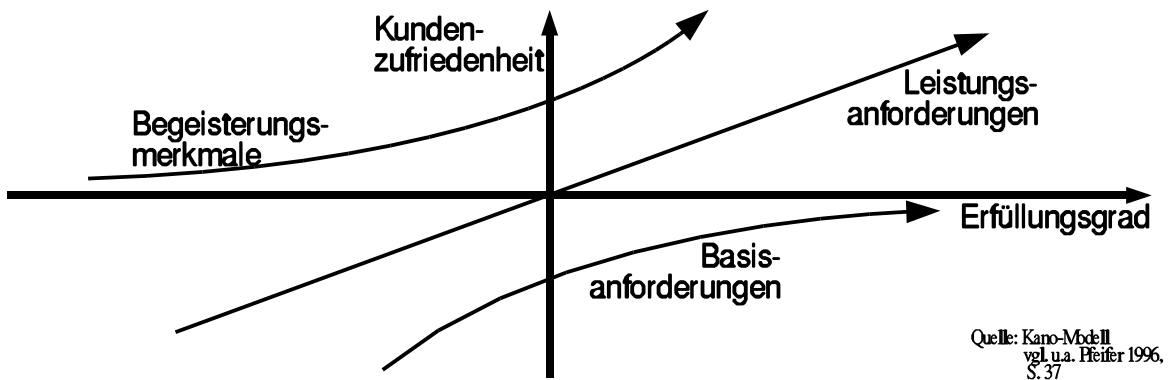


Abbildung 5.15: Kundenzufriedenheit im Kano-Modell[100, S. 37]

## 5 Entscheidung: Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie

- Basisanforderungen werden vom Kunden vorausgesetzt und nicht mehr aktiv wahrgenommen. Sie besitzen ein niedrigeres Gewicht innerhalb der Entscheidungsfindung.
- Leistungsanforderungen werden bewusst durch den Kunden artikuliert und honoriert. Diese Kriterien sind mit einem mittleren Gewicht einzustufen.
- Begeisterung entsteht durch Funktionen, die der Kunde nicht erwartet. Kriterien die dieses ermöglichen, sind hoch gewichtet.

Auf dieser Basis lassen sich nun alle identifizierten Kriterien in bOSES (vgl. Abbildung 5.16) gewichten.

The screenshot shows the 'bOSES : Entscheidungsunterstützung' software window. The 'Kriteriengewichtung' tab is active, displaying a table with the following data:

0.5		Gestalt				Oberfläche	
		Radien	Wandstärke	Fugenmaß	Funktions-Integration	Oberflächen-güte	Colormatching
Kraftfluss		0.6	0.7	0.55	0.8	0.55	0.55
Insassensicherheit		0.6	0.7	0.55	0.8	0.55	0.55
Partnerschutz		0.6	0.7	0.55	0.8	0.55	0.55
Schadensempfindlichkeit		0.5	0.609	0.449	0.727	0.449	0.449
Gestalt	Radien	0	0.609	0.449	0.727	0.449	0.449
	Wandstärke	0.391	0	0.344	0.632	0.344	0.344
	Fugenmaß	0.551	0.656	0	0.766	0.5	0.5
	Funktions-Integration	0.273	0.368	0.234	0	0.234	0.234
Oberfläche	Oberflächengüte	0.551	0.656	0.5	0.766	0	0.5
	Colormatching	0.551	0.656	0.5	0.766	0.5	0
Beständigkeit		0.391	0.5	0.344	0.632	0.344	0.344
Gewicht		0.6	0.7	0.55	0.8	0.55	0.55

(c) HH Bruns

Abbildung 5.16: Gewichtung der Entscheidungskriterien

- Aus heutiger Sicht haben die Kriterien Kraftfluss inkl. mechanischer Stress und die Insassen-Sicherheit (Passive Sicherheit) eine gleichwertige Gewichtung. Beide werden von Kunden bewusst wahrgenommen, aber grundsätzlich entsprechend den gesetzlichen Anforderungen vorausgesetzt. Ein Anbieter kann sich in diesem Merkmal daher nur begrenzt zu seinen Wettbewerbern differenzieren. Diese Kriterien werden daher im Folgenden den Leistungsanforderungen zugerechnet.
- Im Vergleich dazu sind Partnerschutz und Schadensempfindlichkeit nach heutigen Einschätzungen weniger bedeutend. Für den Partnerschutz lassen sich allerdings in Zukunft andere Anspruchsniveaus erwarten: im Rahmen internationaler Vorschriften steigen hier zum einen die Anforderungen, so dass es durchaus zu einem Wettbewerb zwischen den Automobilherstellern kommen kann. Für die Entscheidungsfindung ist deshalb beim Kriterium Partnerschutz eine Unsicherheit bzgl. der Gewichtung zu berücksichtigen.
- Eine wichtige Bedeutung haben heute und auch in Zukunft die Designkriterien, weil über das Design und die Umsetzungsqualität die deutlichste Wettbewerbsdifferenzierung möglich ist. Im Vergleich zum Kraftfluss nehmen diese allerdings eine etwas geringere Gewichtung ein, da die Zusammenhänge zwischen Design und technischen Möglichkeiten dem Kunden nicht präsent sind.
- Die Lebensdauerkriterien (Beständigkeit) werden relativ niedrig bewertet. Der normale Kunde kennt nicht die damit verbundenen Wirkzusammenhänge. Dem heute bereits hohen Anspruchsniveau dieser vorausgesetzten Eigenschaft muss bei der Bewertung Rechnung getragen werden.
- Genau wie beim Partnerschutz, so sind auch bei der durch das niedrige Gewicht geprägten Fahrdynamik zwei verschiedene Szenarien zu berücksichtigen. Als Status Quo wird ein niedriges Fahrzeuggewicht vom Kunden nicht besonders wahrgenommen. Die Bedeutung des Fahrzeuggewichtes relativ zu den Kriterien nimmt mit steigenden Kraftstoffpreisen weiter zu.

Nun ergeben sich aus der Kombination der Szenarien vier zu berücksichtigende Möglichkeiten:

1. Im Szenario *Status Quo* werden Partnerschutz und niedriges Gewicht nicht als großes Differenzierungsmerkmal zum Wettbewerb bestimmt, d. h. sie werden beide gleichwertig zur Beständigkeit relativ niedrig eingestuft.

2. Im Szenario *Gewicht* wird Gewicht am absolut höchsten favorisiert, also dem Kunden als wichtigstes Differenzierungsmerkmal vermittelt. Partnerschutz ist hingegen kein Differenzierungsmerkmal und wird daher weiterhin niedrig bewertet.
3. Im Szenario *Partnerschutz* ist der Partnerschutz als Differenzierungsmerkmal analog dem Insassenschutz positioniert. Es wird also davon ausgegangen, dass entsprechend den internationalen Entwicklungen bei den Vorschriften und durch die Realisierung seitens des Wettbewerbs Partnerschutz für den Kunden eine hohe Bedeutung hat. Der Gewichtsvorteil ist dem Kunden in diesem Szenario hingegen nicht als Vorteil vermittelbar.
4. Im Szenario *Max* treten beide Gewichtungen in ihrer maximalen Ausprägung auf, d. h. sowohl Partnerschutz als auch niedriges Gewicht werden durch den Kunden als Differenzierungsmerkmal wahrgenommen.

Mit diesen Szenarien der Gewichtung liegt also eine Entscheidungssituation unter Unsicherheit vor. Wie im vorherigen Kapitel dargestellt, könnte man eine solche Fragestellung mit der Minimax- oder der Maximin-Regel bzw. nach dem Hurwicz-Prinzip oder mit der Laplace-Regel bearbeiten. Da für diese Szenarien Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmt werden können, liegt eine Entscheidung unter Risiko vor, die mit der Bildung des Erwartungswertes (vgl. Abschnitt 4.4.4) rational gelöst werden kann.

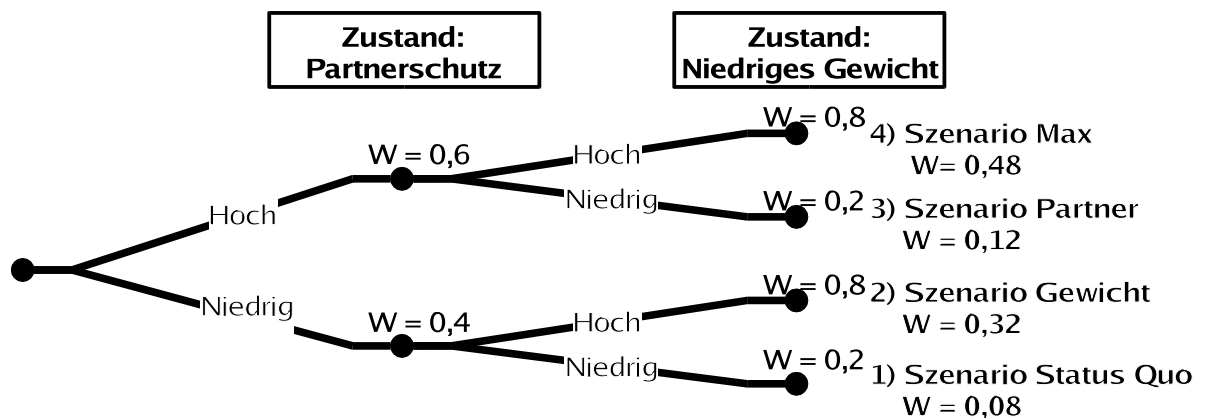


Abbildung 5.17: Erwartungsstrukturen bei der Gewichtung von Kriterien

Diese Erwartungsstrukturen werden sinnvollerweise durch einen Wahrscheinlichkeitsbaum (vgl. Abbildung 5.17) abgebildet. Dabei werden die Einzelwahrscheinlichkeiten

### 5.3 Thermoplaste als Konstruktionswerkstoff für die Karosserie

jeder Gewichtungsausprägung zu einer Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarien multipliziert.

Die je Szenario möglichen normierten Gewichtungsfaktoren  $g_{i,norm}$  und die Eintrittswahrscheinlichkeiten zeigt Tabelle 5.9.

		Szen. 1	Szen. 2	Szen. 3	Szen. 4
Kriteriengruppe	Eintrittswahrscheinlichkeit Kriterium	0,08	0,32	0,12	0,48
Kraftfluss		0,105	0,102	0,102	0,099
Passive Sicherheit	Insassenschutz	0,105	0,102	0,102	0,099
	Partnerschutz	0,069	0,066	0,102	0,099
	Schadensempfindlichkeit	0,088	0,085	0,085	0,082
Design: Form	Radien	0,088	0,085	0,085	0,082
	Fläche/Wandstärke	0,069	0,066	0,066	0,063
	Fugenmaß	0,097	0,094	0,094	0,091
	Funktions-Integration	0,047	0,045	0,045	0,042
Design: Oberfläche	Gleichmäßigkeit	0,097	0,094	0,094	0,091
	Colormatching	0,097	0,094	0,094	0,091
Lebensdauer	Beständigkeit	0,069	0,066	0,066	0,063
Fahrdynamik	Gewicht	0,069	0,102	0,066	0,099

Tabelle 5.9: Übersicht über die normierten Gewichtungsfaktoren

Da durch den paarweisen Vergleich die Kriterien untereinander in Relation gesetzt werden, passen sich die Gewichtungen aller Kriterien in jedem Szenario entsprechend an. Dies entspricht auch der tatsächlichen Wirkung der geteilten Aufmerksamkeit hochpriorisierter Zielkriterien. Die Ergebnisse je Szenario zeigt Tabelle 5.10. Demnach wäre mit einem Erwartungswert von 0,5338 (zu 0,5287) entsprechend dem Erwartungswertkriterium (vgl. Abschnitt 4.4.4) die Alternative Thermoplast zu präferieren.

W [%]	Szen. 1	Szen. 2	Szen. 3	Szen. 4	Erwartungswert
Stahl	0,5376	0,5298	0,5334	0,5253	0,5287
Thermoplast	0,5313	0,5341	0,5323	0,5344	0,5338

Tabelle 5.10: Übersicht über die Nutzenwerte je Gewichtungs-Szenario

Ein besonders kundenwirksames Potential kann jedoch die Integrationsfähigkeit von Thermoplasten darstellen. Wird diese Eigenschaft kundenwirksam genutzt (Gewichtung

analog Schadensempfindlichkeit), ist bereits im Szenario Status Quo die Alternative Thermoplast mit 0,5250 zu 0,5411 vorteilhafter.

## 5.4 Handlungssysteme der Automobilindustrie

Neben der rein sachtechnischen Eignung von Thermoplasten als Konstruktionswerkstoff (die im vorherigen Abschnitt dargestellte Sachsystemebene) sind die unternehmerischen Konsequenzen für die Entscheidungsfindung von Bedeutung.

Ausgangspunkt der weiteren Überlegung ist die strukturelle Systembetrachtung (vgl. Abschnitt 3.1), also die Fragestellung, welche Beziehungen das Sachsystem Karosserie zu den Handlungssystemen eines Automobilherstellers hat (vgl. Abschnitt 3.6) und welche wesentlichen Eigenschaften dieser Systeme davon betroffen sind. Betrachtet werden dabei die Handlungssysteme der klassischen Wertschöpfungskette mit Forschung & Entwicklung, Produktion und Vertrieb sowie – entsprechend der Verantwortung im Lebenszyklus – auch Service und schließlich Beseitigung.

Eine besondere Rolle nimmt dabei die Forschung und Entwicklung mit dem Produktentstehungsprozess ein. Hier werden die Veränderungen aller Teilsysteme zentral zusammengefasst und bei der Produktdefinition berücksichtigt.

### 5.4.1 Produktion als Handlungssystem

Wenn die Funktionen des Sachsystems in der Produktentwicklung definiert sind, dann ist die weitere Fragestellung, wie dieses Sachsystem reproduziert werden kann. Es gilt also zu klären, wie der Produktionsprozess gestaltet werden muss.

Sinnvollerweise unterteilt man den Produktionsprozess in die Gewinnung der Rohstoffe, die Weiterverarbeitung zu Rohteilen/Ausgangsstoffen, die Fertigung von Bauteilen und die Montage zum Gesamtprodukt (vgl. Abbildung 5.19).

Analog der Fertigung von Stahl-Karosserien in der Automobilindustrie wird auch in der Betrachtung von thermoplastischen Werkstoffen die Rohstoffgewinnung und Weiterverarbeitung zum Ausgangsstoff vernachlässigt.

Üblicherweise werden thermoplastische Karosserie-Bauteile in der Spritzgusstechnik erstellt (vgl. Abbildung 5.19). Dazu wird der thermoplastische Kunststoff – Granulate



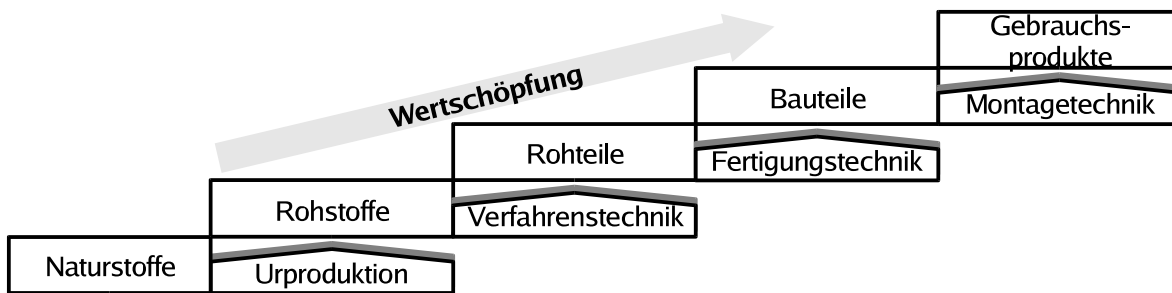


Abbildung 5.18: Vom Naturstoff zum Produkt

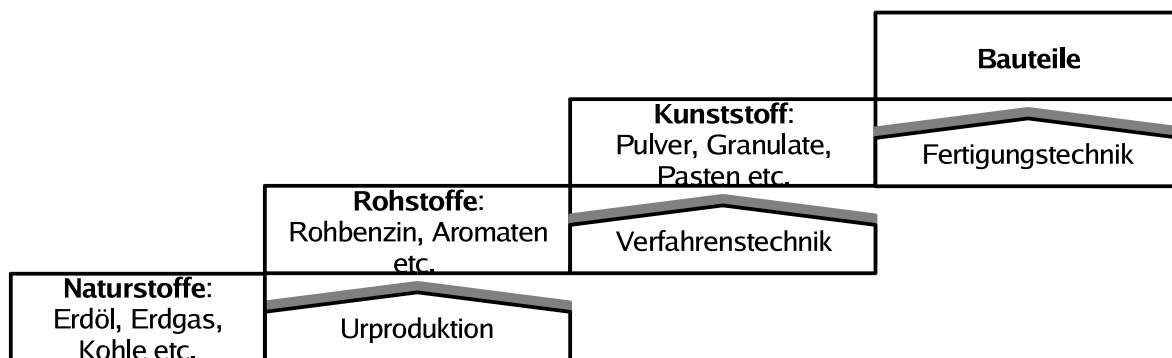


Abbildung 5.19: Erzeugung von thermoplastischen Bauteilen

oder Pulver – vorgeheizt, in einer Transportschnecke plastifiziert und in ein geschlossenes Werkzeug eingespritzt (vgl. auch Abbildung 5.20). Damit erhält das Bauteil seine Gebrauchsgestalt bereits im Urformprozess. Eine spätere Umformung bzw. ein aufwendiges Trennverfahren (bis auf das Entfernen der Anspritzstellen und Grate) ist nicht erforderlich.

Die Verarbeitungszeit ist im Wesentlichen durch den Abkühlprozess im Werkzeug definiert. Dieser Abkühlvorgang ist insofern kritisch, da er erst bei der vollständigen Füllung des Werkzeuges eintreten darf, um eine Orientierung der Makromoleküle durch unterschiedliche Schmelzstarre und so spätere Schlieren im Bauteile zu verhindern. Dazu wird der Abkühlprozess gezielt durch Erwärmung des Werkzeuges verzögert und die vollständige Füllung der Form ggf. mit mehreren Anspritzpunkten gewährleistet.

Nach dem Abkühlen wird das Werkstück durch Auswerfer aus der Spritzgussform entfernt. Diese Auswerfer hinterlassen jedoch genauso wie die Anspritzpunkte Abzeichnungen auf dem Bauteil und sind deshalb in nicht einsehbare Flächen zu verlagern.

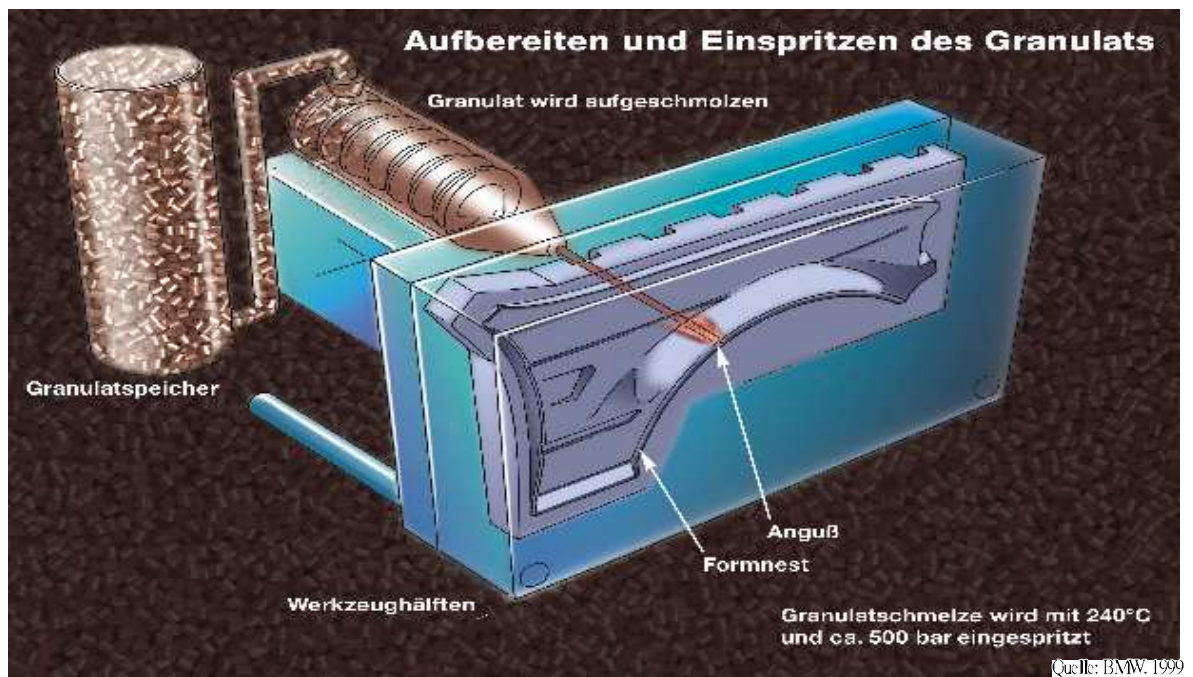


Abbildung 5.20: Fertigung von thermoplastischen Bauteilen im Spritzguss[12]

Da sich die Abkühlung von der Oberfläche zum Bauteilinneren vollzieht, entstehen durch die große Materialschwindung im Bauteil unterschiedliche Eigenspannungen. Dabei kommt es an der Bauteiloberfläche zu rissmindernden Druckspannungen. Bei zu großer Schwindung treten jedoch Lunker und Einfallstellen auf. Deshalb wird während des Abkühlvorganges weiter Material in das Werkzeug eingespritzt, um die Abkühlgeschwindigkeit zu kompensieren.

Neben diesem Bauteilherstellungsprozess verändert sich aber auch die weitere Fertigungsstruktur. Diese Struktur untergliedert sich klassischerweise in

- den Rohbau, in dem die Rohkarosserie gefertigt wird,
- die Lackierung, diese beinhaltet neben der Farbgebung bei Blechteilen die Anbringung des Korrosionsschutzes durch die Kathodische Tauchlackierung (KTL) und schließlich
- die Montage, bei der die Karosserie zu einem fahrenden Fahrzeug komplementiert wird.

Normalerweise wird die komplette Karosserie im so genannten Rohbau im Wesentlichen durch Schweißoperationen zusammengefügt. Ein Thermoplast-Bauteil ist jedoch nicht kompatibel zu dieser Fertigungstechnologie, d. h. dieses Bauteil muss im Anschluss montiert (verklippt, verschraubt, verklebt) werden.

Je nach Verbauort der thermoplastischen Außenhautteile können drei Fälle unterschieden werden:

1. Werden die thermoplastischen Außenhautbauteile innerhalb des Rohbaus angebracht, so bezeichnet man dies als On-line (oder auch In-line) Fertigung (vgl. Abbildung 5.21). Das Bauteil durchläuft montiert an der Karosserie den gesamten Karosserie-Lackprozess und besitzt so die gleiche Farbgebung.

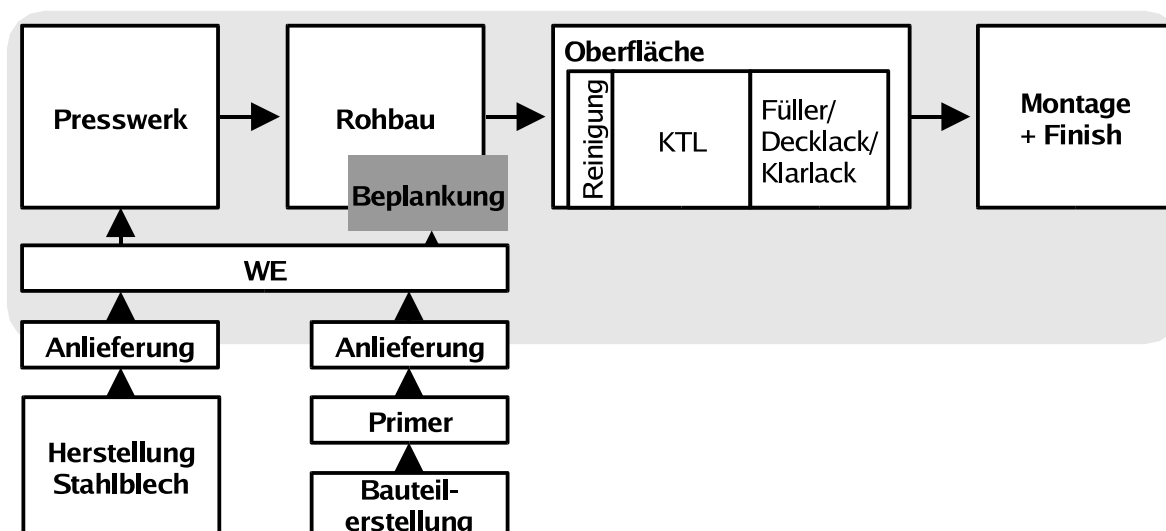


Abbildung 5.21: On-Line-Fertigung: Integration der Kunststoffbepankung in den Karosserie-Rohbau

Da das Bauteil im KTL-Trockner Temperaturen von 190°C (> 20 min.) ausgesetzt wird und nach Abkühlung die erforderlichen Bauteileigenschaften – insbesondere der spätere Strakverlauf – weiterhin gewährleistet sein müssen, sind die Anforderungen an einen thermoplastischen Werkstoff entsprechend sehr hoch. Bislang kann noch kein Werkstoff diese Anforderungen ausreichend realisieren (Ausschlusskriterium).[135, S.40 f.][95, S.193]

2. In der Partiiell-On-Line-Fertigung (vgl. Abbildung 5.21) wird das Bauteil erst nach dem KTL-Trockner in der Lackiererei verbaut und durchläuft anschließend den wei-

## 5 Entscheidung: Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie

teren Lackierungsprozess zusammen mit der Karosserie. So entstehen keine Color-Matching-Probleme. Im Vergleich zum reinen In-Line Verfahren ist anstatt 190°C im KTL-Trockner nur eine Beständigkeit für 150°C (ca. 24 min.) im Füller- und Decklackprozess erforderlich.

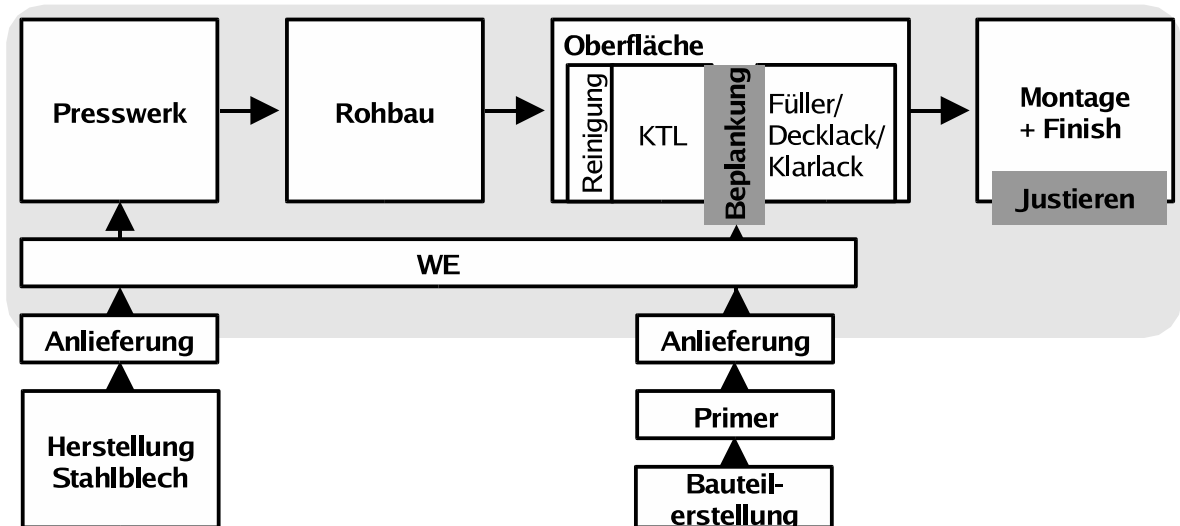


Abbildung 5.22: Partiell-On-Line: Integration der Kunststoffbeplankung in den Karosserie-Rohbau

Für Niedertemperatur-Partiell-On-Line mit Trockentemperaturen unter 100°C gibt es zurzeit noch kein Lacksystem, das sowohl für Thermoplaste als auch für Blech genutzt werden kann (Ausschlusskriterium).[95, S.194]

3. Mit einer auf Kunststoff angepassten separaten Lackiererei als Off-Line-Verfahren (vgl. Abbildung 5.23) sind Bauteiltemperaturen von kleiner 100°C möglich. Allerdings sind bei einer separaten Lackiererei Farbtonunterschiede zwischen benachbarten Stahlblech-Bauteilen nicht zu verhindern.[95, S.196 f.]

Bei einer Entscheidungsfindung zum Einsatz von Thermoplasten müssen mit diesen Verbauorten zwei gültige Alternativen betrachtet werden, die ihrerseits auch einen Einfluss auf die Materialauswahl und die Werteausprägung der Sachsystemkriterien haben.

### Kostenbetrachtung

Wesentliche Zielgröße innerhalb der Produktion ist die Wirtschaftlichkeit. Sie besteht aus der Betrachtung der Herstellkosten (Material- und Fertigungskosten inkl. Fixkostenan-

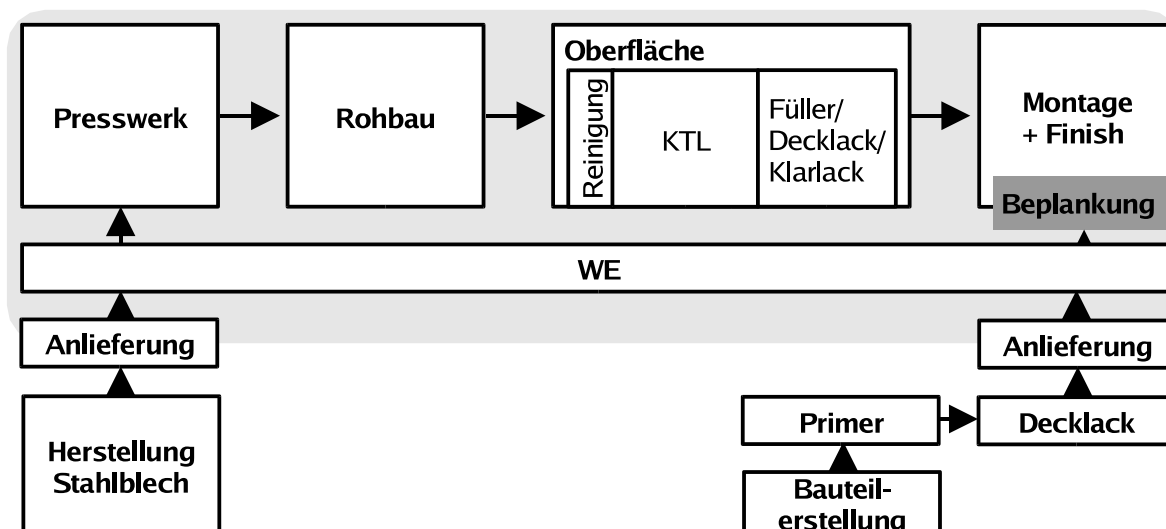


Abbildung 5.23: Off-Line Fertigung: Separate Lackierung, Beplankung in der Montage

teil) und der erforderlichen Investitionen. Bei der klassischen Stahlverarbeitung entstehen bei den hochautomatisierten Prozessen und den geringen Materialpreisen vergleichsweise geringe Herstellkosten. Dafür sind die Anfangsinvestitionen für die Anlagentechnik und die Werkzeuge sehr hoch.

Im Vergleich dazu sind thermoplastische Werkstoffe in der Bauteilfertigung teurer. Auslöser für die vergleichsweise hohen Herstellkosten sind die hohen Materialkosten und die durch veränderte Bedingungen ausgelösten zusätzlichen Lackmaterialkosten. Die Werkzeugkosten sind dagegen deutlich niedriger.

Zudem ist die betriebswirtschaftliche Betrachtung stark von der Bauteilkomplexität (hohe Werkzeugkosten) abhängig. Thermoplaste erlauben eine wesentlich einfachere Fertigung komplexer Bauteilgeometrien. Mit steigendem zusätzlichem Abnahmevermögen bei Thermoplasten kommt es hier zudem zu günstigeren Materialpreisen (vgl. Abbildung 5.24).

Bei der Betrachtung der Unternehmenskosten werden für attraktiv eingeschätzte Nischenmodelle zwei Stückzahlenszenarien betrachtet:

- Das erste Szenario geht von einer Stückzahl von 130.000 Einheiten über eine Laufzeit von sieben Jahren aus.
- Dem zweiten Szenario liegt eine Stückzahl von 350.000 Einheiten über sieben Jahre zugrunde.

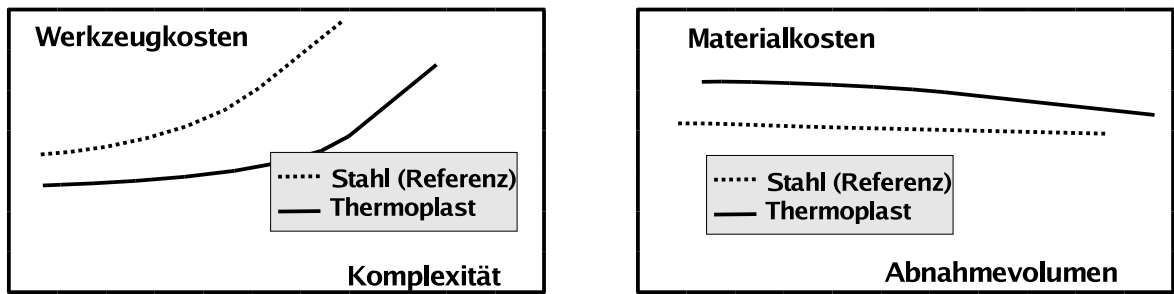


Abbildung 5.24: Entwicklung der Werkzeugkosten und der Materialkosten in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie bzw. dem Abnahmevolumen

Die Tabelle 5.11 zeigt die Zusammensetzung für die relativen Kostenstrukturen der Stückzahlenszenarien für die Alternativen Stahlblech, Partiiell-On-Line und Off-Line.

	Stahl		Thermoplast			
			Partiell On-line		Offline	
	130 T. E.	350 T. E.	130 T. E.	350 T. E.	130 T. E.	350 T. E.
<b>Fertigungskosten</b>	100	65,4	53,2	53,2	45,6	45,6
<b>Herstellkosten</b>	100	73,4	273,6	273,6	418,8	418,8
<b>Sachinvestitionen</b>	100	104	59,4	59,4	59,4	59,4

Tabelle 5.11: Relative Kostenstrukturen im Vergleich

Konsequenterweise gibt es für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit je Bauteil eine Grenzkostenbetrachtung. Dazu werden die erforderlichen Sachinvestitionen  $SBM$  – auf den jeweiligen Buchwert – mit dem Zinsfaktor  $f_z$  verzinst und auf die produzierte Stückzahl umgelegt:

$$SBM_z = SBM \cdot (1 + f_z) \quad (5.1)$$

$$SBM_u = \frac{SBM_z}{A} \quad (5.2)$$

Aus den umgelegten Investitionen  $SBM_u$  und den Herstell-Vollkosten  $HK_{voll}$  ergeben sich als Summe die Unternehmenskosten  $UK$  je Btl. (vgl. Tabelle 5.12).

Die Grenzstückzahl ergibt sich dann aus

	Stahl		Thermoplast			
			Partiell On-line		Offline	
	130 T. E.	350 T. E.	130 T. E.	350 T. E.	130 T. E.	350 T. E.
<b>Unternehmenskosten</b>	100	58,0	153,9	138,7	217,5	202

Tabelle 5.12: Relative Unternehmenskosten im Vergleich

$$A_{Grenz} = \frac{SBM_{z,Stahl} - SBM_{z,TP}}{HK_{voll,TP} - HK_{voll,Stahl}} \quad (5.3)$$

und besagt, dass unter dieser Stückzahl der Einsatz von Thermoplast bezogen auf die Unternehmenskosten wirtschaftlich vorteilhaft ist.

Je nach zu realisierender Geometrie sind nach heutiger Betrachtungsweise Stückzahlen bis zu 150.000 Einheiten wirtschaftlich in einem Partiell-On-Line-Szenario (bzw. 100.000 Einheiten in einem Off-Line-Szenario) mit den geforderten Produkteigenschaften produzierbar. Darüber hinaus kann ein Einsatz von Kunststoff fertigungstechnisch auch Sinn machen, wenn eine Machbarkeit in Stahl aufgrund komplexer Geometrien nicht gegeben ist.

### Flächenbedarf

Neben Kapital und Arbeit (bewertet in der Kostenbewertung) gilt es, auch den Flächenbedarf der betrachteten Alternativen zu bewerten. Unkritisch, weil nicht an bestehende Strukturen anzupassen, ist die Bauteilerstellung, die Lackvorbehandlung und der Decklack. Anders ist dagegen die Beplankung zu bewerten:

- Die zu verbauenden Thermoplast-Teile sind vorbehandelt (Primer) bzw. lackiert und so gegenüber Beschädigungen empfindlicher als unbehandelte Blechteile im Rohbau. Zugleich werden komplette Baugruppen mit einer aufwendigeren Geometrie verbaut. Entsprechend ist für thermoplastische Bauteile mehr Behälterfläche (ca. 20%) und ebenfalls für den Einbau mehr (Handling)Fläche (5%) vorzusehen.
- Bei bestehenden Werksstrukturen ist die Umgestaltung erforderlich. Insbesondere bei dem Partiell-Online Verfahren (Ein- und Ausschleusen der Rohkarosserie nach dem KTL) kann die Umgestaltung der Lackiererei zu beträchtlichen Investitionen führen, was im Einzelfall ein werkspezifisches Ausschlusskriterium darstellt.

### Nutzenbetrachtung

Für die Entscheidungsfindung werden die gewonnenen Erkenntnisse im Handlungssystem Herstellung und Verarbeitung in Nutzenwerte transferiert (vgl. Tabelle 5.13).

	Stahl	Thermoplast	
		Partiell-Online	Offline
Investitionen	0,4	0,7	0,7
HK_Prop	0,6	0,4	0,3
Flächenbedarf	0,5	0,3	0,3

Tabelle 5.13: Nutzenwerte im Handlungssystemn Produktion [20]

#### 5.4.2 Vertrieb, Service & Instandsetzung

Das Handlungssystem Vertrieb ist durch die Substitution von Stahl nur geringfügig betroffen. Geringfügige Vorteile entstehen beim Fahrzeugtransport durch die geringere Schadensempfindlichkeit von Thermoplast-Bauteilen. Andererseits ist eine nachträgliche Behebung von Kleinschäden (Dellen) bei thermoplastischen Bauteilen nicht möglich. Insgesamt kann der Vertrieb für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden.

Der Service und die Instandsetzung müssen allerdings berücksichtigt werden. Es lassen sich folgende Aussagen zusammenfassen:

- Die Schadensempfindlichkeit von Thermoplasten ist generell besser als die von Stahl.
- Das Ausbessern von Schäden ist dagegen deutlich schwieriger. I. d. R. kommt es daher – wie auch häufig bei einem Stahlblech-Bauteil – zum Austausch des beschädigten Bauteils. Abhängig vom verwendeten Anbindungskonzept ist der Teileaustausch dann jedoch einfacher.
- Wie in der Fertigung muss für die Logistik der lackierten Bauteile ein höherer Aufwand betrieben werden.
- Durch einfach demontierbare Anbindungskonzepte kann die Zugänglichkeit zu darunter liegenden Fahrzeugkomponenten erheblich vereinfacht werden.

Insgesamt wird daher aus Sicht von Service und Instandsetzung die Substitution von Stahl (NW = 0,4) durch Thermoplast (NW = 0,5) positiv beurteilt.



### 5.4.3 Beseitigung

Mit der EG-Richtlinie über Altfahrzeuge [44] und deren Umsetzung in nationale Verordnungen [31, 32] sind Automobilhersteller und Importeure zur Rücknahme und Verwertung von Altfahrzeugen und deren Komponenten verpflichtet (vgl. Abbildung 5.25).

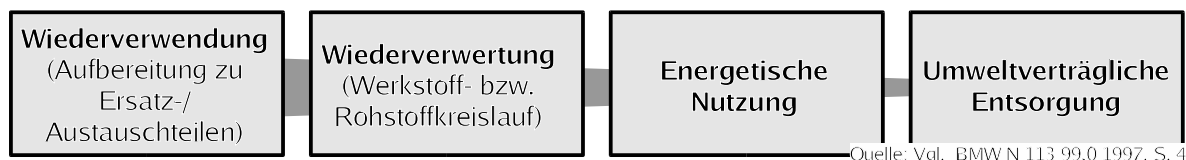


Abbildung 5.25: Altfahrzeugverwertung [8]

Dabei sind zwei Zielvorgaben zu realisieren:

1. „Bis spätestens 1. Januar 2006 werden die Wiederverwendung und Verwertung bei allen Altfahrzeugen auf mindestens 85% des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts pro Jahr erhöht. Innerhalb derselben Frist werden die Wiederverwendung und das Recycling auf mindestens 80% des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts pro Jahr erhöht.“[44, Art. 7, (2a)]
2. „Bis spätestens 1. Januar 2015 werden die Wiederverwendung und Verwertung bei allen Altfahrzeugen auf mindestens 95% des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts pro Jahr erhöht. Bis zu diesem Termin wird die Wiederverwendung und das Recycling auf mindestens 85% des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts pro Jahr erhöht.“[44, Art. 7, (2b)]

Mit dieser Richtlinie ist nun ein weiteres Ausschlusskriterium für die Entscheidungsfindung definiert. Alle Karosserie-Bauteile können prinzipiell wiederverwendet werden. Voraussetzung dafür ist eine zerstörungsfreie Demontage.

Für die stoffliche Wiederverwertung (Recycling) ist eine sortenreine Trennung der Materialien erforderlich (Kennzeichnungspflicht [44, Art. 8]), die dann eine materialspezifische Weiterverwertung ermöglicht. Für Metalle sind diese Werkstoffkreisläufe bereits gut gelöst (z. B. Sortierung über Magnetabscheider). Aber auch sortenreine, unverstärkte Thermoplaste können sehr rentabel recycelt werden. Brennbare Materialien sind zudem

energetisch nutzbar: D. h. durch Energieerzeugung beim Verbrennen kann eine entsprechende Menge Erdöl eingespart werden.[52, S.230][22][23]

Daraus folgt, dass sowohl Thermoplaste als auch Stahl dieses Ausschlusskriterium erfüllen und daher beide weiterhin gültige Alternativen darstellen. Mit einer wirtschaftlichen Bewertung der Kreislaufeignung kann hier weiter differenziert werden:

$$\text{Kreislaufeignung (KE)} = \frac{\text{Kosten}_{(\text{Äquivalentes Neumaterial} + \text{Entsorgung})}}{\text{Kosten}_{(\text{Demontage} + \text{Aufbereitung} + \text{Logistik})}} \quad (5.4)$$

Der hohe Materialpreis von unverstärkten Thermoplasten und dessen einfachen Weiterverwertung liefert eine Kreislaufeignung von 114% (NW=0,8) zu Stahl 100% (NW=0,6).[22, S. 4]

#### 5.4.4 Der Produktentstehungsprozess als Handlungssystem

Mit der thematischen Einordnung der Arbeit in die Integrierte Produkterstellungsmethodik in Kapitel 2 wurde bereits der Produktentstehungsprozess thematisiert. Dieser umfasst die Produktentwicklung sowie Planung und Aufbau der weiteren Handlungssysteme (insb. der Produktion).

Im Folgenden werden die für den Produktentstehungsprozess von Thermoplasten relevanten Auswirkungen aufgezeigt.

##### Know-How

Zunächst muss für den Produktentstehungsprozess sichergestellt sein, dass ein entsprechendes Know-How vorhanden ist. Die Anforderungen für die Handlungssysteme Produktion, Vertrieb, Service/Instandsetzung und Recycling wurden bereits in den vorherigen Abschnitten dargestellt. Die originäre Produktentwicklung (Design, Entwicklung/Konstruktion und Versuch) wurde bislang nicht berücksichtigt.

Neben der Umsetzung der mechanischen Eigenschaften sind es vor allem die fertigungstechnischen Randbedingungen, die bei thermoplastischen Werkstoffen in Design und Konstruktion umgesetzt werden müssen. Innerhalb der Absicherung müssen als Ergänzung zu normalen Versuchsdurchführungen zudem auch spezifische Thermoplast-abhängige Situationen erprobt werden.

Für Thermoplast lassen sich folgende Aussagen für Design, Konstruktion und Versuch treffen:

- Mit Thermoplasten sind komplexere Geometrien darstellbar, was grundsätzlich im Design und bei der Konstruktion neue Styling- und Integrationspotentiale ermöglicht.
  - Die Materialschrumpfung beim Abkühlen führt im Fertigungsprozess bei unterschiedlichen Wandstärken (z.B. Versteifungsrippen und Anbindungsstellen) zu Einfallstellen.
  - Die Farbgebung durch eine spätere Lackierung begrenzt den Einsatz von Hinterschnitten oder scharfen Radien.
  - Die Kerbwirkung bei dynamischen Dauerbelastungen im Fahrzeugbetrieb verhindert fertigungstechnisch realisierbare Radien.
- Die Längenausdehnung von Thermoplasten muss im Design und in der konstruktiven Auslegung berücksichtigt und anschließend im Versuch bestätigt werden. Entstehende Eigenspannungen können zu einem Bruch in den Anbindungsstellen führen. Aber auch Verformungen werden insbesondere im Strakverlauf durch Lichteinfall sichtbar und können in einem emotionalen Designprodukt nicht toleriert werden. Daraus ergeben sich folgende konstruktive Herausforderungen:
  - Die Anbindung des Bauteils an das Fahrzeug muss einer Fest-Los-Lagerung entsprechen. Dabei kann nur ein Anbindungspunkt in alle Richtungen fest definiert sein. Alle anderen Anbindungspunkte müssen entlang ihrer Verbindungsachse zu diesem Anbindungspunkt ausreichend Bewegungsfreiraum bieten. Anstelle fester Verschraubungen oder Schweißpunkte müssen Gleitelemente vorgesehen werden.
  - Im Gesamtzusammenspiel mit umliegenden Bauteilen müssen aufgrund der Längenausdehnung entsprechende Freiräume eingehalten werden. Zentraler Ansatzpunkt bei der heutigen Karosseriegestaltung ist das Spaltmaß, also die Spaltenbreite zwischen benachbarten Außenhaut-Bauteilen. Mit nur einem möglichen Fixpunkt können maximal zwei senkrecht zueinander stehende Kanten eines Bauteils in ihrer Lage definiert werden. Dementsprechend können maximal nur diese anliegende Spalte mit einem knappen Spaltmaß konstruiert werden. Die anderen Spalten sind entsprechend weiter

auszuführen und idealerweise außerhalb des Sichtfeldes zu platzieren bzw. durch Zierleisten etc. zu kaschieren.

- Noch problematischer wird diese thermische Längenausdehnung durch die unterschiedliche Bauteilerwärmung bei direkter Sonneneinstrahlung, da Thermoplaste wie bereits beschrieben sowohl schlechte Wärmeleiter sind als auch eine geringe Wärmekapazität aufweisen.
- Zudem muss auch die Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften berücksichtigt werden. Im Anwendungsbereich – insbesondere auch im Crash-Fall – benötigt das Bauteil eine ausreichende Festigkeit und Zähigkeit.
- Für Blechteile erfolgen mechanische Versuche wie z. B. der Crashtest und optische Beurteilungen bei Raumtemperatur (20°C). Die thermischen Erprobungen bei Blechteilen erfolgen im Allgemeinen zur Dauererprobung als Klimawechseltest.

Die Verwendung thermoplastischer Werkstoffe erfordert hingegen weitere aufwendige Untersuchungen im gesamten Temperaturbereich.

Da sich durch die Längendehnung auch optisch sichtbare Veränderungen ergeben, muss auch die visuelle (Design)-Beurteilung (Auditierung) entlang der wahrscheinlichen Temperaturbereiche erfüllt werden.

Für thermoplastische Bauteile können dazu unterschiedliche thermische Anspruchsniveaus verwendet werden. Die Funktion muss innerhalb des komplett möglichen Temperaturbereiches – üblicherweise -40°C bis +85°C – gewährleistet sein, während der optisch begutachtete Temperaturbereich deutlich kleiner sein kann (-20°C bis +60°C) und dann immerhin noch 96% der Temperaturverteilung abdeckt.

- Die bei der Entwicklung von Blechbauteilen verwendeten Berechnungs- und Simulationssysteme müssen teilweise aufgrund der veränderten Bedingungen für Thermoplaste verändert bzw. neu erstellt werden (z. B. Tiefziehsimulation zur Füllsimulation des Spritzgusswerkzeuges).

Neben dem bisherigen Einsatz von Thermoplasten in Anbauteilen konnte das Know-How über ein Vorentwicklungsprojekt ausgebaut werden. Das Know-How bzgl. der Spezifika von thermoplastischen Außenhautbauteilen wird daher im Schnitt über alle beteiligten Bereiche mit 70% gegenüber Stahl.

## Entwicklungskosten

Die bisherigen Erfahrungen mit thermoplastischen Werkstoffen durch den Einsatz in Zierleisten, Stoßfängern und div. Karosserieverkleidungen und ersten Prototyp-Umsetzungen zeigen, dass für eine Serienentwicklung heute mit 14% höheren Entwicklungskosten gerechnet werden muss.

Selbst wenn ein vergleichbarer Erkenntnisstand und auch geeignete Methoden analog einer Stahlkarosserie vorhanden sind, würde aufgrund der weiterhin zusätzlich erforderlichen Versuche immer noch mit 4% höheren Entwicklungskosten gerechnet.

Besonders positiv sind Thermoplaste jedoch, wenn man die erheblich günstigeren Werkzeugkosten (vgl. Abschnitt 5.4.1) in die Betrachtung einbezieht. Trotz der weiter erforderlichen zusätzlichen Versuche ist der Änderungsaufwand dann um 20% geringer. Thermoplastische Bauteile eignen sich somit insbesondere auch für Modellüberarbeitungen.

### Nutzenbetrachtung

Für die Nutzenbetrachtung werden die in Tabelle 5.14 aufgelisteten Werte herangezogen.

	Stahl	Thermoplast
Know-How	1,0	0,7
Entwicklungskosten	0,5	0,4
Änderungsaufwand	0,4	0,7

Tabelle 5.14: Nutzenwerte im Produktentstehungsprozess [20]

### 5.4.5 Entscheidungsanalyse der Handlungssysteme

Bei der Analyse der Handlungssysteme konnten die in Tabelle 5.15 zusammengefassten Kriterien für die Entscheidungsfindung identifiziert und bewertet werden.

Mit diesen Ergebnissen können folgende Aussagen zur Entscheidungssituation getroffen werden:

1. Mit acht Bewertungskriterien liegt eine *mehrkriterielle Entscheidungssituation* vor.
2. Verschiedene Alternativen sind nach Stand der Technik zurzeit auszuschließen:
  - a) On-Line Verfahren scheitert an den Trockentemperaturen von 190°C.

	Stahl	Thermoplast	
		Partiell-Online	Offline
Investitionen	0,4	0,7	0,7
HK_Prop	0,6	0,4	0,3
Flächenbedarf	0,5	0,3	0,3
Service & Instandsetzung	0,4	0,5	0,5
Kreislaufeignung	0,6	0,8	0,8
Know-How	1,0	0,7	0,7
Entwicklungskosten	0,5	0,4	0,4
Änderungsaufwand	0,4	0,7	0,7

Tabelle 5.15: Nutzenwerte der Handlungssysteme (Partiell-On-Line)

- b) Für Partiiell-On-Line (Niedertemperatur 100°C) gibt es zurzeit keine Lacksysteme.
  - c) Aufgrund vorhandener Strukturen ist zurzeit die Integration von Partiiell-On-line nicht in jede Lackieranlage möglich.
3. Ungewichtet ist die Alternative Thermoplast mit einem Nutzwert von 0,56 gegenüber Stahl mit 0,55 zu präferieren.

Bei einer gewichteten Nutzwertbestimmung dominieren die wirtschaftlichen Aussagen Investitionen und  $HK_{Prop}$ . Da diese jedoch stark stückzahlabhängig sind, werden sie aus den weiteren Betrachtungen separiert. Tabelle 5.16 zeigt die Wichtungen der verbleibenden Kriterien.

	$g_{i,norm}$
Flächenbedarf	0,128
Service & Instandsetzung	0,192
Kreislaufeignung	0,176
Know-How	0,091
Entwicklungskosten	0,192
Änderungsaufwand	0,221

Tabelle 5.16: Gewichtung der Kriterien[20]

Mit diesen Gewichtungsfaktoren ergibt sich dann eine Vorteilhaftigkeit von Thermoplast im Partiiell Online-Verfahren mit 0,571 zu Stahl mit 0,522.

## 5.5 Entscheidungsempfehlung für den Einsatz thermoplastischer Werkstoffe in der Leichtbau-Karosserie

Thermoplastische Werkstoffe im Partiiell-On-Line-Verfahren sind für vertikale Außenhautteile (Seitenwände, Tür-Außenhaut) bei Nischenmodellen mit bis zu 150.000 Einheiten über Laufzeit zu präferieren. Sie sind wirtschaftlich und weisen einen höheren Nutzwert auf.

## 5 Entscheidung: Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie

Wenn aufgrund vorhandener Strukturen die Beplankung in der Lackiererei nicht möglich ist, so kann mit geringfügigen Abstrichen beim Colormatching auch das Off-Line-Verfahren eingesetzt werden. Die wirtschaftliche Grenzstückzahl ist durch die Weiterentwicklung zum On-Line-Verfahren noch deutlich zu verbessern. Mit der Entwicklung eines niedertemperaturfähigen Lacksystems könnten andererseits im Partiiell-On-Line-Verfahren mehr Thermoplaste verwendet werden.

Die Kern-Aussagen für den Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie-Außenhaut sind in Abbildung 5.26 dargestellt.

<b>Einleitung</b>	<b>Grundlagen: Entwicklung</b>	<b>Grundlagen: Systeme</b>	<b>Grundlagen: Entscheidung</b>	<b>Anwendung: Thermoplast</b>	<b>Schluss</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>⊢ Thermoplaste können bei Anbauteilen und hängenden Außenhautbauteilen Stahl substituieren. Neben dem Gewicht sprechen vor allem die höhere Gestaltungsfreiheit bei guter Oberflächenbeschaffenheit für den Einsatz von unverstärkten Thermoplasten. Desweiteren ist der große Bereich der voll reversiblen Verformung vorteilhaft für Partnerschutz und Schadensempfindlichkeit.</li><li>⊢ Für die Produktion ist das Partiiell-On-Line Verfahren zielführend. Die hohen Temperaturen im KTL-Prozess werden vermieden; Colormatching wird durch die Integration im Füller und Decklack realisiert.</li><li>⊢ Die niedrigen Werkzeugkosten machen den Einsatz von Thermoplasten in Kleinserien attraktiv. Der Einsatz in einer Serie mit mehr als 150.000 Einheiten ist in der Regel wirtschaftlich nicht sinnvoll.</li></ul>					

Abbildung 5.26: Überblick und Kernaussagen Kapitel 5



## 6 Zusammenfassung

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war es, Methoden zur Analyse und Entscheidungsfindung für die Systeminnovation Karosserie-Leichtbau mit unverstärktem Thermoplast bereitzustellen.

Dazu wurden ausgehend von dem allgemeinen Technikbegriff vier Aspekte von Systeminnovationen definiert:

- das technische Sachsystem als solches,
- die Handlungssysteme Produktentstehungsprozess und Produktion,
- das Handlungssystem Verwendung mit Gebrauch und Instandhaltung und
- und schließlich das Handlungssystem Beseitigung.

Systeminnovationen zeichnen sich also dadurch aus, dass mehrere technische Aspekte Veränderungen unterliegen. Die in dieser Arbeit betrachtete Substitution von Stahlblech durch unverstärkte Thermoplaste hat – wie gezeigt wurde – verschiedene Auswirkungen auf alle beschriebenen technischen Aspekte.

Da die Aspekte unterschiedliche Fachgebiete tangieren, konnte es nicht Ziel der Arbeit sein, diese in aller Vollständigkeit zu behandeln. Die Arbeit ist demnach auf der Managementebene angesiedelt, indem sie die unterschiedlichen Aspekte miteinander in einer ganzheitlichen Entscheidungsfindung verknüpft. Dazu bildet die kurz dargestellte IP-Methodik den konstruktionswissenschaftlichen Ansatz zum übergreifenden Projektmanagement. Dabei wurde eine detaillierte Aufbereitung der Systemtheorie und Entscheidungstheorie erforderlich.

Im Rahmen der Behandlung der Systemtheorie wurden drei grundlegende Konzepte dargestellt:

- Hierarchisches Systemmodell

## 6 Zusammenfassung

- Strukturales Systemmodell
- Funktionales Systemmodell

Alle drei ließen sich als Software-Prototyp darstellen. Aber erst im Zusammenspiel der Konzepte wird die Systemanalyse zu einer schlagkräftigen Methode. Der hier entwickelte Software-Prototyp zur Systemanalyse bOSSA vereinigt alle drei systemtheoretischen Ansätze.

Angewandt auf die betrachtete Systeminnovation Karosserie-Leichtbau ließ sich ein systemtheoretischer Untersuchungsrahmen für die Arbeit identifizieren. Die übergreifende Klammer bildete dabei das koordinierende Zielsystem, in dem alle für eine Entscheidung bedeutsamen Aspekte berücksichtigt wurden.

Neben der Systemtheorie war die interdisziplinäre Entscheidungstheorie Grundlage für die Arbeit, um eine rationale Entscheidungsfindung mit der Bildung einer Präferenzordnung zu gewährleisten. Dabei wurden zunächst die Voraussetzungen für rationale Entscheidungen mit der Einführung des Ordnungs- und des Transitivitätsaxioms dargestellt. Dann wurden allgemeine Entscheidungsmodelle am Beispiel Karosserie-Leichtbau vorgestellt:

- Entscheidung unter Sicherheit
  - Dominanz und Effizienz
  - Zielunterdrückung und lexikographische Ordnung
  - ungewichteter und gewichteter Mittelwert
- Entscheidung unter Unsicherheit im engeren Sinne
  - Minmax und Maximin-Regel
  - Hurwicz-Kriterium
  - Laplace-Regel
- Entscheidung unter Risiko
  - Erwartungswert-Kriterium
  - Erwartungsnutzen-Prinzip

- Entscheidung unter Unschärfe
  - Fuzzy-Set
  - Interpolation

Aufgrund des dynamischen Zukunftsbezugs und der Komplexität von Systeminnovationen liegen immer Entscheidungen unter Unsicherheit vor. D. h. die später eintretenden Ergebnisse sind weder im Vorfeld genau zu quantifizieren, noch zu bewerten. Im Gegenteil – unterschiedliche Umfeldszenarien beeinflussen die Ergebnisentwicklung. Für eine rationale Entscheidungsfindung zum Einsatz von Thermoplasten in der Karosserie-Außenhaut wurde in der Arbeit das Erwartungswert-Kriterium ausgewählt.

Mit der Arbeit wurden damit die Grundlagen der Entscheidungsfindung bei Systeminnovationen gelegt. Die Substitution von Stahl durch Thermoplast in einer Leichtbau-Karosserie ist für vertikale Außenhautbauteile von Nischenmodellen (< 150.000 Einheiten über Laufzeit) eine zu präferierende Alternative. Neben einer Gewichtseinsparung von 30% ermöglicht Thermoplast designseitig und insbesondere durch die mögliche Integration von weiteren kundenwertigen Funktionen (wie z. B. Antennen) ein hohes Differenzierungspotential.

Die Zukunft wird von der herkömmlichen Stahlblechbauweise zu einem intelligentem Mischbau führen, d. h. die unterschiedlichsten Materialien werden einsatzbezogen verwendet. Im Mischbau zeigt sich allerdings auch der weitere Handlungsbedarf in der Automobilindustrie: alternative materialeitige Systeminnovationen in der Pkw-Karosserie werden folgen. Die gleiche – in dieser Arbeit entwickelte – Systematik kann dann auch bei diesen Materialien für eine rationale Auswahl auf Komponentenebene angewandt werden.



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Umweltbelastungen durch Kfz-Verkehr [99, S. 37]	1
1.2	Grundfunktionen der Karosserie	4
1.3	Gewichtsverteilung beim BMW 320i	4
1.4	Kunststoffe	5
1.5	Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs durch den Einsatz von unverstärkten Thermoplasten in der Pkw-Karosserie	6
1.6	Technische Aspekte des Karosserie-Leichtbaus	7
1.7	Auswirkungen der Unsicherheit auf Erfassung und Bewertung von Systeminnovationen	10
1.8	Kernprozesse in der Automobilindustrie	10
1.9	Zielsetzung der Arbeit – erwartete Erkenntnisse	11
1.10	Überblick und Kernaussagen der Einleitung	13
2.1	Systemtechnische Problemlösungsstrategie [45, S. 77][128, S. 3]	16
2.2	Hierarchische Analyse bei der Problemformulierung[128, S. 4]	16
2.3	Zeitstrahl des Karosserie-Leichtbaus	17
2.4	Vorgehenszyklus der integrierten Produktplanung[45, S. 262, 289]	17
2.5	Lösungsschritte für das Problemfeld Karosserie-Leichtbau	18
2.6	Überblick und Kernaussagen Kapitel 2	19
3.1	Zusammenhang zwischen Systemtheorie und Modelltheorie	22
3.2	Konzepte der Systemtheorie[111, S. 75-77]	22
3.3	Hierarchische Gliederung von Systemen im Vergleich zur einfachen Auflistung	25
3.4	Canvas-Widget	26
3.5	Systemhierarchie und Relationen in BOSSA	29

3.6	Definition der Komplexität [98, S. 23]	30
3.7	Komplexitätsbewältigung bei der Modellierung von Systemen	30
3.8	Wichtige Systemmodelle bei der Problemlösung	32
3.9	Systemtheoretischer Untersuchungsrahmen für Karosserie-Leichtbau	33
3.10	bOSSA: Übergeordnete Systemhierarchie	35
3.11	Überblick und Kernaussagen Kapitel 3	35
4.1	Basiselemente eines Entscheidungssystems [79, S.20]	38
4.2	Entscheidungssituation Karosserie-Leichtbau	39
4.3	Hierarchie der Bewertungskriterien[28, S. 138]	42
4.4	Werte auf dem Zahlenstrahl	44
4.5	Systemmodell und Bewertungsmodell	46
4.6	Zuordnung von Eigenschaften in bOSSA	47
4.7	<i>table</i> -Widget als Entscheidungsmatrix	49
4.8	Bestimmung von Gewichtungsfaktoren in bOSES durch paarweisen Vergleich	57
4.9	Diskursive Entscheidungsfindung auf Basis des Hurwicz-Prinzip [85, S. 39]	60
4.10	Linguistische Variable Spaltmaß	62
4.11	Mehrkriterielle Entscheidungsverfahren	65
4.12	Entscheidungsverfahren bei Unsicherheit	66
4.13	Hierarchisches Zielsystem in bOSES	67
4.14	Alternativen und Szenarien in bOSES	68
4.15	Überblick und Kernaussagen Kapitel 4	68
5.1	Technologieorientierung vs. Komponentenorientierung bei der Bewertung von Thermoplastischen Werkstoffen	69
5.2	Verwendete Methoden	71
5.3	Relevante Funktionen des Sachsystems Karosserie	72
5.4	Beziehungen zwischen Grundfunktionen und Werkstoffeigenschaften	73
5.5	Passive Sicherheit	75
5.6	Unfallverteilung auf Kollisionsarten	76
5.7	Für eine Entscheidungsfindung relevante Attribute des Sachsystems Karosserie in bOSSA	81
5.8	Das hierarchische Sachsystem Karosserie	86
5.9	Funktionen und Subsysteme der Karosserie	87
5.10	Verknüpfte Thermoplaste	89

5.11	Eigenschaftsbereiche einiger Thermoplaste[52, S.88] . . . . .	91
5.12	Ausschlusskriterium: mechanische Eigenschaften . . . . .	92
5.13	Entscheidungskriterien für vertikale Außenhautbauteile . . . . .	93
5.14	Entscheidungsanalyse in bOSES mit ungewichteten Kriterien . . . . .	101
5.15	Kundenzufriedenheit im Kano-Modell[100, S. 37] . . . . .	101
5.16	Gewichtung der Entscheidungskriterien . . . . .	102
5.17	Erwartungsstrukturen bei der Gewichtung von Kriterien . . . . .	104
5.18	Vom Naturstoff zum Produkt . . . . .	107
5.19	Erzeugung von thermoplastischen Bauteilen . . . . .	107
5.20	Fertigung von thermoplastischen Bauteilen im Spritzguss[12] . . . . .	108
5.21	On-Line-Fertigung: Integration der Kunststoffbeplankung in den Karosserie- Rohbau . . . . .	109
5.22	Partiell-On-Line: Integration der Kunststoffbeplankung in den Karosserie- Rohbau . . . . .	110
5.23	Off-Line Fertigung: Separate Lackierung, Beplankung in der Montage . .	111
5.24	Entwicklung der Werkzeugkosten und der Materialkosten in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie bzw. dem Abnahmevolumen . . . . .	112
5.25	Altfahrzeugverwertung [8] . . . . .	115
5.26	Überblick und Kernaussagen Kapitel 5 . . . . .	122





# Tabellenverzeichnis

1.1	Zeiträume einer Systeminnovation[25][24] . . . . .	9
4.1	Wertevergleich der Alternativen . . . . .	46
4.2	Entscheidungsmatrix bei Sicherheit bzgl. der Temperatur 20°C . . . . .	48
4.3	Entscheidungsmatrix bei Sicherheit bzgl. der Temperatur 70°C . . . . .	51
4.4	Transformationskonzept zur Lösung von Entscheidungsproblemen [Entscheidungsmatrix 70°C] . . . . .	53
4.5	Paarweiser Vergleich mit auf 1 normierten Gewichtungen . . . . .	54
4.6	Gewichtungsmatrix mit Gewichtungsfaktoren . . . . .	55
4.7	Gewichtete Ergebnismatrix und Präferenzwerte . . . . .	57
4.8	Ergebnismatrix bei Unsicherheit . . . . .	58
4.9	Laplace-Regel . . . . .	60
4.10	Erwartungsstruktur . . . . .	60
4.11	Erwartungskriterium . . . . .	61
5.1	Einfluss der Lackierung auf die Oberflächentemperatur [64, S. 107] . . . . .	80
5.3	Einsatztemperatur und deren Verteilung . . . . .	94
5.2	Exemplarische Versuche [18][21][19] . . . . .	95
5.4	Bewertung Kraftfluss [20] bei verschiedenen Einsatztemperaturen . . . . .	96
5.5	Bewertung Insassensicherheit [20] bei verschiedenen Einsatztemperaturen . . . . .	97
5.6	Bewertung Partnerschutz und Schädensempfindlichkeit[20] bei verschiedenen Einsatztemperaturen . . . . .	97
5.7	Bewertung Gestaltungsmöglichkeiten[20] bei verschiedenen Einsatztemperaturen . . . . .	98
5.8	Bewertung Oberflächenqualität [20] bei verschiedenen Einsatztemperaturen . . . . .	99

## *Tabellenverzeichnis*

5.9	Übersicht über die normierten Gewichtungsfaktoren . . . . .	105
5.10	Übersicht über die Nutzenwerte je Gewichtungs-Szenario . . . . .	105
5.11	Relative Kostenstrukturen im Vergleich . . . . .	112
5.12	Relative Unternehmenskosten im Vergleich . . . . .	113
5.13	Nutzenwerte im Handlungssystemn Produktion [20] . . . . .	114
5.14	Nutzenwerte im Produktentstehungsprozess [20] . . . . .	120
5.15	Nutzenwerte der Handlungssysteme (Partiell-On-Line) . . . . .	120
5.16	Gewichtung der Kriterien[20] . . . . .	121

# Abkürzungsverzeichnis

Abldg.	Abbildung
Aufl.	Auflage
BMW	Bayerische Motoren Werke
bOSES	Open Source Entscheidungssystem
bOSSA	Open Source System Analyse
Btl.	Bauteile
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	cirka
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
div.	diverse
EG	Europäische Gemeinschaft
engl.	englisch
etc.	et cetera
evtl.	eventuell
F&E	Forschung und Entwicklung
f.	folgende
ff.	mehrere folgende
ggf.	gegebenenfalls
HK	Herstellkosten
Hrsg.	Herausgeber
i.d.R.	in der Regel
i.e.S	im engeren Sinne
inkl.	inklusive
IP	Integrierte Produktentwicklung
KE	Kreislaufeignung
KTL	Kathodische Tauchlackierung
Kfz	Kraftfahrzeug
Lfz.	Laufzeit
min.	mindestens
Mrd.	Milliarden
NW	Nutzwert

## Abkürzungsverzeichnis

p. a.	per anno
Pkw	Personenkraftwagen
S.	Seite
s. o.	siehe oben
s. u.	siehe unten
SBM	Sachanlagen und Betriebsmittel
teilw.	teilweise
TOTE	Test Operate Test Exit
TP	Thermoplast
u. a.	unter anderem
UK	Unternehmenskosten
u. U.	unter Umständen
UV	Ultraviolett
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
Verf.	Verfasser
vgl.	vergleiche
vs.	versus
WE	Wareneingang
z. B.	zum Beispiel
zugl.	zugleich

# Verwendete Formelzeichen

$a$	Beschleunigung
$A$	Stirnfläche
$A$	Alternative; Menge der Alternativen
$A$	Systemeigenschaft; Attribut
$B$	Beziehung; Menge der Systemrelationen
$\mathbf{B}$	Basisvariable
$Be$	Kraftstoffverbrauch
$\mathbf{D}$	Definitionsbereich
$E$	Systemelement; Menge der Elemente
$E, \vec{E}$	Ergebnis einer Alternative; Ergebnisvektor
$F_x$	Fahrwiderstände
$F_B$	Beschleunigungswiderstand
$F_L$	Luftwiderstand
$F_R$	Rollwiderstand
$F_{St}$	Steigungswiderstand
$g_i, g_{i,norm}$	Gewichtungsfaktor; normierter Gewichtungsfaktor
$K$	Ergebniskriterien
$p_{AB}, \tilde{p}_{AB}$	relative Wichtigkeit des Kriteriums A zum Kriterium B
$R$	Relation
$\mathbf{S}$	Sematik
$\mathbf{T}$	Termmenge
$T$	Temperatur
$T_g$	Glastemperatur
$T_m$	Kristallitschmelztemperatur
$T_z$	Zersetzungstemperatur
$U$	Nutzenfunktion
$U$	Umweltelemente; Menge der Umweltelemente
$\tilde{U}$	Unschärfe Menge

## *Verwendete Formelzeichen*

$w$	Eintrittswahrscheinlichkeit
$Z$	Zielkriterien
$\Gamma$	Umwelt; Umgebung
$\Phi$	Präferenzfunktion
$\Omega$	Allsystem
$\eta$	Wirkungsgrad
$\mu$	Zugehörigkeitsfunktion

# Literaturverzeichnis

- [1] ANSELM, D.: *Die Pkw-Karosserie*. Vogel, Würzburg, 1997.
- [2] BAMBERG, G.: *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*. Vahlen, München, 8. Aufl., 1994.
- [3] BARNES, D., M. EWING und E. TROAN: *Tcl and TK: Reference manual*. Red HAT, Westport, 1995.
- [4] BEHLES, F.: *Energie sparen durch Leichtbau*. In: *Fahrzeugbau und Fahrwerk, Leichtbau und Motor und Kraftübertragung*, Bd. 12 d. Reihe *Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften*, S. 23–32. VDI, Düsseldorf, März 1978.
- [5] BERTALAFFY, L.: *Zu einer allgemeinen Systemtheorie*. Bleicher 1972, 1949.
- [6] BICKEL, P. und R. FRIEDRICH: *Was kostet uns die Mobilität*. Springer, Berlin, 1995.
- [7] BLUM, E.: *Betriebsorganisation: Methoden und Techniken*. Gabler, Wiesbaden, 2. Aufl., 1988.
- [8] BMW AG NORMUNG: *Werksnorm 113 99.0: Recyclingoptimierte Fahrzeugkonstruktion*. Unveröffentlicht, Nov. 1997.
- [9] BMW AG NORMUNG : GS 97003: *Oberflächenklassifizierung für lackierte Kraftfahrzeuge*. Unveröffentlicht, 2002.
- [10] BMW GROUP: GESAMTFAHRZEUG – PROJEKT SAKKO: *SAKKO: Crashversuche*. Unveröffentlicht, 2001.
- [11] BMW GROUP: KAROSSERIEENTWICKLUNG – PROJEKT SAKKO: *N 600 91.0*. Unveröffentlicht, 1998.

- [12] BMW GROUP: KAROSSERIEENTWICKLUNG – PROJEKT SAKKO: *Projektdokumentation Verfahrensentwicklung*. Unveröffentlicht, 1998.
- [13] BMW GROUP: KAROSSERIEENTWICKLUNG – PROJEKT SAKKO: *Prüfvorschrift Heckklappe: PR 8 245 150*. Unveröffentlicht, 1998.
- [14] BMW GROUP: KAROSSERIEENTWICKLUNG – PROJEKT SAKKO: *Prüfvorschrift PA15-061*. Unveröffentlicht, 1998.
- [15] BMW GROUP: KAROSSERIEENTWICKLUNG – PROJEKT SAKKO: *Prüfvorschrift PrV 303*. Unveröffentlicht, 1998.
- [16] BMW GROUP: KAROSSERIEENTWICKLUNG – PROJEKT SAKKO: *Prüfvorschrift PrV 306*. Unveröffentlicht, 1998.
- [17] BMW GROUP: KAROSSERIEENTWICKLUNG – PROJEKT SAKKO: *Prüfvorschrift PrV 341*. Unveröffentlicht, 1998.
- [18] BMW GROUP: KAROSSERIEENTWICKLUNG – PROJEKT SAKKO: *ZAKKO: Lastenheft Seitenwand hinten*. Unveröffentlicht, 1998.
- [19] BMW GROUP: KAROSSERIEENTWICKLUNG – PROJEKT SAKKO: *ZAKKO: Lastenheft Türaußenhaut rechts*. Unveröffentlicht, 1998.
- [20] BMW GROUP: KAROSSERIEENTWICKLUNG – PROJEKT SAKKO: *Nutzwertanalyse – Seitenwand vorne: Thermoplast vs. Stahlblech*. Unveröffentlicht, 1999.
- [21] BMW GROUP: KAROSSERIEENTWICKLUNG – PROJEKT SAKKO: *SHL E36/2: Lastenheft Seitenwand vorne*. Unveröffentlicht, 1999.
- [22] BMW GROUP: RECYCLING: *SAKKO: Status Team Recycling*. Unveröffentlicht, 2000.
- [23] BMW GROUP: RECYCLING: *SHL E36/2: Vergleichende Ökologische Bauteilbilanz*. Unveröffentlicht, 2000.
- [24] BMW GROUP: SPARTE PRESSWERK: *Nutzungszeiträume technischer Anlagen*. Unveröffentlicht, März 2000.
- [25] BMW GROUP: TECHNISCHE ZENTRALE – REENGINEERING: *Masterplan Produktentstehungsprozess*. Unveröffentlicht, November 1997.



- [26] BOSCH (Hrsg.): *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Vieweg, Braunschweig, 23. Aufl., 1999.
- [27] BRAESS, H.-H.: *Die Karosserie – typisches Beispiel für Zielkonflikte und Zielkonfliktlösungen für Automobile*. In: *Entwicklungen im Karosseriebau*, S. 1–23. VDI-Verlag, 1992.
- [28] BREIING, A. und M. FLEMMING: *Theorie und Methoden des Konstruierens*. Springer, Berlin, 1993.
- [29] BREIING, A. und R. KNOSOLA: *Bewerten technischer Systeme: theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen*. Springer, Berlin, 1997.
- [30] BRETZKE, W.-R.: *Der Problembezug von Entscheidungsmodellen*. Tübingen, 1980.
- [31] *Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen*. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil I Nr. 41, 28. Juni 2002.
- [32] *407. Verordnung: Altfahrzeugverordnung*. Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, 5. November 2002.
- [33] BÖTTCHER, F. und H. METZNER: *CO<sub>2</sub> : Klimabedrohung oder Politik?*. Haupt, Bern, 1994.
- [34] CLARK, K. B. und T. FUJIMOTO: *Autoentwicklung mit System. Strategie, Organisation und Management in Europa, Japan und USA*. Campus, Frankfurt, 1992.
- [35] DAENZER, W. J. AND HUBER, F.: *Systems engineering : Methodik und Praxis*. Industrielle Organisation, Zürich, 8. Aufl., 1994.
- [36] DE LANGE, H.: *Farbtonangleichung von Kunststoffanbauteilen*. In: *Kunststoffe im Automobilbau - Variabel für die Zukunft*, S. 311–316, Düsseldorf, 1999. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI.
- [37] DIN 70000: *Straßenfahrzeuge: Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten: Begriffe*. Beuth, Berlin, 1994.
- [38] DIN EN ISO 4599: *Spannungsrißprüfung*. Beuth, Berlin, 1994.

- [39] DIN ISO 3560: *Straßenfahrzeuge - Prüfverfahren für Frontaufprall gegen starre Barriere*. Beuth, Berlin, 1976.
- [40] DYLLA, N.: *Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren*. Doktorarbeit, TU München, 1990.
- [41] DÖRRER, T.: *Wissensbasierte Evaluierung zukünftiger Produktionsstrategien*. Shaker, Aachen, 2000. Zugl. TU Clausthal, Doktorarbeit, 1999.
- [42] DÖRSAM, P.: *Grundlagen der Entscheidungstheorie*. PD-Verlag, Heidenau, 3. Aufl., 2001.
- [43] EATON, J. W.: *GNU Octave: A high-level interactive language for numerical computations*. <http://www.octave.org>, 3. Aufl., 1997.
- [44] *Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge*.
- [45] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung : Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion*. Hanser, München, 1995.
- [46] EHRENSPIEL, K., A. KIEWERT und U. LINDEMANN: *Kostengünstig entwickeln und konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. Springer, Berlin, 2000.
- [47] ELBLING, O. und C. KREUZER: *Handbuch der strategischen Instrumente*. Überreuter, Wien, 1994.
- [48] *Schwerpunkt Straßenverkehr*. ESSO AG, Presse- und Informationsabteilung Kapstadtring 2, 22297 Hamburg, 1999.
- [49] ESTER, J.: *Systemanalyse und mehrkriterielle Entscheidung*. Verlag Technik, Berlin, 1987.
- [50] FIGEL, K.: *Optimieren beim Konstruieren: Einsatz von Optimierungsverfahren und Expertensystemen*. Hanser, München, 1988.
- [51] FORRESTER, J.: *Industrial Dynamics*. M.I.T. Press, Cambridge (Mass.), 1961.
- [52] FRANCK, A.: *Kunststoff-Kompendium. Herstellung, Aufbau, Verarbeitung, Anwendung, Umweltverhalten und Eigenschaften der Thermoplaste, Polymerlegierungen, Elastomere und Duroplaste*. Vogel, Würzburg, 1996.

- [53] FRANKEN, M.: *Automobil: Faserverstärkte Werkstoffe sind für die Fahrzeugproduktion oft noch viel zu teuer. Composites sind nur in Nischen stark.* VDI-Nachrichten, (38):21–21, Sep. 1998.
- [54] FRANKEN, M.: *Werkstoffe: Hersteller wollen mit dünneren Blechen leichtere Autos bauen: Stahlindustrie hat Leichtbauprojekt abgeschlossen.* Handelsblatt, 33(153):39–39, Aug. 1998.
- [55] FRIEDL, C.: *Altauto-Richtlinie der EU verhindert das 2-Liter-Auto.* VDI-Nachrichten, 13. Okt. 2000.
- [56] FURRER, P. und M. BLOECK: *Aluminium-Karosseriebleche : Lösungen für den kosteneffizienten Automobil-Leichtbau.* Verl. Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 2001.
- [57] GAUSEMEIER, J., A. FINK und O. SCHLAKE: *Szenario-Management: Planen und Führen mit Szenarien.* Hanser, München, 1995.
- [58] GAUSEMEIER, J., A. FINK und O. SCHLAKE: *Strategic Product Planning – the Use of Scenarios to Develop New Products and Markets.* In: BERLIN, I. (Hrsg.): *IX. Internationales Produktionstechnisches Kolloquium : Technologiemanagement*, S. 95–103, 1998.
- [59] GIERHARDT, H.: *Global verteilte Produktentstehungsprojekte.* Doktorarbeit, TU München, 2002.
- [60] GIPSER, M.: *Systemdynamik und Simulation.* Teubner, Stuttgart, 1999.
- [61] GOMEZ, P. und G. PROBST: *Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens - Vernetzt denken, unternehmerisch handeln, persönlich überzeugen.* Haupt, Bern, 1995.
- [62] GOTTSCHALK, B.: *CO<sub>2</sub>: Automobilindustrie auf Reduktionskurs.* Pressedienst: <http://www.vda.de/autoaktu/REGISTER/0112.htm>, Dez. 1997.
- [63] GRUDEN, D.: *Die ökologische Dimension des Automobils.* expert, Renningen-Malmsheim, 1996.
- [64] HALDENWANGER, H. G., J. HEISS und H. REIM: *PUR-Hardtop für das Audica-briolet.* In: *Kunststoffe im Automobilbau - Zukunft durch neue Anwendungen*, S. 87–110, Düsseldorf, 1998. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI.

- [65] HARRISON, M. und M. MCLENNAN: *Effective Tcl/Tk programming : writing better programs with Tcl and Tk*. Addison-Wesley, Massachusetts, 1998.
- [66] HAUKE, W.: *Fuzzy-Modelle in der Unternehmensplanung*. Physika, Heidelberg, 1998.
- [67] HAUSCHILDT, J.: *Innovationsmanagement*. Vahlen, Berlin, 2. Aufl., 1997.
- [68] HUBKA, V. und E. EDER: *Einführung in die Konstruktionswissenschaft*. Springer, Berlin, 1992.
- [69] JANDY, G.: *Systemtechnik (Systems Engineering)*. Veröffentlichung des Instituts für Maschinenwesen - Im Baubetrieb der Universität (TH) Karlsruhe, 1986.
- [70] JONAS, W.: *Design-System -Theorie : Überlegungen zu einem systemtheoretischen Modell von Design-Theorie*. Die Blaue Eule, Essen, 1994. Zugl.: Wuppertal, Univ., Habil.-Schr., 1994.
- [71] KAMISKE, G. und J. BRAUER: *Qualitätsmanagement von A-Z. Erläuterungen moderner Begriffe des QM*. Hanser, München, 2. Aufl., 1995.
- [72] KLEIN, B.: *Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. Vieweg, Braunschweig, 1997.
- [73] KOŠTURIK, J. und M. GREGOR: *Simulation von Produktionssystemen*. Springer, Wien, 1995.
- [74] KRAMER, F.: *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen*. Vieweg, Braunschweig, 1998.
- [75] KREBS, C. und M.-A. AVONDET (Hrsg.): *Langzeitverhalten von Thermoplasten : Alterungsverhalten und Chemikalienbeständigkeit*. Hanser, München, 1999.
- [76] KUDLICZA, P.: *Schwere Entscheidungen zum leichten Pkw*. VDI-Nachrichten, (20):14–14, 1996.
- [77] KUENHEIM, E. v.: *Wirtschaftsfaktor Auto*. der arbeitgeber, (16):774–775, 1981.
- [78] LAMPE, T., F. KÖNIG, P. SCHWARZER und T. CREER: *Emotionen wecken durch edle Oberflächen*. In: *Kunststoffe im Automobilbau - Variabel für die Zukunft*, S. 139–164, Düsseldorf, 1999. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI.

- [79] LAUX, H.: *Entscheidungstheorie*. Springer, Berlin, 1998.
- [80] LEUTE, U.: *Kunststoffe und EMV : elektromagnetische Verträglichkeit mit leitfähigen Kunststoffen*. Hanser, München, 1999.
- [81] LINDEMANN, U.: *Theorie und Praxis: Fallbeispiel einer Magnetbremse*. In: *2. Europäischer Triz Kongress: Triz macht erfinderisch, Lösungen mit Pfiff, schneller als der Wettbewerb*, S. 1–8, Salzburg, Mai 2001. Europäisches Triz-Centrum für innovatives Problemlösen e.V.
- [82] LINGNAU, G.: *Einer klugen Mischung der Materialien gehört die Zukunft: Karosserie-Werkstoffe für Personewagen*. Frankfurter Allgemeine Zeitung, (53):t1–t2, 04.03.1997.
- [83] LUCZAK, H.: *Arbeitswissenschaft*. Springer, Berlin, 1993.
- [84] MASSBERG, W.: *Beherrschung der Komplexität in der Produktion*. Werkstattstechnik, 87:349–354, 01. Juli 1997.
- [85] MEYER, R.: *Entscheidungstheorie*. Gabler, Wiesbaden, 1999.
- [86] MILBERG, J.: *Perspektiven für die Produktion aus der Sicht des Fahrzeugbaus : Agilität als Wettbewerbsfaktor*. In: BERLIN, I. (Hrsg.): *IX. Internationales Produktionstechnisches Kolloquium : Technologiemanagement*, S. 29–38, 1998.
- [87] MÜLLER, J.: *Arbeitsmethoden der Technikwissenschaft : Systematik, Heuristik, Kreativität*. Springer, Berlin, 1990.
- [88] NELSON, C.: *Tcl/Tk:Programmers Reference*. Osborne/McGraw-Hill, Berkeley, 2000.
- [89] NITSCH, R. VON: *Entscheidungslehre*. Wissenschaftsverlag Mainz, Aachen, 3. Aufl., 1998.
- [90] NN: *Materialschlacht um die Karosserie: Werkstoffe: Stahl und Aluminium buhlen um die Gunst der Automobilhersteller*. Automobilproduktion, (1):102–104, 01.02.1998.
- [91] NN: *Mercedes: Die Produktoffensive rollt*. Automobilproduktion, (3):28–31, 01.06.1996.

- [92] NN: *15 Monate bis zur Serienreife. Die japanischen Automobilhersteller starten eine beispiellose Offensive zur Entwicklung neuer Produkte.* Automobilproduktion, (Automobil Entwicklung):52–58, 01.09.1997.
- [93] NN: *Statistisches Jahrbuch für das Ausland.* Metzler-Poeschel, Stuttgart, 1998.
- [94] NN: *Negative Gewichtsspirale: Erster Ansatz einer quantitativen Erfassung.* Automobiltechnische Zeitschrift, Januar 1999.
- [95] NOPPE, C. und A. JASKOLA: *Integration von Bauteilen in BMW-Fahrzeuglackierereien.* In: *Kunststoffe im Automobilbau - Variabel für die Zukunft*, S. 191–200, Düsseldorf, 1999. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI.
- [96] OUSTERHOUT, J. K.: *Tcl und Tk : Entwicklung grafischer Benutzerschnittstellen für das X Window System.* Addison-Wesley, Bonn, 1995.
- [97] PAHL, G. und W. BEITZ: *Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung.* Springer, Berlin, 4. Aufl., 1997.
- [98] PATZAK, G.: *Systemtechnik. Planung komplexer und innovativer Systeme.* Springer, Berlin, 1982.
- [99] PETERSEN, R. und H. DIAZ-BONE: *Das Drei-Liter-Auto.* Birkhäuser, Berlin, 1998.
- [100] PFEIFER, T.: *Qualitätsmanagement : Strategien, Methoden, Techniken.* Hanser, München, 2. Aufl., 1996.
- [101] PIPPERT, H.: *Karosserietechnik: Personenkraftwagen, Lastkraftwagen, Omnibusse: Leichtbau, Werkstoffe, Fertigungstechniken, Konstruktion und Berechnung.* Vogel, Würzburg, 3. Aufl., 1998.
- [102] POMBERGER, G. und G. BLASCHEK: *Grundlagen des Software engineering.* Hanser, München, 1993.
- [103] REIMPELL, J. und K. HOSEUS: *Fahrwerktechnik: Fahrzeugmechanik.* Vogel, Würzburg, 2. Aufl., 1992.
- [104] REINHARDT, G., U. LINDEMANN und H. JOACHIM: *Qualitätsmanagement : Ein Kurs für Studium und Praxis.* Springer, Berlin, 1996.

- [105] REUTER, W.: *Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunde mit Class-A-Oberflächenqualität für den Einsatz in der Fahrzeugaußenhaut*. Doktorarbeit, Universität Kaiserslautern, 2001.
- [106] RINK, C.: *Aluminium als Karosseriewerkstoff : Recycling und energetische Betrachtungen*. Doktorarbeit, Universität Hannover, 1996.
- [107] RODENACKER, W. G.: *Methodisches Konstruieren*. Springer, Berlin, 4. Aufl., 1991.
- [108] ROHBECK, J.: *Technologische Urteilskraft : Zu einer Ethik des Handelns*. Suhrkamp, Frankfurt, 1993.
- [109] ROPOHL, G. (Hrsg.): *Systemtechnik – Grundlagen und Anwendung*. Hanser, München, 1975.
- [110] ROPOHL, G.: *Ethik und Technikbewertung*. Suhrkamp, Frankfurt, 1996.
- [111] ROPOHL, G.: *Allgemeine Technologie : Eine Systemtheorie der Technik*. Hanser, München, 2. Aufl., 1999.
- [112] ROPOHL, G.: *Technologische Aufklärung: Beiträge zur Technikphilosophie*. Suhrkamp, Frankfurt, 2. Aufl., 1999.
- [113] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen : Konstruktionslehre*, Bd. 1. Springer, Berlin, 2. Aufl., 1994.
- [114] SCHNEEWEISS, C.: *Planung 1 - Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen*. Springer, Berlin, 1991.
- [115] SCHNEIDER, H.: *Management werkstoffseitiger Innovationen – ein theoretisch-konzeptioneller Ansatz zur Erklärung und Ausgestaltung einer strategischen Vorsteuerung*. Vandenhoeck, Göttingen, 1992.
- [116] SCHUHMANN, J., U. MEYER und W. STRÖBERLE: *Grundzüge der mikroökonomischen Theorie*. Springer, Berlin, 1999.
- [117] *Fakten und Argumente. Aktuelle Themen aus der Mineralölwirtschaft*. Deutsche Shell Aktiengesellschaft, Hamburg, Oktober 1998.
- [118] SPUR, G.: *Technologie und Management : zum Selbstverständnis der Technikwissenschaften*. Hanser, München, 1998.

- [119] STEINMEIER, E.: *Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der Pkw-Entwicklung*. Doktorarbeit, TU München, 1998.
- [120] TERNINKO, J., A. ZUSMAN und B. ZLOTIN: *TRIZ – der Weg zum konkurrenzlosen Erfolgsprodukt : Ideen produzieren, Nischen besetzen, Märkte gewinnen*. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 1998.
- [121] THANNHEISER, U.: *Strukturanalyse unscharfer Informationen anhand von korrelationsanalytischen Verfahren*. Doktorarbeit, RWTH Aachen, 1998.
- [122] TUSCHIK, H.-P. und H. WOLTER: *Mathematische Logik: Grundlagen, Modelltheorie, Entscheidbarkeit, Mengenlehre*. BI Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1994.
- [123] *NCAP Crash Test Sources for Previously Tested Motor Vehicles*. Highway a. Safety Report, November 1995.
- [124] VARIAN, H. R.: *Grundzüge der Mikroökonomie*. Oldenbourg, München, 4. Aufl., 1999.
- [125] VDA 621-412: *Prüfung*. Verband der Automobilindustrie, 1996.
- [126] VDI-RICHTLINIE 2057: *Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen*. VDI, 1987.
- [127] VDI-RICHTLINIE 2220: *Produktplanung : Ablauf, Begriffe und Organisation*. VDI, 1980.
- [128] VDI-RICHTLINIE 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme*. VDI, 1993.
- [129] VDI-RICHTLINIE 2222 BLATT 1: *Konstruktionsmethodik: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. VDI, 1997.
- [130] VDI-RICHTLINIE 3633: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*. VDI, 1993.
- [131] VDI-RICHTLINIE 3780: *Technikbewertung: Begriffe und Grundlagen*. VDI, 1991.
- [132] VOLLRATH, K.: *Ultraleichte Stahl-Karosserie fährt weiter*. VDI-Nachrichten, (32):14–14, 07.08.1998.



- [133] VOLZ, A. K.: *Systemorientierter Karosserie-Konzeptentwurf am Beispiel der Crashesimulation*. Doktorarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2000.
- [134] WEBER, K. P.: *System Dynamics: Untersuchung eines kybernetisch-systemtheoretischen Modellansatzes unter besondere Berücksichtigung von wachstumstheoretischen Modellen*. Fischer, Frankfurt, 1979.
- [135] WENTZIEN, H.: *Kunststoffanwendungen im Außenbereich*. In: *Kunststoffe im Automobilbau - Variabel für die Zukunft*, S. 29–45, Düsseldorf, 1999. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI.
- [136] WERNERS, B.: *Approximative Interferenz mit linguistischen Variablen*. Springer, Berlin, 1994.
- [137] WIENER, N.: *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press, Cambridge, 1948.
- [138] ZAHN, E.: *Handbuch Technologiemanagement*, Kap. Gegenstand und Zweck des Technologiemanagements. Schäffer-Poeschell, Stuttgart, 1995.
- [139] ZIMMERMANN, H.-J.: *Fuzzy set theory and its applications*. Kluwer Academic Publisher, Boston, 1991.
- [140] ZIMMERMEYER, G.: *Ökologische, politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen der deutschen Automobilindustrie*. In: GRUDEN, D. (Hrsg.): *Die ökologische Dimension des Automobils*. expert, Renningen-Malsheim, 1996.