



**Verbundprojekt BAHNKREIS**  
Förderkennzeichen des BMBF: 02PV21334

---

# Nachhaltiges Wirtschaften am Beispiel von Schienenfahrzeugen

## Band 1

### Projektgrundlagen: Ausgangssituation, Ziele, Prozesse, Datenbasis

#### Verfasser:

|                             |                    |
|-----------------------------|--------------------|
| Dr. Ing. Wilfried Gerhäußer | Siemens AG A&D SE  |
| Dr. Ing. Herbert Ebach      | Siemens AG VT 875  |
| Dipl. Ing. Michael Eberlein | Siemens AG VT 875  |
| Dipl. Ing. Thomas Inderthal | Siemens AG VT 8 PT |

Erlangen  
25. Oktober 2000



## Band 1

# Verbundprojekt BAHNKREIS

Förderkennzeichen des BMBF: 02PV21334

## Ausgangssituation, Ziele, Prozesse, Datenbasis

---

### Verzeichnis der Ergebnisberichte:

|  |  |
|--|--|
| <b>Band 1: Projektgrundlagen:</b>                  | <b>Ausgangssituation, Ziele, Prozesse, Einflüsse, Datenbasis</b>   |
| <b>Band 2: LC-Modellierung:</b>                    | <b>Gesamtmodellstruktur, LC-Prozeßmodell, Ein- und Ausgabedaten, Datenbank, Gebrauchswertmodul, Algorithmen</b>    |
| <b>Band 3: Baugruppenmodell:</b>                   | <b>Modellstruktur, Algorithmen, Ein- und Ausgabedaten, Schnittstellen zum LC-Prozeßmodell</b>                      |
| <b>Band 4: Materialeinsatz:</b>                    | <b>Werkstoffstruktur der Schienenfahrzeuge , Beispielbaugruppen, Materialkreislaufanalyse</b>                      |
| <b>Band 5: Modellrealisierung:</b>                 | <b>Ergebnisse, Erfahrungen, Anwendungsbereich, Ausblick</b>  |
| <b>Band 6: Anforderungen an Schienenfahrzeuge:</b> | <b>aus Betreibersicht, aus Bestellersicht, aus Herstellersicht, Konstruktionsrichtlinien, Kreislaufgerechtheit</b> |

|           |   |                                    |
|-----------|---|------------------------------------|
| <b>1</b>  | <b>Einleitung</b>   | <b>4</b>                           |
| <b>2</b>  | <b>Ausgangssituation</b>  | <b>5</b>                           |
| 2.1       | Auslegungsgrundsätze bei Schienenfahrzeugen                     | 5                                  |
| 2.2       | Kriterien für die Auswahl von Testfahrzeugen                    | 6                                  |
| 2.3       | Optimierungspotenziale  | 7                                  |
| 2.4       | Aspekte der Systematik zur Beurteilung von Schienenfahrzeugen   | 10                                 |
| 2.5       | Charakteristik bisheriger Beurteilungsverfahren                 | 11                                 |
| <b>3.</b> | <b>Ziele</b>  | <b>11</b>                          |
| 3.1       | Allgemeine Anforderungen  | 12                                 |
| 3.2       | Anforderungen in den Lebenszyklusphasen                         | 15                                 |
| 3.3       | Modul LCC und Gebrauchswert                                     | 17                                 |
| 3.4       | Umweltaspekte   | Fehler! Textmarke nicht definiert. |
| 3.5       | Software und Programmbedienung                                  | 18                                 |
| <b>4.</b> | <b>Prozesse</b>   | <b>19</b>                          |
| 4.1       | Allgemeines   | 19                                 |
| 4.2       | Herstellungsprozess   | 20                                 |
| 4.3       | Hauptphase Betrieb I (vor Modernisierung)                       | 21                                 |
| 4.4       | Modernisierung  | 23                                 |
| 4.5       | Hauptphase Betrieb II (nach Modernisierung)                     | 23                                 |
| 4.6       | Entsorgung  | 24                                 |
| <b>5.</b> | <b>Einflüsse der Datenbasis</b>                                 | <b>24</b>                          |
| 5.1       | Eingabedaten  | 24                                 |
| 5.2       | Modellierung  | 26                                 |
| 5.2.1     | Kostenrechnungen  | 26                                 |
| 5.2.2     | Gebrauchswert   | 27                                 |
| 5.2.3     | Ökologierechnungen  | Fehler! Textmarke nicht definiert. |
| 5.3       | Kostenbasis und Kostenveränderungen während der Lebensdauer     | 27                                 |
| 5.4       | Zuordnung der Kosten und Materialverbräuche zu den Verursachern | 29                                 |
| <b>6</b>  | <b>Zusammenfassung</b>  | <b>30</b>                          |
| <b>7</b>  | <b>Anhang: Literaturangaben</b>                                 | <b>31</b>                          |

## 1 Einleitung

Ökologische Themen treten mehr und mehr in den Vordergrund. Der Betreiber eines Schienenfahrzeuges muss sich trotz starker Investitionsaktivitäten die Frage nach der Umweltgerechtigkeit gefallen lassen. Neue Standards entstehen. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz und DIN ISO 14040 /1/ sind seit 1996 in Deutschland in Kraft und Methoden wie Life Cycle Assessment machen von sich reden. Antwort auf offene Fragen aus dem Umweltbereich soll das Projekt „Bahnkreis“ vorbereiten. Seit April 1998 befasst sich das von BMBF geförderte Forschungsprojekt mit dem Themenbereich „Wirtschaften in Kreisläufen am Beispiel von Schienenfahrzeugen“ in Zusammenarbeit mit dem Rhein-Main-Verkehrsverbund, der DB AG, den Hochschulen TU Berlin und TU Dresden, dem IFQI Dresden und den Firmen Bombardier und Siemens AG. Die am Projekt beteiligten Partner sind in Abb. 1 zusammengestellt.

Das Projekt „Nachhaltiges Wirtschaften am Beispiel von Schienenfahrzeugen“ wurde im April 1998 begonnen und vom BMBF gefördert.

| <b>Bahnbetreiber</b>              | <b>Herstellerfirmen</b> | <b>Hochschulen, Institute</b> |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| <b>Deutsche Bahn AG</b>           | <b>Bombardier</b>       | <b>TU Dresden</b>             |
| <b>Rhein-Main-Verkehrsverbund</b> | <b>Siemens</b>          | <b>TU Berlin</b>              |
|                                   |                         | <b>IFQI Dresden</b>           |
|                                   |                         | <b>HTW Dresden</b>            |

**Abb.1: Projektpartner für Projekt Bahnkreis**

Das Ziel des Projektes ist es, eine Basis zu schaffen, auf der Herstellerfirmen, Betreiber der Schienenfahrzeuge und sonstige Interessierte eine Gesamtdarstellung der Kosten, des Gebrauchswerts und der Umweltauswirkungen durch das Schienenfahrzeug über seinen gesamten Lebensweg erhalten, und zwar beginnend mit der Planung bis hin zur Entsorgung. Der Vorteil einer solchen Betrachtungsweise ist, dass das Gesamtsystem einer Fahrzeugflotte und des Einsatzverhaltens optimiert werden kann. Daraus können dann wieder verbesserte Fahrzeuge entstehen, die nicht nur in Teilbereichen, sondern bezüglich der Gesamtkosten optimiert sind. Den Vorteil hat über die Kosten und den Gebrauchswert letztlich der Bahnkunde, da Preisvorteile an ihn weitergegeben werden können. Darüber hinaus soll die Optimierung weitere Gebiete, wie das Umweltverhalten des Fahrzeugs oder den Nutzen des Fahrzeugs für den Bahnkunden (Gebrauchswert), z. B. in Form von Sicherheit, Komfort, Schnelligkeit, etc. umfassen.

Zur Optimierung dieser Eigenschaften müssen die Eigenschaften des Fahrzeugs, die Herstell-, Betriebs-, Instandhaltungs- und Modernisierungsprozesse sowie deren Kosten möglichst genau bekannt sein. In diesem Projekt wurde versucht, das Eingabematerial für verschiedene bei der DB AG und beim RMV in Betrieb befindliche Fahrzeuge zusammenzutragen und daraus die Zielgrößen für das jeweilige Fahrzeug zu berechnen. Als Demonstrationsobjekt wurden der Triebwagen ET 420 und der Doppelstockwagen DABz 756 ausgewählt.

In dem hier vorliegenden Band 1 von insgesamt 6 Bänden werden die Ausgangssituation, die Ziele, die zu Grunde liegenden Prozesse und die notwendigen Eingabedaten beschrieben.

## 2 Ausgangssituation

Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, nach welchen Grundsätzen ein Schienenfahrzeug angelegt wird und wie der Stand der Vorgehensweise zu Beginn des Projekts sich darstellte. Daran anschließend werden Optimierungspotenziale aufgezeigt. Die bisher vorliegenden Beurteilungsverfahren werden charakterisiert.

### 2.1 Auslegungsgrundsätze bei Schienenfahrzeugen

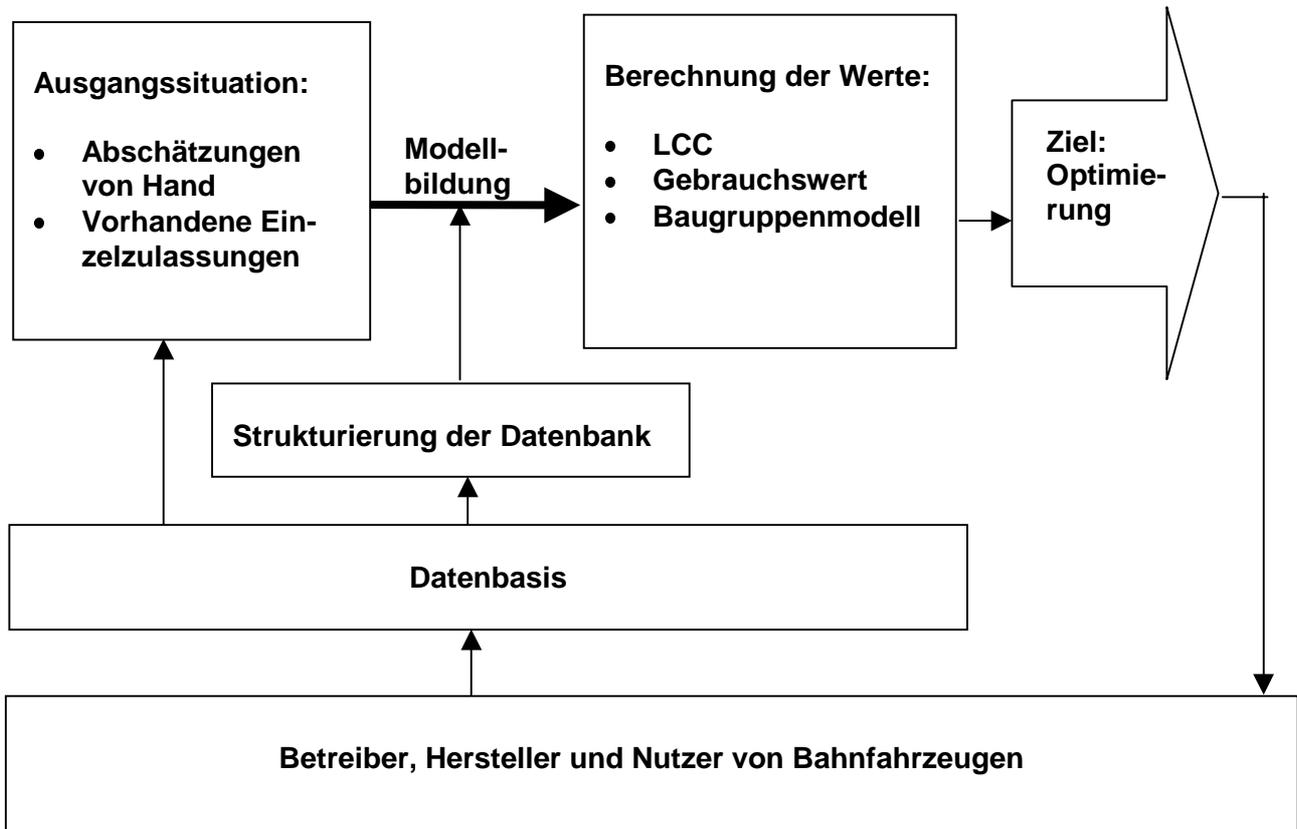
Die Grundsätze, nach denen ein Schienenfahrzeug ausgelegt und betrieben wird, werden bestimmt durch das Zusammenwirken mehrerer unabhängiger Partner, wie z. B.

- Bahnindustrie
- Bahnbetreiber
- Instandhalter
- Genehmigungsbehörden und
- Nutzer der Fahrzeuge.

Die Situation bei der Gesamtbeurteilung von Schienenfahrzeugen zeigt die Abb. 2. Je nachdem, welchen Standpunkt man bei der Beurteilung vertritt, werden unterschiedliche Anforderungen im Vordergrund stehen. Der Hersteller der Fahrzeuge wird vor allem darauf achten, dass er das Produkt marktgerecht anbieten kann. Für einen Betreiber ist neben dem Anschaffungspreis der Aufwand für die Instandhaltung sowie für die verbrauchte Traktionsenergie von größter Bedeutung, während eine Genehmigungsbehörde vor allem auf die Sicherheit der Fahrzeuge achtet.

Zusätzlich zu den oben genannten Punkten sind die Erwartungen der Fahrgäste zu berücksichtigen. Der Bahnkunde möchte möglichst sicher und bequem sowie auch preiswert die Transportleistung in Anspruch nehmen. Darüber hinaus erwartet der Kunde, dass die Transportleistung „Bahnfahrt“ ökologisch günstiger ist als eine Fahrt mit dem Pkw oder mit dem Flugzeug.

Jeder der an Herstellung und Betrieb des Fahrzeugs Beteiligten hat somit eigene – sich ergänzende - Anforderungen bei der Auslegung und der Konstruktion der Fahrzeuge /2, 3, 4/. Aus diesem Grund entstanden bereits in der Vergangenheit mehrere unterschiedliche Programme /5/ als Hilfsmittel zur Beurteilung der Fahrzeuge. Um hier eine einheitliche Sichtweise und eine einheitliche Vorgehensweise in Abstimmung mit den entsprechenden Normen /6, 7, 8/ zu erreichen, wurde das Projekt „Nachhaltiges Wirtschaften am Beispiel von Schienenfahrzeugen in Zusammenarbeit mit den oben genannten Partnern durchgeführt. Die Erwartungen der Bahnkunden wurden von den Betreibern in Befragungsaktionen erhoben und in die Betrachtungen eingebracht (siehe Band 6).



**Abb.2: Situation zur Beurteilung von Schienenfahrzeugen**

## 2.2 Kriterien für die Auswahl von Testfahrzeugen

Die Fragen, die ein neu zu erstellendes Beurteilungsverfahren beantworten sollte, sind vielfältiger Natur und stammen aus den verschiedensten Anforderungskategorien (vgl. Abschnitt 2.1). Ein solches ganzheitliches Verfahren muss ein gleichartiges Vorgehen bei einem breiten Spektrum an Fahrzeugen ermöglichen; es sollten Einzelfahrzeuge, Züge und Fahrzeugflotten berechnet werden können (Abb. 3). Ferner sollte für mindestens zwei verschiedene Fahrzeuge eine Datenbasis für die Testrechnungen vorhanden oder beschaffbar sein.

**In der Prototypversion betrachtete Objekte:**

**Triebzug ET 420:**



**Baugruppe: Fahrmotor**

**Doppelstockwagen DABz 756:**



**Baugruppe: Zwischenboden**

**Mögliche weitere Objekte:**

- Einzelfahrzeuge
- weitere Baugruppen (Komponenten von Fahrzeugen)
- Züge
- Zugverbände
- Fahrzeugflotten

**Abb. 3: Betrachtete Objekte**

**2.3 Optimierungspotenziale**

Bei der ganzheitlichen Optimierung von Fahrzeugen müssen alle Einflüsse auf das Fahrzeug während seiner gesamten Lebensdauer betrachtet werden.

Aus den für das Fahrzeug spezifischen Größen, wie z. B. der Fahrzeugstruktur, den Werkstoffen, den Massen und den Preisen für die einzelnen Komponenten – den sog. Eingabegrößen – werden die interessierenden und zu optimierenden Werte – die sog. Zielgrößen – berechnet. Die Berechnung erfolgt über Verknüpfungen unter Beachtung des Einflusses aller Prozesse, der Umgebungsbedingungen, sowie aller weiterer relevanter Größen (Einflussgrößen). Die einzelnen Größen sind untereinander über ein sog. Wirkungsgefüge verknüpft.

Die Werkzeuge zur ganzheitlichen Optimierung werden sinnvollerweise in einem Software – Werkzeug integriert. Die Ziele bei der Erstellung für ein solches Werkzeug sind in der Abb. 4 skizziert.

- **Berechnung von Kenngrößen zur Beurteilung der Fahrzeuge**
- **Betrachtungen zu den Gebieten Ökonomie, Gebrauchswert und ökologische Auswirkungen**
- **Berechnung der Zielgrößen für jeden Lebensabschnitt und für die gesamte Lebensdauer**
- **Werkzeug zum Vergleich von Bauartvarianten und Baureihen**
- **Optimierung der Fahrzeuge durch Ableitung von Konstruktionsempfehlungen**
- **Aufstellung eines Standards zum Vergleich von Fahrzeugen untereinander und zur Einsatz-Optimierung**

**Abb. 4: Ziele eines Softwarewerkzeugs zur Berechnung von LCC und LCA-Aspekten**

Neben der Sicherheit der Fahrzeuge und dem Gebrauchswert des Fahrzeugs (d. h. der Attraktivität für den Benutzer) interessieren insbesondere die Kosten, die bei Herstellung und Betrieb des Fahrzeugs anfallen. Zusätzlich sollten die Anforderungen der Kunden in Anforderungskatalogen – zu ermitteln durch Befragungen – festgehalten werden.

Bei einer einheitlichen Sichtweise müssen die Gesamtkosten über die Lebensdauer des Fahrzeugs betrachtet werden (LCC = Life cycle cost = Lebenszykluskosten). Diese Lebenszykluskosten müssen untergliedert darstellbar sein, und zwar sowohl auf die einzelnen Lebenszyklusphasen als auch auf die einzelnen in einem Zug oder Fahrzeug verwendeten Komponenten oder Bauteile.

Ziel muss es dann sein, die bei den jeweiligen Kosten vorhandenen Sparpotenziale zu erkennen und bei Konstruktion und Auslegung der Fahrzeuge zu berücksichtigen.

Die vorhandenen Optimierungspotenziale (Abb. 5) können dabei in sehr unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden; sie lassen sich im Allgemeinen drei Gruppen zuordnen, nämlich:

- Kosten
- Umweltauswirkungen und
- Gebrauchswert des Fahrzeugs.

Die wesentlichen Optimierungspotenziale sind in der Abb 5. dargestellt.

| Kosten   |  | Gebrauchswert   | Umwelt   |
|--|--|---|--|
| Herstellung  | Betrieb  |   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Werkstoffe</li> <li>- Konstruktion</li> <li>- Engineeringaufwand</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Energieverbrauch</li> <li>- Wartung und Inspektion</li> <li>- Verbrauchsmaterial</li> <li>- Laufweg</li> <li>- Unterhaltung des Netzes</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sicherheit</li> <li>- Fahreigenschaften</li> <li>- Lebensdauer</li> <li>- Kundenakzeptanz</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissionen</li> <li>- Ressourcenverbrauch</li> <li>- Recyclingrate</li> <li>- potenzielle Umweltauswirkung</li> </ul> |

**Abb. 5: Optimierungspotenziale**

Bei den Kosten sind die folgenden Sparpotenziale ausschlaggebend:

- Sparpotenziale bei der Herstellung der Fahrzeuge durch Verwendung anderer Werkstoffe oder Änderung der Konstruktion
- Sparpotenziale beim Energieverbrauch
- Sparpotenziale bei der Instandhaltung, z. B. durch Verlängerung der Wartungsintervalle, soweit die Sicherheit nicht beeinträchtigt ist
- Sparpotenziale durch Verlängerung der Lebensdauer der Fahrzeuge (z. B. durch Modernisierung)
- Sparpotenziale bei der Unterhaltung des Netzes (im Projekt nicht berücksichtigt).

Eine allgemeine Berechnung muss ferner die tatsächlichen und potentiellen Auswirkungen des Fahrzeugs auf die Umwelt betrachten (Abb. 6), z. B.

- Ausstoß von Schadstoffen
- Verwendung von Gefahrstoffen
- Verbrauch von Energieträgern
- Recyclingfähigkeit der verwendeten Materialien am Ende der Lebensdauer.

Die wesentlichen Auswirkungen eines Fahrzeugs auf die Umwelt sind in Abb. 6 aufgelistet (siehe Band 3, Kapitel 2).

| Verbräuche           | Emissionen  | potentielle Belastungen                      |
|----------------------|---|--|
| - Energie            | - CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> | - Gefahrstoffe                               |
| - Werkstoffe         | - Ozon abbauende Stoffe                               | - human u. ökotoxische Stoffe                |
| - Betriebsstoffe     | - nicht recycelbare Werkstoffe                        | - Umweltgifte                                |
| - Verbrauchsmaterial | - Betriebsabfälle                                     | - Versauerung                                |
| - Ressourcen         | - Betriebsabfälle                                     | - terrestrische und aquatische Eutrophierung |

### Abb. 6: Umweltauswirkungen

Die Bahnkunden – und damit natürlich auch die Betreiber und Hersteller der Fahrzeuge – sind neben der sicheren und preisgünstigen Beförderung vor allem am Komfort interessiert (Abb. 7), den es bereits beim Angebot des Herstellers an den Bahnbetreiber sowie anschließend bei der Konstruktion zu berücksichtigen gilt.

Eine vollständige Betrachtung darf jedoch darüber hinaus die anderen Belange nicht ignorieren, wie z. B. die Sicherheit der Fahrzeuge. Diese hat Priorität vor allen anderen Belangen. Das bedeutet, dass ein Inspektionsintervall nur dann verlängert werden darf, wenn (nahezu) keine Auswirkung auf die Ausfallrate sicherheitsgerichteter Teile zu erwarten ist.

Die Eigenschaften eines Fahrzeugs hinsichtlich dieser Kategorien lassen sich zusammenfassen im Gebrauchswert. Die Auswirkungen des Gebrauchswerts eines Fahrzeugs sind in Abb. 7 zusammengestellt.

| <b>Sicherheit</b>   | <b>Akzeptanz</b>  | <b>Beförderung</b>   |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fahrsicherheit</li> <li>- Fahrweg</li> <li>- Aufstoßsicherheit</li> <li>- Brandschutz</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Komfort</li> <li>- Hygiene</li> <li>- Pünktlichkeit</li> <li>- Fahrzeit</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fahrgastkapazität</li> <li>- technisch - verkehrlicher Nutzen</li> <li>- Wirkungsgrad des Fahrmotors</li> </ul> |

**Abb. 7: Auswirkungen des Gebrauchswerts**

## 2.4 Aspekte der Systematik zur Beurteilung von Schienenfahrzeugen

Der Betrieb von Schienenfahrzeugen ist einerseits durch die Kostensituation charakterisiert; bei Betrachtung der Fahrzeuge stellt der Verbrauch an elektrischer Traktionsenergie den größten Anteil dar. Weitere Anteile sind durch die Unterhaltung des Schienennetzes und den Vertrieb (u. a. Fahrkartenverkauf) bedingt. Zum anderen ist beim Betrieb die Akzeptanz des Schienenfahrzeugs durch den Kunden von größter Bedeutung; hier wird also der Gebrauchswert des Fahrzeugs direkt zu bewerten sein.

Die heutige Situation bei der Bewertung von Fahrzeugen ist durch die Optimierung von Teilgebieten gekennzeichnet, sei es, weil ein Betreiber sich z. B. nur für die Wartung und Instandhaltung interessiert und Einsparungen an anderer Stelle (zu Unrecht) vernachlässigt oder weil z. B. bei neu konstruierten Fahrzeugen Vergleichsdaten fehlen.

Insgesamt läßt sich auch feststellen, dass die Detaillierung der beschaffbaren Daten häufig sehr zu wünschen übrig lässt. Die Gründe dafür liegen in uneinheitlicher Kennzeichnung, unsystematischem Stücklistenaufbau, mangelhafter funktionaler Struktur und in fehlender Zuordnung von Ereignissen zu bestimmten Fehlertypen. Die Datenerhebung wird zudem noch meist durch Betriebsvereinbarungen über Geheimhaltung von Fehlerdaten erschwert. Ferner werden bei einem Austausch von Elektronikteilen meist keine Fehlerklassen angegeben, so dass ein Rückschluss auf die Fehlerursache oft unmöglich wird.

Kompliziert wird das Verfahren der Datenbeschaffung noch durch verschiedene Zuständigkeiten beim Kostencontrolling. In aller Regel ist der Controller dem Einkauf zuzuordnen und nicht zuständig für die Kostenkontrolle im Betrieb oder bei der Instandhaltung. Sofern die Detaillierung beim Kostencontrolling ausreichend ist, erfolgt in diesen Fällen meist kein Vergleich mit den anderen Kostenarten, wie z. B. dem Unterhalt des Schienennetzes oder den Kosten für die Traktionsenergie.

## 2.5 Charakteristik bisheriger Beurteilungsverfahren

Da das herausragende Kriterium zur Beurteilung von Fahrzeugen durch den Hersteller oder Betreiber die Kosten sind, gibt es auch auf diesem Gebiet die zahlreichsten Betrachtungs- und Rechenhilfen. Von mehreren Institutionen wurden in der Vergangenheit bereits Programme zur Abschätzung der Lebenszykluskosten von Schienenfahrzeugen erstellt /5/. Die Auswertung solcher Rechnungen liefert bereits eine Kostenübersicht über den gesamten betrachteten Zyklus.

Diese Programme wurden aber in der Regel nur für einen ganz bestimmten, eng begrenzten Benutzerkreis geschrieben und sind damit auf dessen Belange zugeschnitten.

Im Allgemeinen werden mit diesen Programmen nur Teilaspekte erfasst. Bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten ist meist nur die Bearbeitung eines zeitlich verhältnismäßig kleiner Ausschnitts aus der Lebenszeit möglich. Andere Programme betrachten z. B. nur spezielle Baugruppen. Damit fehlt diesen Programmen die universelle Anwendbarkeit, ganz zu schweigen von der Tatsache, dass Programme zur Lebensdauerprognose nur einen Teil der benötigten Ergebnisse liefern und dass somit z. B. Aussagen über die Eignung des betrachteten Fahrzeugs in ökologischer Hinsicht nicht mit dem gleichen Programm berechnet werden können.

Dadurch, dass eine Vielzahl von einzelnen Programmen für einen jeweils kleinen Nutzerkreis und beschränkten Auswertungen existiert, erhält man unterschiedliche Rechen- und Auswertemethoden. Diesen Rechenmethoden liegt zwar immer das gleiche Prinzip zu Grunde – z. B. ist eine Abschätzung der Lebensdauerkosten immer eine Summation über die in den einzelnen Lebensphasen anfallenden Kosten – jedoch kann das Ergebnis durchaus variieren, z. B. bedingt durch unterschiedliche Ansätze der einzelnen Programmanbieter bei der Gewichtung der Kostenarten. Eine Normierung in dem Sinn, dass man empfohlene Rechen- und Auswerteverfahren zur Verfügung hat, besteht zur Zeit (noch) nicht. Bisher existieren lediglich Empfehlungen, die die anzuwendenden Rechenverfahren in Ansätzen skizzieren /4/.

Bei der Erstellung eines LCC-Modells bestehen große Freiräume, da die einzelnen Schritte nicht exakt festgelegt sind. Das gleiche gilt für die Auswertung der Rechenergebnisse und für deren Darstellung.

Durch die Vielfalt der Ergebnisse und Teilaspekte wird der Vergleich eines Fahrzeugs mit einem anderen sehr erschwert und man kann nicht sicher sein, alle Aspekte, die dieses spezielle Fahrzeug betreffen, erfasst zu haben.

## 3. Ziele

Die Optimierung eines Schienenfahrzeugs hat verschiedene Ziele zu berücksichtigen. Solche Ziele sind z. B.:

- Niedrige Herstellkosten
- Kurze Herstellzeit
- Niedrigere Betriebskosten als heute
- Umweltfreundlichkeit
- Vom Endverbraucher besser akzeptiert werden.

Zur Optimierung der Fahrzeuge wurden die folgenden Schritte durchgeführt:

- Schaffung eines Werkzeugs zur Erfassung und Darstellung der Gesamtkosten
- Betrachtung des Lebenswegs von der Projektierung und Herstellung bis zur Entsorgung des Schienenfahrzeugs
- Gewichtung und Optimierung der Ziele

### 3.1 Allgemeine Anforderungen

Ein neu zu entwickelndes Softwarewerkzeug sollte für einen breiten Benutzer- und Anwenderkreis geeignet sein. Dieser Anwenderkreis sollte mindestens die Hersteller, die Bahnbetreiber und die Zulassungsbehörden umfassen.

Eine Aufstellung der potentiellen Anwender enthält die Abb. 8.

| <b>Bahnindustrie</b>  | <b>Bahnbetreiber</b>  | <b>Behörden</b>  | <b>Sonstige</b>   |
|---|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Einkäufer</li> <li>- Angebotsersteller</li> <li>- Entwickler</li> <li>- Konstrukteure</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Einkäufer</li> <li>- Kostenrechner</li> <li>- Transportdienstleister</li> <li>- Instandhalter</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Genehmigung</li> <li>- Prüfstellen</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gesetzgebung</li> <li>- Normung</li> <li>- Umweltverbände</li> <li>- Marktforscher</li> <li>- Forschungsinstitute</li> </ul> |

**Abb. 8: Potentielle Anwender**

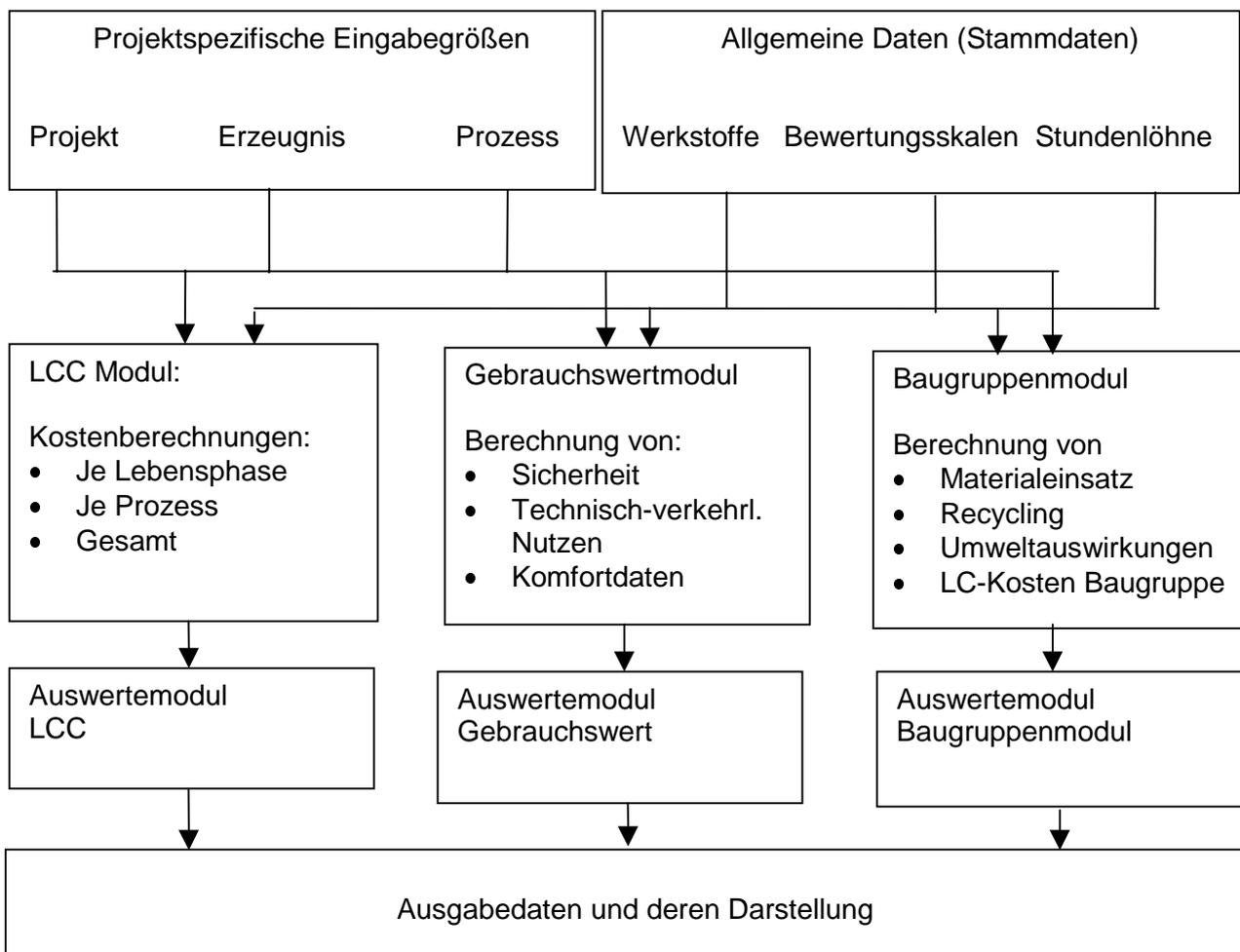
Die Informationen für andere fachlich interessierte Gruppen, wie z. B. die Fahrgäste, werden zum größten Teil durch diese Benutzergruppen abgedeckt, sei es, dass z. B. der den Fahrgast interessierende Komfort auch für die Betreiber ein Argument zur Hinzugewinnung neuer Kunden ist, oder dass die im öffentlichen Interesse liegende Sicherheit des Fahrzeugs von den Genehmigungsbehörden betrachtet wird.

Ein für einen breiten Anwenderkreis erstelltes Programm muss eine möglichst einfache und selbsterklärende Oberfläche haben, da sonst die Anwendung durch den Einarbeitungsaufwand zumindest unnötig erschwert wird, wenn nicht sogar durch mangelnde Akzeptanz ein Einsatz gänzlich verhindert wird.

Die für die Rechnung notwendigen Daten gliedern sich in

- Allgemeine Projektdaten
- Stammdaten, wie z. B. Autoren, Quellen oder Lieferanten, Material- und Baugruppendaten.
- Projektspezifische Daten, wie z. B.
  - Struktur und Komponenten des untersuchten Objekts
  - Laufwege und -zeiten
  - Herstellkosten
  - Technische Daten (Gebrauchswertdaten)
  - Verwendete Materialien und deren Zusammensetzung
  - Instandhaltungsintervalle und -kosten
  - Entsorgungskosten.

Die gesamte Berechnung muss modular aufgebaut sein, so dass der Anwender die für ihn interessierenden Gebiete auswählen kann. Ein Beispiel für eine modulare Struktur zeigt die Abb. 9. Die zur Rechnung notwendigen Daten werden bei den einzelnen Modulen näher erläutert.



**Abb. 9: Aufbau des Programms aus Modulen**

Der Rechenalgorithmus ist in einer separaten Hilfedatei beschrieben, so dass eine jederzeitige Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse möglich ist.

Derzeit sind zwei verschiedene Module hinterlegt:

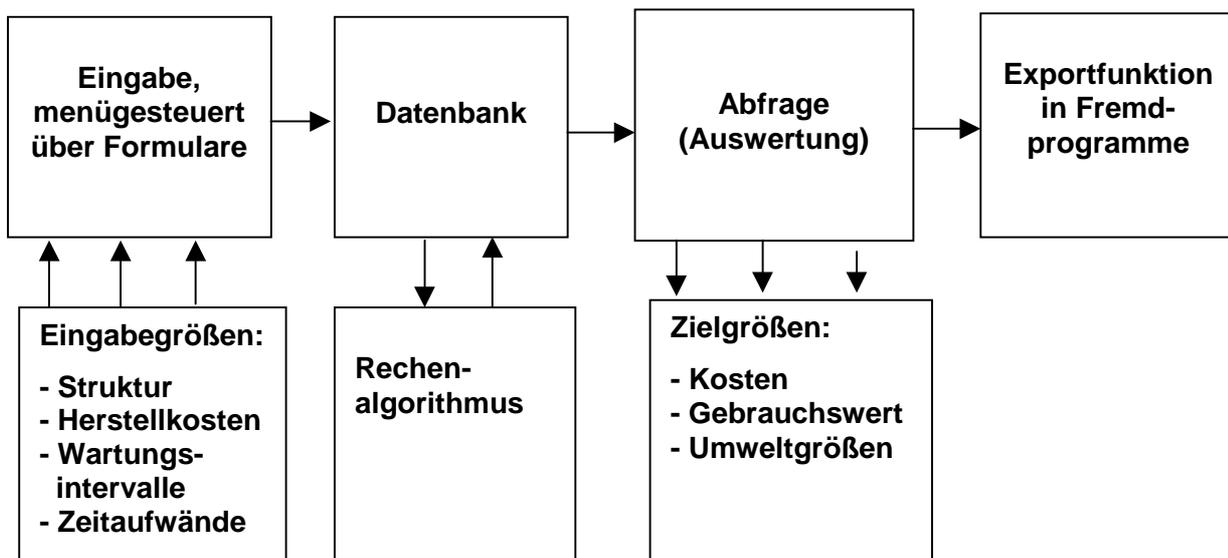
- der LCC- und Gebrauchswertmodul
- der Baugruppenmodul.
- 

Die LCC – Berechnung und der Gebrauchswert sind in ein gemeinsames Modul integriert. Dieses Modul ist unabhängig vom Baugruppenmodul.

Im ersteren Modul werden die Kosten für das jeweilige Fahrzeug (in jeder Lebensphase) sowie die Gebrauchswertkenndaten berechnet. Der Baugruppenmodul berechnet über den Lebensweg des Schienenfahrzeugs die mit der Baugruppe verbundenen Kosten und die Auswirkungen der betrachteten Baugruppe auf die Umwelt, von der Phase der Herstellung über den Betrieb bis zur Entsorgung.

Die einzelnen Module benutzen jeweils eine Access – Datenbank mit verschiedenen Ausgabeberichten. Jeder Programmmodul besteht aus den Teilen (Abb. 10):

- Eingabemasken
- Rechenalgorithmen der Datenbank
- Ausgabe der Daten als Bericht.



**Abb.10: Struktur eines Moduls**

Wird ein Auswertebereich angeklickt und wurde eine dazu notwendige Eingabemaske nicht (vollständig) ausgefüllt, so wird die Berechnung abgebrochen und in einem Fehlerprotokoll auf die fehlenden Daten hingewiesen.

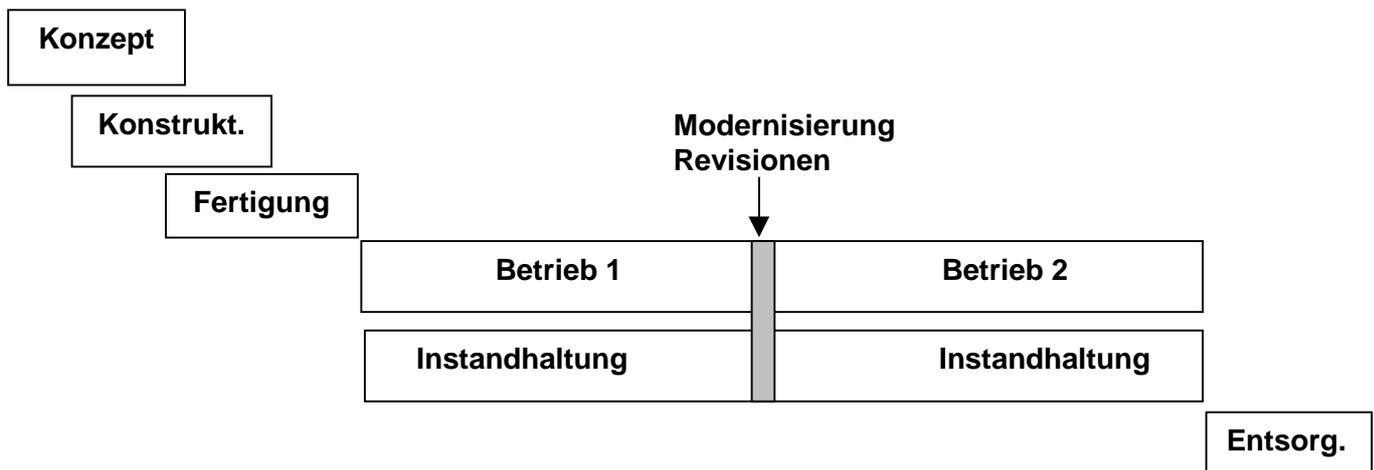
Im Rechenalgorithmus werden die ausgewählten Zielgrößen für alle Lebensphasen des Fahrzeugs über eine Datenbank mit Hilfe eines sog. Wirkungsgefüges berechnet und in Ergebnistabellen abgelegt.

Das verwendete Programm und die Berechnungsalgorithmen werden im Band 2: LC-Modellierung und Band 3: Baugruppenmodellierung näher beschrieben.

### 3.2 Anforderungen an ein Schienenfahrzeug in den Lebenszyklusphasen

Die folgenden Lebensphasen eines Fahrzeugs (Abb. 11) sind in der Darstellung enthalten:

- Konzepterstellung des Fahrzeugs
- Entwurf
- Entwicklung und Konstruktion
- Fertigungsvorbereitung
- Fertigung und Inbetriebsetzung
- Betrieb und Instandhaltung
- Instandsetzung bei Revisionen
- Modernisierung und
- Entsorgung.



**Abb. 11: Hauptphasen im Lebenszyklus eines Schienenfahrzeugs**

Jede Zielgröße (Abb.12) stammt dabei aus einem der Gebiete:

- Kosten: Modul: LCC und Gebrauchswert, Baugruppenmodul
- Gebrauchswert Modul: LCC und Gebrauchswert
- Ökologie Modul: Baugruppenmodul.

| Zielgrößen 1. Ebene                                  | Zielgrößen 2. Ebene        | Zielgrößen 3. Ebene  | Zielgrößen 4. Ebene   |
|--|----------------------------|--|---|
| Ökonomie   | Lebenszykluskosten (netto) | Personalkosten<br>Materialkosten<br>Energiekosten<br>Abschreibungen<br>Zinsen                                      | Aufwand<br>Energieverbrauch<br>Masse  |
| Ökologie   | Umweltbelastungen          | Ressourcenverbrauch<br>Treibhauseffekt<br>Ozonabbau<br>Toxizität<br>Versauerung<br>Eutrophierung<br>Schallemission | Energieverbrauch<br>Medienverbrauch<br>Betriebsstoffe<br>Wasserverbrauch<br>Lebensdauer   |
|  | Kreislauffähigkeit         | Wiederverwertung bzw. Weiterverwendung   | Aufarbeitungsgerechte Gestaltung<br>Vermeidung von Gefahr- und Problemstoffen<br>Einsatz recyclingfähiger Werk- und Hilfsstoffe |
| Verkehrsdienstleistung des Fahrzeugs (Gebrauchswert) | Qualität                   | Sicherheit<br>Komfort<br>Funktion<br>Information<br>Modernität<br>Design<br>Fahrzeit                               |   |

**Abb 12: Hierarchie der verschiedenen Zielgrößen**

Die Zielgrößen können dabei auf einen Bezugswert, wie z. B. die gefahrenen Fahrzeugkilometer, normiert werden, so dass ein Vergleich von Fahrzeugen oder Fahrzeugvarianten möglich wird. Je nachdem, welcher Modul angesprochen wird, können die Zielgrößen verschieden sein. Sie werden im folgenden bei den einzelnen Modulen erläutert.

### 3.3 Modul LCC und Gebrauchswert

Wie oben bereits ausgeführt, erfolgt im Modul LCC und Gebrauchswert die Berechnung der Kosten, und zwar getrennt für jede Lebenszyklusphase, sowie die Berechnung der Gebrauchswerteigenschaften, die den Fahrgast interessieren.

Die Berechnung der Gesamtkosten ist eine Summation über die einzelnen Phasen. Die entstandenen Kosten können selbstverständlich in verschiedene Kostenarten aufgespalten werden, so dass sich bereits eine grobe Zuordnung zu den Prozessen ergibt, bei denen eine Einsparung erfolgen könnte.

Ziel der Berechnungen im LCC-Modul ist es, die Übersichtlichkeit der Kostenrechnung zu steigern und durch Vergleich von verschiedenen Baureihen bzw. Bauartvarianten die Einsparpotenziale zu erkennen bzw. Hilfestellung zu deren Nutzung zu geben.

Im Bereich Ökonomie sind die folgenden Aufwände Beispiele für Zielgrößen:

- Entwicklungskosten
- Herstellkosten
- Kapitalkosten
- Betriebskosten
- Aufwendungen für Instandhaltung
- Aufwendungen für Modernisierung
- Entsorgungskosten.

Im Bereich Gebrauchswert wird im weitesten Sinne all das berechnet bzw. bewertet, was die Sicherheit und den Komfort des Fahrgastes betrifft.

Beispiele für Zielgrößen in diesem Bereich sind deshalb:

- Fahrsicherheit
- Entgleisungssicherheit
- Beförderungskapazität
- Zugkraft (bei Lokomotiven)
- Laufgüte
- Komfort
- Service
- Hygiene
- Reinigungsfreundlichkeit
- Flexibilität beim Einsatz

Während sich die Fahrsicherheit als einfache Zahl darstellen lässt, z. B. als vom Fahrzeug absorbierte Energie bei einem Zusammenstoß des Fahrzeugs mit einem Hindernis mit einer Geschwindigkeit von  $x$  km/h, sind die Größen wie z. B. Komfort, Service und Hygiene vom subjektiven Empfinden des Fahrgasts abhängig.

Die Bewertung kann deshalb nur nach einem Punktschema erfolgen in der Art und Weise, dass für bestimmte Eigenschaften eine Anzahl von Punkten vergeben wird und die Punkte über die Teilgebiete aufsummiert wird. Als maximale Punktzahl werden in jedem Bereich z. B. 1000 Punkte vergeben, für den Vergleich mit anderen Fahrzeugen oder mit Bauartvarianten wird der erreichte Punktwert verwendet. Die Zuordnung, wie viele Punkte für jede Eigenschaft vergeben werden, ist vom subjektiven Empfinden des Beobachters abhängig und kann deshalb variiert werden. Die entsprechenden Felder sind jedoch mit Defaultwerten belegt, die in den meisten Fällen die Verhältnisse recht gut abbilden.

### **3.4 Modul Baugruppe**

Der Baugruppenmodul beinhaltet eine Detailberechnung ökologischer und ökonomischer Zielgrößen auf der Ebene einer Baugruppe. Dabei werden die Umweltaspekte berechnet. Zielgrößen sind hierbei:

- Materialeinsatz
- Energieeinsatz
- Ressourcenverbrauch
- Verbrauch nachwachsender Rohstoffe
- Einsatz von Gefahrstoffen
- Emissionen, z. B. CO<sub>2</sub>
- Überwachungsbedürftige Abfälle
- Verwertbarer Anteil der Werkstoffe bei der Entsorgung.

Ferner werden die Auswirkungen auf die Umwelt abgeschätzt, z. B. durch Berechnung folgender Größen:

- Versauerung
- Terrestrische Eutrophierung
- Aquatische Eutrophierung
- Beitrag zum Treibhauseffekt
- Ozonabbaupotenzial.

Berechnet werden immer nur die Emissionen und deren potenzielle Umweltwirkungen; Immissionen werden nicht angegeben, da diese in vielfältiger Weise von den Bedingungen der Umwelt abhängen. Die Auswirkungen auf die Umwelt werden hierbei in einem sog. Wirkungsgefüge berücksichtigt; die einzelnen Faktoren entstammen der Literatur /9/. Bei Bedarf können die Faktoren angepasst werden, um z. B. neuere Forschungen zu berücksichtigen.

### **3.5 Software und Programmbedienung**

Der modulare Programmaufbau wurde bereits im Abschnitt 3.3 beschrieben. Die beiden hinterlegten Module LCC und Gebrauchswert einerseits und Baugruppenmodell andererseits sind voneinander unabhängig. Im folgenden werden die Gemeinsamkeiten der beiden Module aufgezeigt.

Das Programm lässt dem Bediener weitgehende Freiheiten bei der Auswahl der zu berechnenden Zielgrößen; der Anwender hat in den vorgegebenen Menüs eine große Anzahl von auswählbaren Zielgrößen zur Verfügung. Abhängig von den gewählten Fragestellungen wird das Programm die dazugehörigen Eingabemasken aufblenden und eine Eingabe verlangen. Der Benutzer erhält so bereits einen Vollständigkeitscheck der eingegebenen Daten. Die Projekterstellung wird durch einen Assistenten unterstützt; vor der Berechnung des Projekts wird ein Konsistenzcheck durchgeführt.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt mit den Crystal Reports, die eine ansprechende und komfortable Oberfläche zur Verfügung stellen. Auch ist ein Export der Ergebnisberichte z. B. in MS Office - Anwendungen jederzeit möglich, so dass eine weitere Bearbeitung dort erfolgen kann.

## 4. Prozesse

### 4.1 Allgemeines

Zur Berechnung der Zielgrößen werden Materialien, Bauteile und Aufwände der verschiedenen Prozesse über den Lebensweg aggregiert. Nur auf diese Weise ist es möglich, die entstehenden Auswirkungen zu beurteilen oder gar Verbesserungsvorschläge zu unterbreiten. Die Abb. 13 zeigt die Zuordnung der für eine Beurteilung der Fahrzeuge wichtigen Größen zu den Lebenszyklusphasen.

| Zu betracht. Lebenszyklusphase             | Personalkosten                      |                                |                                    | Betriebsmittel                        | Energie                              | Material                                | Logistik                       |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------|
|  | Management                          | Personal                       | Randbedingungen                    |                                       |                                      |   |                                |
| <b>Konzept, Entwurf</b>                    | Projektmanagem.                     |                                | Stundensatz                        |                                       |                                      |   |                                |
| <b>Entwickl., Konstrukt.</b>               | Projektmanagem.                     | Entwickler, Konstrukt.         | Stundensatz                        | Ausrüst. Konst.tools                  |                                      |   |                                |
| <b>Fertigung, Einbau, Inbetriebsetzung</b> | Fert.organisation Qualitätsmanagem. | Werker                         | Stundensätze, Arbeitszeit, Schicht | Maschinen und Ausrüst.                | Energieverbrauch der Fert. Einricht. | Material-einsatz, Materialpreis         | Transport, Lager               |
| <b>Betrieb</b>                             | Betriebsleitung                     | TF, ZuB                        | Stundensätze                       | Infrastruktur, z. B. Trasse, Bahnhöfe | Energieverbrauch Traktion und Heiz.  | Betriebsstoffe (Menge und Preis)        | Umlaufpläne, Abstellflächen    |
|  | Fahrdienstleitung                   | Zugtechniker                   | Stundensätze, Arbeitszeit, Schicht | Meßhilfsmittel                        |                                      |   |                                |
|  | Schulungsleiter                     | Zugpersonal                    | Stundensätze                       | Ausrüst., Geräte                      |                                      |   |                                |
| <b>Instandhaltung</b>                      | Arbeitsplanung                      | Werker                         | Stundensätze, Arbeitszeit, Schicht | Maschinen und Ausrüstung              | Energieverbrauch                     | Material-einsatz, Materialpreis         | Transport, Lager               |
| <b>Modernisierung</b>                      | Arbeitsplanung                      | Werker, Entwickler, Konstrukt. | Stundensätze                       | Maschinen und Ausrüstung              | Energieverbrauch                     | Material-einsatz, Materialpreis         | Transport, Lager               |
| <b>Entsorgung</b>                          | Arbeitsplanung                      | Werker                         | Stundensätze                       | Maschinen und Ausrüstung              | Energieumsetz.                       | Materialumsatz, Verwertbare Komponenten | Deponie- und Entsorgungskosten |

**Abb. 13: Zuordnung der zu betrachtenden Größen zu den Lebenszyklusphasen**

Von den einzelnen Prozessen im Leben eines Schienenfahrzeugs müssen die folgenden Daten bekannt sein:

- Art und Dauer des Prozesses
- Bei periodischen Prozessen: Wiederholfrequenz (nach Betriebsdauer oder Laufleistung)
- Materialeinsatz
- Energieeinsatz
- Einsatz von Baugruppen und Bauteilen
- Personal- und Maschinenaufwände.

Mit diesen Daten können dann die Kosten berechnet werden. Sind diese Daten nicht bekannt, kann alternativ mit einem Festwert gerechnet werden, in diesem Fall ist die Tiefe der Datenausgabe auf Festwerte (zumindest in diesem Lebensabschnitt) reduziert.

## 4.2 Herstellungsprozess

Die Kosten für den Herstellprozess lassen sich wie folgt aufgliedern:

- Entwicklung
- Konstruktion
- Fertigung und
- Inbetriebsetzung.

Für jeden Teilprozess werden die Kosten für Material und Lohn (bzw. Stunden und Stundensatz) benötigt. Unter den Herstellkosten sind alle Kosten bis zur Übergabe des Fahrzeugs an den Bahnbetreiber zu verstehen.

Falls sich die Entwicklung und Fertigung über einen längeren Zeitraum hinzieht, können hier Werte für die einzelnen Zeitabschnitte eingegeben werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn nicht ein Einzelfahrzeug, sondern eine Fahrzeugflotte betrachtet wird, da sich hier die Herstellperiode über Jahre hinziehen kann.

Im Baugruppenmodell werden darüber hinaus allgemeine Prozesse der Werkstoff-, Betriebsstoff- und Energiebereitstellung berücksichtigt.

### 4.3 Hauptphase Betrieb I (vor Modernisierung)

Die Hauptphase Betrieb I schließt sich direkt an die Inbetriebsetzung an; es ist darunter die Zeitspanne von der Übergabe des Zuges an den Betreiber bis zur Modernisierung zu verstehen.

In dieser Phase sind 3 verschiedene Kostenblöcke zu betrachten:

- Kosten für Energieversorgung
- Kosten für Verbrauchsmaterial
- Kosten für Instandhaltung.

Beispiele für die in dieser Phase benötigten Eingabedaten zeigt die Abb. 14.

| <b>Kosten</b>        | <b>Gebrauchswert</b>          | <b>Ökologie</b>               |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| - Ersatzteilpreise   | - Anfahrbeschleunigung        | - Verwendete Werkstoffe       |
| - Stundensätze       | - Bremsbeschleunigung         | - Materialzusammensetzung     |
| - Inspektionsfristen | - Energieaufnahme bei Unfall  | - Energieverbrauch            |
| - Arbeitsaufwände    | - Fahrzeiten                  | - Toxizitätsfaktoren *)       |
| - Tauschteile        | - Anzahl beförderter Personen | - In- und Output der Prozesse |
| - Laufleistung       |                               |                               |
| - Energiekosten      |                               |                               |

\*) Veränderung über Datenbank möglich

**Abb. 14: Beispiele für benötigte Eingabedaten, Hauptphase Betrieb**

Die Kosten für die Energieversorgung ergeben sich im wesentlichen aus dem zurückgelegten Laufweg und den Fahrspielen, d.h. aus dem Einsatzplan des Zuges. Im Falle einer Lokomotive oder eines Triebzuges sind die Energiekosten zum größten Teil durch Aufwendungen für die Traktionsenergie bestimmt. Die Kosten für Heizung und Klimatisierung und für Hilfsfunktionen sind dagegen eher gering.

Kosten für Verbrauchsmaterialien entstehen einerseits durch den Betrieb des Zuges, wie z. B. der Verbrauch an Schmiermitteln. Andererseits können aber auch Kosten durch den Verbrauch von Materialien durch Fahrgäste dazukommen, z. B. der Verbrauch von Wasser.

Die Kosten für Inspektion und Wartung gliedern sich in zwei Blöcke:

- Kosten der vorbeugenden Instandhaltung und
- Kosten der korrektiven Instandsetzung.

Um die Kosten der vorbeugenden Instandhaltung möglichst genau erfassen zu können, müssen die folgenden Daten bekannt sein:

- Fristenplan für die Inspektionen
- Zeitaufwand für jede Inspektion
- Benötigtes Verbrauchsmaterial
- Auszutauschende Teile
- Ersatzteilpreise (oder Aufarbeitungspreise)

Die anfallenden Kosten für die korrektive Instandhaltung und die präventive Instandhaltung sind nicht unabhängig voneinander. Jedes Fahrzeug enthält Verschleißteile, bei denen die Ausfallrate mit fortschreitender Lebenszeit ansteigt. Würde eine solche Komponente zu spät ausgewechselt, so können die Kosten durch einen notwendig werdenden ungeplanten Austausch beim Ausfall der Komponente ansteigen. Die Entscheidung, wann eine Komponente ausgetauscht werden soll, ist jedoch nicht leicht zu treffen, da eine Vielzahl von Einflüssen betrachtet werden muss, /10, 11/, die meist nicht genau bekannt ist.

Der Austausch von Verschleißteilen muss erfolgen, bevor die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls zwischen den Inspektionen einen gerade noch als zulässig erachteten Wert übersteigt. Dieser Wert muss individuell festgelegt werden und ist von der Funktion des Bauteils abhängig. Für sicherheitsrelevante Teile wird die gerade noch tolerierbare Ausfallwahrscheinlichkeit im Zeitintervall zwischen den Inspektionen sehr viel niedriger liegen als für Komponenten mit komfortorientierter Funktionalität. Eine etwas höhere Ausfallwahrscheinlichkeit von nicht sicherheitsrelevanten Teilen kann insbesondere dann in Kauf genommen werden, wenn die betreffende Komponente teuer ist und mit geringem Aufwand ausgetauscht werden kann. Falls sich Ausfälle bei einem Bauteil vorher ankündigen, ist es möglich, die Ausfallwahrscheinlichkeit über ein geeignetes Diagnosewerkzeug in regelmäßigen Abständen zu bestimmen. Es ist dann möglich, das Bauteil bis zu einem Zeitpunkt, der relativ nahe am statistischen Ausfallzeitpunkt liegt, zu verwenden, da die Funktionsfähigkeit über die Diagnose sichergestellt werden kann.

Eine Kostenoptimierung kann durch Rechnung mit verschiedenen Varianten der Instandhaltungsstrategie erfolgen. Dieses Vorgehen ist allerdings nur dann zulässig, wenn die Sicherheit des Fahrzeugs dadurch nicht in unzulässiger Weise beeinträchtigt wird.

Abb. 15 zeigt eine mögliche Vorgehensweise bei der Kostenoptimierung.

**Durchführung der folgenden Schritte:**

**1. Rechnung mit Bauartvarianten**

➔ **Ableitung von Konstruktionsempfehlungen**

**2. Überprüfung der Inspektionsintervalle und des Instandhaltungsinhalts**

➔ **Verlängerung der Intervalle, wenn nach Ausfallrechnung zulässig und sinnvoll**

**3. Zusammenfassung von Arbeitsabläufen bei verschiedenen Fristen**

➔ **Verminderung des zeitlichen Aufwands und der Stillstandszeit des Fahrzeugs**

**Abb. 15: Vorgehen bei Kostenoptimierung in Wartung und Inspektion**

## 4.4 Modernisierung

Wenn ein Fahrzeug nach 10 oder 20 Jahren Betriebszeit für die Fahrgäste nicht mehr attraktiv genug ist, kann der Vergleich der Modernisierungskosten mit den Kosten für eine Neubeschaffung die Basis für eine Entscheidung über den Weiterbetrieb des Fahrzeugs mit einer modernisierten Version liefern. Auch aus anderen Gründen, wie z. B. Umweltschutz, kann es sinnvoll sein, über eine Modernisierung des Fahrzeugs nachzudenken. Abb. 16 listet einige Zielsetzungen einer vor der Modernisierung durchzuführenden Rechnung auf.

### Bei Modernisierungsrechnungen zu betrachten:

- **Berechnung des Beitrags zu LCC**
- **Überprüfung der Wirtschaftlichkeit (Restlaufzeit vs. Modernisierungsaufwand bzw. Neukauf vs. Modernisierungsaufwand)**
- **Berechnung der Ausfallraten nach Aufarbeitung**
- **Vergleich des Gebrauchswertes vor und nach der Modernisierung**
- **Vergleich der Umweltauswirkungen (LCA) der Modernisierung und des Weiterbetriebs mit den Auswirkungen einer Neufertigung**

### Abb. 16: Zielsetzung von Modernisierungsrechnungen

Um eine fundierte Aussage machen zu können, müssen bekannt sein:

- Herstellpreis eines neuen Fahrzeugs zum Zeitpunkt der Modernisierung bzw. Ablösung
- Modernisierungskosten (Lohn- und Materialanteile)
- Auszutauschende bzw. zu modernisierende Komponenten
- Restlaufzeit des modernisierten Fahrzeugs
- Ausfallzeit durch die Modernisierung
- Von den Prozessen benötigte Zuführungen oder Abgaben an Material, Energie, etc. (In- und Outputs der Prozesse).

Berücksichtigt man im Programm nur die Phase Modernisierung, so kann mit diesen Daten sofort die Wirtschaftlichkeit berechnet werden. Darüber hinaus liefert das Programm über den Gebrauchswertmodul einen (relativen) Maßstab für die Erhöhung des Komforts, u. U. auch für die Erhöhung der Sicherheit. Die Attraktivität für die Fahrgäste kann dann direkt abgelesen werden, ebenso ist eine Aussage über Umweltbelastungen (z. B. in Form der nicht wieder verwendbaren ausgetauschten Teile) bei der Baugruppenbetrachtung möglich.

## 4.5 Hauptphase Betrieb II (nach Modernisierung)

Die Hauptphase Betrieb II schließt sich direkt an die Phase Modernisierung an und endet mit der Entsorgung des Schienenfahrzeugs. Falls keine Modernisierung im Lauf des Lebens des Fahrzeugs stattfindet entfällt die Hauptphase Betrieb II. Ansonsten gelten die gleichen Grundsätze und Betrachtungen wie für die Hauptphase Betrieb I. Die Phase Modernisierung unterbricht somit lediglich die

Hauptphase Betrieb; nach Abschluss der Modernisierungsarbeiten gelten die gleichen Daten für die Wartung und Instandhaltung wie vorher.

## 4.6 Entsorgung

Die Kosten für die Entsorgung am Ende der Lebensdauer werden meist als (geschätzter) Festwert erfasst. Für detailliertere Rechnungen müssen bekannt sein:

- Zeitdauer der Demontage
- Lohnkosten
- Aufarbeitungskosten bzw. Erlöse für aufgearbeitetes Material
- Zusammensetzung und Deponiekosten für nicht recycelfähiges Material
- In- und Outputs der Recycling bzw. Entsorgungsprozesse.

Mit diesen Daten kann dann gleichzeitig auch die potentielle Umweltbelastung in Form der nicht wieder verwendbaren Materialanteile und der zu entsorgenden Betriebsstoffe (z. B. Schmieröle) berechnet werden.

## 5. Einflüsse der Datenbasis

### 5.1 Eingabedaten

Die Qualität der Eingabedaten beeinflusst das Ergebnis durch die Eigenschaften (Abb 17)

- Vollständigkeit
- Genauigkeit und
- Konsistenz.

| Vollständigkeit  | Genauigkeit  | Konsistenz   |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Detaillierung bis zur gewählten Ebene</li> <li>- Bei Mangel an einzelnen Daten: Schätzwerte</li> <li>- Betrachtung aller Teile bis zur gewählten Ebene</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- abhängig von Detaillierung</li> <li>- für LCC-Rechnungen nur mittlere Genauigkeit (Prognose)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Überprüfung auf Zulässigkeit (Wertebereich)</li> <li>- Ausschluss unlogischer Werte durch Programm</li> </ul> |

**Abb. 17: Einflüsse der Datenbasis**

Die Vollständigkeit der Daten ist insbesondere dann wichtig, wenn für ein Fahrzeug eine Gesamtrechnung erstellt werden soll. Interessiert dagegen nur eine ganz bestimmte Lebensphase, so können die anderen Phasen durchaus mit Festwerten abgebildet werden.

Die benötigten Daten sind nach der funktionalen Fahrzeugstruktur geordnet und derzeit maximal bis zur 4. Funktionsebene detailliert.

Zur funktionalen Fahrzeugstruktur ist folgendes zu bemerken:

Das vollständige Fahrzeug stellt die oberste Hierarchieebene dar. Darunter wird in folgender Weise differenziert:

| Ebene | Bezeichnung    | Struktur Nr. | Beispiel               |
|-------|----------------|--------------|------------------------|
| 1     | Anlage         | 4            | Antriebssystem         |
| 2     | Hauptbaugruppe | 4.4          | Antrieb                |
| 3     | Baugruppe      | 4.4.1        | Elektrischer Fahrmotor |
| 4     | Unterbaugruppe | 4.4.1.3      | Fahrmotorlagerung      |

Für die Daten gilt: Eine Detaillierungsebene muss vollständig bekannt sein, bevor die nächste Detaillierung begonnen werden kann. Das bedeutet, dass es nicht möglich ist, die LCC-Rechnungen mit Detaillierung auf Ebene 3 mit Erfolg durchzuführen, wenn nicht vorher alle Komponenten in der Ebene 2 bekannt sind.

Selbstverständlich ist eine Rechnung auf z. B. dreistelliger Detaillierungsebene durchführbar, wenn nur einige Komponenten mit einer Detaillierung der Ebene 3 bekannt sind, der Rest sich jedoch mit der zweistelligen Detaillierungsebene zufrieden geben muss. Das Ergebnis entspricht in der Genauigkeit dann jedoch dem schwächsten Glied, d. h. im Beispiel der zweistelligen Ebene.

Ausnahmen von dieser Regel treten nur dann auf, wenn von vornherein bekannt ist, dass die Eingabedaten mit der geringsten Detaillierung zum Ergebnis nur wenig beitragen. Fehlen hingegen nur wenige Teildetaillierungen, so ist es in der Regel günstiger, die fehlende Detaillierung mit Schätzwerten vorzunehmen. Wird mit diesen Schätzwerten die Größenordnung richtig abgebildet, so ist das Ergebnis meist immer noch genauer als ohne Vornahme einer Schätzung und damit Beschränkung auf die geringere Detailtiefe.

Analog gilt im Baugruppenmodell, dass für die untersuchte Baugruppe die Daten aller betrachteten Unterbaugruppen die gleiche Detaillierungstiefe besitzen sollten.

Die Genauigkeit der Daten ist dagegen meist von etwas geringerer Bedeutung. Oft müssen ohnehin Schätzwerte verwendet werden. Zufällige Fehler bei Einzelkomponenten (z. B. bei den Kostenschätzungen für bestimmte Instandhaltungsarbeiten) verändern die Gesamtkosten der Instandhaltung über die Lebenszeit im Allgemeinen nur verhältnismäßig wenig.

Ferner beeinflusst bei Variantenrechnungen ein Fehler bei Einzelkomponenten das Rechenergebnis der einzelnen Varianten oft in der gleichen Richtung, so dass die relativen Ergebnisse trotzdem richtig bleiben.

## 5.2 Modellierung

Die dem Modell zugrunde liegenden Zusammenhänge wurden bereits an anderer Stelle dargestellt /6 bis 9/. Eine genauere Beschreibung der Modellierung erfolgt in Band 2 und Band 3; im Folgenden wird nur ein kurzer Abriss der Eigenschaften gegeben.

Die Vorgehensweise ist in Abb. 18 skizziert.

### 1. Modellierung:

- **Auswahl der Ausgabegrößen über Wirkungsgefüge**
- **Berechnung der Zielgrößen nach Zeit oder Laufleistung**
- **Bewertung der Ausgaben nach Ökonomie, Ökologie und Gebrauchswert**
- **Bei „subjektiven“ Daten (Z. B. Komfort): Bewertung nach Punkteskala**
- **Bewertung der Umgebungsbelastung über „Umrechnungsfaktoren“**

### 2. Auswertung:

- **Summation der Werte der einzelnen Lebensphasen zum Gesamtwert**
- **Ergebnisdarstellung in Tabellen und Grafiken**
- **Export einzelner Ergebnisse und Weiterverarbeitung in Fremdprogrammen**

### Abb. 18: Vorgehen bei der Berechnung von Zielgrößen

Die notwendigen Eingabedaten für das Modell sind:

- die Projektdaten (zur Identifikation des Projekts)
- die Erzeugnisdaten des Fahrzeugs (u. a. Massen, Herstellungspreise in der jeweiligen Detaillierungstiefe)
- die Prozessdaten (Angabe der Prozesse mit Häufigkeit, Dauer und Aufwände für Materialien, Bauteile, Personal und Maschinen)
- die Stammdaten, wie z. B. Stundensätze. Hier sind (änderbare) Defaultwerte hinterlegt.

### 5.2.1 Kostenrechnungen

Im Falle von LCC berechnet das Programm die jeweiligen Kosten in einem Lebensabschnitt aus den in Tabellenform vorliegenden Eingabedaten.

Das Programm berechnet die Kosten jeweils nach Zeit oder Laufleistung für den jeweiligen Prozess; die Gesamtkosten für LCC in diesem Lebensabschnitt ergeben sich dann durch Aggregation über alle Prozesse (in dieser Struktur und in dem gewählten Zeitabschnitt). Die Kostenrechnung auf Baugruppenebene wird weitgehend analog durchgeführt.

## 5.2.2 Gebrauchswert

Aus den technischen Eingabedaten, wie z. B.

- Maximale Anzahl von Personen, die das Fahrzeug befördern kann
- Anzahl der Sitz- und Stehplätze
- Anfahr- und Bremsbeschleunigung
- Kräfte bei Kollision
- Massen
- Abmessungen
- Erreichbare Geschwindigkeiten

werden die entsprechenden Zieldaten berechnet und in Ausgabetafeln gespeichert. Der Gebrauchswertmodul stellt somit eine komfortable und ansprechende Sammlung aller Daten dar, die für Sicherheit, Komfort oder technisch – verkehrlichen Nutzen von Bedeutung sind.

## 5.2.3 Berechnung ökologischer Zielgrößen im Baugruppenmodell

Im Fall der Berechnung der ökologischen Zielgrößen wird ganz ähnlich vorgegangen wie bei der Berechnung der Lebenszykluskosten. Für die pro Zeiteinheit stattfindenden Prozesse werden Verbräuche an Material, Energie und Verschleißteilen ermittelt. Mit Hilfe von Wirkungsfaktoren wird dann die ökologische Wirkung in einem bestimmten Zeitintervall berechnet. Die Wirkungsfaktoren, die ein Maß für die Umweltwirkung einer in die Umwelt zerstreuten „Komponente“ darstellen, sind fest in den Datenbanken hinterlegt.

## 5.3 Kostenbasis und Kostenveränderungen während der Lebensdauer

Die zeitlichen Aspekte bei Lebensdauerrechnungen sind in Abb. 19 zusammengefasst.

Die Nutzungsdauer eines Zuges oder eines Triebfahrzeugs beträgt in der Regel ca. 30 Jahre. Während dieser langen Zeitdauer ist das Kostengefüge bei Bahnen nicht starr vorgegeben, sondern es unterliegt den entsprechenden Veränderungen des Marktes. Wichtig ist deshalb die Angabe eines Basisjahres, auf das sich die finanziellen Daten beziehen. Im Allgemeinen wird man hierfür das Jahr der Inbetriebsetzung oder den Anfang des betrachteten Zeitpunkts wählen.

Auf dieses Basisjahr beziehen sich dann alle Kosten, wie z. B. die Ersatzteilkosten. Es besteht die Möglichkeit, die Kosten mit einer angenommenen Preissteigerungsrate umzurechnen bzw. eine Kostendegression zu berücksichtigen.

Als veränderbare Kosten während der Laufzeit des Fahrzeugs kommen in Frage (Abb.19):

- Abschreibungen
- Lohnkosten (Stundensätze)
- Ersatzteilkosten
- Kosten der Verbrauchsmaterialien
- Energiekosten

| <b>Kostensteigerung</b>   | <b>Kostendegression</b>   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Lohnrunden</li> <li>- Geldentwertung</li> <li>- Material- oder Energieverknappung</li> <li>- Behördenauflagen</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Preisverfall von Komponenten</li> <li>- Energieeinsparung</li> <li>- Verlängerung und Zusammenlegung der Wartungsintervalle</li> </ul> |
| <p><b>Berücksichtigung ist auf zwei Wegen möglich:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Definition abschnittsweise konstanter Prozesse</li> <li>- Eingabe eines konstanten Kostensteigerungsfaktors (Inflationsrate)</li> </ul> |   |

**Abb. 19: Zeitliche Aspekte bei LCC Rechnungen**

Die Berücksichtigung der Veränderung der Kosten kann mit zwei verschiedenen Methoden erfolgen:

**Methode 1:**

Die entsprechenden Prozesse werden abschnittsweise über eine Gültigkeitsfunktion definiert, z. B. bei den Energiekosten. Nachteil ist hier eine kompliziertere Eingabe, zumindest dann, wenn die Abschnitte, in denen ein Prozess gültig sein soll, verhältnismäßig klein sind, um Abweichungen zu minimieren. Dieses Verfahren wird im Allgemeinen nur bei verhältnismäßig schwach veränderlichen Prozessen angewendet werden. Der Vorteil liegt darin, dass für jeden Prozess eine (abschnittsweise konstante) Funktion definiert werden kann, die Kostenänderungen unabhängig von anderen Kostenveränderungen festlegt.

**Methode 2:**

Das statistische Bundesamt ermittelt jährlich Preisindizes im Bereich der Schienenfahrzeuge, bezogen auf ein Basisjahr. Diese Preisindizes können als Sonderfunktion eingegeben werden und berücksichtigen dann für jede Komponente des Fahrzeugs eine gleiche Kostenveränderung.

Zusätzlich können im LCC-Modell Preisindizes eingegeben werden für die Veränderung der Lohnkosten und der Energiekosten. Nicht berücksichtigt wird derzeit der Preisverfall einzelner Komponenten durch technische Veralterung.

## 5.4 Zuordnung der Kosten und Materialverbräuche zu den Verursachern

Eine Kostenoptimierung kann nur dann erfolgreich durchgeführt werden, wenn die Verursacher der jeweiligen Kosten bekannt sind und ihnen ein jeweiliger Kostenanteil eindeutig zugeordnet werden kann. Dazu müssen die Struktur, die Komponenten des Fahrzeugs und alle Prozesse sowie deren zeitliche Abfolge in den einzelnen Lebensphasen bekannt sein.

Erst nach Durchführung von Rechnungen mit verschiedenen Varianten – bezüglich der Komponenten des Fahrzeugs oder der zu betrachtenden Prozesse - kann eine kostentreibende Konstellation identifiziert und möglicherweise durch eine ähnliche Konstellation mit geringeren Kosten ersetzt werden.

Die Vorgehensweise der Kostenzuordnung zu den Verursachern kann wie in Abb. 20 dargestellt erfolgen.

- **Kostenzuordnung über**
  - **Detaillierung der Struktur und der Prozesse**
  - **Auswertung der einzelnen Lebenszyklusphasen**
  - **Variantenrechnung**
- **Zuordnung zu einer Hauptphase des Lebenszyklus**
- **Weitere Detaillierung über Prozesse**

### **Konsequenzen:**

- **Ausschöpfung der Sparpotenziale**
- **Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen (z. B. für Konstruktion)**
- **Optimierung des Einsatzes (bezüglich der Strecken)**
- **Verbesserung der Kundenakzeptanz über Fahrpreis und Gebrauchswert**

### **Abb. 20: Kostenzuordnung zum Verursacherprozess**

Der Nutzen des Programms liegt in der Anwendung für die Optimierung der Fahrzeuge bezüglich Kosten, Umweltauswirkungen sowie Sicherheit und Komfort für den Fahrgast. Diese Optimierung kann jedoch nur dann erfolgen, wenn entsprechende „Auslegungsfehler“ erkannt werden, d. h. wenn eine verlässliche Vergleichsrechnung verschiedener Varianten vorliegt.

Durch die Berechnung der Auswirkungen, d. h. der Zielgrößen in verschiedenen Lebensphasen kann bereits eine grobe Zuordnung zum verursachenden Prozess vorgenommen werden.

So werden z. B. erhöhte Energiekosten durch Verwendung von zu schweren Werkstoffen nur durch Änderungen bei der Konstruktion und Entwicklung zu beheben sein; andererseits werden erhöhte Wartungs- und Inspektionskosten nur durch Einsatz zuverlässigerer (und damit teurerer) Einzelkomponenten zu reduzieren sein.

Durch Berechnung von verschiedenen Varianten kann das Programm helfen, ein Optimum zu finden – und zwar wegen der Gesamtbetrachtung von der Entwicklung bis zur Entsorgung des Fahrzeugs unabhängig von den Einzelinteressen der jeweils nur an einer bestimmten Phase Interessierten. Als letzte Konsequenz ergeben sich hieraus Empfehlungen, wie ein verbessertes Fahrzeug zu konstruieren und auszulegen ist.

## 6 Zusammenfassung

Es wurde eine Systematik und Methodik zur ganzheitlichen Betrachtung und Kalkulation weitreichender Aspekte des Systems Schienenfahrzeug entwickelt.

Integriert sind diese Systematik und Methodik nun in dem vorliegenden Softwarewerkzeug, das es gestattet, die Wirkungen (Materialbedarf, Kosten u.v.a.) eines Schienenfahrzeugs über seine gesamte Lebensdauer abzuschätzen. Voraussetzung dafür war ein modularer Aufbau, um verschiedene Auswirkungen zu berücksichtigen:

- Kosten
- Verbrauch von Energie und Ressourcen
- Umweltauswirkungen
- Auswirkungen auf den Gebrauchswert (und damit auf die Akzeptanz des Fahrzeugs).

Das PC-Programm ist wegen der einfachen Bedienung und leichten Eingabe für einen weiten Anwenderkreis aus Herstellern, Betreibern und Genehmigungsbehörden von Bahnfahrzeugen geeignet.

Es werden die verschiedensten Einflüsse auf die Zielgrößen durch die über das Wirkungsgefüge verknüpften Einflussgrößen aufgezeigt.

Durch Berechnung von Varianten mit veränderten Eigenschaften können Kosten- und Rationalisierungspotenziale erkannt und eine Optimierung des Fahrzeugs erreicht werden.

Die Erkenntnisse über die Kosten oder Umweltauswirkungen des Fahrzeugs werden nicht nur zu besserer Vorausberechnung der auftretenden Gesamtkosten und –umweltauswirkungen führen, sondern bewirken über eine Rückkopplung auf Konstruktion und Entwicklung langfristig die Herstellung von Fahrzeugen, die über den Lebensweg ökonomisch und ökologisch optimiert sind.

### 7 Anhang: Literaturangaben

- /1/ DIN ISO 14040: Umweltmanagement Ökobilanz; 8/1996
- /2/ M. Eberlein:  
Bedeutung der Datenmodellierung im LCC- Kenngrößenmanagement  
VDI-Berichte 1334, S. 53-65  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997
- /3/ M. Eberlein:  
Sicherheit und Verfügbarkeit im Spannungsfeld von LCC und LCA  
VDI-Berichte 1488, S. 153-165
- /4/ G. Fleischer, A. Ciroth, K. Gerner, H. Kunst (TU Berlin):  
Bahnkreis – Modelle zur Beurteilung der Umweltrelevanz von Schienenfahrzeugen  
Bahnen und Umwelt, VDI-Berichte 1488, S. 53-65
- /5/ Beschreibung Unilife:  
Beschreibung über Internet: <http://www.unife.org.workgroups.workpcw0.htm>  
Beschreibung Unife LCC-Interface, Sept. 2000
- /6/ DIN 25002: Bahnanwendungen – Schienenfahrzeuge; Überarbeitung 2000
- /7/ CENELEC TC9X: EN 50126:  
Railway applications – The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)  
Sept. 1999
- /8/ Internationale Elektrotechnische Kommission  
Zuverlässigkeitsmanagement  
Teil 3: Leitfaden zur Anwendung  
Hauptabschnitt 3: Bewertung der Lebenszykluskosten  
IEC 56/655CD, Juni 2000
- /9/ G. Fleischer, A. Ciroth, K. Gerner, H. Kunst (TU Berlin):  
Bewertung von Recyclingkonzepten am Beispiel von Schienenfahrzeugkomponenten;  
VDI- Berichte 1570, S. 175 - 189
- /10/ H. Schult, D. Kleest:  
Zuverlässigkeitsengineering – wo stehen wir?  
ZEV + DET Glasers Annalen 124 (2000) 2/3 Februar/März, S. 159 – 168
- /11/ J. Moubray:  
RCM - Die hohe Schule der Zuverlässigkeit von Produkten und Systemen  
Verlag Moderne Industrie, 1996  
ISBN 3-478-91630-5



# Verbundprojekt **BAHNKREIS**

Förderkennzeichen des BMBF: 02PV21334

---

## Band 2

# LC-Modellierung

### **Verfasser:**

- Hochschule für Technik und Wirtschaft (FH) Dresden,  
Fachbereich Informatik/Mathematik,
- Ingenieurgesellschaft Fahrzeugbau, Qualität und Instandhaltung  
Dresden,
- Technische Universität Dresden, Institut für  
Schienenfahrzeugtechnik

Dresden, den 20.10.2000

## **Verzeichnis der Ergebnisberichte**

|         |                                    |
|---------|------------------------------------|
| Band 1: | Projektgrundlagen                  |
| Band 2: | LC-Modellierung                    |
| Band 3: | Baugruppenmodellierung             |
| Band 4: | Materialeinsatz                    |
| Band 5: | Modellanwendung                    |
| Band 6: | Anforderungen an Schienenfahrzeuge |

## Inhaltsverzeichnis

|     |                                    |    |
|-----|------------------------------------|----|
| 0   | Zielstellung.....                  | 4  |
| 1   | Struktur des Gesamtmodells.....    | 5  |
| 2   | LC-Prozeßmodul .....               | 7  |
| 2.1 | LC-Phasen und Prozesse .....       | 7  |
| 2.2 | Produktstruktur .....              | 9  |
| 3   | Daten und Datenbank.....           | 9  |
| 3.1 | Zielstellung und Bedeutung.....    | 9  |
| 3.2 | Datenmodell und Dateninhalte ..... | 10 |
| 3.3 | Datenbeschaffung und -haltung..... | 13 |
| 4   | Gebrauchswert.....                 | 13 |
| 5   | Algorithmen .....                  | 17 |
| 5.1 | Bestandteile des Algorithmus.....  | 18 |
| 5.2 | Bearbeitung Prozesse.....          | 19 |
| 5.3 | Simulation der Prozesse.....       | 22 |
| 6   | Ein- und Ausgabedaten .....        | 23 |
| 6.1 | Ausgewählte Daten.....             | 23 |
| 6.2 | Oberflächen-Gestaltung.....        | 25 |
| 6.3 | Gestaltung der Ausgaben.....       | 27 |
| 7   | Leistungsparameter .....           | 30 |
|     | Literaturverzeichnis .....         | 33 |

## 0 Zielstellung

Mit der Modellierung des Lebenszyklus von Schienenfahrzeugen und der damit verknüpften Darstellung von Kosten-, Material-/Energie- und wertrelevanten Informationsströmen sollen die Ziele verfolgt werden,

- die am Lebenszyklus von Schienenfahrzeugen beteiligten Wirtschaftspartner unter Abgleich unternehmerischer Einzelziele sowie der Harmonisierung der Datenstrukturen und -formate auf eine komplexe Betrachtungsweise zu orientieren,
- in die betriebswirtschaftliche Bewertung im Sinne einer LCC-Berechnung z. B. gemäß DIN IEC 60300-3-3 und E DIN IEC 56/655/CD die Berücksichtigung ökologischer Sachverhalte und die zusammenfassende Erfüllung von Gebrauchswertforderungen zu integrieren,
- eine grundsätzliche vom Nutzer wählbare Untersuchungstiefe bezüglich der Produkt-, Prozeß- und Kostenstrukturierung bis zum Anschluß detaillierter Ökobilanzen gemäß DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14041 für abgegrenzte Objekte zu ermöglichen /1/ und
- die programmtechnische Umsetzung des Modells am Beispiel der Referenzfahrzeuge Doppelstockreisezugwagen DABz 756 und des S-Bahn-Triebzuges ET 420/421 zu verifizieren.

Die beispielhafte Erprobung setzte die Anwendbarkeit für Einzelfahrzeuge und für (Zug-) Verbände voraus.

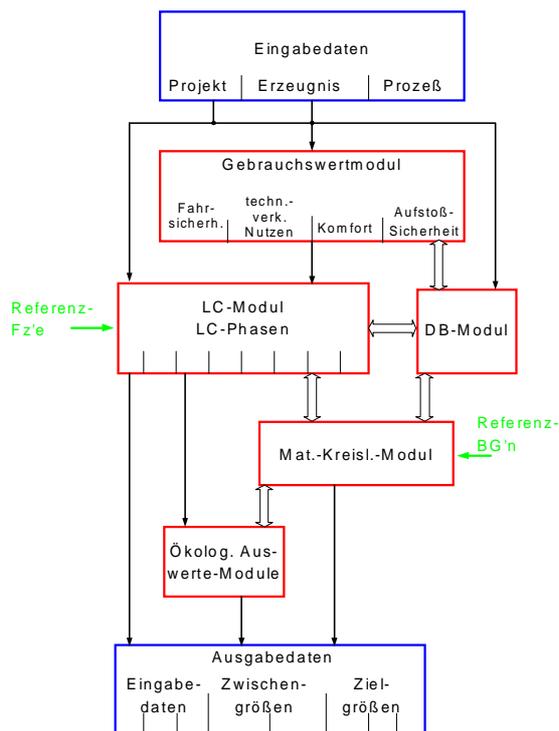
Der Nutzer hat die fahrzeugspezifischen Daten, z.B. Erzeugnisgliederung, Werkstoffe, Masseanteile usw. ebenso wie die den Lebenszyklus bestimmenden Prozeßbestandteile, wie Einsatzdaten, Aufwände, Instandhaltungsprozesse usw. einzugeben, die gewünschten Berechnungsergebnisse (Zielgrößen) festzulegen und Projekte (komplexe Berechnungsaufgaben mit konstanter Produkt- und Prozeßstruktur) zu starten.

Zur Erleichterung der Dateneingabe werden Erzeugnis- und Prozeßstrukturen zur Auswahl und Ergänzung angeboten. Hilfen erleichtern die Handhabung des Modells.

Der Umfang der gewünschten Modellnutzung wird durch die modulare Modellstruktur den Nutzerwünschen angepaßt, als Betrachtungszeitraum sind der Lebenszyklus insgesamt, einzelne seiner Phasen oder beliebige Zeiträume wählbar.

Die Ausgabedaten und -formate entsprechen der Protokollierung der Eingabedaten, wesentlicher Zwischengrößen und der gewünschten Berechnungsergebnisse; ihre Darstellung ist in Form von Berichten mit Prozeßinformationen und der Ergebnisübersicht als Ausdruck oder Datei konzipiert.

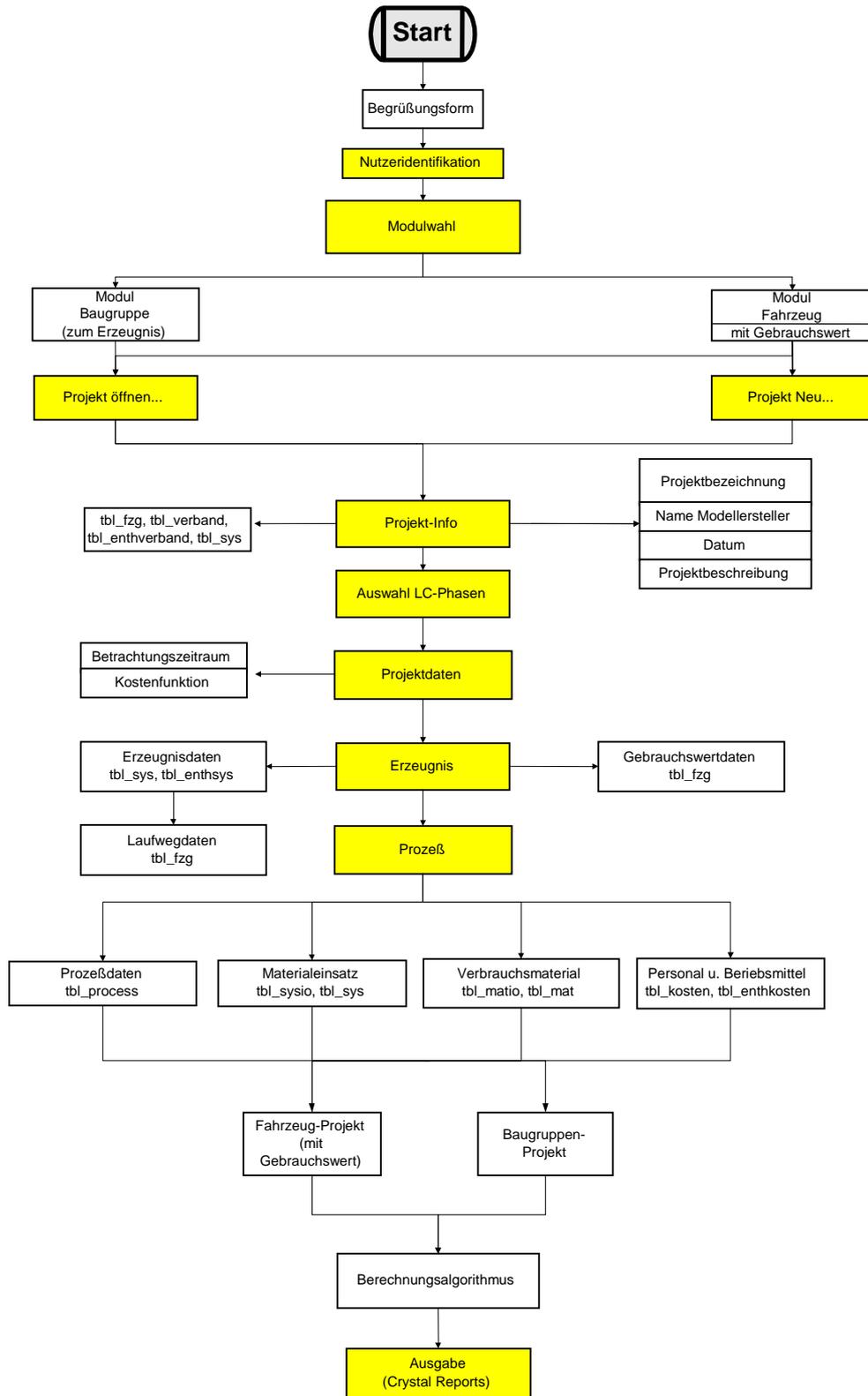
## 1 Struktur des Gesamtmodells



Das im Projekt geschaffene Modell BAHNKREIS (Bild 1) besteht aus den zwei berechnungsorientierten Modulen „LC-Modul“ und „Materialkreislauf-Modul“. Ihnen sind der Gebrauchswertmodul einerseits und ein ökologischer Auswerte-Modul andererseits zugeordnet, die insgesamt alle auf den Datenbankmodul zugreifen.

Eine einheitliche Programmoberfläche garantiert unabhängig von dem zur Berechnung ausgewählten Modul die Eingabe / Auswahl der Eingabedaten; die Ausgabe der Daten erfolgt ebenfalls einheitlich.

**Bild 1: Module des erweiterten LCC-Programms BAHNKREIS**



**Bild 2: Programmkonzept des erweiterten LCC-Programms BAHNKREIS**

Das Programmkonzept ist Bild 2 zu entnehmen.

Nach der üblichen Nutzeranmeldung in den Kategorien „Administrator“, „Projektant“ (Neuanlage von Projekten) und „Projektbearbeiter“ (Datenbearbeitung im Rahmen vorhandener Projekte) erfolgen Modulauswahl (Zugriff auf Berechnungsmodul) und die Wahl der Art der Projektnutzung (Neuanlage oder Nutzung).

Auf jedem Zweig der Nutzungsart schließt sich die Eingabe/Auswahl der Projektformationen, die Berücksichtigung von Zugverband, Fahrzeug oder Baugruppe, die Projektbezeichnung und -beschreibung sowie aktueller Nutzerdaten (Name) an.

Mit der Festlegung des Betrachtungszeitraumes wird automatisch der Beginn als Bezugsgröße für sich ändernde Einflußgrößen (Kosten, Preise) festgelegt; entsprechende Änderungsfunktionen (Inflationsrate, Lohnsteigerungsrate, Zinsen) sind implementiert und in ihren Parametern (z. B. Zinsfuß) wählbar. Als Währungseinheit wurde der EURO (EUR) gewählt.

Nach Eingabe aller projektrelevanten Daten erfolgen die Eingabe/Auswahl der Erzeugnis- und der Prozeßdaten. Ausschließlich mit der Betrachtung des kompletten Erzeugnisses verknüpft wird die Festschreibung der Gebrauchswertdaten (Kapitel 4) verbunden.

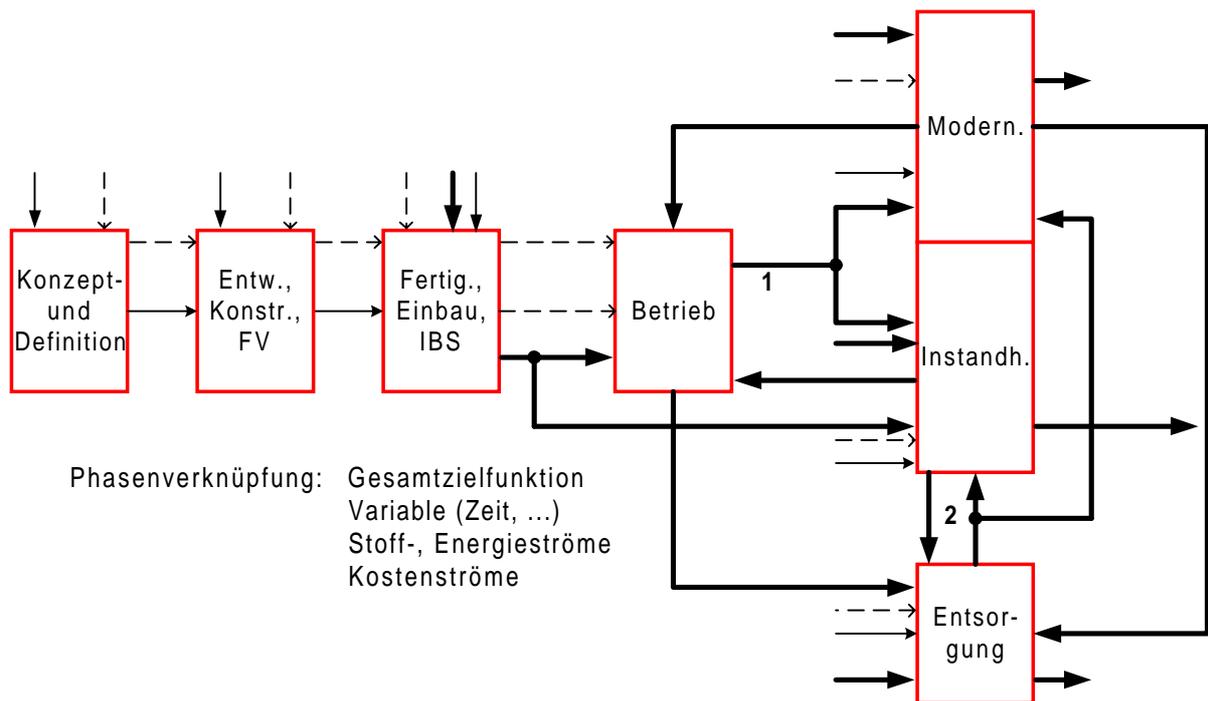
In Bild 2 sind neben den Arten der nutzbaren Daten auch die zugehörigen Tabellen in der Datenbank angegeben (Kapitel 3). In Abhängigkeit vom gewählten Berechnungsmodul müssen die Variablen (Einflußgrößen) in Eingangsgrößen für die implementierten Berechnungsalgorithmen eingegeben werden. Berechnungen sind als Einzelberechnungen bzw. prinzipiell im Sinne von Simulationsläufen möglich.

Die Ergebnisausgabe erfolgt mit Hilfe von Crystal Reports (s. Kap. 6).

## **2 LC-Prozeßmodul**

### **2.1 LC-Phasen und Prozesse**

Auf der Grundlage entsprechender Prozeßanalysen wurden Hauptphasen des Lebenszyklus gemäß Bild 3 definiert.



**Bild 3: Hauptphasen des Lebenszyklus**

Jede dieser Hauptphasen beinhaltet Prozesse, deren Detailliertheit prinzipiell in gewünschter Tiefe (Hauptphase → Phase → Phasenstufe → Phasenvorgang → Phasenschritt →...) denkbar ist, in der Projektbearbeitung aber lediglich bis zur Phasenstufe ausgeführt wurde. Der Nutzer definiert für die Hauptphasen des Lebenszyklus die für ihn wesentlichen Prozesse selbst.

Jedem Prozeß werden die absolute Zeit (Zeiteinheit: Stunde, Tag, Monat, Jahr wählbar) und/oder der Laufweg für Anfang und Ende zugeordnet; er steht über das Datenmodell mit anderen Parametern in Verbindung (Aufwände, Material,...). Variable Prozeßinhalte ergeben sich im Ergebnis stochastischer Vorgänge, wie Instandhaltungsprozesse (Arbeiten nach Befund/Schadensanfall).

Bei der Algorithmierung wurde beachtet, daß bei Überlagerung von z.B. 2 Instandhaltungsmaßnahmen (z. B. Frist 1 und Frist 2) der Prozeß mit der höheren Wertigkeit (hier: Frist 2) in die Prozeßfolge aufgenommen wird.

## 2.2 Produktstruktur

Die hierarchisch angelegte und als Vorlage einer einheitlichen Erzeugnisstruktur im Programm hinterlegte Produktstruktur (Stammdaten) folgt den Überlegungen einer funktional orientierten Gliederung. Sie ermöglicht die Strukturierung in Anlagen → Hauptbaugruppen → Baugruppen → Untergruppen →...), ist prinzipiell in gewünschter Tiefe denkbar und im Projekt bis zur Ebene „Untergruppe“ ausgeführt:

z. B.:

|         |                                     |
|---------|-------------------------------------|
| 4       | Anlage „Antriebssystem              |
| 4.4     | Hauptbaugruppe „Antrieb“            |
| 4.4.1   | Baugruppe „Elektrischer Fahrmotor“  |
| 4.4.1.3 | Unterbaugruppe „Fahrmotorlagerung“. |

Das Modell kann abweichend auch kundenspezifische Erzeugnisstrukturen übernehmen.

Werden Zugverbände betrachtet, so ist jedes Fahrzeug in seiner konkreten Struktur mit den sonstigen Eingabedaten im laufenden Projekt zu berücksichtigen. Das grundsätzliche Eingabeprinzip sollte die serielle Eingabe für jedes Fahrzeug gesondert sein.

Da zwischen Elementen der Produktstruktur und Elementen der Prozeßstruktur in vielen Fällen eindeutige Zuordnungen existieren (z.B.: Außenreinigung - Fahrzeug, Profilberichtigung - Radsatz), wurde als Erleichterung bei der Programmnutzung eine entsprechende Produkt-Prozeß-Matrix entwickelt.

## 3 Daten und Datenbank

### 3.1 Zielstellung und Bedeutung

Das Aufstellen des Datenmodells bewirkte die qualitative Normierung der Analyseergebnisse und erlaubte die Anwendungsbreite der BAHNKREIS-Modelle; sämtliche Anforderungen an die Modelle spiegeln sich somit im Datenmodell wider.

Die Bedeutung des Datenmodells ist insbesondere darin zu sehen, daß jede Dateneingabe und jede zeitaufwendige Implementation von Oberflächen, Algorithmen sowie sämtliche Programmierleistungen das Datenmodell als notwendige Voraussetzung benötigen und von diesem wesentlich abhängen [2]. Das Datenmodell ermöglicht eine vollständige, widerspruchs- und redundanzfreie Speicherung der Daten.

Eine relationale Datenbank (physische Umsetzung des Datenmodells) bildet die hochkomplexe Datenlage zur Beantwortung der vielfältigen Fragestellungen im Projekt ab. Das Datenmodell kann äquivalent sowohl für weitere bekannte XBase Datenbanken (dBase, FoxPro), Paradox und ähnliche als auch für den MS SQL-Server 7.0 und die Datenbanken ORACLE 8, SYBASE, INFORMIX und weitere verwendet werden.

Der Anwender kommt nur indirekt mit dem vorgestellten Datenmodell in Berührung. Die Dateneingabe für eine derart komplexe Datenbank wird über Visual-Basic-Programme (Erfassungsformulare) realisiert.

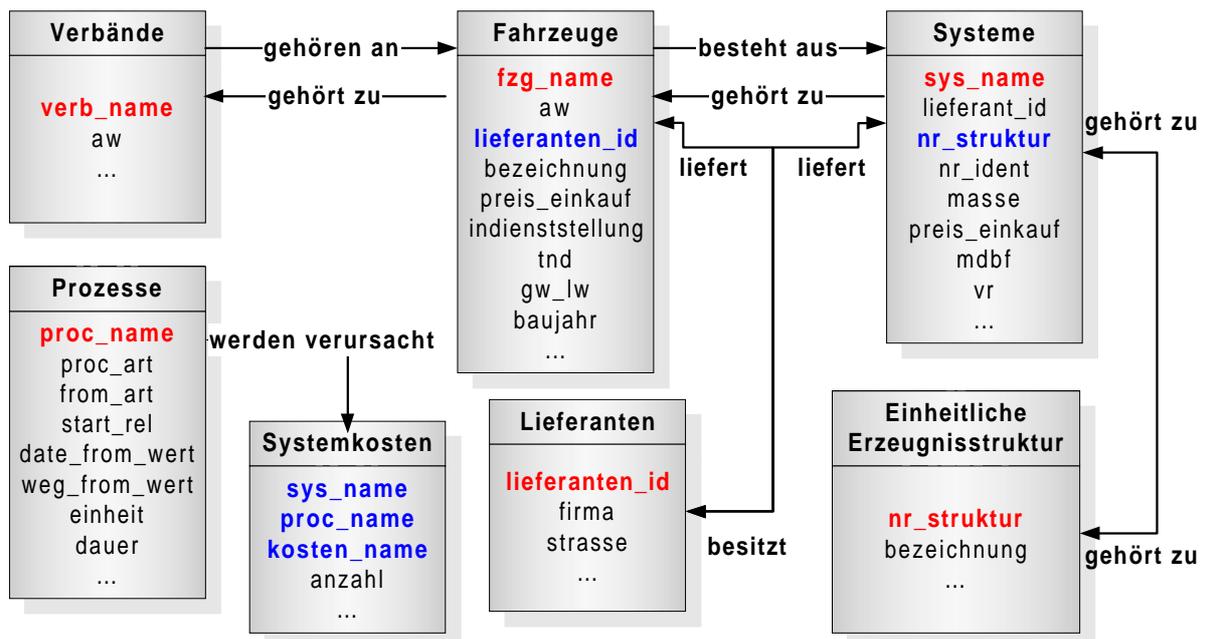
### 3.2 Datenmodell und Dateninhalte

In der Datenbank sind allgemein Daten zu nachfolgenden Inhalten entsprechend Bild 4 gespeichert:



**Bild 4: Dateninhalte**

Als wesentliche Datengruppen sind Fahrzeuge, Verbände, Prozesse, Erzeugnisbestandteile (Anlagen, Hauptbaugruppen, Baugruppen, ...), Materialien und Kosten abgebildet. Darüber hinaus sind Verwaltungsdaten wie Nutzer- und Quellenangaben enthalten. Nach dem Prinzip der relationalen Datenbank stehen diese Datengruppen miteinander in Beziehung. Bild 5 verdeutlicht diesen Zusammenhang anhand des Entity-Relationship-Attribute-Modell (Ausschnitt):



**Bild 5: Entity-Relationship-Attribute-Modell (Ausschnitt)**

So kann ein Verband aus beliebig vielen Fahrzeugen bestehen, ein Fahrzeug kann mehreren Verbänden angehören (m:n –Beziehung) etc.

Durch das Ablegen der Daten in verknüpften Tabellen werden (bei geschickter Datenstrukturierung) folgende Punkte sichergestellt:

- Vermeiden von Redundanzen
- verständliches Datenmodell (vereinfacht Wartung und Programmierung)

- Vermeiden von Fehlern bei Datenänderungen, Dateninkonsistenzen und Nullwerten in Datenfeldern
- Sicherung der referentiellen Integrität der Daten.

Referentielle Integrität ist ein Regelsystem, mit dessen Hilfe sichergestellt wird, daß Beziehungen zwischen Datensätzen in Detailtabellen gültig sind und verknüpfte Daten nicht versehentlich gelöscht oder geändert werden. Bei Berücksichtigung der Integrität wird folgendes verhindert:

- Hinzufügen von Datensätzen in einer Detailtabelle, wenn kein zugehöriger Datensatz in der Mastertabelle vorhanden ist.
- Änderungen von Werten in der Mastertabelle, die in einer Detailtabelle verwaiste Datensätze zur Folge hätten.
- Das Löschen von Datensätzen aus der Mastertabelle, wenn übereinstimmende Detaildatensätze in einer Detailtabelle vorhanden sind.

In Bild 6 wird die in der Datenbank umgesetzte und entsprechend Bild 5 erläuterte Beziehung der Fahrzeugtabelle (tbl\_fzg) mit der Lieferantentabelle (tbl\_lieferant) gezeigt (1:n-Beziehung).

The image shows two database tables. The top table, 'tbl\_fzg', has columns: fzg\_nr, nw, lieferanten\_id, bezeichnung, preis\_einkauf, indienststellung, and tnd. The bottom table, 'tbl\_lieferant', has columns: lieferant\_id, firma, and at. A red arrow points from the 'lieferanten\_id' column in the 'tbl\_fzg' table to the 'lieferant\_id' column in the 'tbl\_lieferant' table, indicating a foreign key relationship.

| tbl_fzg : Tabelle |                                     |                |                  |               |                  |     |  |
|-------------------|-------------------------------------|----------------|------------------|---------------|------------------|-----|--|
| fgz_nr            | nw                                  | lieferanten_id | bezeichnung      | preis_einkauf | indienststellung | tnd |  |
| BR 111            | <input type="checkbox"/>            | 30             | S-Bahn, BR 111   | 1800000,00    | 01.01.89         | 20  |  |
| DABz 756          | <input type="checkbox"/>            | 1              | Doppelstockwagen | 1000000,00    | 31.05.95         | 20  |  |
| ET 420/421        | <input checked="" type="checkbox"/> | 26             | S-Bahn-Triebzug  | 3200000,00    | 01.01.00         | 30  |  |

| tbl_lieferant : Tabelle |   |           |
|-------------------------|---|-----------|
| lieferant_id            | firma                                   | at        |
| 1                       | Bombardier Transportation, Werk Görlitz | Abteilung |
| 2                       | Sperling GmbH & Co                      | Abteilung |
| 3                       | Robert Wagner                           | Abteilung |
| 4                       | Fahrzeugausrüstung Berlin GmbH (FAGÄ)   | Abteilung |

**Bild 6: Verknüpfung von ausgewählten Datenbanktabellen**

### **3.3 Datenbeschaffung und -haltung**

Zur Entwicklung sowie zur Validierung des entwickelten Instrumentes wurden zwei Fahrzeuge des Personennahverkehrs festgelegt; ein Neubau-Doppelstockreisezugwagen DABz 756 und der S-Bahn Triebzug ET 420/421.

Der Datenbeschaffung lag eine fachliche und inhaltliche Abstimmung zugrunde. Es wurde grundsätzlich bei der Datenkommunikation zwischen Hersteller, Betreiber und Industriepartnern mit neutralisierten Daten gearbeitet. Als Schwierigkeit beim Beschaffungsprozeß hat sich die Aufbereitung von vorhandenen, zumeist in Papierform vorliegenden Daten erwiesen.

Die Daten zu den Beispielfahrzeugen und -baugruppen sind in der Projektdatenbank gemeinsam abgelegt und können beliebig geändert oder erweitert werden. Somit steht bei konsequenter Anwendung ein Wissensspeicher zur Verfügung, der bei der Anwendung der BAHNKREIS-Modelle genutzt werden kann.

## **4 Gebrauchswert**

Ohne Betrachtung des Gebrauchswertes ist eine Bewertung oder der Vergleich mit anderen Fahrzeugen nur sehr eingeschränkt möglich.

Problematisch ist die objektive Bewertung des Gebrauchswertes vor allem deshalb, weil diese von vielen subjektiven Faktoren abhängt und bisher keine allgemeingültige Bewertungsvorschrift existiert. Es gibt jedoch eine Reihe technischer Grenzwerte und Mindestanforderungen, die in Gesetzen, UIC-Vorschriften, DIN-Blättern, VDI-Richtlinien sowie internen Vorschriften der Betreiber verankert sind. Z.B. beschreibt die UIC 518 /3/ die Grenzwerte für Fahrsicherheit und Fahrkomfort. Neben den z.Z. stark in der Diskussion befindlichen crashgerechten Schienenfahrzeug-Konstruktionen mit Stoßverzehrelementen, die die Aufstoßsicherheit entscheidend beeinflussen, sind hinsichtlich des Gebrauchswertes für den Fahrgast vor allem die Komfortgrößen von Bedeutung.

Hier kann auf /4/ aufgebaut werden, ansonsten muß durch geeignete Verfahren (Beobachtungen, Zeitmessungen, Befragungen) eine Wichtung der sehr unterschiedlichen Aspekte (Fahrkomfort, Einstiegscomfort, Sitzcomfort, Lärm, Heizung/Lüftung/Klimatisierung, Hilfsmittel für Behinderte) herbeigeführt werden. Den Verkehrsdienstleister wiederum wird vor allem der technisch verkehrliche Nutzen des Fahrzeuges in einem bestimmten Zugverband auf einer bestimmten Strecke mit einer vorhandenen Nachfrage interessieren.

Die Zielgrößen des Gebrauchswertes werden in folgende Bereiche unterteilt:

### **Fahrsicherheit**

Aus folgenden Größen werden die vertikale und horizontale Fahrwegbeanspruchung berechnet:

- Mittlere Achsfahrmasse (kg): abh. von Eigenmasse, Zuladung, Radsatzzahl für Streckenklasse
- Abfederungsverhältnis (%): abh. von abgef. und unabgef. Masseanteil, abgef. Masseanteil zu Gesamtmasse
- Mittlere Radkraft (kN): Radkraft aus mittlerer Achsfahrmasse
- Zulässige Führungskraft (kN): abh. von Radkraft, nach UIC 518 berechnet.

Da die Angabe einer Maßzahl in kN nur für Spezialisten aussagekräftig ist, wird vorzugsweise die Ausnutzung der Maximalwerte von 145 kN bzw. 60 kN in % angegeben. Weiterhin werden berechnet:

- Vertikale Fahrwegbeanspruchung (%): tatsächl. auftret. Radkraft / Maximalkraft
- Horizont. Fahrwegbeanspruchung (%): tatsächl. auftret. Querkraft / Maximalkraft.

Fahrsicherheit und Sicherheit gegen Entgleisen stellen das Verhältnis von Führungskraft zu Radkraft dar. Die Fahrsicherheit wird in der Geraden bzw. in großen Gleisbögen bei hohen Geschwindigkeiten, die Sicherheit gegen Entgleisen in engen Gleisbögen bei sehr geringen Geschwindigkeiten bestimmt. Die Grenzwerte unterscheiden sich mit 0,8 und 1,2 deutlich.

- Fahrsicherheit: Dynamische Führungskraft / Radkraft
- Sicherheit gegen Entgleisen: Statische Führungskraft / Radkraft.

### Aufstoßsicherheit

Diese Nachweise befinden sich – national wie international – gerade in Entwicklung und stellen eine neue Qualität in der Schienenfahrzeugtechnik dar /5/. Vergleichsgrundlage der Beurteilung bildet hier die Energiebetrachtung beim Aufstoß auf ein 80t schweres starres Hindernis bei normaler Geschwindigkeit (ohne bleibende Verformung) und im außergewöhnlichen Fall (mit bleibender Verformung).

Da bisher gebaute Fahrzeuge nicht auf dieser Basis, sondern nur mit einer vorgeschriebenen Längskraft dimensioniert wurden, muß außerdem die Längsfestigkeit der Fahrzeuge bewertet werden. Zusätzlich positiv bewertet werden bessere Bremssysteme, weil ihr Vorhandensein zur Schadensbegrenzung beiträgt. Insgesamt tragen zur Bewertung bei:

- Gesamtenergieaufnahme (kJ): Summe der Energieaufnahmen aller Stoßverzeherelemente
- Kollisionsenergie bei norm. Aufstoß: Berücksichtigung nur der Stoßeinrichtung
- Kollisionsenergie bei außerg. Aufstoß: Berücks. der Gesamtenergieaufnahme
- Bewertung der Energieaufnahme: in Abh. kollisionsfähiges Fahrzeug
- Zusatzbewertung BOStrab-Bremse: höhere Verzögerung
- Zusatzbewertung Längsfestigkeit: Berücksichtigung der Ist-Längsfestigkeit
- Gesamtzusatzbewertung: Produkt aus Einzelzusatzbewertungen
- Gesamtbewertung Aufstoßsicherheit: Produkt aus Gesamtzusatz- und Energieaufnahmebewertung

### Komfort

Da unterschiedliche Komfortmerkmale mit verschiedenen Dimensionen schwerlich zusammengefaßt werden können und das Vorhandensein anderer nur durch Ja/Nein – Entscheidungen berücksichtigt werden kann, wird vorschlagsgemäß eine Punktbewertung vorgenommen.

**Tabelle 1: Punktbewertungstabelle für Komfortmaße:**

| Größe                   | Einheit | Punkte | 0          | 1                     | 2                     | 3          |
|-------------------------|---------|--------|------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| Einstieghöhendifferenz  | mm      |        | >600       | 680...440             | 440...200             | <200       |
| Türspurbreite           | mm      |        | <600       | 600...680             | 680...760             | >760       |
| Sitzteiler 1./2. Klasse | mm      |        | <1800/1650 | 1800..1900/1650..1800 | 1900..2000/1800..1900 | >2000/1900 |
| Sitzbreite 1./2. Klasse | mm      |        | <500/450   | 500..525/450..470     | 525..550/470..490     | >550/490   |
| Schwingungskomfort      | Wz      |        | >3         | 3...2,5               | 2,5...2,2             | <2,2       |
| Geräuschniveau          | dB(A)   |        | >65        | 65...62               | 62...60               | <60        |

Bewertet wird weiterhin bei Vorhandensein der Service- und Ausstattungskomfort.

Die insgesamt ermittelten Punkte werden entsprechend der Wahrnehmungsstärke mit Faktoren bewertet (multipliziert), der Sitzkomfort mit 3, Einstiegskomfort, Schwingungskomfort und Lärm mit 2 und alle übrigen mit 1. Alle Komfortpunkte werden letztendlich addiert, zur maximalen Gesamtpunktzahl ins Verhältnis gesetzt und bilden so eine Aussage zum **Gesamtkomfort**.

### **Technisch – verkehrlicher Nutzen**

Bei den technisch – verkehrlichen Zielgrößen sind vor allem Aussagen zur Leistungsfähigkeit des Verkehrsmittels aus der Sicht des Betreibers gefragt. Im Einzelnen werden die folgenden Kenngrößen berechnet:

- Leichtbaugrad (kg/m): Metermasse des leeren Fahrzeuges
- Motorisierungsgrad (kW/kg): Leistungsmasse des leeren Fahrzeugs
- Personenbeförderungskapazität (P/m) Gesamtpersonenzahl / Fahrzeuglänge
- Fahrgastwechsel (P/Türspur) Gesamtpersonenzahl / Türspur
- Sitzplatzanteil (%) Sitzplatzzahl / Gesamtplatzzahl
- Anfahrzugkraft (kN) Zugkraft aus Masse und Anfahrbeschleunig.
- Zugkraft bei mittl. Geschw.(kN) Zugkraft aus Leistung und mittl. Geschwindigkeit.
- Benötigte Bahnsteiglänge (m) Gesamtzuglänge aus benötigter Fahrzeugzahl

Die notwendigen Eingabedaten werden im Programm auf „Karteikarten“ entsprechend den angeführten Bereichen übersichtlich zusammengestellt und in der Datenbank abgespeichert. Beim Aufruf des Gebrauchswertmodules werden daraus online die Zielgrößen und die Gesamtkomfortbewertung berechnet.

## **5 Algorithmen**

Bei der Umsetzung funktionaler Abhängigkeiten zwischen Einfluß- und Zielgrößen und der Abbildung der Modellstruktur in einem Programm sind folgende Aspekte zu beachten:

- Auswahl relevanter Größen und Beziehungen unter Beachtung der Modellziele → Entscheidungen zur Selektion zu berücksichtigender Größen
- Verhinderung der Modellüberfrachtung mit unwesentlichen Details → Formulierung von Abstraktionen
- Vereinfachte Darstellung realer oder geplanter Abläufe durch das Modell → Idealisierung
- Sicherung der Modellqualität durch Begrenzung der Restriktionen
- Notwendige Präzisierung, Strukturierung und Formalisierung unscharfer, unvollständiger verbaler Anforderungen
- Definition zeitlicher und personeller Randbedingungen
- Einhaltung des Prinzips der Skalierbarkeit aller Modellobjekte zwecks flexibler Detaillierbarkeit (Granularität)
- Gewährleistung der Offenheit und Erweiterbarkeit des Modells wegen laufender Forderungen und zukünftiger Algorithmen
- Aufbau eines Modells mit redundanzfreier und damit fehlerarmer widerspruchsfreier, kompakter Datenhaltung.

Darüber hinaus sind die Hersteller- und Betreiberneutralität des Modells, die Berücksichtigung optionaler Ausfallraten von Baugruppen (Grundlage für Instandhaltungsplanung) sowie ein modularer Aufbau und damit prinzipiell gegebene Erweiterbarkeit zu beachten.

Eine diesen Anforderungen entsprechende Umsetzung des Fahrzeugmodells ist grundsätzlich Bild 5 zu entnehmen.

## 5.1 Bestandteile des Algorithmus

Der Algorithmus besteht aus folgenden drei Teilen:

### I. Interpretation der Prozesse der ausgewählten Fahrzeuge und Verbände

Eine interne, expandierte Prozeßtabelle (tbl\_ip) wird generiert. Dabei werden die interpretierten Prozesse intern nach ihrer Startzeit chronologisch wachsend angeordnet. Insbesondere diejenigen Prozesse, die mehreren Fahrzeugen zugeordnet sind und die periodisch expandierenden, bewirken eine schnell wachsende Datensatzmenge.

### II. Simulation der intern gespeicherten Prozesse

Für jedes ausgewählte Fahrzeug werden alle internen Prozesse in chronologischer Reihenfolge aktiviert. Jeder aktivierte Prozeß verbraucht oder tauscht die zugeordneten Stoffe, Materialien, Baugruppen und berechnet weitere finanzielle Aufwände. Eingetragen werden diese Transfers in den Historie-Dateien tbl\_matiohist, tbl\_sysiohist und tbl\_prochist.

### III. Generierung der Zielgrößen und Datenaufbereitung für den Reportgenerator

Die von den Prozessen gespeicherten Transfers an Materialien, Baugruppen und Aufwänden werden in Jahresscheiben akkumuliert (tbl\_preisindex). Korrektive Instandhaltungsaufwendungen werden getrennt nach verfügbarkeitsrelevanten und nicht verfügbarkeitsrelevanten Ausfällen den Betriebsprozessen je Fahrzeug zugeordnet. Korrektive Instandhaltungsaufwendungen werden sowohl pro Fahrzeug als auch pro Baugruppe und Fahrzeugakkumuliert. Korrektive Instandhaltungsaufwendungen werden des weiteren für Fahrzeuge, Verbände und Baugruppen in Jahresscheiben zusammengefaßt. Zudem werden die pro Jahr realisierten Laufwege und die Betriebsdauer ermittelt

Wesentlich für das Verständnis ist, daß im Modell drei Zeitbegriffe und drei Wegbegriffe existieren:

**Zeit** auch **absolute Zeit**, bildet die reale abgebildete Zeit in der Maßeinheit [d] modellintern ab

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| <b>absolute Betriebsdauer</b> | als <b>Betriebsdauer</b> bezeichnet, Maßeinheit [d], beginnt mit dem ersten Betriebseinsatz bei 0, wird nur bei Betriebseinsätzen akkumuliert |
| <b>relative Betriebsdauer</b> | wie die <b>absolute Betriebsdauer</b> , wird jedoch bei jeder Revision ( <code>tbl_process.proc_art="R"</code> ) wieder auf 0 gesetzt         |
| <b>Laufweg</b>                | Maßeinheit [km], beginnt mit dem ersten Betriebseinsatz bei 0, wird chronologisch aufsteigend bei Betriebseinsätzen akkumuliert               |
| <b>relativer Laufweg</b>      | wie der <b>Laufweg</b> , wird bei jedoch bei jeder <b>Revision</b> ( <code>tbl_process.proc_art="R"</code> ) wieder auf 0 gesetzt             |
| <b>Weg</b>                    | Abstand zwischen zwei <b>Laufwegen</b> bzw. <b>relativen Laufwegen</b><br>Maßeinheit [km]   |

## 5.2 Bearbeitung Prozesse

Die Vorgehensweise soll am Beispiel der im Lebenszyklus dominanten und zahlreichen Phasen enthaltenen Hauptphase „Betrieb“ demonstriert werden (Bild 7).

Betriebsprozesse werden auf der Zeitachse mit Laufweg, Anfangs- und Enddatum chronologisch abgebildet (`tbl_ip`). Betriebsprozesse dürfen sich innerhalb eines Fahrzeuges nicht überschneiden.

Prozesse mit relativer oder absoluter Startzeit (Modernisierung oder Außerbetriebsetzung) werden danach auf der Zeitachse abgebildet. Ein zeitliches Überschneidungen mit Betriebsprozessen bewirkt deren zeitproportionale Reduzierung.

Als dritter Schritt wird die akkumulierte Betriebsdauer für alle bisher für das Fahrzeug interpretierten Prozesse eintragen (`tbl_ip`).

Danach werden Prozesse mit absoluter Betriebsdauer als Startzeit (Modernisierung, Außerbetriebsetzung, Revisionen, Außerplanmäßige Instandsetzungen) interpretiert. Überschneidungen mit Betriebsprozessen bewirken wiederum eine Reduzierung der betroffenen Betriebsintervalle.

Im nächsten Schritt werden absolute Laufwegangaben für alle bisher für das Fahrzeug interpretierten Prozesse in die interne Prozeßtabelle eintragen.

Jetzt können die Prozesse mit absoluten Laufwegen als Startangaben eingeordnet werden. Wieder erfolgt eine Reduzierung von Betriebsprozessen im Falle von Überschneidungen.

Zuletzt werden die periodisch auftretenden Prozesse (Instandhaltungen, Innen- und Außenreinigungen) interpretiert und zeitparallel je Fahrzeug in der tbl\_ip angeordnet. Dabei unterdrücken höherwertige Prozesse gleicher Gattung die niederwertigen Prozesse innerhalb jedes Fahrzeuges. Nach jeder Revision werden die relative Betriebsdauer und der relative Laufweg auf Null gesetzt.

Wesentliche Eigenschaften des Interpretationsalgorithmus sind:

- alle Fahrzeug und alle Fahrzeuge eines Verbandes werden einzeln auf einer individuellen Zeitachse in Form der internen Prozeßtabelle angeordnet
- nur ausgewählte Fahrzeuge und Verbände werden betrachtet
- die Anzahl der zu betrachtenden Fahrzeuge und Verbände ist unlimitiert
- es erfolgt eine umfassende Kontrolle der Daten auf Integrität, Vollständigkeit, Widerspruchsfreiheit und semantische Glaubwürdigkeit
- Informationen, Warnungen, Fehler werden sowohl auf dem Monitor als auch in einer Fehlerdatei kontextbezogen protokolliert

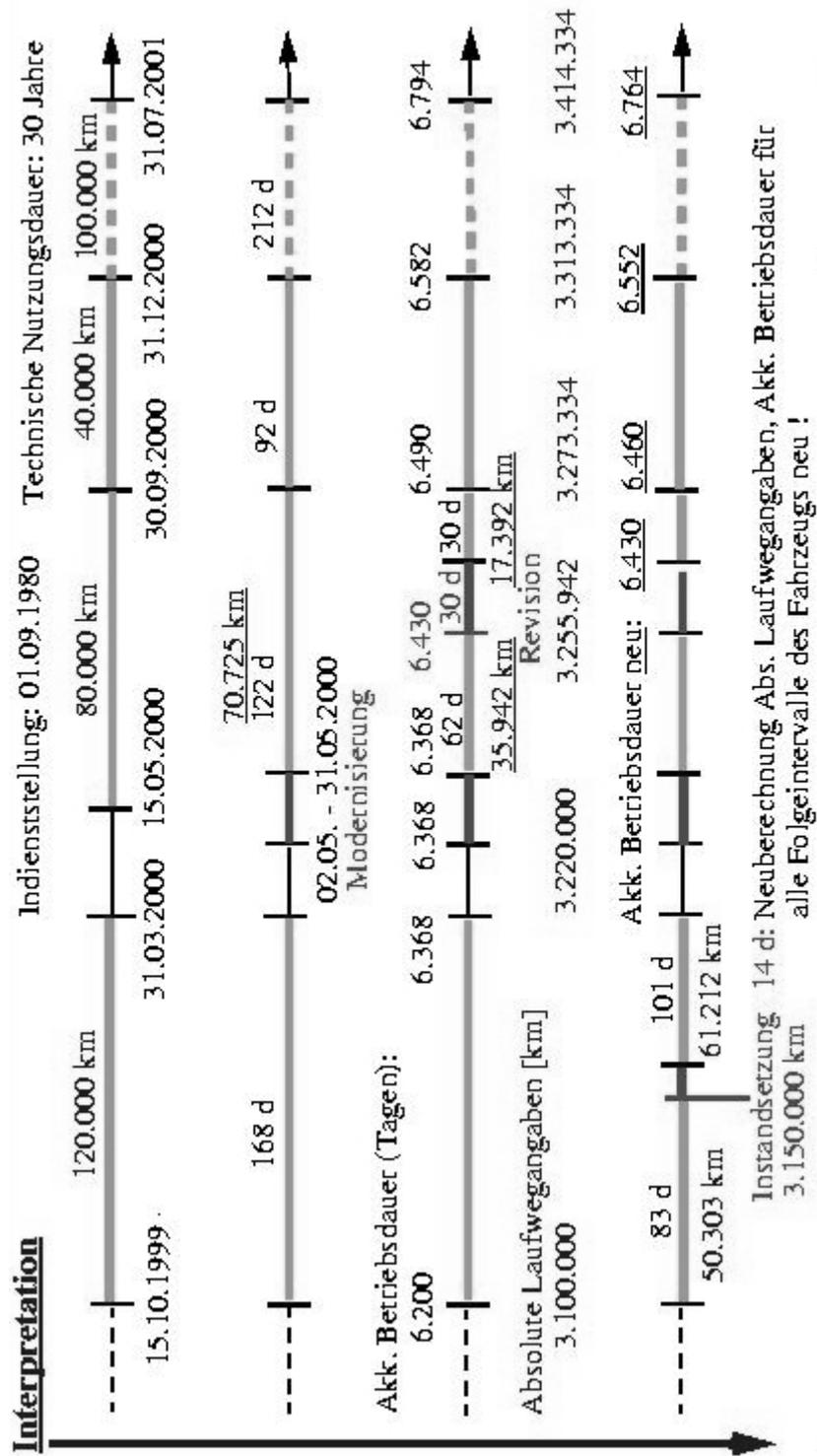


Bild 7: Interpretation der Prozesse eines Fahrzeuges (Betriebsphase)

- Datenfehler führen nicht zum Abbruch
- intelligente, automatische Fehlerreaktionen und Fehlerkorrekturen unterstützen den Anwender, der Anwender wird informiert
- Zeitintervalle der Prozeßarten Revision, Außerbetriebsetzung, Instandsetzung, Modernisierung müssen durchschnittsfremd sein.
- die Betriebsprozesse werden bzgl. des Datums der Indienststellung und der Technischen Nutzungsdauer hin überprüft
- das Ergebnis der Interpretation (interne Prozeßtabelle) kann optional aufgelistet werden

### **5.3 Simulation der Prozesse**

Für jedes Fahrzeug werden alle Prozesse der internen Prozeßtabelle in chronologisch aufsteigender Richtung aktiviert. Dabei werden alle zugeordneten Stoffe, Materialien, Energien je Prozeß verbraucht bzw. ausgegeben und pro Fahrzeug, Material und Prozeß in den Tabellen tbl\_matiohist, tbl\_sysiohist und tbl\_prochist mit Datum/Uhrzeit abgespeichert.

Einzelaufwände werden sowohl pro Material als auch über alle Materialien des Prozesses akkumuliert. Bei der Behandlung der Baugruppen wird zwischen dem Austausch der Baugruppen und der Aufarbeitung unterschieden. Sämtliche Einzelkosten, die beim Austausch oder der Aufarbeitung von Systemen bekannt sind, werden berücksichtigt.

Einzelaufwände werden sowohl pro Baugruppe als auch über alle Baugruppen des Prozesses akkumuliert.

Im Falle von Absolutkostenangaben bei Prozessen werden nur diese berücksichtigt, in jedem Fall werden die Kosten vollständig ermittelt.

Je Prozeß werden die Materialkosten, Baugruppenkosten und weiterer Aufwände ermittelt.

Die Zielgrößen werden für die Ausgabe seitens des Reportgenerators aufbereitet. Aufwände für Material/Stoffe/Energie, für Baugruppen und weitere Kosten werden je Fahrzeug und Prozess in Jahresscheiben akkumuliert (tbl\_preisindex).

Die korrektiven Instandhaltungsaufwendungen sind getrennt nach verfügbarkeits- und nicht verfügbarkeitsrelevanten Angaben, je Betriebsprozeß und Fahrzeug zugeordnet (tbl\_failhis).

Außerdem werden die korrektive Instandhaltungsaufwendungen pro Fahrzeug und pro Verband akkumuliert. Korrektive Instandhaltungsaufwendungen sind ebenfalls pro Baugruppe und Fahrzeug akkumuliert.

Danach werden korrektive Instandhaltungsaufwendungen für Fahrzeuge, Verbände und Baugruppen innerhalb von Jahresscheiben akkumuliert (tbl\_kihis).

Die realisierte Betriebsdauer und der zurückgelegte Laufweg werden pro Fahrzeug und Jahr ermittelt und in die tbl\_tek geschrieben.

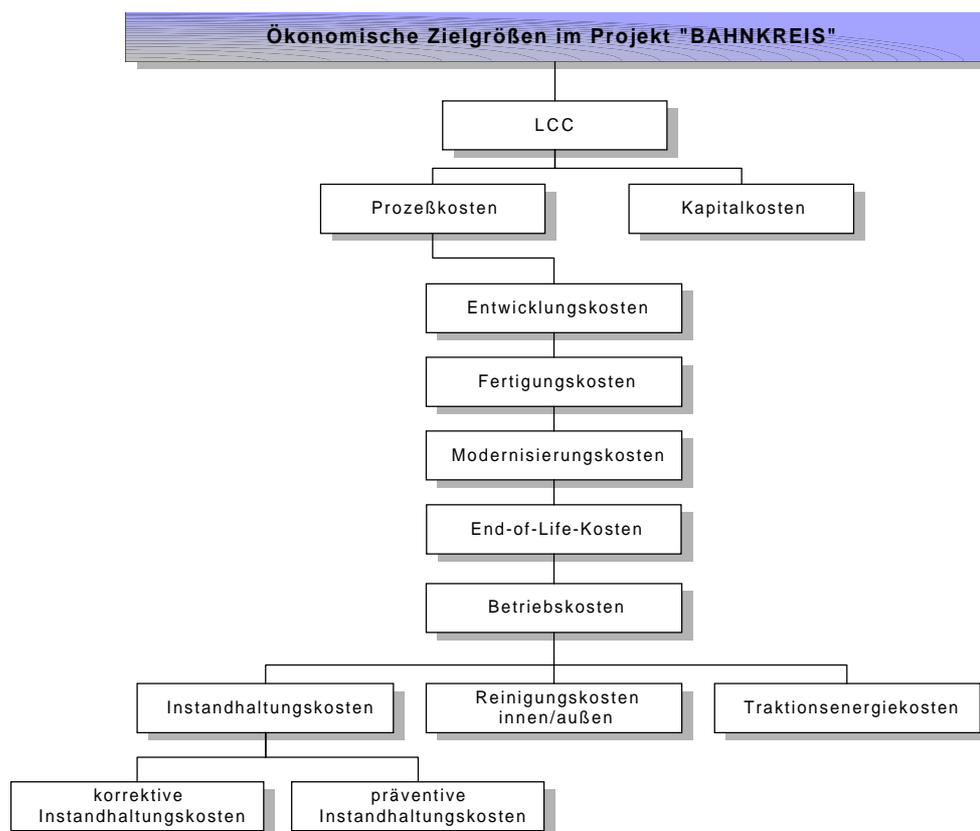
## **6 Ein- und Ausgabedaten**

### **6.1 Ausgewählte Daten**

Die ökonomischen Zielgrößen werden aus den jeweiligen Kostenbestandteilen in den Hauptphasen entsprechend DIN IEC 60300-3-3 gebildet. Diese setzen sich wiederum aus definierten Kostenarten zusammen und sind durch Aufwände für Personal, Betriebsmittel, Tauschteile und Materialaufwände, Verbrauchsmaterial und Energie beschrieben.

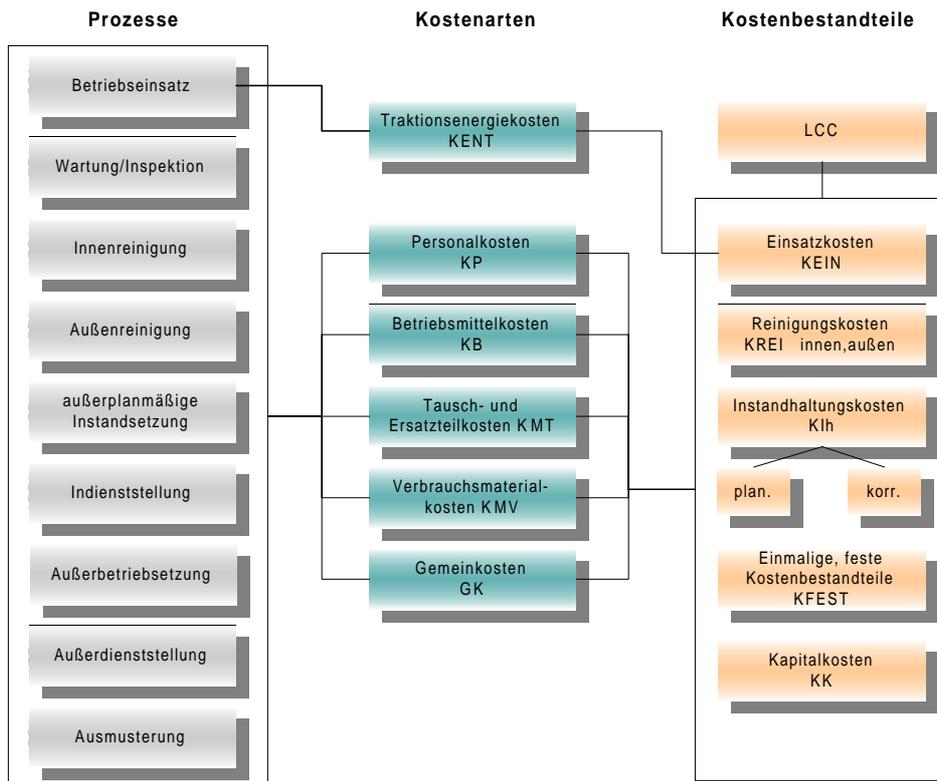
Aus Gründen der Datenverfügbarkeit und zur Minderung des Erfassungsaufwandes wurden alternative Eingabemöglichkeiten in Form einer 3-stufigen Kostendetaillierung vorgesehen.

Bei Wahl des höchsten Detaillierungsniveaus müssen Erzeugnisbestandteile, Verbrauchsmaterialien und die dazugehörigen Personal-/Betriebsmittelaufwände dem Prozeß zugeordnet werden (s. Kap. 2: Erzeugnis-/Prozeßmatrix). In Bild 8 werden die wesentlichen ökonomischen Zielgrößen ausgewiesen.



**Bild 8: Ökonomische Zielgrößen**

Die Kostenbestandteile sind nach Prozessen klassifiziert und unterscheiden sich nach Kostenarten. So sind z. B. durch die Strukturierung der Hauptphase Betrieb auch die Kostenbestandteile gemäß Bild 9 determiniert.



**Bild 9 : Prozesse, Kostenarten, Kostenbestandteile der Hauptphase Betrieb**

## 6.2 Oberflächen-Gestaltung

Nachfolgende Anforderungen an die Eingabe sind durchgängig im Programm umgesetzt:

- Robustheit gegen Fehlbedienung, Inkonsistenz des Datenbestandes mit Fehlerprotokollierung, Löscharbeiten
- Einheitlichkeit in der Bedienung (einheitliche Oberflächen und Verhalten der Befehlsflächen, Styleguides)
- Benutzerfreundlichkeit (Übersichtsdarstellung der Daten im Datengitter, Suchfunktion, Sortierfunktion, Anzeige des Bearbeitungsmodus, Assistentenunterstützung bei der Eingabe, kontextabhängige Online-Hilfe)
- Kommandos sind jederzeit abzubrechen, Datenbanksitzungen können verworfen werden (Rollback)

In Bild 10 wird ein Beispielformular für die Eingabe von Fahrzeugdaten gezeigt. Im oberen Bereich sind die vorhandenen Fahrzeugdaten als Übersicht im Datengitter dargestellt, die nach jeder Spalte aufsteigend oder absteigend sortiert werden können. Im mittleren Bereich befinden sich die Eingabefelder, und im unteren Bereich ist die Navigationsleiste mit Suchfunktion zu sehen. Der Bearbeitungsmodus und die Anzahl der Datensätze werden angezeigt.

| Bezeichnung        | Fahrzeug-Nr.   | Indienststellung | Preis          | Nutzungsdauer | Grenzwert Laufweg | Baujahr  | Regionalbereich |     |
|--------------------|----------------|------------------|----------------|---------------|-------------------|----------|-----------------|-----|
| BR 111             | S-Bahn, BR 111 | 01.01.89         | 1.800.000,00 € | 20 a          | 5.000.000 km      | 01.01.89 | Rheinland       | Aac |
| DABz 756           | Doppelstockwa  | 31.05.95         | 1.000.000,00 € | 20 a          | 5.000.000 km      | 11.04.94 | Rheinland       | Aac |
| ET 420/421         | S-Bahn-Triebzu | 01.01.00         | 3.200.000,00 € | 30 a          | 5.000.000 km      | 11.04.94 | Rheinland       | Aac |
| Mittelwagen ET 421 | 421 201-5      | 31.05.95         | 800.000,00 €   | 20 a          | 5.000.000 km      | 11.04.94 | Rheinland       | Aac |

**Fahrzeugdaten**

**Allgemeine Fahrzeugdaten**

Fahrbezeichnung: DABz 756  
Fahrzeug-Nr.: Doppelstockwagen  
Lieferant: Bombardier Transportation, Werk Görl

**Leistungparameter Life Cycle**

Indienststellung: 31.05.1995  
Technische Nutzungsdauer: 20 [Jahre]  
maximale Laufleistung: 5000000 [km]  
bisherige Betriebsdauer: 0  
bisheriger Laufweg: 0 [km]

**Kostengrößen**

Fahrzeugpreis: 1000000 [EUR]  
Restwert (Schrottwert): 10000 [EUR]

**Verbräuche Traktion**

Energieverbrauch: 0 [kWh/km]  
Kraftstoffverbrauch: 0 [l/km]

**Sonstiges**

Regionalbereich: Rheinland  
Heimatbahnhof: Aachen  
Baujahr: 11.04.1994  
Autor: Kohn  
Quelle: Fiktive Daten  
Bemerkungen: kein konkretes Fahrzeug mit Wagen-Nr., Do-Wagen

**Navigation:**

Datensatz: 2 von 6 | Modus: Anzeigen | Suchen: Inaktiv

Bearbeiten | Neuer Satz | Sicher | Löschen | Suchen neu | Suchen | Abbrechen | Beenden

**Bild 10: Formular zur Eingabe von Fahrzeug- und Gebrauchswertdaten**

Bild 11 zeigt das Formular zur Eingabe von Erzeugnisdaten. Über die Befehlsschaltflächen „...“ werden jeweils die verknüpften Formulare aufgerufen (s. Kap. 3, Bild 5 und 6). Ausgewählte Eingaben werden auf Plausibilität geprüft. Die Prüfung umfaßt Grenzwerte (Minimum/Maximum), Pflichtfelder und weitere Regeln durch eine spezielle Notation.

| Struktur-Nr. | Bezeichnung                                       | Ident-Nr. | Masse  | Preis      | MDBF | MTBF     | MTTR |
|--------------|---|-----------|--------|------------|------|----------|------|
| 1.6.7        | ET420_Scheibenwischer / Waschanlage               | 0         | 20 kg  | 297,00 €   | 0 km | 50000 h  | 1 h  |
| 7.1.4        | ET420_Sitze, Fahrgastraum                         | 0         | 45 kg  | 329,00 €   | 0 km | 50000 h  | 1 h  |
| 1.7.1        | ET420_Spitzensignal (Signalleuchte weiß oben)     | 0         | 20 kg  | 346,00 €   | 0 km | 13333 h  | 0 h  |
| 7.1.3        | ET420_Sitze, Führerraum                           | 0         | 60 kg  | 439,00 €   | 0 km | 100000 h | 1 h  |
| 1.6.1        | ET420_Seitenfenster                               | 0         | 63 kg  | 520,00 €   | 0 km | 33333 h  | 1 h  |
| 4.4.2        | ET420_Tatzrollenlagerung                          | 0         | 220 kg | 545,00 €   | 0 km | 200000 h | 6 h  |
| 1.7.2        | ET420_Schlußleuchten (Signalleuchte weiß und rot) | 0         | 20 kg  | 577,00 €   | 0 km | 13333 h  | 0 h  |
| 3.2.4        | ET420_Trenner                                     | 0         | 24 kg  | 781,00 €   | 0 km | 25000 h  | 2 h  |
| 6.3.6        | ET420_Steuerung, Schutz, Überwachung, Siebglied   | 0         | 35 kg  | 786,00 €   | 0 km | 50000 h  | 1 h  |
| 8.1.11       | ET420_Anfahrüberwachung                           | 0         | 9 kg   | 1.050,00 € | 0 km | 200000 h | 1 h  |
| 1.4.3        | ET420_Datenkupplung                               | 0         | 15 kg  | 1.076,00 € | 0 km | 23256 h  | 2 h  |

**Allgemeine Erzeugnisdaten:**

Bezeichnung:  Masse:  [kg]  
 Struktur-Nr.:  Preis:  [EUR]  
 Ident-Nr.:  Lieferant:

**Instandhaltungsdaten:**

verfügbarkeitsrelevant:   
 MTTR:  [h]     MDBF:  [km]  
 MCR:  [EUR]     MTBF:  [h]  
 Prozeß nach Ausfall:

**Sonstiges:**

Quelle:   
 Autor:   
 Bemerkung:

**Navigation:**

Datensatz: 2 von 101    Modus:     Suchen:

**Bild 11: Formular zur Eingabe von Erzeugnisdaten**

### 6.3 Gestaltung der Ausgaben

Die Ergebnisdokumente sind grundsätzlich nach den definierten Zielgrößen gegliedert. So werden die einzelnen Prozeßkosten entsprechend Bild 8 (z. B. Reinigungs-, Instandhaltungs-, Revisions-/Modernisierungskosten, Kapitalkosten etc.) jeweils als technische Ergebnisberichte nach Jahren und Kostenarten ausgegeben. Bild 12 zeigt exemplarisch einen Ergebnisbericht für Reinigungskosten in Form einer Kostenübersichts-Kreuztabelle nach Jahren.

Ergebnisbericht Reinigungskosten im Life Cycle

Seitenansicht

- ET 420/421
  - ET 420/421\_Außenreinigung
  - ET 420/421\_Innenreinigung 11
  - ET 420/421\_Innenreinigung 12
  - ET 420/421\_Innenreinigung 13
  - ET 420/421\_Innenreinigung 14

## Reinigungskosten

### Reinigungskosten nach Jahren und Kostenarten für Betrachtungseinheit

Dieser Bericht protokolliert die angefallenen Reinigungskosten im Life Cycle für den Betrachtungszeitraum von 01.01.2000 bis 01.01.2030. Bitte beachten Sie, daß jede Änderung an der Eingangsdatenlage den Neustart des Life Cycles erfordert.

Verbrauchsmaterial => Summe aller eingesetzten Betriebs- und Hilfsstoffe zur Ausführung je Prozeß  
 Personal/Betriebsmittel => Summe eingesetzter Personalarten oder Personalfestkostenwerte je Prozeß  
 Festkostenwerte => Summe der Prozeßfestkostenwerte je Prozeß

Druckdatum: 26.09.00

---

### Reinigungskosten Fahrzeug ET 420/421

#### Übersichtstabelle

|       | ET 420/421_Außenreinigung | ET 420/421_Innenreinigung 11 | ET 420/421_Innenreinigung 12 | ET 420/421_Innenreinigung 13 | ET 420/421_Innenreinigung 14 | Totale      |
|-------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------|
| 2.000 | 45,00 €                   | 2.000,00 €                   | 1.500,00 €                   | 0,00 €                       | 4.000,00 €                   | 7.545,00 €  |
| 2.001 | 45,00 €                   | 1.000,00 €                   | 3.000,00 €                   | 2.000,00 €                   | 8.000,00 €                   | 14.045,00 € |
| 2.002 | 45,00 €                   | 2.000,00 €                   | 1.500,00 €                   | 0,00 €                       | 8.000,00 €                   | 11.545,00 € |
| 2.003 | 60,00 €                   | 2.000,00 €                   | 3.000,00 €                   | 2.000,00 €                   | 8.000,00 €                   | 15.060,00 € |
| 2.004 | 60,00 €                   | 2.000,00 €                   | 3.000,00 €                   | 2.000,00 €                   | 8.000,00 €                   | 15.060,00 € |
| 2.005 | 45,00 €                   | 1.000,00 €                   | 3.000,00 €                   | 0,00 €                       | 8.000,00 €                   | 12.045,00 € |
| 2.006 | 60,00 €                   | 2.000,00 €                   | 3.000,00 €                   | 2.000,00 €                   | 8.000,00 €                   | 15.060,00 € |
| 2.007 | 60,00 €                   | 2.000,00 €                   | 1.500,00 €                   | 2.000,00 €                   | 8.000,00 €                   | 13.560,00 € |

Bild 12: Ergebnisbericht Reinigungskosten (Ausschnitt)

Es wird eine grafische Ausgabe angeboten, die dem Anwender zusätzliche Informationen liefert (Kostenanteile von Instandhaltungs- o. Reinigungsstufen im Life Cycle, Schwerpunktbaugruppen in der Instandsetzung etc.). Bild 13 zeigt exemplarisch eine grafische Ausgabe für Instandhaltungskosten. Da dieses Modell unterschiedliche Laufleistungen in den Jahren verarbeiten kann und die Prozesse Außerbetriebsetzung, Außerplanmäßige Instandsetzung, Revision und Modernisierung die geplante Laufleistung reduzieren, stellt diese Auswertung eine Programmspezifik dar.

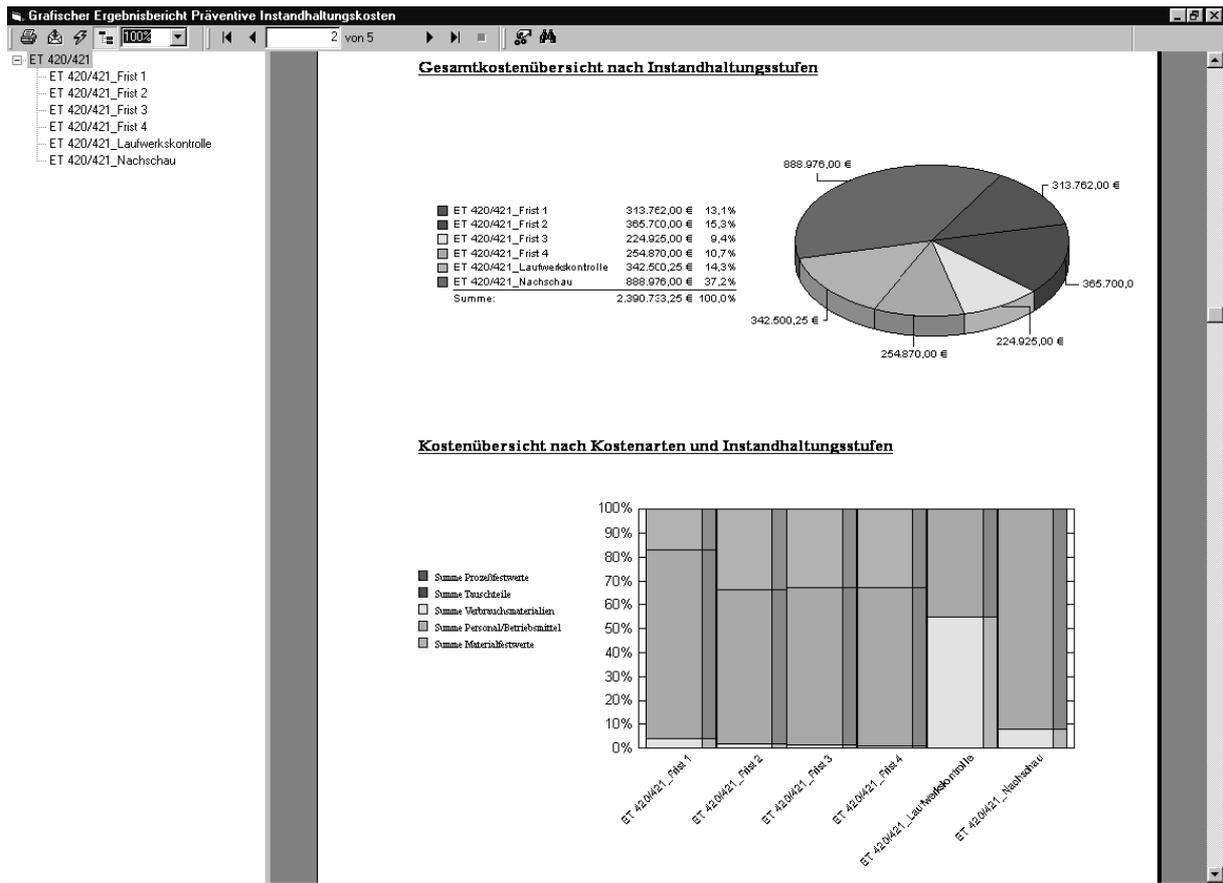


Bild 13: Ergebnisbericht Instandhaltungskosten – Grafische Ausgabe (Ausschnitt)

Detaillierte Life Cycle-Daten zu spezifischen Prozessen (Prozeßhäufigkeiten im Life Cycle nach Jahren) oder die gesamte Life Cycle-Historie können ebenfalls ausgegeben werden. In einem Hauptbericht sind noch einmal alle Kostenbestandteile gemeinsam aufgelistet, d. h. die Lebenszykluskosten insgesamt berechnet.

Die Berichte sind dynamisch konzipiert, so daß diese auf die ausgewählte Betrachtungseinheit angepaßt reagieren. Wurde ein Verband gewählt, so werden sämtliche Fahrzeuge des Verbandes jeweils in den Berichten repräsentiert. In der Navigationsleiste (links in Bild 12 und 13) ist das Fahrzeug ET 420 zu sehen. Durch Anklicken des interessierenden Prozesses werden die Detaildaten angezeigt.

Die Berichte können ausgedruckt und in gebräuchliche Formate exportiert werden. Darüber hinaus kann nach Dateninhalten gesucht werden. Es besteht auch die Möglichkeit, Felder des Berichts hinsichtlich der anzuzeigenden Daten zu reduzieren (z. B. alle Kosten > 5.000 € usw.).

Neben der prozeßspezifischen Ausgabe sind auch Ausgaben nach Erzeugniselementen bzw. Verbrauchsmaterialien implementiert. Somit können beispielsweise die Instandhaltungskosten eines Fahrmotors oder die verbrauchte Materialmenge (z. B. Sand, Spurkranzschmiermittel) bzw. die über den Materialpreis je Mengeneinheit abgeleiteten Kosten differenziert werden. Verbrauchsmaterialien werden hier zumeist als Betriebs- und Hilfsstoffe verstanden sowie als sonstige Materialien, die nicht Erzeugniselement sind

## **7 Leistungsparameter**

Das in Bild 1 dargestellte Gesamtmodell läßt sich durch folgende Leistungsparameter kennzeichnen:

- Abbildbarkeit aller Hauptphasen des Lebenszyklus, gegebenenfalls unter Beachtung von Einsatz- und Stillstandszeiten
- Einbeziehung ökologischer Sachverhalte und des Gebrauchswertes in die Lebenszykluskostenbetrachtung
- Nachnutzbarkeit für beliebige Sfz'e → Speichern der berechneten Daten in einer „Wissensdatenbank“ (Access-Module)
- Produkt-, Prozeß- und Kostendetailliertheit prinzipiell wählbar, damit
- Abbildungsgenauigkeit prinzipiell wählbar → damit Aufwand an die gewünschte Zielstellung anpaßbar
- Exportfunktion des Programmes → Schnittstelle zu anderen Anwender-Programmen
- Optimierung von Konstruktion, Energieeinsatz, Materialverbrauch und Kosten sowie der Umweltbeeinflussung und der Kundenakzeptanz
- Suchen von Sparpotentialen durch Variantenrechnung
- Vorhandensein von Demonstrationsbeispielen, vorbelegt mit Daten, die sich an reale Erzeugnisse der DB Regio AG anlehnen.

Hinsichtlich der Handhabung ist das Programm charakterisiert durch:

- einfache, selbst erklärende Bedienung,
- eingebaute Plausibilitätsprüfungen für die Eingaben,

- Vorbelegung wesentlicher Daten mit veränderbaren Defaultwerten,
- übersichtliche Darstellung der Ergebnisse in Tabellen oder Grafiken und
- Verfügbarkeit von Hilfedateien zu jeder einzelnen Eingabe.

Die Unterstützung mit Hilfsdateien erfolgt durch folgende Systeme:

- Kontextabhängige HTML-Hilfe
- Automatische Generierung von Fehlermeldungen bei der Eingabe von unzulässigen Daten
- Quick-Infos bei allen Steuerelementen (kurzer Hilfetext).

Ausgewählte Elemente der Benutzeroberfläche (z. B. ein Steuerelement, ein Eingabefeld oder ein Menü) sind mit einem verwandten Thema in der Hilfedatei verknüpft, die kontextabhängig vom Anwender mit der Taste F1 aufgerufen werden kann. Bild 14 zeigt beispielhaft die BAHNKREIS-HTML-Hilfe.

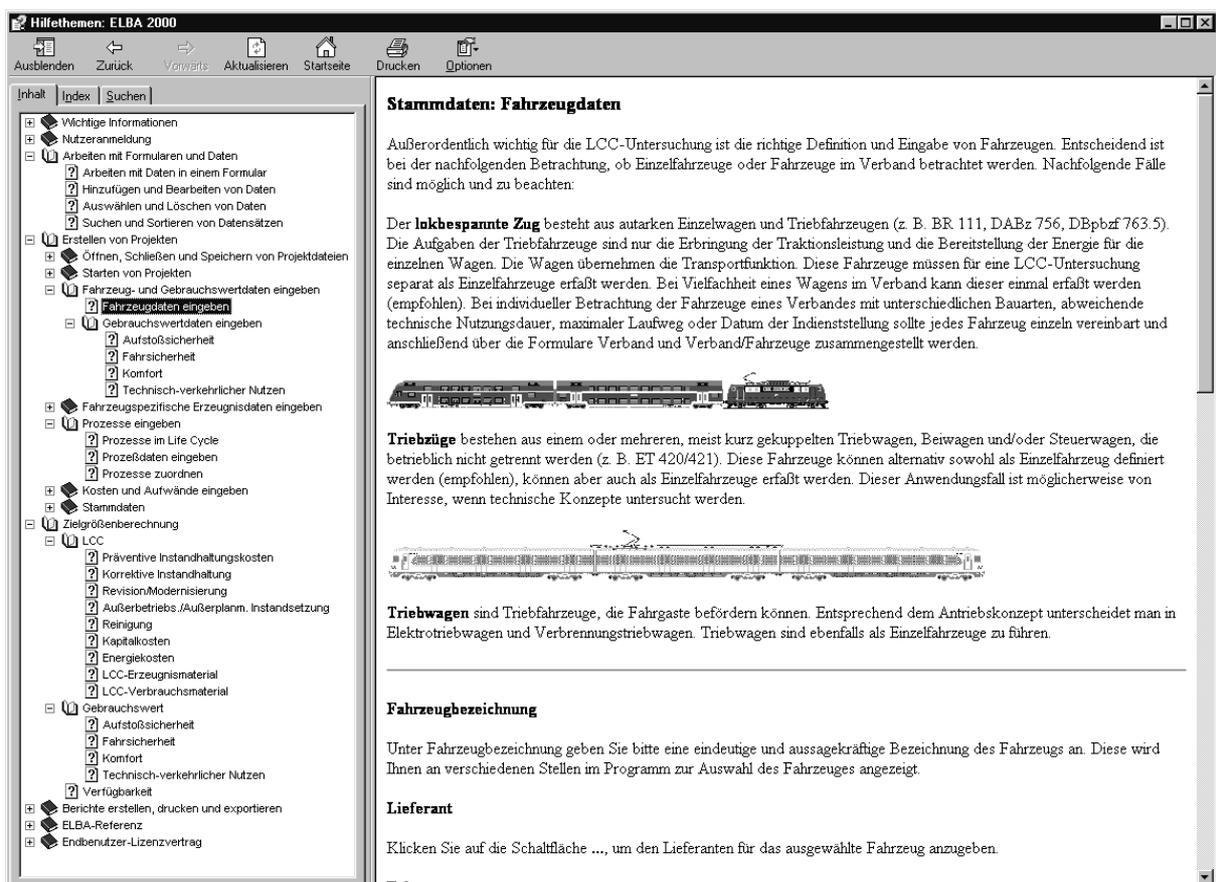


Bild 14: Beispiel HTML-Hilfe

Als Programmvoraussetzungen sind zu nennen:

- Lauffähigkeit auf Windows 98 oder auf Windows NT 4.0 mit Internetexplorer 4.5 oder höher
- Pentium II Prozessor oder kompatibler Prozessor, Taktrate mindestens 250 MHz, empfohlen: Pentium III 400 MHz oder höher
- Hauptspeicher mindestens 64 MB
- Festplattenspeicher mindestens 200 MB (abhängig von der Größe der Datenbank)
- Bildschirm mindestens VGA, empfohlen jedoch: 17“-Monitor, Auflösung 1024 x 768, 256 Farben
- CD ROM-Laufwerk
- Drucker

## Literaturverzeichnis

- /1/ Projekt BAHNKREIS: Ergebnisbericht Bd. Materialkreislaufmodellierung
- /2/ Nestler, W.; Ciroth, A.; Kohn, A.:  
Datenmodell des Projektes BAHNKREIS, Ergebnisdokument TP 10, 2000
- /3/ UIC 518:  
Fahrtechnische Prüfung und Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen – Fahrsicherheit, Fahrwegbeanspruchung und Fahrverhalten, Ausgabe Febr. 1998
- /4/ Kottenhoff, K.; Troche, G.:  
Innengestaltung von Reisezugwagen – Kundenpräferenzen und Wirtschaftlichkeit, ETR 45 (1996) 7/8, S. 427...432
- /5/ DIN, FSF, AA 4.1, Normenentwurf (unveröffentlicht):  
Längsfestigkeit der Fahrzeugkästen von Leichttriebwagen, Dez. 1999



## Verbundprojekt **BAHNKREIS**

Förderkennzeichen des BMBF: 02PV21319

---

### **Band 3**

# **Baugruppenmodell - Ein Instrument zur ökologischen und ökonomischen Beurteilung von Schienenfahrzeugbaugruppen**

## **Verfasser:**

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Prof. Dr.-Ing. Günter Fleischer | Technische Universität Berlin, FG Abfallvermeidung |
| Dipl.-Ing. Andreas Ciroth       | Technische Universität Berlin, FG Abfallvermeidung |
| Dipl.-Ing. Karin Gerner         | Technische Universität Berlin, FG Abfallvermeidung |
| Dipl.-Ing. Heiko Kunst          | Technische Universität Berlin, FG Abfallvermeidung |

Berlin, den 17.10.2000

## **Verzeichnis der Ergebnisberichte**

- Band 1: Projektgrundlagen
- Band 2: LC-Modellierung
- Band 3: Baugruppenmodell
- Band 4: Materialeinsatz
- Band 5: Modellanwendung
- Band 6: Anforderungen an Schienenfahrzeugen

---

## Inhalt

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>EINFÜHRUNG</b>                                      | <b>4</b>  |
| 1.1      | Das Baugruppenmodell im Verbundprojekt Bahnkreis       | 4         |
| 1.2      | Anwendungsfelder des Baugruppenmodells                 | 5         |
| <b>2</b> | <b>METHODISCHE GRUNDLAGEN</b>                          | <b>6</b>  |
| 2.1      | Methodische Grundelemente                              | 6         |
| 2.2      | Methodische Detailprobleme und ihre Lösungen           | 13        |
| 2.2.1    | Umgang mit periodischen Prozessen                      | 13        |
| 2.2.2    | Allokationsprobleme                                    | 16        |
| 2.2.3    | Systemgrenzen  | 17        |
| <b>3</b> | <b>ANWENDUNG DES BAUGRUPPENMODELLS</b>                 | <b>19</b> |
| 3.1      | Projektbearbeitung                                     | 19        |
| 3.2      | Variantenrechnung                                      | 24        |
| 3.3      | Ökologische Rangfolgenbildung                          | 26        |
| 3.3.1    | Methode der ökologischen Rangfolgenbildung             | 26        |
| 3.3.2    | Anwendung der ökologischen Rangfolgenbildung           | 28        |
| <b>4</b> | <b>ANWENDUNGSBEISPIEL DOPPELSTOCK-ZWISCHENFUßBODEN</b> | <b>29</b> |
| 4.1      | Aufbau und Lebensweg des Doppelstock-Zwischenfußbodens | 29        |
| 4.2      | Ergebnisse   | 31        |
| <b>5</b> | <b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>                    | <b>35</b> |
| <b>6</b> | <b>LITERATUR</b>                                       | <b>36</b> |

*Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen O2 PV 21319 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

# 1 Einführung

## 1.1 Das Baugruppenmodell im Verbundprojekt Bahnkreis

Das im Rahmen den Verbundprojekts Bahnkreis entwickelte Instrument zur ökonomischen und ökologischen Optimierung von Schienenfahrzeugen und ihrer Komponenten besteht aus zwei miteinander verknüpften Modellen, dem LCC- und dem Baugruppenmodell. Während das LCC-Modell komplette Schienenfahrzeuge und Schienenfahrzeugverbände betrachtet, sind mit dem Baugruppenmodell Detailuntersuchungen für Baugruppen und Bauteile von Schienenfahrzeugen (dritte und vierte Hierarchieebene der im Projekt verwendeten funktionalen Fahrzeugstrukturen [TP 1: 1999]) möglich (siehe auch Band 1 und 2 des Ergebnisberichts Bahnkreis). Das Baugruppenmodell basiert im wesentlichen auf der Methodik des Life Cycle Assessment (LCA) und des Life Cycle Costing (LCC).

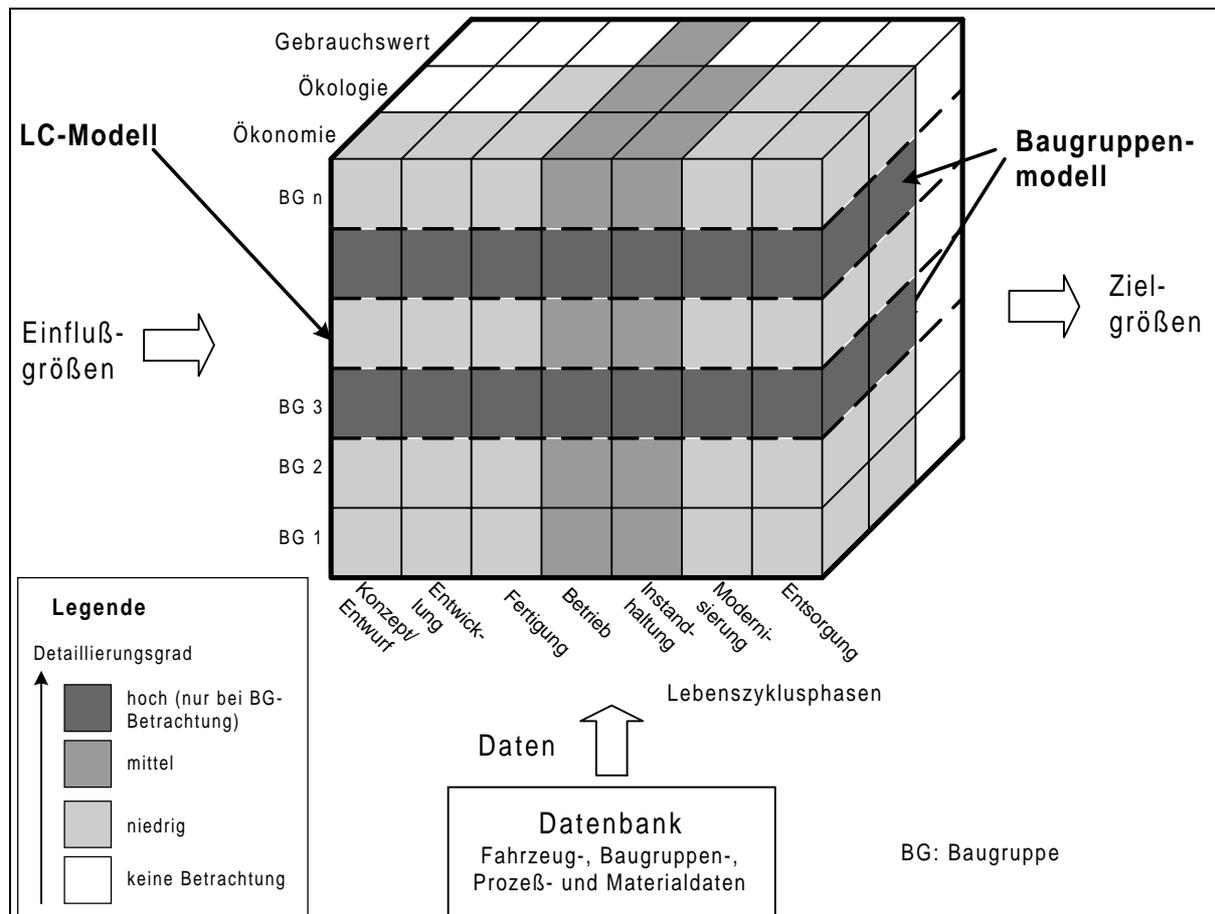


Abbildung 1: Struktur der Bahnkreis-Modelle [Fleischer et al. 1999]

Beide Modelle stellen Zielgrößen aus den Bereichen Ökologie (Kenngrößen der Umweltrelevanz), Ökonomie (Lebenszykluskosten) und des Gebrauchswertes (wie z. B. Komfort) in Ab-

hängigkeit von Einflußgrößen dar, die der Modellanwender variieren kann (siehe auch [Trest, Fleischer, Fischer 2001]).

Abbildung 1 stellt das Prinzip der Verknüpfung der beiden Modelle, deren unterschiedlichen Systemumfang und Detaillierungsgrad dar.

## 1.2 Anwendungsfelder des Baugruppenmodells

Wesentliche Anwendungsfelder des Baugruppenmodells sind die Neu- und Weiterentwicklung sowie die Beschaffung von Schienenfahrzeugkomponenten. In dieser Phase des Produktlebenszyklus entstehen zwar nur sehr geringe Umweltbelastungen und verhältnismäßig geringe Kosten, dennoch wird an dieser Stelle der überwiegende Teil von Kosten und Umweltbelastungen im weiteren Lebensweg festgelegt (durch Entscheidungen z. B. über Konstruktion und verwendete Materialien), so daß Optimierungen hier ansetzen sollten. Darüber hinaus sind auch während des Fahrzeugbetriebs weitere Einsatzfelder des Baugruppenmodells denkbar.

Mögliche Fragestellungen, die mit dem Baugruppenmodell bearbeitet werden können, sind u. a.:

- Wie ändert sich der Energieverbrauch über den Lebenszyklus unter definierten Rahmenbedingungen für einen Doppelstockwagen, wenn Baugruppen im Leichtbau angelegt werden? So wurde beispielsweise im Rahmen des Forschungsprojektes ein Zwischenboden aus Sperrholz mit einer Aluminium-PE-Sandwichkonstruktion verglichen.
- Welche Instandhaltungsstrategie für Baugruppen führt zu minimalen Umweltbelastungen über den Lebensweg? Wie verteilen sich die Umweltbelastungen über die einzelnen Lebenszyklusphasen?
- Lohnt es sich aus Kosten- und Umweltsicht, ein Fahrzeug bzw. dessen Komponenten zu modernisieren?
- Welches sind die Kostentreiber im Lebenszyklus einer Schienenfahrzeugbaugruppe?

## 2 Methodische Grundlagen des Baugruppenmodells

### 2.1 Methodische Grundelemente

Die Methodik des Baugruppenmodells basiert im wesentlichen auf den drei Grundelementen Lebenswegbetrachtung, Prozeßbilanzierung und Verknüpfung der Modellgrößen in einem Wirkungsgefüge.

#### **Modellgrößen und Wirkungsgefüge**

Die Basis des Baugruppenmodells ist die modellhafte Abbildung der Zusammenhänge zwischen verschiedenen Größen in einem Wirkungsgefüge, wie sie in Abbildung 3 grundsätzlich dargestellt ist. Das Wirkungsgefüge bildet die Grundlage eines nachvollziehbaren Rechenalgorithmus. Es ist das abgestimmte Ergebnis der Analyse der einzelnen Lebenswegphasen mit Experten. Die für den Anwender wichtigsten Modellgrößen sind die sogenannten Ziel- und Einflußgrößen.

**Zielgrößen** werden im Projekt Bahnkreis als die Konkretisierung und Operationalisierung eines Ziels verstanden. Sie sind die abhängigen Größen der Modellzielfunktion und werden von den Modellen als Ergebnisgrößen berechnet und ausgegeben.

Die im Baugruppenmodell eingesetzten Zielgrößen wurden auf Erfüllung einheitlicher, konkret festgelegter Anforderungen geprüft [TP 8.5: 1999]:

- Homogenität: Eine Zielgröße sollte möglichst ein isolierbares Ziel abdecken, verschiedenartige Ziele (Beispiel: Kosten und Umweltfreundlichkeit) sollten erst in einem nachgelagerten Schritt zu einer Gesamtbewertung zusammengeführt werden.
- Unabhängigkeit: Verschiedene Zielgrößen sollten nicht den gleichen Sachverhalt darstellen, da sonst ein erhöhter Aufwand in der Auswertung entsteht, ohne daß zusätzliche Informationen vorliegen. Außerdem besteht die Gefahr von ungewollten Doppelbewertungen.
- Quantifizierbarkeit/ Bewertbarkeit: Modelle, die direkt der Optimierung von Schienenfahrzeugen bzw. von Baugruppen dienen, benötigen quantifizierbare oder bewertbare Zielgrößen<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Es ist ausreichend, wenn die zu optimierenden Größen ein ordinales Skalenniveau haben.

- Datenverfügbarkeit: Für die Einflußgrößen, die auf eine Zielgrößen einwirken, müssen Daten in hinreichender Menge und Qualität zur Verfügung stehen.

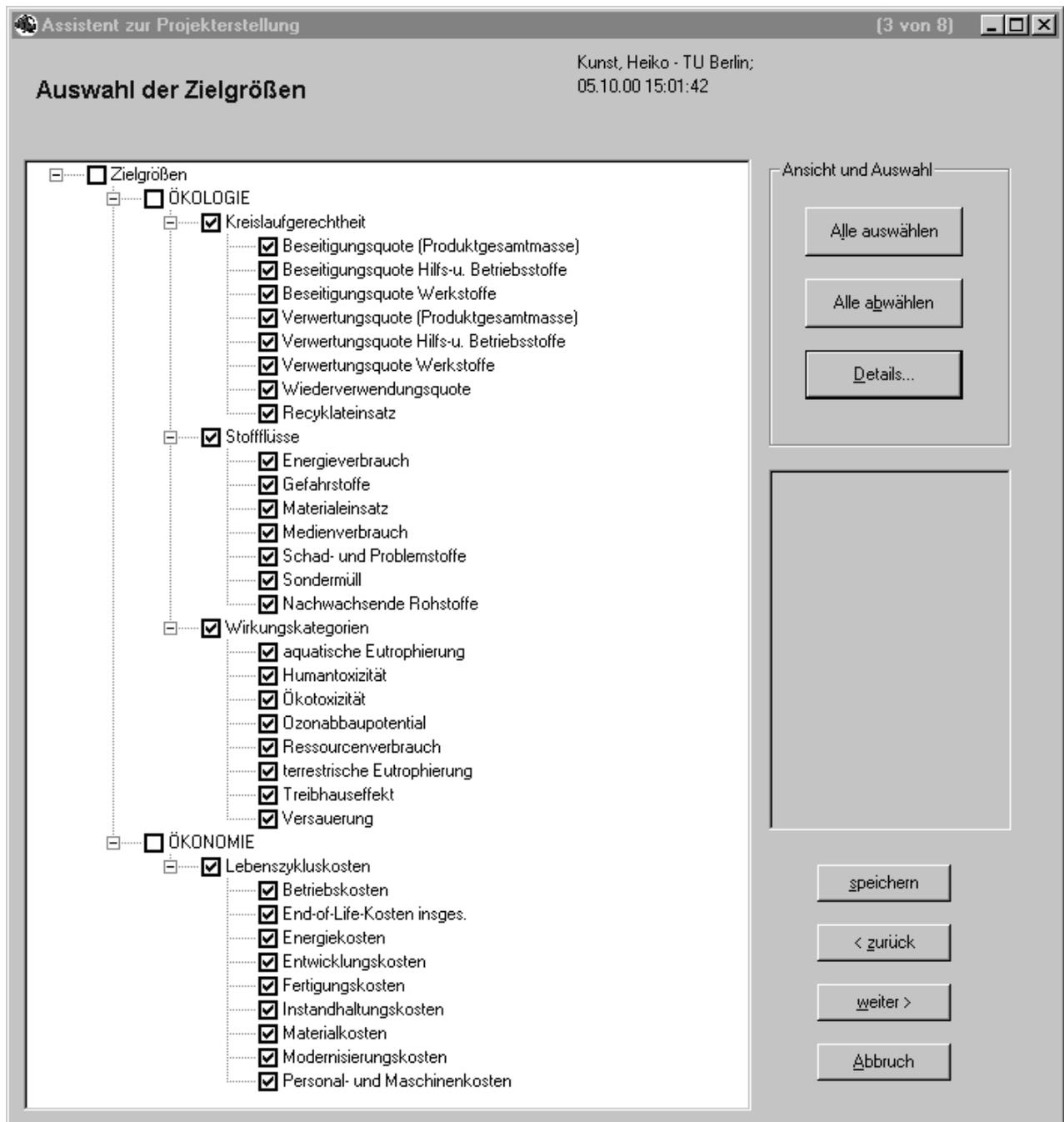


Abbildung 2: Formular zur Zielgrößenauswahl des Baugruppenmodells

Im Zuge der Projektbearbeitung haben sich für das Baugruppenmodell die Zielgrößenbereiche Ökologie und Ökonomie als relevant herauskristallisiert. Diese Zielgrößenbereiche, insbesondere die Ökologie, sind nicht direkt zugänglich. Eine Unterteilung in einzelne, hand-

habbare Größen ist daher erforderlich. Diese sind in Abbildung 2 dargestellt, so wie sie der Modellanwender zur Auswahl präsentiert bekommt.

**Einflußgrößen** sind die Eingangsgrößen in die Modelle, von denen die Zielgrößen abhängen. Sie sind daher die unabhängigen Größen der Modellzielfunktion. Folgende Größen werden beispielsweise im Baugruppenmodell als Einflußgrößen verwendet:

- Lebensdauer der Baugruppe,
- Laufleistung des Fahrzeugs,
- Auslastung des Fahrzeugs,
- Baugruppen- und Fahrzeugmasse,
- Stoff- und Energieströme der Prozesse.

Auch die Einflußgrößen sollen einheitliche, konkret festgelegte Anforderungen erfüllen. Folgende Anforderungen sind hierbei besonders relevant:

- **Vollständigkeit:** Das Set aller Einflußgrößen einer Zielgröße soll die Einflüsse auf diese Zielgröße möglichst vollständig und angemessen abbilden.
- **Relevanz:** Einflußgrößen sollen einen deutlichen Einfluß auf die Zielgröße aufweisen.
- **Unabhängigkeit:** Die Einflußgrößen innerhalb eines Sets sollten unabhängig voneinander sein. Andernfalls würde ihre Anzahl unnötig groß sein (siehe auch Praktikabilität).
- **Datenverfügbarkeit:** Für die Einflußgrößen müssen Daten in hinreichender Menge und Qualität zur Verfügung stehen.
- **Praktikabilität:** Die Anzahl der Zielgrößen sollte möglichst klein und insgesamt überschaubar bleiben, damit die Modelle in der Anwendung handhabbar bleiben, da der Anwender für jede Einflußgröße Daten eingeben muß.

Eine Überprüfung der genannten Anforderungen erfolgte im Rahmen der ersten Modellberechnung (mit den für die Referenzfahrzeuge/ Beispielbaugruppen erhobenen Daten).

**Bezugsgrößen** sind Vergleichseinheiten für die Zielgrößen. Sie werden als quantifizierter Nutzen eines Produkts oder als Menge eines Produktes, das zur Erfüllung einer klar definierten Funktion erforderlich ist, verstanden. Neben der Verwendung als Vergleichseinheiten für die Zielgrößen ist auch eine Verwendung als Bezug für zahlreiche Einflußgrößen sinnvoll.

Die im Projekt verwendeten Bezugsgrößen für Schienenfahrzeugbaugruppen sind in Tabelle 1 dargestellt. Sie können im Projekt parallel angewandt werden, da sie grundsätzlich ineinander überführbar sind.

Tabelle 1: Geeignete Bezugsgrößen für Schienenfahrzeugbaugruppen

| Bezugsgröße       | Beispiel                       | Erläuterung  |
|-------------------|--------------------------------|--|
| Baugruppe         | Energieverbrauch/Baugruppe     | Baugruppe über den Lebensweg des Gesamtfahrzeuges                    |
| Fahrzeug          | Fertigungskosten/Fz            | Fahrzeug über seinen Lebensweg                                       |
| Fahrzeugkilometer | Betriebskosten/Fzkm            | Leistungsabhängige Größe   |
| Personenkilometer | Betriebskosten/Pkm             | Bezug auf die tatsächlich beförderte Personenzahl                    |
| Masse             | verwertete Masse/Fahrzeugmasse | wichtige Bezugsgröße für Zielgrößen wie Verwertung, Beseitigung etc. |

Das Zusammenwirken von Einfluß-, und Zielgrößen wird in sogenannten Wirkungsgefügen dargestellt (siehe Abbildung 3). Die Verknüpfung erfolgt entweder direkt von einer Einfluß- zu einer Zielgröße, oder indirekt über eine oder mehrere sogenannte Zwischengrößen. Oftmals wirken mehrere Einflußgrößen auf eine Zielgröße und umgekehrt.

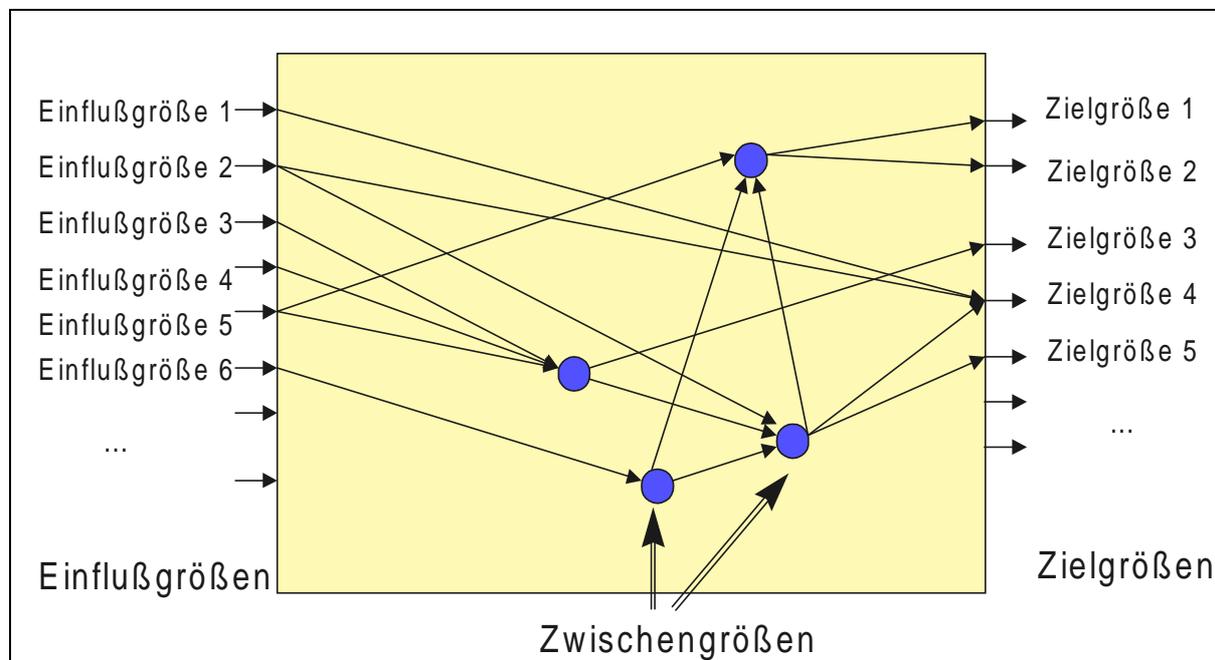


Abbildung 3: Zusammenwirken von Ziel- und Einflußgrößen im Baugruppenmodell [Fleischer et al. 1999]

Die Wirkungsgefüge beinhalten neben einer qualitativen Darstellung, welche Größen aufeinander wirken, auch die Erfassung der quantitativen Zusammenhänge in Formeln. Ein Beispiel für diese Zusammenhänge ist mit der Abwasserentstehung im Fahrzeugbetrieb in Abbildung 4 dargestellt.

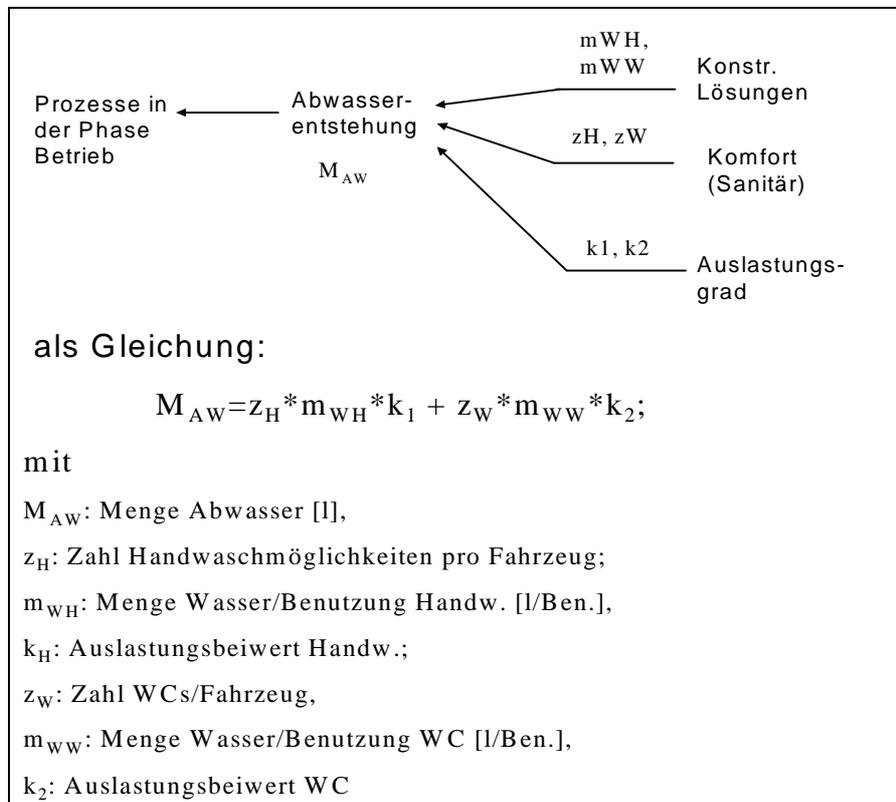


Abbildung 4: Ausschnitt aus dem Wirkungsgefüge (Abwasserentstehung im Betrieb)

### Lebenszyklusbetrachtung

Das Baugruppenmodell untersucht den vollständigen Lebensweg der Baugruppen im Fahrzeug von der Werkstoffherstellung (unter Berücksichtigung der Rohstoffgewinnung) bis zur Entsorgung des Fahrzeugs (und damit der Baugruppen) und von sonstigen Abfällen, die über den Lebensweg entstehen (z. B. Produktionsabfälle, siehe Abbildung 5). Der zeitliche Betrachtungsraum ist damit die Lebensdauer des Schienenfahrzeuges und nicht die der Baugruppe. Bei Verschleißteilen müssen also „25 bis 30 Jahre funktionsfähige Baugruppe“ angenommen werden. Dieser Zeitraum kann ein Vielfaches der Lebensdauer eines einzelnen Bauteiles umschließen. So wird beispielsweise beim Doppelstock-Zwischenfußboden berücksichtigt, daß der Sperrholzboden im Zuge der Modernisierung ausgetauscht wird, der Bodenbelag wird zusätzlich noch bei der Revision ersetzt. In diesem Beispiel ist demnach die Fertigung und Entsorgung von zwei Sperrholzböden und drei Bodenbelägen über die Fahrzeuglebensdauer zu bilanzieren.

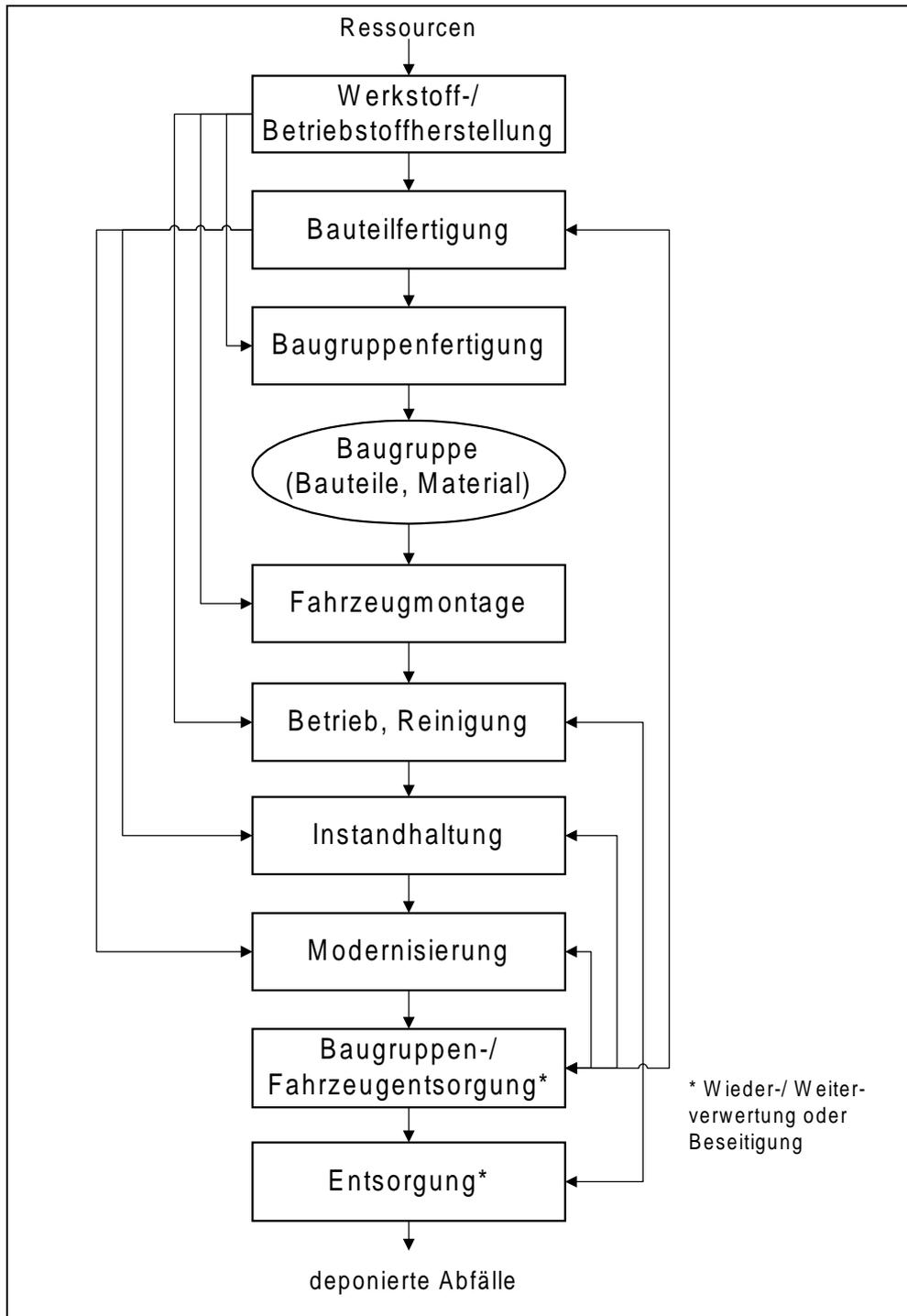


Abbildung 5: Systemumfang des Baugruppenmodells (vereinfachte Darstellung) [Fleischer et al. 1999]

Der Systemumfang ist in Abbildung 5 dargestellt. Aufgrund der hohen Komplexität des Lebenswegs sind die Verknüpfungen zwischen den einzelnen Abschnitten des Lebenswegs nicht vollständig dargestellt. Die zur Wahrung der Praktikabilität erforderliche methodisch korrekte Einschränkung der Baugruppenlebenswege hinsichtlich Betrachtungsumfang (d. h.

zu untersuchende Prozesse im Lebensweg) und Betrachtungstiefe erfolgt durch Definition von Abschneidekriterien (siehe Abschnitt 2.2.3).

Die Lebenswegphasen werden nicht rein sequentiell durchlaufen, da es zahlreiche Rücksprünge, Schleifen und Produkt-/ Materialkreisläufe gibt (Beispiel: Betrieb und Instandhaltung werden mehrfach hintereinander durchlaufen). Einige dieser Kreisläufe sind in Abbildung 5 dargestellt. [Fleischer et al. 1999]

### Prozeßbilanzierung

Die einzelnen Lebenszyklusphasen werden in Prozesse untergliedert, für die jeweils Stoff- und Energiebilanzen ermittelt werden. Abbildung 6 stellt in allgemeiner Form die Material- und Energieströme dar, die in einen Prozeß ein- bzw. aus ihm heraustreten.

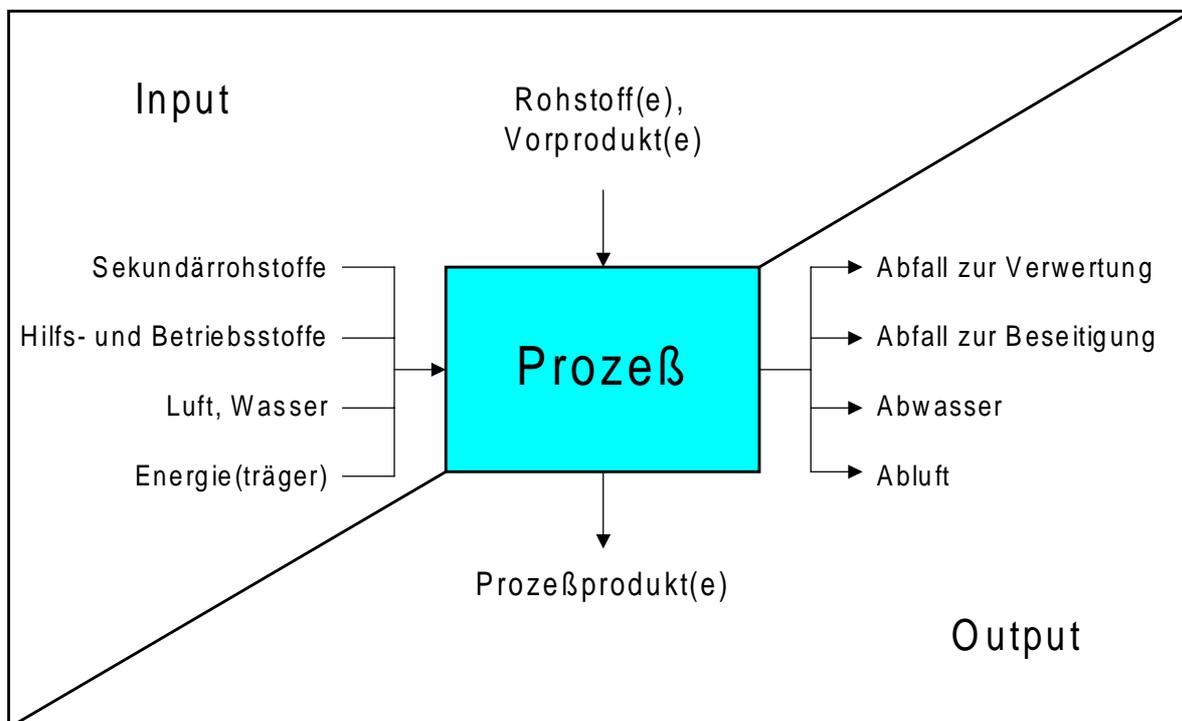


Abbildung 6: Bei der Prozeßbilanzierung zu berücksichtigende Material- und Energieströme [Fleischer 1993]

Für alle Stoff- und Energieflüsse eines Prozesses werden Art des Flusses, Menge sowie Herkunft (bei Inputs) bzw. Verbleib (bei Outputs) dokumentiert. Damit läßt sich - ausgehend vom Betrieb als dem zentralen Prozeß im Lebensweg - ein Netzwerk der Prozesse aufbauen und berechnen, so daß eine Aggregation über den Lebensweg erfolgen kann. Aus den aggregierten Bilanzen lassen sich die ökologischen Zielgrößen berechnen.

Zur Berechnung der ökonomischen Zielgrößen dient ein Prozeßkostenansatz. Analog zu den Stoff- und Energiebilanzen werden für die gleichen Prozesse Kostenbilanzen aufgestellt. Material- und Energiekosten lassen sich aus den Material- und Energiebilanzen und den jeweiligen spezifischen Preisen ermitteln. Darüber hinaus werden mit Personal- und Maschinenkosten weitere Kostenarten berücksichtigt.

### **Zielgrößenberechnung**

Die genannten methodischen Bausteine, die Wirkungsgefüge der Modellgrößen und die Bilanzierung über den Produktlebensweg, wirken bei der Zielgrößenberechnung zusammen. So greifen die meisten Einflußgrößen in den Lebenszyklus des Erzeugnisses ein, d. h. sie verändern die Stoff- und Energiebilanz über den Lebensweg. Dies kann auf zwei Wegen geschehen: Einige Einflußgrößen greifen direkt in Prozeßparameter zur Bestimmung der Häufigkeit oder Intensität der Prozesse ein. Beispielsweise können über Instandhaltungsstrategien die Instandhaltungsintervalle und damit die Häufigkeit eines Instandsetzungsprozesses im Lebenszyklus beeinflußt werden. Die Häufigkeit eines Prozesses bestimmt wiederum die Stoff- und Energiebilanz über den Lebensweg. Andere Einflußgrößen (z. B. konstruktive Lösungen) beeinflussen dagegen die Art der Prozesse, d. h. sie führen zu einer Prozeßauswahl (z. B. Schweißen von Aluminium oder Stahl je nach eingesetztem Werkstoff).

## **2.2 Methodische Detailprobleme und ihre Lösungen**

### **2.2.1 Umgang mit periodischen Prozessen**

Ein wesentliches Charakteristikum von Schienenfahrzeugen und ihren Komponenten ist eine große Zahl periodischer Prozesse des Betriebes, der Reinigung, der Instandhaltung und Modernisierung, die innerhalb der Lebenszeit des Schienenfahrzeuges stattfinden. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt. Dabei stellen die Pfeile den tatsächlichen Prozeßablauf chronologisch dar.

Es ist zwar prinzipiell möglich, die periodischen Prozesse in dieser Weise zu berücksichtigen, sie ist jedoch extrem aufwendig, wenn alle Reinigungs- und Instandhaltungsstufen sowie die Modernisierung mit den dazwischen liegenden Betriebsphasen abgebildet werden sollen. Die I1 (kleinste Reinigungsstufe) wird beispielsweise täglich nach jeder Tagesfahrt

durchgeführt, damit resultieren 18.250 Prozesse<sup>2</sup> allein für Betrieb und eine Reinigungsstufe. Diese Darstellung ist für die Modellierung von Baugruppenlebenswegen zu aufwendig, da zudem für jeden Prozeß die Material- und Energieströme sowie die sich daran anschließenden Prozesse zur Bereitstellung (z. B. Trinkwasseraufbereitung, Herstellung des Reinigers) und Entsorgung (Abwasserklärung) dieser Materialströme betrachtet werden müssen.

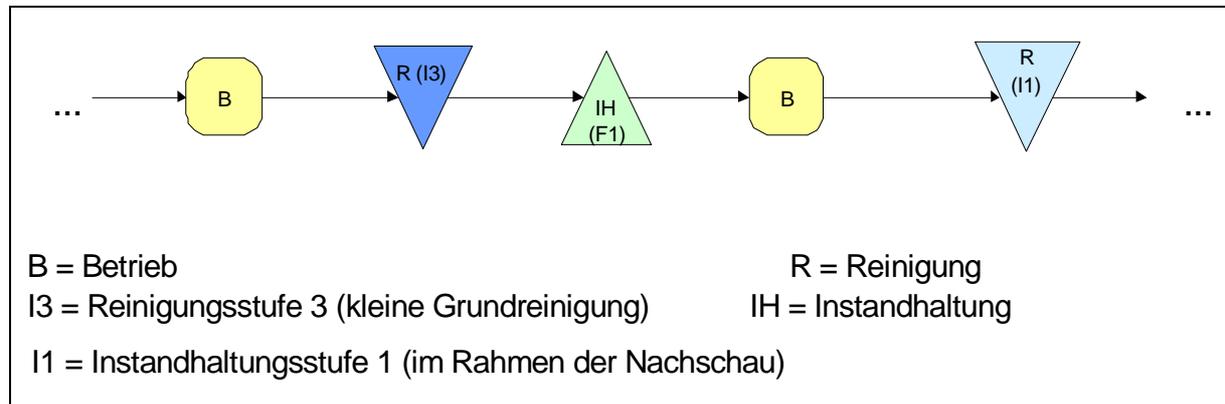


Abbildung 7: Beispiel einer chronologischen Prozeßfolge in der Betriebsphase [Ciroth, Gerner, Kunst 2000]

Ferner erscheint es sehr fraglich, ob für einen Modelleinsatz bei Entwicklung oder Beschaffung von Schienenfahrzeugen und ihren Komponenten die Aussage, daß ein bestimmter Reinigungs- oder Instandhaltungsprozeß an einem bestimmten Tage in 25 Jahren stattfindet, eine praktische Bedeutung besitzt.

Für das skizzierte Problem wurde im Rahmen des Projekts mit dem sogenannten Blumenkonzept eine neue Lösung entwickelt (siehe Abbildung 8). Dabei wird der Betrieb als zentraler Prozeß dargestellt. Von diesem Prozeß aus werden alle anderen Prozesse verknüpft. Die einzelnen periodischen Prozesse eines Prozeßtyps werden dafür für eine festzulegende Zeitscheibe (in der Regel ein Jahr) zusammengefaßt (z. B. alle Reinigungsprozesse I1 eines Jahres). Aus dem zentralen Betriebsprozeß wird die Baugruppe dann an die einzelnen Reinigungs-, Instandhaltungs- und Modernisierungsprozesse übergeben und – nach der Berechnung – wieder an den Betrieb zurückgegeben (beide Übergaben bilden das ‚Blütenblatt‘ in Abbildung 8). Die verschiedenen zusammengefaßten Prozesse (Prozeßtypen) werden separat betrachtet, wobei jedoch berücksichtigt wird, daß ein hierarchisch höherstehender

<sup>2</sup> Betrieb und eine Reinigung ergeben: 2 Prozesse/Tag x 365 Tage/Jahr x 25 Jahre = 18.250 Prozesse

Prozeß einen hierarchisch niedrigerstehenden Prozeß substituieren kann (z. B. ersetzt Reinigungsprozeß I2 den Prozeß I1 an einem Tag).

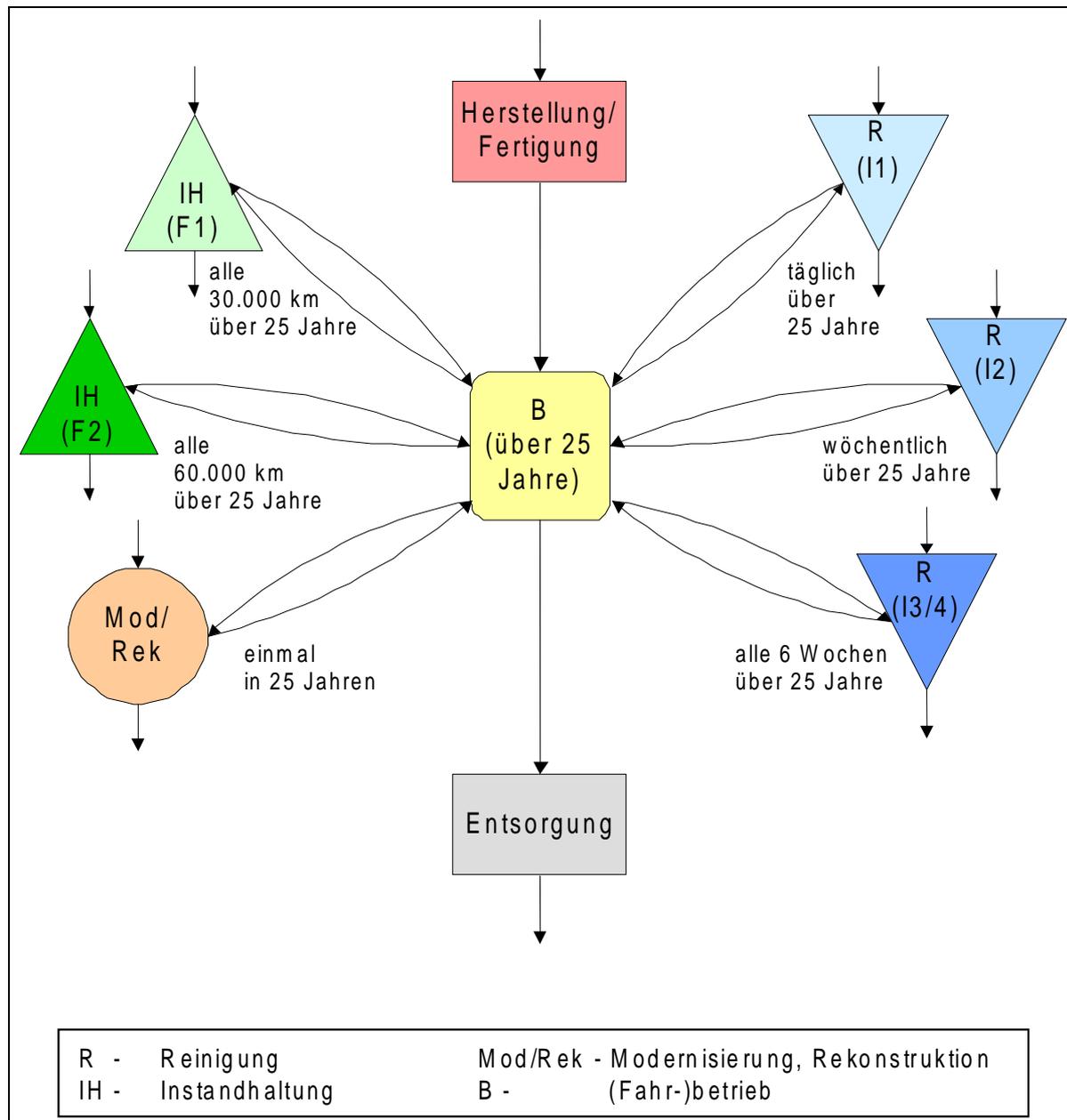


Abbildung 8: "Blumenkonzept" – Aggregierte Prozesse mit nutzenbezogener Prozeßverfolgung [Ciroth, Gerner, Kunst 2000]

Die Zahl der zu betrachtenden Prozesse verkleinert sich erheblich, da jetzt z. B. in einer Zeitscheibe durchzuführenden Reinigungsprozesse zusammengefaßt werden können. An jedem der umgebenden Prozesse können nun weitere Prozeßketten ansetzen. Es kann z. B. notwendig sein, die Herstellung und Entsorgung des Grundreinigers, der in der I3 verwendet wird, zu berücksichtigen.

Die Information über die exakte Prozeßabfolge geht bei diesem Konzept verloren, was jedoch angesichts der signifikanten Vereinfachung der Prozeßberechnung in Kauf genommen werden kann, da eine grobe zeitliche Differenzierung in Zeitscheiben (beispielsweise in Jahre) für Lebenszyklusbetrachtungen mit vorwiegend prognostischem Charakter völlig ausreichend ist.

## 2.2.2 Allokationsprobleme

Bei der Baugruppenbetrachtung stellt sich das Problem der Zuordnung der Prozesse des Fahrzeuglebenswegs zu den Komponenten des Fahrzeugs. Dabei sind folgende Varianten denkbar:

- Zuordnung eines Prozesses ausschließlich zu einer Baugruppe (Beispiel: Die Fertigung des Zwischenbodens wird ausschließlich dem Zwischenboden zugerechnet.)
- Zuordnung eines Prozesses ausschließlich zum Fahrzeug (Beispiel: Die Indienststellung läßt sich nicht einer einzelnen Baugruppe zuordnen, sondern nur dem gesamten Fahrzeug.)
- Zuordnung eines Prozesses zu mehreren oder allen Baugruppen des Fahrzeugs (Beispiel: Die verbrauchte Traktionsenergie hängt u. a. von der Masse des Fahrzeugs und damit von den Masse aller Baugruppen ab.)

Bei den ersten beiden Fällen ist die Zuordnung eindeutig und daher unkompliziert. Ist dagegen eine Zuordnung zu mehreren Baugruppen erforderlich, ergeben sich Allokationsprobleme, d. h. es ist zu klären, welcher Anteil der Stoff- und Energieflüsse sowie der Aufwände eines Prozesses den einzelnen Baugruppen angerechnet wird.

Ziel der Allokation ist eine verursachergerechte Zuordnung der Stoff- und Energieflüsse sowie der Aufwände. Somit werden Optimierungen an der Baugruppe, die zu Reduzierungen der Kosten und Umweltauswirkungen des Fahrzeugs beitragen, dieser Baugruppe auch angerechnet.

Im folgenden wird die Allokationsproblematik am Beispiel des Traktionsenergieverbrauchs und eines Fahrmotors näher erläutert:

Der Verbrauch an Traktionsenergie hängt u. a. von der Fahrzeugmasse sowie von den Energieverlusten im Antriebssystem ab. Entsprechend erfolgt die Allokation des Traktionsenergieverbrauchs getrennt nach Masse und Verlusten (siehe Abbildung 9). Allen Baugruppen wird entsprechend ihres Masseanteils am Fahrzeug ein Anteil des Traktionsenergiever-

brauchs ohne Berücksichtigung von Verlusten zugeordnet. Die Verluste im Antriebssystem werden hingegen ausschließlich den Baugruppen des Antriebssystems zugerechnet. Dadurch werden Effizienzsteigerungen am Motor auch nur diesem gutgeschrieben.

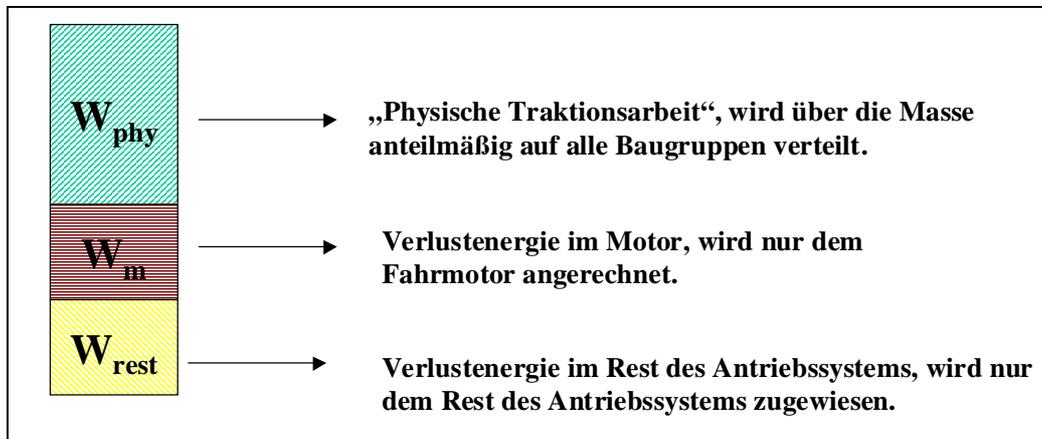


Abbildung 9: Differenzierung des Traktionsenergieverbrauch in physische Traktionsarbeit und Verluste

Für den Fahrmotor sind  $W_m$ , also die Verluste im Motor, sowie ein dem Massenanteil des Motors am Fahrzeug entsprechenden Anteil an  $W_{phy}$  zu berücksichtigen. Für den Zwischenboden ist dagegen nur der entsprechende Anteil an  $W_{phy}$  zu berechnen.

### 2.2.3 Systemgrenzen

Anders als das LCC-Modell zur Fahrzeuguntersuchung umfaßt der zu betrachtende Lebensweg beim Baugruppenmodell auch solche Prozesse, die nicht schienenfahrzeugspezifisch sind (sogenannte generische Prozesse, z. B. die Stahlherstellung oder die Abwasserentsorgung). Für das LCC-Modell ist dies nicht erforderlich, da für die LCC-Berechnung als Vereinfachung Einkaufspreise für Zukaufteile und Materialien angenommen werden können, die nur relativ gering von den tatsächlichen Kosten zur Fertigung dieser Zukaufteile und Materialien abweichen (wesentlicher Unterschied durch Gewinne/ Verluste). Für ökologische Zielgrößen ist dieser Ansatz nicht anwendbar, da es keine analoge Größe zum Einkaufspreis gibt. Daher müssen die durch die Stoff- und Energieflüsse der vor- und nachgelagerten Prozesse verursachten Umweltbelastungen bilanziert werden, um Aussagen über die Umweltbelastungen über den Lebenszyklus der Schienenfahrzeugbaugruppe zu gewinnen.

Hierbei stellt sich jedoch in der Regel das Problem eines sehr großen Systems, da für jeden Input und Output eines Prozesses weitere Prozesse bilanziert werden müssen. Das System

bzw. dessen Modell muß daher vereinfacht werden. Hierzu wird eine Systemgrenze festgelegt, die definiert, welche Prozesse im zu betrachtenden System liegen und welche nicht.

Als allgemeiner Grundsatz dafür muß gelten, daß alle ergebnisrelevanten Bestandteile der verschiedenen Systeme innerhalb der Systemgrenzen liegen (Forderung nach Vollständigkeit der Lebenswegbetrachtung). Dies betrifft Prozesse, die einen deutlichen Beitrag zu den einzelnen Zielgrößen des Baugruppenmodells liefern. Andererseits sollte die Anzahl an Prozessen so klein wie möglich gehalten werden, um die Berechnungen nicht unnötig zu komplizieren.

Zur Festlegung der Systemgrenzen für eine Baugruppenuntersuchung wird die Ergebnisrelevanz der Prozesse anhand von Abschneidekriterien überprüft. Diese Überprüfung wird in zwei Schritten durchgeführt.

1. Es wird ein auf der Masse (bzw. Energieinhalt) basierendes Abschneidekriterium verwendet. Dieses Kriterium wird direkt am Mengenvervielfachungsfaktor<sup>3</sup> des jeweiligen Prozesses anknüpfen. Der numerische Wert ist sehr klein gewählt (z.B.  $10^{-5}$ ). In diesem ersten Schritt werden daher vor allem Rekursionen aufgelöst und somit die benötigte Rechnerkapazität minimiert (bei Probeberechnungen ohne die Ziehung von Systemgrenzen waren Systemgrößen von bis zu 2 Millionen Prozessen keine Seltenheit). Ein nennenswerter Informationsverlust ist durch dieses extrem niedrige Abschneidekriterium nicht zu erwarten.
2. Auf der Grundlage des im ersten Schritt erstellten vorläufigen Systems werden die Zielgrößen berechnet. Diese Werte werden als Referenzwert (100 %) verwendet. Danach werden alle generischen Prozesse erneut untersucht. Ein Prozeß muß in die weitere Betrachtung einbezogen werden, wenn er beispielsweise beim gewählten Abschneidekriterium 0,01 mit wenigstens 1 % zu mindestens einer der wirkungsbezogenen ökologischen Zielgrößen (Treibhauseffekt, Ozonabbaupotential, Versauerung, aquatische Eutrophierung, terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität, Ökotoxizität, Ressourcenverbrauch) beiträgt.

Die numerischen Werte für beide Abschneidekriterien können vom Modellanwender innerhalb eines vorgegebenen Intervalls festgelegt werden.

---

<sup>3</sup> Der Mengenvervielfachungsfaktor eines Prozesses gibt an, mit welchem Faktor die Inputs und Outputs eines Prozesses multipliziert werden müssen, um sie auf die verwendete zentrale Bezugsgröße der Bilanzierung (z. B. ein Fahrzeugkilometer) zu beziehen.

### 3 Anwendung des Baugruppenmodells

Hard- und Softwarevoraussetzungen für das Baugruppenmodell und das LC – Modell sind ein handelsüblicher PC mit Windows 98 bzw. Windows, sowie einem Internetexplorer ab Version 4.5 zur Anzeige der HTML-Hilfen. Für das Baugruppenmodell muß die Datenbank „db15tub.mdb“ verknüpft werden.

Bei der Anwendung des Baugruppenmodells stehen im wesentlichen folgende Features zur Verfügung:

1. **Projektbearbeitung:** Ein Projekt besteht aus einer Baugruppe, ihrem Aufbau und zugehörigen Randbedingungen (z. B. Einsatz, Fristenplan etc.). Ziel ist die Berechnung von ausgewählten Zielgrößen für diese Baugruppe. Sinnvoll ist der Einsatz für Schwachstellenanalysen oder für Vergleiche mit anderen Projekten.
2. **Variantenrechnung:** Variantenrechnungen dienen dem Vergleich von zwei oder mehr Projekten derselben Baugruppen mit unterschiedlichem Aufbau oder unterschiedlichen Randbedingungen. Dadurch kann die für die gewählten Zielgrößen beste Variante identifiziert werden.
3. **Ökologische Rangfolge:** Bei Vergleichen von Projekten derselben Baugruppen mit unterschiedlichem Aufbau oder unterschiedlichen Randbedingungen für den Bereich Ökologie stellt sich oftmals das Problem sich widersprechender Ergebnisse einzelner Zielgrößen. Für diese Fälle wird dem Anwender ein Zusatztool zur Generierung einer vergleichenden Gesamtaussage zur Umweltrelevanz bereitgestellt.
4. **Stammdateneditierung:** Außerhalb der eigentlichen Projekt- oder Variantenbearbeitung können projektunabhängige Daten zu Baugruppen, Materialien, Prozessen etc. editiert oder neu eingegeben werden. Sie sind für beliebig viele Projekte einsetzbar.

#### 3.1 Projektbearbeitung

Zur Bearbeitung von Projekten im Baugruppenmodell wird dem Anwender ein Assistent zur Verfügung gestellt, da die Projektbearbeitung, d. h. die Auswahl von Optionen sowie die Dateneingabe, sehr komplex sein kann. Mögliche Fehlbedienungen (in erster Linie fehlende Eingaben) können so bereits im Vorfeld der Zielgrößenberechnung abgefangen werden.

Vor Beginn der Projektbearbeitung am Rechner muß sich der Anwender Klarheit verschaffen über seinen Untersuchungsgegenstand, z. B. den Produktaufbau und die stoffliche Zusam-

mensetzung, sowie über den Lebensweg, d. h. die beteiligten Prozesse. Es ist empfehlenswert, diese Daten möglichst vollständig bereits im Vorfeld zu erheben.

Der Ablauf der Projektbearbeitung mit Hilfe des Assistenten ist in Abbildung 10 im Überblick dargestellt.

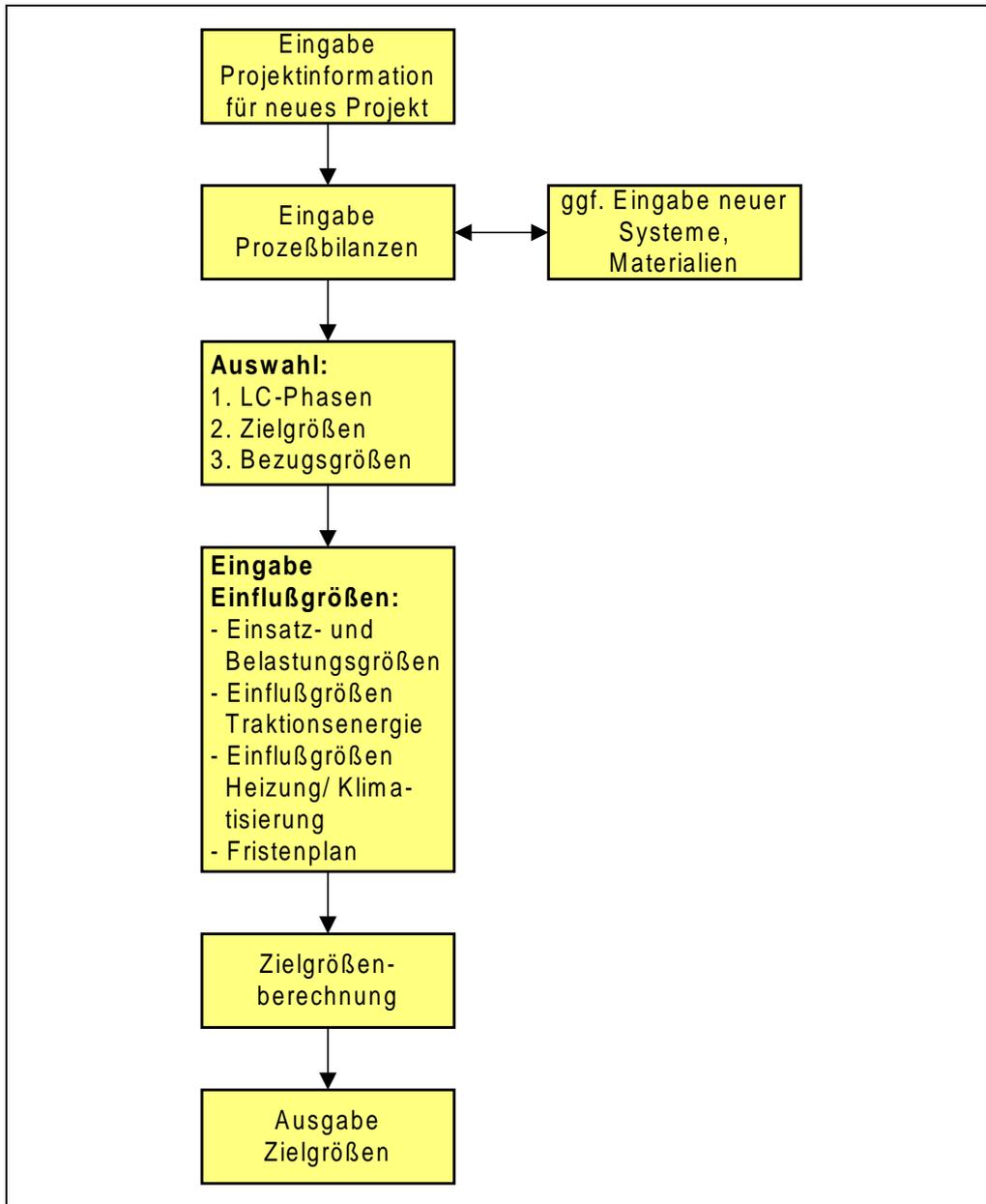


Abbildung 10: Ablauf einer Projektbearbeitung

Nach dem Start des Assistenten stehen dem Anwender drei Optionen zur Verfügung, die Bearbeitung eines vorhandenen Projekts, die vollständige Neuanlage sowie die Erstellung

eines neuen auf Basis eines vorhandenen Projekts. Letzteres ist zu empfehlen bei Sensitivitätsanalysen, d. h. der Variation eines Parameters.

Bei allen drei Optionen sind zunächst allgemeine Angaben zum Projekt wie Bezeichnung, betrachtete Baugruppe, Bearbeiter etc. einzugeben bzw. zu bestätigen.

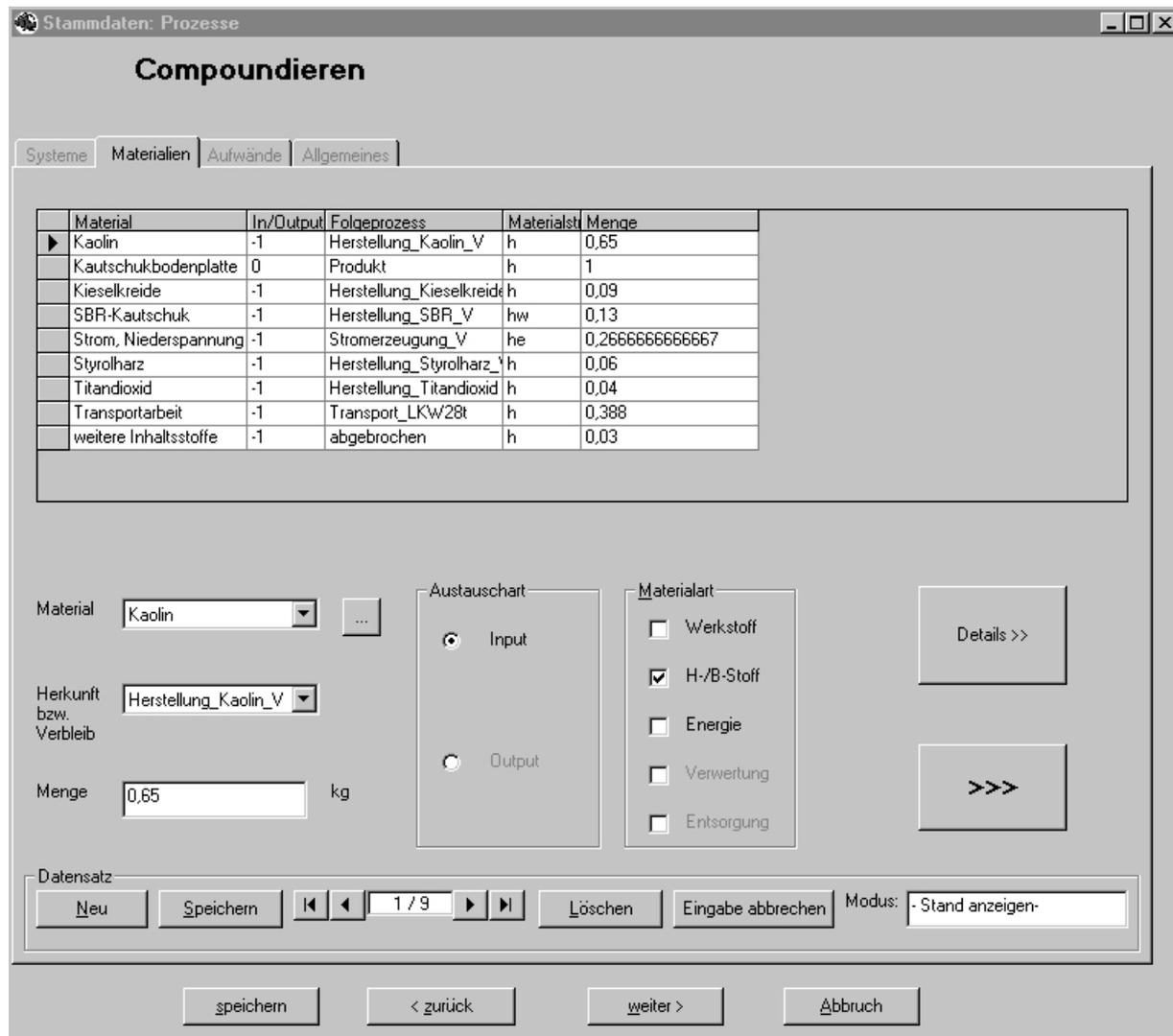


Abbildung 11: Formular zur Prozeßdateneingabe

Bereits vor Beginn der eigentlichen Projektbearbeitung können die für den Untersuchungsgegenstand und seinen Lebensweg benötigten Prozesse eingegeben werden, sofern sie nicht bereits in der Datenbank vorhanden sind. Neben allgemeinen Angaben zum Prozeß liegt das Hauptaugenmerk auf der Prozeßbilanz, d. h. den Input und Outputs an Systemen (Komponenten, Registerkarte Systeme), den Stoff- und Energieflüssen (Registerkarte Materialien) sowie den Personal- und Maschinenaufwänden (Registerkarte Aufwände, siehe Abbildung

11). Einzugeben sind jeweils die Bezeichnung, die Mengen sowie bei Materialien und Systemen die Herkunft (bei Prozeßinputs) bzw. der Verbleib (bei Outputs).

Beispielsweise benötigt der in Abbildung 11 dargestellte Prozeß „Compoundieren“ für die Herstellung der Bodenbeläge als Input 0,65 kg Kaolin, die aus dem Prozeß „Herstellung\_Kaolin\_V“ stammen. Nachfolgende Prozesse können Entsorgungsprozesse für Abfälle oder auch Emissionen in die Umwelt sein.

Der nächste Schritt der Projektbearbeitung umfaßt Auswahlaktionen des Anwenders. Es wird festgelegt, welche Lebenszyklusphasen betrachtet werden sollen. Dadurch sind neben Untersuchungen des gesamten Lebenszyklus auch Teilbetrachtungen möglich. Im nächsten Formular werden die gewünschten Zielgrößen vom Anwender ausgewählt. Die Zielgrößen sind als Baumstruktur dargestellt (siehe Abbildung 2), um zu verdeutlichen, daß bei Auswahl hierarchisch höherstehender Größen die niedrigerstehenden Größen ebenfalls auszuwählen sind (Beispiel: Für die Berechnung der Lebenszykluskosten sind Energie- und Materialkosten gleichfalls zu berechnen.).

Auf dem dritten Auswahlformular kann der Anwender die Bezugsgrößen für die von ihm gewählten Zielgrößen bestimmen. Voreingestellte Standardbezugsgröße ist die Baugruppe, für die Verwertungs- und Beseitigungsquoten hingegen die Masse (vergleiche Abschnitt 2.1).

Nachdem der Anwender festgelegt hat, was berechnet werden soll, müssen nun die für die Berechnung benötigten Einflußgrößen im folgenden Block mit mehreren Formularen angegeben werden. Zunächst wird der Fristenplan eingegeben. Hierzu sind für die Prozesse der Reinigung und Instandhaltung, sowie die Kriterien zur Auslösung der Prozesse als Laufwegs- oder Zeitintervall einzugeben. Es können zwei Kriterien verwendet werden, von denen das zuerst erreichte den Prozeß auslöst (logische „oder“ - Verknüpfung). Die Prozesse mit ihren Bilanzen und Aufwänden werden bereits in einem vorherigen Schritt eingegeben bzw. editiert.

Anschließend werden Einsatz- und Belastungsgrößen, Einflußgrößen des Traktionsenergieverbrauches sowie Einflußgrößen für Heizung/ Klimatisierung eingeben. In Abbildung 12 ist als Beispiel das Formular für den Traktionsenergieverbrauch dargestellt. Der Anwender hat die Möglichkeit, default values (Werte, die bei der Bearbeitung der Referenzbaugruppen im Rahmen des Projekts Bahnkreis erhoben worden sind) zu übernehmen oder neue Werte einzugeben.

Die für die Projektberechnung erforderlichen Eingaben sind damit abgeschlossen.

Assistent zur Projekterstellung (7 von 8)

Einflußgrößen: Traktionsenergieverbrauch

Rechentest\_Sandwich  
Kunst, Heiko - TU Berlin;  
05.10.00 15:01:42

| Traktionsenergieverbrauch         |      |             |         |                                   |  |
|-----------------------------------|------|-------------|---------|-----------------------------------|--|
| Einflußgröße                      | Wert | Defaultwert | Einheit | Definition                        |  |
| ▶ Auslastung                      | 0,5  | 0,5         | -       | mittlerer Auslastungsgrad (mittl. |  |
| Durchschnittsgewicht pro Fahrgast | 70   | 70          | kg      |                                   |  |
| Sonstige Zuladung                 | 350  | 350         | kg      | mittlere Masse an Gepäck (incl.   |  |
| Rückspeisegrad                    | 0,1  | 0,1         | -       | Anteil des Bahnstromverbrauchs.   |  |
| Wirkungsgrad des Fahrmotors       | 0,75 | 0,75        | -       | Wirkungsgrad des                  |  |
| Masse Verband                     | 240  | 240         | kg      | Nettomasse des Verbands, ohne     |  |
| Anzahl Wagen im Verband           | 3    | 3           | Zahl    | gemäß Szenario für Einsatz        |  |

alle Defaultwerte übernehmen... < zurück weiter > Abbruch

Abbildung 12: Formular zur Eingabe von Einflußgrößen für den Traktionsenergieverbrauch

Auf dem Formular 'Berechnung der Zielgrößen' kann die Berechnung gestartet werden. Vorher können die Abschneidekriterien zur Begrenzung des Lebenswegs für die ökologischen Zielgrößen durch den Anwender verändert werden (zur Bedeutung der Abschneidekriterien siehe Abschnitt 2.2.3).

Die Berechnung kann vom Anwender über den Statusbalken sowie über die Meldungen der gerade durchgeführten Aktionen verfolgt werden.

Zunächst wird die Berechnung vorbereitet, indem die Vollständigkeit der benötigten Daten geprüft wird sowie die erforderlichen Prozeßdaten zusammengestellt und auf einheitliche Bezugsgrößen normiert werden.

Anschließend erfolgt die Aufstellung und Berechnung des Prozeßnetzwerks. Dazu werden zunächst die schienenfahrzeugspezifischen Prozesse über ihre Inputs und Outputs ausgehend von zentralen Betriebsprozeß miteinander verknüpft. Die folgende Berechnung der Mengenvervielfachungsfaktoren (siehe Abschnitt 2.2.3) je Zeitscheibe erfolgt getrennt für periodische Prozesse (z. B. Reinigung, präventive Instandhaltung), stochastische Prozesse (korrektive Instandhaltung) sowie nichtperiodische Prozesse der Fertigung und Entsorgung. Anschließend werden die generischen Prozesse (z. B. Herstellung und Entsorgung von Werkstoffen

bzw. Abfällen) an das System angehängt. Nun können die Bilanzen aller Prozesse berechnet werden.

Aus den Prozeßbilanzen werden nun die verschiedenen Zielgrößen berechnet. Für die wirkungsbezogenen ökologischen Zielgrößen erfolgt eine Multiplikation der Stoffflüsse mit sog. Charakterisierungsfaktoren, die angeben, wie stark die relative Wirkung eines Stoffs im Vergleich zu einer Referenzsubstanz ist, mit anschließender Aggregation.

Andere ökologische Zielgrößen wie z. B. der Materialeinsatz oder Schad- und Problemstoffe werden direkt aus der Klassifizierung der Stoffe und den Prozeßbilanzen durch einfache Aggregation ermittelt.

Für die Kostengrößen erfolgt eine Multiplikation von Aufwänden bzw. Verbräuchen mit spezifischen Preisen sowie eine anschließende Aggregation und (falls vom Anwender gewünscht) Zeitbewertung.

Die Ergebnisse der Zielgrößenberechnung werden in technischen Berichten angezeigt. Neben einer Übersicht über die Ergebnisse der Zielgrößen über den gesamten Lebensweg sowie der Dokumentation der Randbedingungen des berechneten Projekts lassen sich - nach Wunsch des Anwenders - die Zielgrößen in detaillierter Form aufgeschlüsselt nach Lebenszyklusphasen, Jahren sowie Lebenszyklusphasen und Jahren ausgeben. Diese Berichte können auch ausgedruckt und in verschiedene Formate (u. a. MS Word und Excel) exportiert werden.

## **3.2 Variantenrechnung**

Wichtige Entscheidungen im Rahmen der Entwicklung oder Beschaffung von Schienenfahrzeugen und ihren Komponenten lassen sich nur über den Vergleich unterschiedlicher Alternativen treffen. Dafür stellt das Baugruppenmodell dem Anwender mit der Variantenrechnung ein Hilfsmittel zur Entscheidungsunterstützung zur Verfügung.

Es können zwei oder mehrere Projekte mit ihren Zielgrößenergebnissen verglichen werden. Voraussetzung für eine sinnvolle Anwendung der Variantenrechnung ist die Vergleichbarkeit der Varianten, die im Vorfeld vom Anwender geprüft werden muß. Sinnvoll ist beispielsweise der Vergleich von konstruktiven Alternativen einer Baugruppe unter den gleichen Randbedingungen.

Der Anwender wählt die zu vergleichenden Projekte aus einer Liste von vorliegenden Projekten, die bereits berechnet worden sind, aus und legt fest, welches Projekt als Referenzprojekt dienen soll (siehe Formular zur Variantenrechnung in Abbildung 13). Ferner ist aus-

zuwählen, in welcher Form die Ergebnisse dargestellt werden sollen: als Gegenüberstellung absoluter Zielgrößenwerte, als Differenzen (Referenzprojekt = 0) oder in relativer Darstellung (Referenzprojekt = 1).

**Variantenrechnung**  
- Vergleich der Ergebnisse verschiedener Baugruppenprojekte \_

Bezeichnung der Variante:

Auswählen aus den verfügbaren Baugruppenprojekten

| Projektbezeichnung                                      | Baugruppe        | Datum der Anla...  |
|---|------------------|--------------------|
| <input type="checkbox"/> Fahrmotor                      | Fahrmotor        | 19.10.00 10:31:... |
| <input type="checkbox"/> Fahrmotor hohe Effizienz       | Fahrmotor        | 23.10.00 14:55:... |
| <input type="checkbox"/> Fahrmotor85%Effizienz          | Fahrmotor        | 23.10.00 15:29:... |
| <input checked="" type="checkbox"/> Holzboden           | Fußboden         | 13.10.00 18:37:... |
| <input checked="" type="checkbox"/> Rechentest_Sandwich | Sandwichfußboden | 05.10.00 15:01:... |

Start der Variantenrechnung

Abbruch

Referenzprojekt:

< zurück

Details

Bezugsgrößen ansehen / verändern...

Darstellungsform der Ergebnisse

- absolute Zielgrößenwerte
- Differenzen
- relative Angaben

Abbildung 13: Formular zur Variantenrechnung

Die Ergebnisse der Variantenrechnung werden ebenfalls in technischen Berichten dokumentiert. Hier stehen die gleichen Features wie bei der Zielgrößenrechnung zur Verfügung (siehe Abschnitt 3.1).

### 3.3 Ökologische Rangfolgenbildung

Die Ergebnisse eines Teiles der berechneten ökologischen Zielgrößen sind für den Anwender ohne Hintergrundwissen in diesem Bereich schwer zu interpretieren. Um hier dem Anwender eine Unterstützung zu geben, wurden die der Ökobilanz [DIN EN ISO 14040: 1997] entlehnten Zielgrößen die ökologische Rangfolgenbildung implementiert. Damit können zwei Varianten hinsichtlich ihrer Umweltrelevanz direkt verglichen werden. Es wird eine vergleichende Aussage generiert ('Variante A ist besser als B', 'Variante B ist besser als A' oder 'Beide Varianten sind ökologisch gleichwertig').

Folgende Zielgrößen werden in der ökologischen Rangfolgenbildung berücksichtigt:

- aquatische Eutrophierung
- terrestrische Eutrophierung
- Humantoxizität
- Ökotoxizität
- Ozonabbaupotential
- Ressourcenverbrauch
- Treibhauseffekt
- Versauerung

Basis für die ökologische Rangfolgenbildung ist die Auswertung der Ökobilanz im Sinne der [DIN EN ISO 14040: 1997]. Die hier entwickelte und angewendete Methode fußt auf zwei anerkannten Methoden aus diesem Bereich (vgl. [Giegrich 1995] und [Volkwein, Gühr, Klöpfer 1996]).

#### 3.3.1 Methode der ökologischen Rangfolgenbildung

Für die ökologische Rangfolgenbildung werden grundsätzlich zwei voneinander unabhängige Bewertungsaspekte zusammengeführt und zu einer ökologischen Gesamtaussage verdichtet:

- Ergebnis der jeweiligen Zielgrößen bzw. Ergebnisdifferenzen bei direkten Vergleichen
- ökologische Bedeutung der einzelnen Zielgrößen im Vergleich untereinander

Für diese Ergebnisverdichtung wird jedoch keine Gewichtung der ökologischen Zielgrößen vorgenommen, sondern die Bestätigung eines Bewertungsvorschlags angestrebt, der sich aus dem Trend der Mehrzahl der ökologischen Zielgrößen ergibt. Dazu wird versucht, die diesem Bewertungsvorschlag widersprechenden Zielgrößen gegen andere zu 'kürzen'. Basis hierfür sind die Zielgrößenergebnisse sowie eine möglichst nachvollziehbare und intersubjektive Beurteilung der ökologischen Bedeutung der Zielgrößen anhand von einheitlichen Kriterien, wie Gefährdungspotential und zeitliche und geographische Bedeutung der potentiellen Auswirkungen. Dieses 'Kürzen' wird in mehreren Schritten versucht, zunächst ohne Aggregation der Bewertungskriterien und später nach einer Zusammenfassung aller Kriterien einschließlich der Zielgrößenergebnisse. Im folgenden werden die einzelnen Schritte der Rangfolgebildung näher beschrieben.

Vor der eigentlichen Rangfolgebildung werden die Ergebnisse der ökologischen Zielgrößen normiert, d. h. die Zielgrößenergebnisse werden auf globale Werte (z. B. alle Treibhausemissionen eines Jahres) bezogen, um die quantitative Bedeutung der Zielgröße für den jeweiligen Anwendungsfall darzustellen.

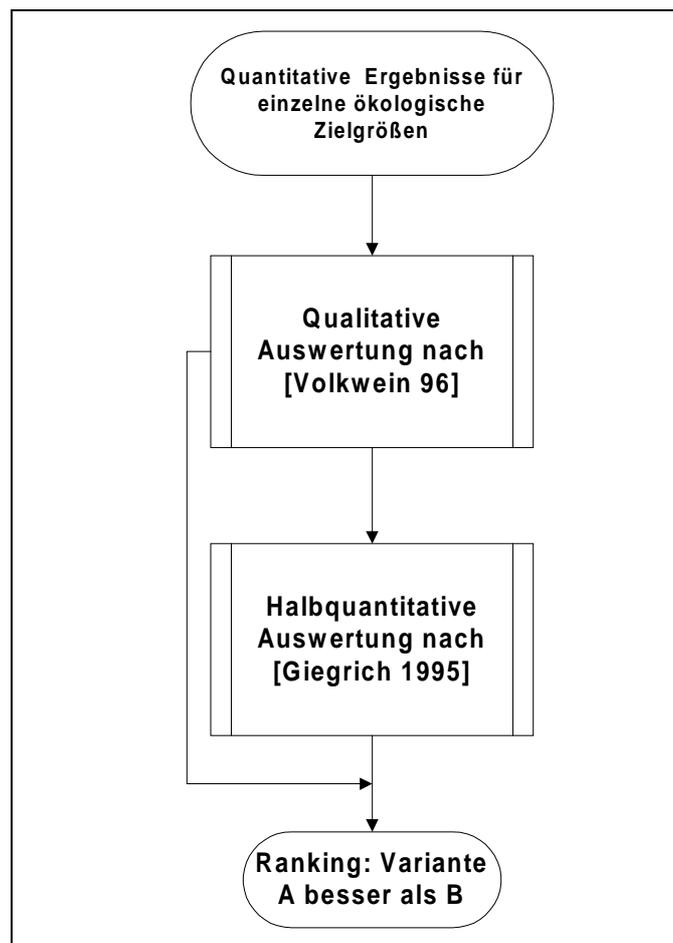


Abbildung 14: Prinzipielles Vorgehen in der ökologischen Rangfolgebildung

Nun wird in einem ersten Schritt eine weitgehend qualitative Methode in Anlehnung an [Volkwein, Gühr, Klöpffer 1996] angewendet. Diese Methodik hat den Vorteil, eine übersichtliche und sehr vollständige Betrachtung der verschiedenen Bewertungsaspekte (Ort, Zeit, Gefahr und Menge) zu integrieren.

Wenn mit dieser Methode kein abschließendes Urteil zum Ranking der beiden zu vergleichenden Varianten erreicht werden kann, so sollte eine Rankingmethode nach [Giegrich 1995] verwendet werden, wie sie u. a. in [UBA 1994] angewendet wurde. Dabei wird eine qualitative Bewertungsmatrix computertechnisch durch eine halbquantitative Intervallbetrachtung ersetzt. Die Bewertungskriterien für die ökologische Bedeutung der Wirkungskategorien können aus den Orts-, Zeit- und Gefährdungskriterien der Methodik von [Volkwein, Gühr, Klöpffer 1996] übernommen werden. Abbildung 14 verdeutlicht die Vorgehensweise.

### **3.3.2 Anwendung der ökologischen Rangfolgebildung**

Die Anwendung der ökologischen Rangfolgebildung ist sehr einfach. Der Anwender muß lediglich die zu vergleichenden Projekte auswählen. Es ist dabei sicherzustellen, daß für beide Projekte die acht relevanten ökologischen Zielgrößen (Wirkungskategorien) berechnet worden sind und daß die Projekte bzw. die untersuchten Baugruppen vergleichbar sind. Ist die Vergleichbarkeit nicht gewährleistet, würden unsinnige Ergebnisse ermittelt. Die Vergleichbarkeit schließt u. a. ein, daß eine Baugruppe in zwei verschiedenen Konstruktionsweisen, die für den gleichen Einsatzzweck vorgesehen sind, oder eine Baugruppe mit gezielt variierten Randbedingungen betrachtet werden soll.

Die ökologische Rangfolgenbildung erfolgt bei Bedarf, d. h. wenn kein eindeutiges Ergebnis erzielt werden konnte, in mehreren Iterationsschritten (siehe Abschnitt 3.3.1). Jeder Iterationsschritt entspricht einer sogenannten Unsicherheitsstufe, von denen es fünf gibt. Die Unsicherheitsstufe wird stets mit dem Ergebnis ausgegeben. Eine niedrige Unsicherheitsstufe bedeutet, daß das Ergebnis belastbarer ist als bei höheren Unsicherheitsstufen. So bedeutet eine Unsicherheitsstufe I, daß die ökologisch bessere Variante für alle Zielgrößen besser abschneidet und eine Unsicherheitsstufe V daß keine widerspruchsfreie Rangfolge ermittelt werden konnte, die verglichenen Projekte müssen daher als ökologisch gleichwertig betrachtet werden.

## **4 Anwendungsbeispiel Doppelstock-Zwischenfußboden**

### **4.1 Aufbau und Lebensweg des Doppelstock-Zwischenfußbodens**

Die Ergebnisse der Baugruppenuntersuchungen sowie die prinzipiellen Einsatzmöglichkeiten des Baugruppenmodells werden vorgestellt am Beispiel des Doppelstock-Zwischenfußbodens, für den einige ökologische und ökonomische Zielgrößen berechnet und dargestellt werden. Die verwendeten Daten wurden im Projekt für einen modernen Doppelstock-Reisezugwagen erhoben. Für die Detailbeschreibung sei auf den Band 6 der vorliegenden Endberichte verwiesen.

Der Zwischenfußboden eignet sich gut als Beispiel, da für diese Baugruppe alle Phasen des Schienenfahrzeuglebenszyklus relevant sind (auch Reinigung, Instandhaltung, Modernisierung) und zahlreiche Variationsmöglichkeiten hinsichtlich Materialauswahl und Konstruktion untersucht werden können.

Der Doppelstock-Zwischenfußboden ist der Boden des Obergeschosses von Doppelstock-Reisezugwagen, die im Personennahverkehr eingesetzt werden. Das Fahrregime entspricht den Umlaufplänen 11500 bis 11506 des Regionalbereiches Rheinland im DB Regio (DB Regionalbahn Rheinland GmbH), Aachen - Köln - Düsseldorf - Mülheim/Ruhr - Hamm - Gütersloh - Bielefeld) [TP 1: 1999]. Die Baugruppe Zwischenfußboden ist einerseits ein tragendes Teil des Schienenfahrzeugs und weist andererseits eine im Einsatz stark strapazierte Oberfläche auf. Der Doppelstock-Zwischenfußboden besteht aus einer 16 mm starken Sperrholzplatte, die auf eine Stahlkonstruktion geschraubt wird, und einem 2 mm dicken Kautschukbodenbelag. Der Bodenbelag wird auf die Sperrholzplatte aufgeklebt.

Diese Konstruktion nach dem Stand der Technik wird verglichen mit einer fiktiven Leichtbauvariante mit Sandwichplatte (2 Deckschichten jeweils aus 1 mm Aluminium mit Kunststoffwabenstruktur (PE)) berücksichtigt. Diese Variante wird im folgenden als „Sandwich“ bezeichnet. Die Sandwichplatte bringt eine Gewichtsersparnis von ca. 100 kg pro Fahrzeug, so daß mit einem verringerten Traktionsenergieverbrauch gerechnet werden kann.

Der Lebensweg des Doppelstock-Zwischenfußbodens, der in Abbildung 15 vereinfacht dargestellt ist, wird im folgenden kurz beschrieben.

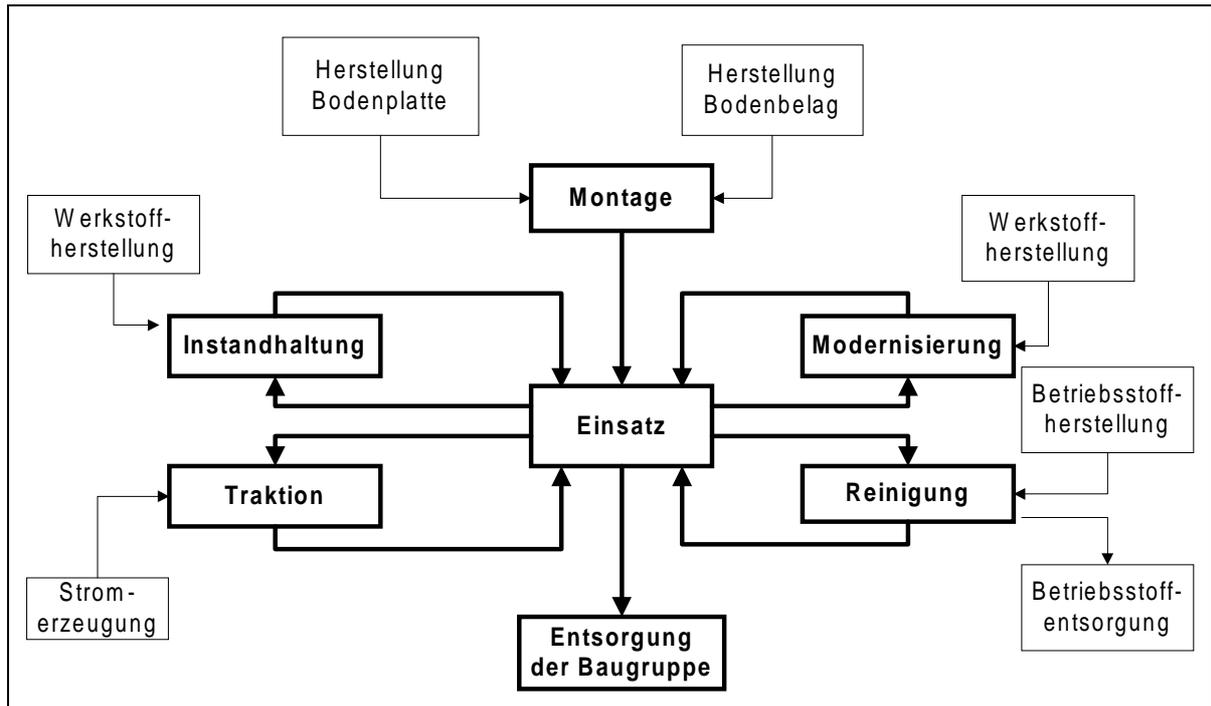


Abbildung 15: Vereinfachte Darstellung der Prozesse im Lebenszyklus der Baugruppe Doppelstock-Zwischenfußboden [Gerner, Ciroth, Kunst 2000]

Der Doppelstock-Zwischenfußboden wird in Einzelfertigung direkt im Fahrzeug aus den Einzelteilen Sperrholzplatte und Kautschukbodenbelag aufgebaut. Die eingesetzten Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie die benötigte Energie werden im Zuge der Bilanzierung berücksichtigt, um den gesamten Lebenszyklus zu erfassen.

Nach der Inbetriebsetzung wird das Fahrzeug und mit ihm der Doppelstock-Zwischenfußboden über mehrere Jahre (in diesem Beispiel 25 Jahre) eingesetzt. Der Betrieb stellt eine wesentliche Phase im Lebenszyklus eines Schienenfahrzeuges dar, weil im Laufe der Lebensdauer eine große Laufleistung erreicht wird (im vorgestellten Beispiel mehr als 9 Mio. km). Für den Betrieb des Fahrzeugs ist die Stromerzeugung (für Traktion oder als Hilfsenergie) ein wesentlicher Prozess. Um den Betrieb für die Baugruppe darstellen zu können, wird der Baugruppe ein Anteil am Energieverbrauch des Fahrzeugs (bzw. des Fahrzeugsverbands) je nach seinem Gewichtsanteil am Gesamtfahrzeuggewicht angerechnet.

Während der Lebensdauer von Fahrzeug und Baugruppe werden einige periodische Prozesse durchlaufen:

- **Reinigung:** Während des Betriebes des Schienenfahrzeuges werden die Wagen nach einem Fristenplan gereinigt. Der Bodenbelag ist ein Teil der bei jeder Reinigungsfrist zu reinigenden Baugruppen.

- Instandhaltung: Parallel zur Reinigung wird auch die Instandhaltung der Fahrzeuge durchgeführt. Wird im Zuge einer der regelmäßigen Instandhaltungsmaßnahmen festgestellt, daß der Bodenbelag und/ oder der Zwischenboden beschädigt ist, so wird der entsprechende Bereich ausgewechselt. Die Instandhaltung erfolgt im Betriebshof/ Werk Aachen (KA) im RIGA-Verfahren. Alle 30.000 km wird eine wagentechnische Untersuchung, alle 60.000 km eine Frist im RIGA-System und alle 1.000.000 km eine Revision durchgeführt.
- Modernisierung: Einmal im Lebensweg des Schienenfahrzeugs findet eine Modernisierung statt, die den kompletten Austausch des Doppelstock-Zwischenfußbodens beinhaltet.

## 4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse für die ökologische Zielgröße Energieverbrauch (als kumulierter Energieaufwand (KEA) gemäß VDI-Richtlinie 4600 [VDI 4600: 1997]) sowie die der Ökobilanz im Sinne der [DIN EN ISO 14040: 1997] entlehnten Zielgrößen Treibhauseffekt, terrestrische Eutrophierung, Ozonabbaupotential und Ressourcenverbrauch spiegeln die große Bedeutung des Traktionsenergieverbrauchs wider. Zwischen 88 und 99 % am jeweiligen Zielgrößenergebnis für den gesamten Lebenszyklus lassen sich auf den Verbrauch von Traktionsenergie bzw. auf die Erzeugung des im Betrieb verbrauchten Bahnstroms zurückführen. Dem Zwischenboden wird vom gesamten Traktionsenergieverbrauch sein (auf die Masse bezogener) Anteil zugerechnet (siehe Abschnitt 2.2.2).

Auch für das Ozonabbaupotential dominiert der Prozeß der Stromerzeugung eindeutig. Dennoch erreichen hier Prozesse anderer Lebenszyklusphasen mit ca. 12 % einen durchaus zu berücksichtigenden Anteil. Dies ist u. a. auf Chloremissionen aus den Herstellungsprozessen für das in der Reinigung verwendete Reinigungsmittel zurückzuführen.

Über die Lebensdauer des Zwischenfußbodens fallen etwa 3 Tonnen Holzabfälle an, die jedoch entweder als Ersatzbrennstoff in der Industriefeuerung direkt thermisch verwertet werden oder in einer Müllverbrennungsanlage unter Wärmerückgewinnung verbrannt werden können. Für diese energetische Verwertung wird dem Zwischenfußboden eine Gutschrift (d. h. negative Emissionen und Ressourcenverbräuche) erteilt, da hierdurch Umweltbelastungen durch Wärme- bzw. Stromerzeugung auf anderem Wege (z. B. durch Kohleverbrennung) vermieden werden. Mit den anfallenden Bodenbelagsresten und den Abfällen aus der Reinigung werden zusätzlich etwa 900 kg hausmüllähnliche Abfälle entsorgt. Der Fahrzeugbetrieb hat keinen Einfluß auf das Abfallaufkommen im Lebenszyklus des Zwischenfußbo-

dens, weil die im Betrieb anfallenden Abfälle (z. B. die von den Fahrgästen entsorgten Abfälle) nicht in einem direkten Zusammenhang mit der Baugruppe stehen.

Die Dominanz des Fahrbetriebs läßt sich zum einen durch die sehr hohe Fahrleistung im Rahmen des Umlaufplans der Referenzstrecke RE Aachen – Bielefeld erklären, die im Tagesmittel über 1.000 km beträgt. Zum anderen ist ein größerer Einfluß der Masse auf den Energieverbrauch im Regional- im Vergleich zum Fernverkehr aufgrund der zahlreichen Halte zu erwarten [Büttner, Heyn 1999]. Aus diesem Ergebnis läßt sich ableiten, daß der Leichtbau zumindest für den Nahverkehr eine erfolversprechende Strategie zur Verminderung der direkt und indirekt mit dem Doppelstock-Zwischenfußboden und seinem Lebenszyklus verbundenen Umweltbelastungen darstellt.

Dieses Ergebnis kann durch die Variantenuntersuchung bestätigt werden. In Abbildung 16 sind die Ergebnisse der ökologischen Zielgrößen für den Sperrholzboden und die Sandwichkonstruktion gegenübergestellt.

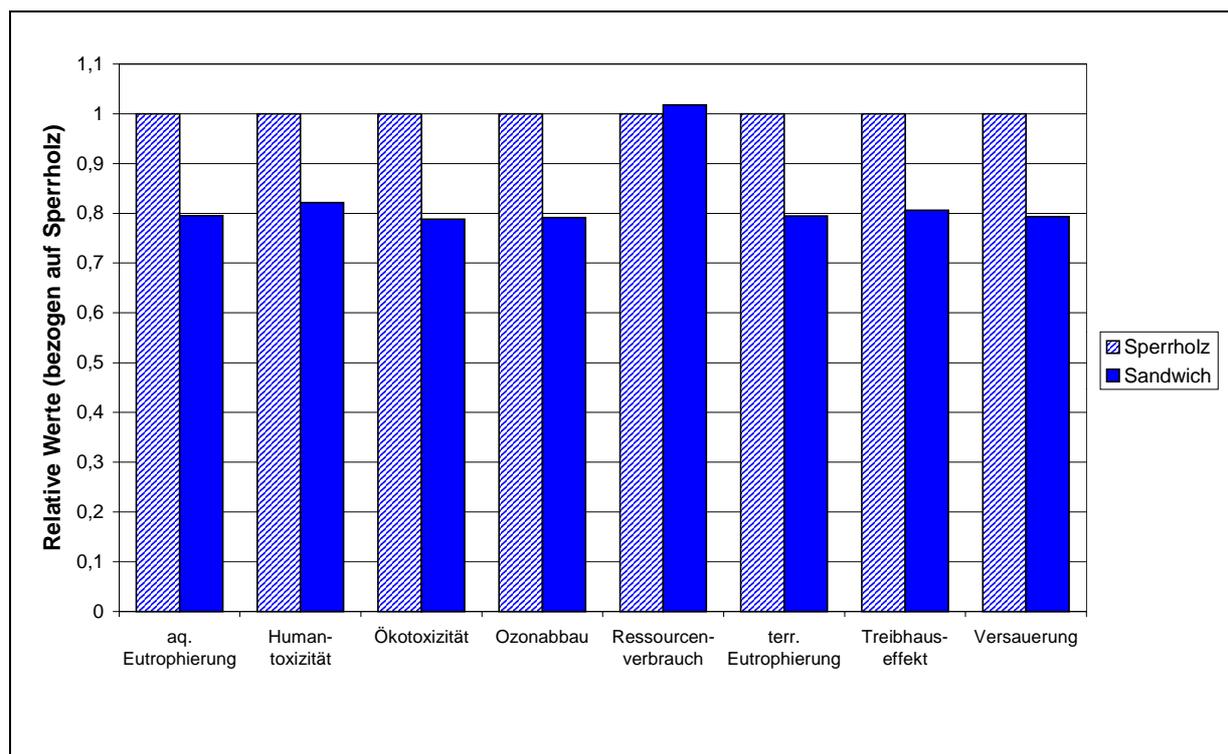


Abbildung 16: Ergebnisse des Vergleichs Sperrholzboden - Sandwichkonstruktion für den Doppelstock-Zwischenfußboden

Aufgrund der großen Bedeutung des Traktionsprozesses wirkt sich die geringere Masse der Sandwichkonstruktion direkt auf die von der Baugruppe verursachten Umweltbelastungen aus. Die Zielgrößenwerte liegen mit Ausnahme des Ressourcenverbrauchs um 17 bis 21 % unter denen der Sperrholzkonstruktion (siehe Abbildung 16). Beim Ressourcenverbrauch

weist der Sperrholzboden Vorteile gegenüber dem Sandwich auf, die in erster Linie auf die Werkstoffverbräuche bei der Herstellung (sowie der Modernisierung) zurückzuführen sind (Aluminiumverbrauch für das Sandwich gegenüber dem nachwachsenden Rohstoff Holz). Die ökologische Rangfolgebildung (siehe Abschnitt 3.3) für diesen Vergleich kommt zum Ergebnis, daß insgesamt aus ökologischer Sicht die Sandwichkonstruktion besser abschneidet (unter den gegebenen Randbedingungen wie Laufleistung, Lebensdauer etc.).

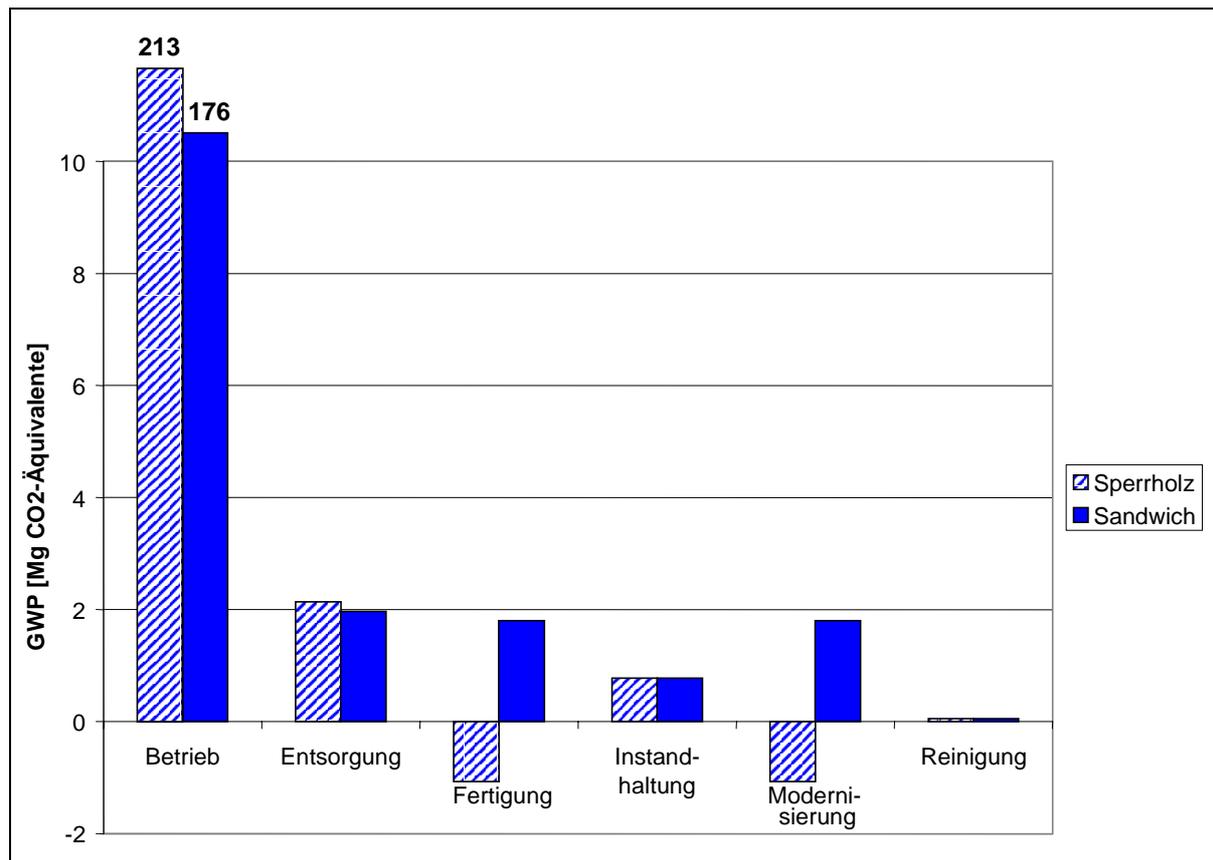


Abbildung 17: Detailvergleich der Ergebnisse der Zielgröße Treibhauseffekt (GWP) für den Doppelstock-Zwischenfußboden als Sperrholz- und als Sandwichkonstruktion

Interessant ist ein detaillierter Vergleich zwischen den beiden Konstruktionsvarianten für die ökologische Zielgröße Treibhauseffekt, der in Bild 11 dargestellt ist. Für die Lebenszyklusphasen Instandhaltung und Reinigung bestehen keinerlei Unterschiede zwischen beiden Varianten, da in diesen Phasen nur der Bodenbelag ausgebessert bzw. gereinigt wird. In der Fertigung und der analog dazu erfolgenden Modernisierung besteht zwischen den Treibhausemissionen ein grundsätzlicher Unterschied: Die Werte für die Sperrholzkonstruktion sind geringer als diejenigen der Sandwichvariante, sie sind sogar kleiner als Null. Grund hierfür ist die Verwendung des nachwachsenden Rohstoffs Holz, der für seine Herstellung

eine negative Bilanz des Treibhausgases Kohlendioxids aufweist (Holz bindet beim Wachstum CO<sub>2</sub>).

Dieser ökologische Vorteil für die Sperrholzkonstruktion wird jedoch mehr als nur kompensiert durch den geringeren Traktionsenergieverbrauch für die Sandwichkonstruktion, da die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Bahnstromerzeugung das Ergebnis zugunsten der Sandwichvariante beeinflussen. Auch dieses Ergebnis weist auf die großen Umweltentlastungspotentiale durch einen konsequenten Leichtbau von Schienenfahrzeugkomponenten hin.

Für die ökonomischen Zielgrößen ergibt sich ein anderes Bild, hier dominieren für den Zwischenfußboden die der Baugruppe anzurechnenden Personalkosten. Für die täglich durchgeführten Reinigungsprozesse, die im wesentlichen von den Personalkosten bestimmt werden, beträgt der Anteil an den Lebenszykluskosten über 75 % (siehe Abbildung 18). Dagegen weist der Betrieb, für den in erster Linie Energiekosten (Traktion) zu Buche schlagen, nur einen Anteil von 16 % an den Lebenszykluskosten des Zwischenfußbodens auf. Für die ökonomische Optimierung ist daher eine Verbesserung der Reinigungsgerechtigkeit des Bodenbelags entscheidend. Dennoch lassen sich auch durch Leichtbaukonstruktionen Kosteneinsparungen erreichen.

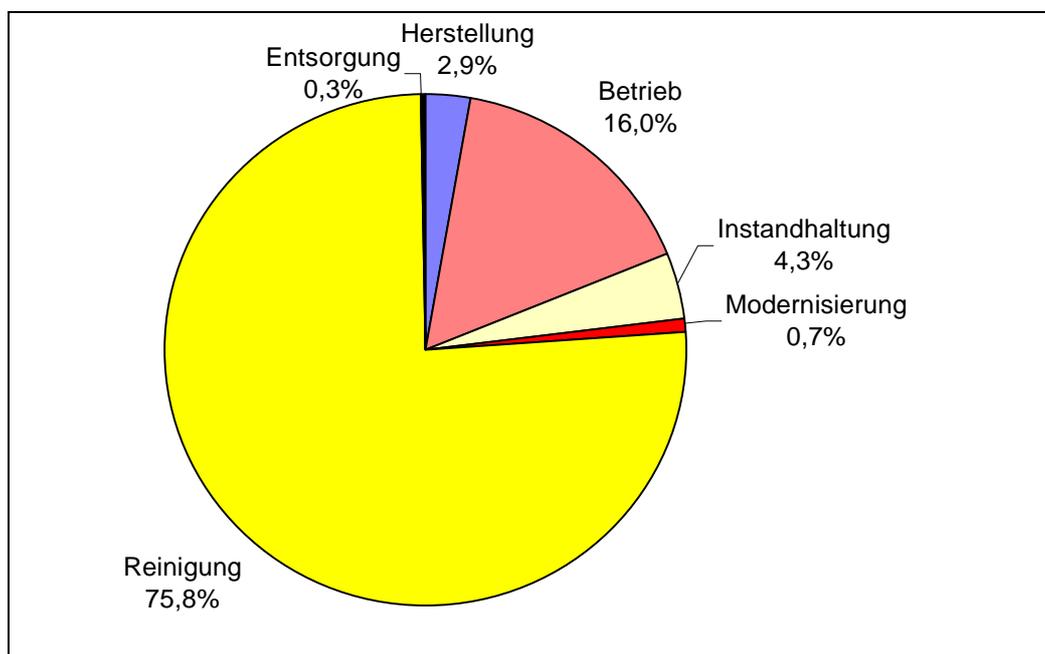


Abbildung 18: Verteilung der Lebenszykluskosten des Doppelstock-Zwischenfußbodens über die Lebenszyklusphasen

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Baugruppenmodell dient der Berechnung von Zielgrößen aus den Bereichen Ökologie und Ökonomie für Schienenfahrzeugbaugruppen. Methodische Grundelemente sind die Prozeßbilanzierung, die Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus, sowie die Wirkungsgefüge zwischen Ziel- und Einflußgrößen.

Die Besonderheiten des Baugruppenmodells lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- LCC- und LCA-Berechnung sind homogen in einem Programm integriert, und werden nicht in zwei separaten Modulen berechnet, wie in anderen Programmen.
- Periodische und stochastische Prozesse können im Lebensweg berücksichtigt werden; ebenfalls kann berücksichtigt werden, daß sich bestimmte dieser Prozesse gegenseitig substituieren (und daher nicht gleichzeitig ablaufen).
- Für wichtige Prozesse können funktionale Abhängigkeiten dargestellt werden (z. B. Traktion).
- Kostengrößen für den Lebensweg des Produkts werden nach der Zeit aufgeschlüsselt.
- Der Rechenalgorithmus kann die im Prozeßsystem vorhandenen Rekursionen ersten Grades (d.h. Verknüpfungen von einem Prozeß zu einem Nachfolgeprozeß und zurück) darstellen und in der Bilanzierung richtig berechnen.
- Zur Generierung vergleichender Aussagen über die Umweltrelevanz ist eine neuartige Methode zur ökologischen Rangfolgebildung implementiert, die bewährte Methoden kombiniert und eine schrittweise Erhöhung der Trennschärfe der Auswertung ergibt.
- Systemgrenzen für die Berechnung ökologischer Zielgrößen werden in zwei Schritten gesetzt und sind vom Anwender wählbar.
- Zahlreiche Daten werden in einer Datenbank abgelegt und sind damit nutzbar für andere Projekte. Der Datenerhebungsaufwand künftiger Projekte wird dadurch kontinuierlich reduziert.

Das Baugruppenmodell wurde als Softwareprototyp implementiert und am Beispiel zweier Referenzbaugruppen erprobt und validiert. Kurzfristig ist eine Erweiterung des Anwendungsfelds auf solche Baugruppen möglich, die von Aufbau und Lebenswegstruktur den Referenzbaugruppen ähnlich sind. Mittelfristig kann eine Erweiterung auf beliebige Baugruppen sowie auf Fahrzeuge realisiert werden.

Die Weiterentwicklung des Softwareprototypen in Richtung einer erhöhten Anwenderfreundlichkeit ist eine weitere Perspektive des Baugruppenmodells.

## 6 Literatur

- [Büttner, Heyn 1999] Büttner, A, Heyn, J.: Umwelt- und Kostenbilanz im Fahrzeugrohbau: Aluminium, Stahl und Edelstahl. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Bahnen und Umwelt. In: VDI Berichte 1488, S. 137 - 152. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999
- [Ciroth, Gerner, Kunst 2000]: Ciroth, A.; Gerner, K; Kunst, H.: Methodische Grundlagen für Modelle zur Beurteilung der Umweltrelevanz von Schienenfahrzeugen. In: Umweltschutz im neuen Jahrhundert - Vom medialen Umweltschutz zum Sicherheitsdenken. Neuruppin TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky 2000
- [DIN EN ISO 14040: 1997]: DIN EN ISO 14040, Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin 1997
- [Trebst, Fleischer, Fischer 2001]: Trebst, W.; Fleischer, G.; Fischer, W.: Interdisziplinäres Forschungsprojekt „Nachhaltiges Wirtschaften am Beispiel von Schienenfahrzeugen (BAHNKREIS)“. In: Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 1/2001 (geplant)
- [Fleischer 1993]: Fleischer, G.: Eine schlüssige Ökobilanzmethode - Die Produkt-Umweltverträglichkeitsprüfung. In: VDI Berichte 1060 - Materialien in ihrer Umwelt; Seite 177 - 192, VDI-Verlag, Düsseldorf 1993.
- [Fleischer et al. 1999]: Fleischer, G.; Ciroth, A.; Gerner, K. Kunst, H.: Bahnkreis - Modelle zur Beurteilung der Umweltrelevanz von Schienenfahrzeugen. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Bahnen und Umwelt. VDI Berichte 1488, S. 53 - 65. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999
- [Gerner, Ciroth, Kunst 2000] Gerner, K; Kunst, H.; Ciroth, A.: Erste Ergebnisse der Ökobilanzierung von Schienenfahrzeugen und ihrer Baugruppen. In: Umweltschutz im neuen Jahrhundert - Vom medialen Umweltschutz zum Sicherheitsdenken. Neuruppin TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky 2000
- [Giegrich 1995]: Giegrich, J.; Mampel, U.; Duscha, M.; Zazcyk, Prof. Dr. R.; Osorio-Peters, S.; Schmidt, T.: Bilanzbewertung in produktbezogenen Ökobilanzen-Evaluation von Bewertungsmethoden, Perspektiven. IFEU, Universität Trier, Zentrum für europäische Wirtschaftsforschung, In: UBA-Texte 23/95: Methodik der Produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung, Berlin 1995
- [TP 1: 1999] Projekt Bahnkreis, unveröffentlichtes Ergebnisdokument zu Teilprojekt 1 (Produktstrukturierung), Bearbeiter: Deutsche Bahn AG, 1999

[TP 8.5: 1999] Projekt Bahnkreis, unveröffentlichtes Ergebnisdokument zu Teilprojekt 8.5 (Anforderungsdefinition für die Modelle im Bahnkreis), Bearbeiter: TU Berlin, 1999

[UBA 1994]: Schmitz, Stefan; Oels, Hans-Jürgen; Tiedemann, Albrecht: Ökobilanz für Getränkeverpackungen - Vergleichende Untersuchung der durch verschiedene Verpackungssysteme für Frischmilch und Bier hervorgerufenen Umweltbeeinflussungen. Diskussionspapier des Umweltbundesamtes, Berlin 1994

[VDI 4600: 1997] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 4600: Kumulierter Energieaufwand, Begriffe, Definitionen Berechnungsmethoden, Düsseldorf, Juni 1997

[Volkwein, Gühr, Klöpffer 1996]: Volkwein, S.; Gühr, R.; Klöpffer, W.: The Valuation Step Within LCA, Part II: a formalized method of Priorization by Expert Panels. In: International Journal of Life Cycle Assessment 1(4), S. 182-192, Landsberg 1996



**Verbundprojekt BAHNKREIS**  
Förderkennzeichen des BMBF:  
02PV21334

---

## Band 4

# Ganzheitlicher Materialeinsatz

## Verfasser

**Dr. M. Ehinger und Dr. G. Löffler**

Institut für Schienenfahrzeugtechnik, TU Dresden

**Dr. H. Zeininger**

Siemens Corporate Technology, Erlangen

## Verzeichnis der Ergebnisberichte

---

Band 1            Projektgrundlagen

Band 2            LC-Modell

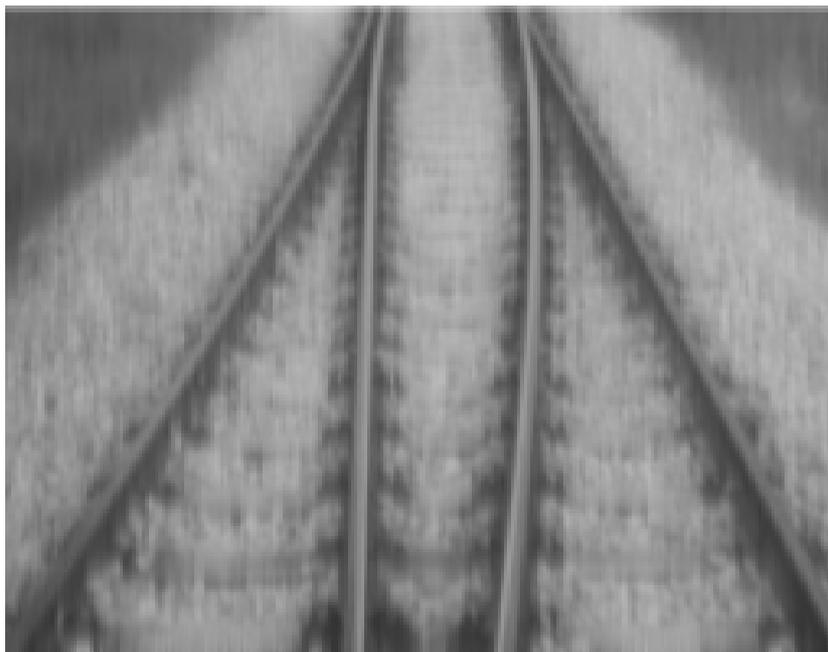
Band 3            Baugruppenmodell

|               |                                       |
|---------------|---------------------------------------|
| <b>Band 4</b> | <b>Ganzheitlicher Materialeinsatz</b> |
|---------------|---------------------------------------|

Band 5            Modellanwendung

Band 6            Anforderungen an Schienenfahrzeuge

| <b>Inhaltsverzeichnis</b>  | <b>Seite</b> |
|--|--------------|
| <b>PRÄAMBEL</b>  | <b>4</b>     |
| <b>A ZUSAMMENHANG ZWISCHEN KONSTRUKTION UND WERKSTOFFAUSWAHL</b>   | <b>6</b>     |
| <b>B LIFE CYCLE COSTING DES MATERIALEINSATZES</b>  | <b>13</b>    |
| <b>C UMWELTGERECHTER MATERIALEINSATZ</b>   | <b>16</b>    |
| <b>C1 Erzeugnis-Struktur</b>   | <b>18</b>    |
| <b>C2 Prozeßstruktur</b>   | <b>24</b>    |
| <b>C3 EndOfLife-Struktur, EOL</b>  | <b>28</b>    |
| <b>D NACHHALTIGE ENTWICKLUNG VON SCHIENENFAHRZEUGEN DURCH<br/>GANZHEITLICH OPTIMISIERTEN MATERIALEINSATZ</b> | <b>31</b>    |
| <b>References</b>  | <b>31</b>    |
| <b>Anlage 1: Funktionale Fahrzeugstruktur ET 420 mit Massen/Zug-Einheit</b>                                  | <b>32</b>    |
| <b>Anlage 2: Funktionale Fahrzeugstruktur Doppelstockwagen mit Massen</b>                                    | <b>35</b>    |
| <b>Anlage 3: Gliederungsstruktur der Material- und Mediengruppen</b>   | <b>39</b>    |



**Präambel**

Ziel des Abschlußberichts zum ganzheitlichen Materialeinsatz bei Schienenfahrzeugen ist es, die Bedingungen für eine ressourceneffiziente Materialauswahl darzustellen.

Die ganzheitliche Werkstoffauswahl [1] steht im engen Zusammenhang mit der Entwicklung und Auswahl der Bauweisen, den Fertigungsverfahren und Fügetechniken zur Herstellung neuer Fahrzeuge, dem ressourcenschonenden Betrieb, der präventiven und korrektiven Instandhaltung und dem Materialrecycling/Entsorgung.

Die qualitativen und wirtschaftlichen Anforderungen an den Schienenverkehr steigen stetig und können nur durch eine Verbesserung des Gebrauchswerts erfüllt werden. Im Vergleich der Verkehrsmittel weisen Schienenfahrzeuge heute die höchste Masse pro Sitzplatz auf, was teilweise begründbare aber auch schwer nachvollziehbare Ursachen hat und nicht nur mit der hohen Lebensdauer und Fahrleistung erklärt werden kann, Tab.1. Das Konzept des ganzheitlichen Materialeinsatzes ist u.a. als eine Entscheidungshilfe für den Leichtbau von Schienenfahrzeugen einsetzbar.

**Tabelle 1** Vergleich von Verkehrsmitteln anhand von Kennziffern [TU Dresden]

| <b>Verkehrsmittel</b> | <b>Reisege-<br/>schwindigkeit</b> | <b>Masse</b>   | <b>Anschaffungs-<br/>kosten</b> | <b>Antriebs-<br/>leistung</b> |
|-----------------------|-----------------------------------|----------------|---------------------------------|-------------------------------|
|                       | [km/h]                            | [t /Sitzplatz] | [1000 DM/ Sitzplatz]            | [kW/ Sitzplatz]               |
| Automobil             | 150                               | 0,3            | 7                               | 25                            |
| Reisebus              | 100                               | 0,4            | 12                              | 5                             |
| <b>S-Bahn</b>         | <b>120</b>                        | <b>0,7</b>     | <b>20</b>                       | <b>12</b>                     |
| IC                    | 250                               | 0,8            | 35                              | 10                            |
| Verkehrsflugzeug      | 800                               | 0,35           | 400                             | 750                           |

Der ganzheitliche Materialeinsatz im System „Schienenfahrzeug“ umfaßt neben dem Gebrauchswert und den LCC-Kosten, die Lifecycle –Prozesse sämtlicher Ebenen der funktionalen Fahrzeugstruktur.

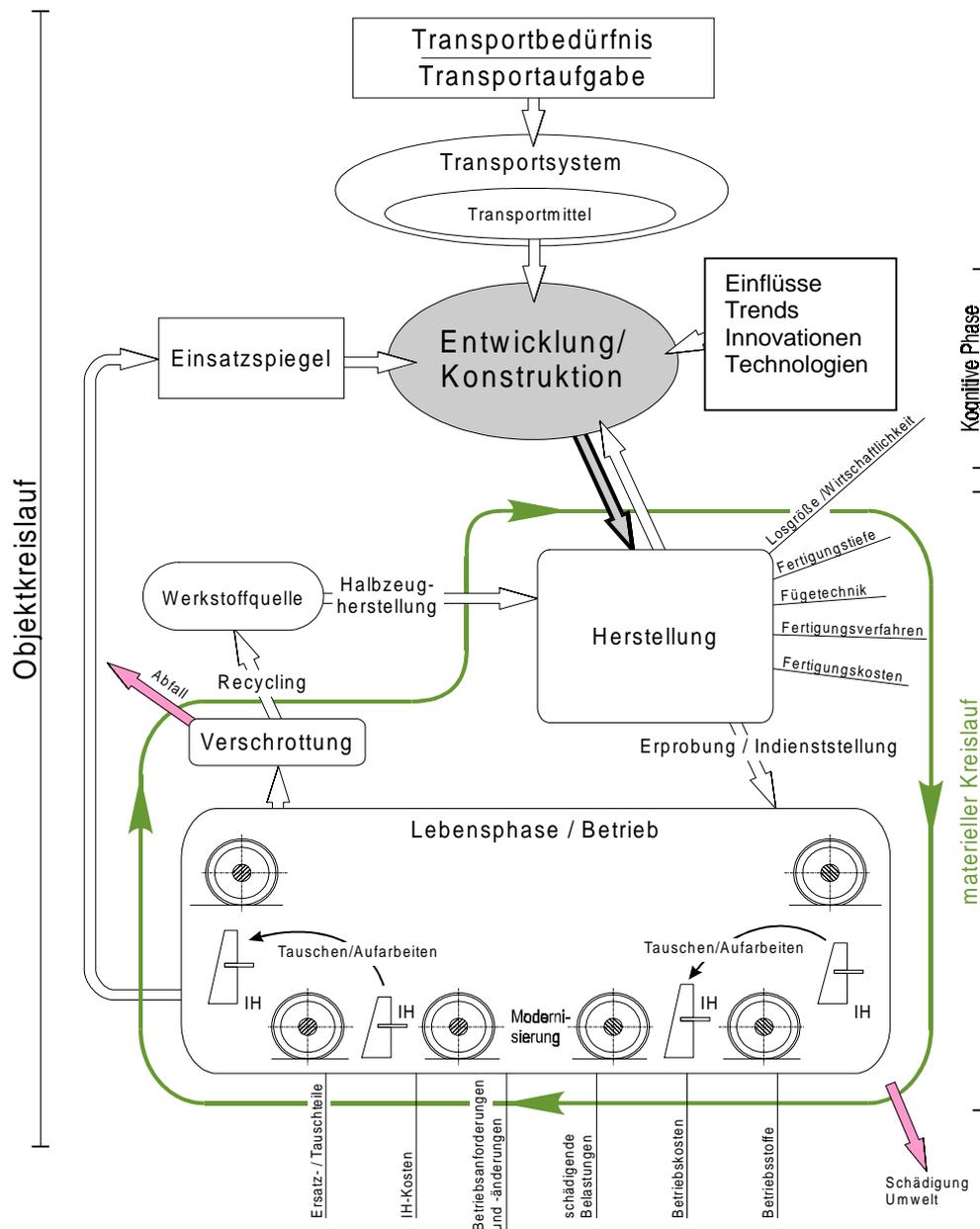
In Bild 1 ist der Betrachtungsumfang des Materials im System „Schienenfahrzeug“ skizziert (Quelle: TU Dresden)

---

[1] Zeininger H., Jansen H., Schmidt H., Mit dem Eco-ComPass auf Faktor 4 Kurs, VDI Berichte 1400 (1998) S.181

[ ComPass= COMprehensive Product ASSessment / =ganzheitliche Produktbewertung ]

**Bild 1 Betrachtungsumfang des ganzheitlichen Materialeinsatzes**



## **A Zusammenhang zwischen Konstruktion und Werkstoffauswahl**

Zur Planung des Fahrzeugeinsatzes mit dem Ziel der Erfüllung einer Verkehrsaufgabe mit möglichst wenigen Fahrzeugen und geringen Energiekosten müssen die Fahrzeuge der Beförderungsaufgabe gewachsen sein, d.h. artgerecht (Nah- od. Fernverkehrsfahrzeuge), kapazitätsgerecht (Anzahl zu befördernder Personen) und fahrplangerecht (entsprechende Leistung und Geschwindigkeit) eine bestimmte Strecke bedienen können. Für das nachhaltige Wirtschaften von Schienenfahrzeugen leiten sich für den ganzheitlich optimierten Materialeinsatz folgende Überlegungen ab:

- Die zum Einsatz kommenden Werkstoffe müssen Eigenschaften haben, die den Besonderheiten des Schienenverkehrs entsprechen:
  - spurgeführter Lauf von Stahlrädern auf stählernen Schienen,
  - in der Regel lange Züge, bestehend aus Lok und Wagen oder Triebzüge,
  - hohe Lebensdauer, i.d.R. viel höher als bei Kfz (ca. 30 Jahre),
  - hohe jährliche Laufleistungen (z.B. ICE: 450 000 km/a),
  - in vielen Fällen lange Zeiten des Betriebes ohne detaillierte Inspektionen,
  - hohe statische Radsatzlast (im Personenverkehr bis 170 kN).
- Schienenfahrzeuge sind fast immer öffentliche und Massenverkehrsmittel mit entsprechenden Beanspruchungen durch die Reisenden und damit mit besonderen Sicherheitsanforderungen gerade auch an die Werkstoffe.
- Schienenfahrzeuge sind immer dynamisch in drei Koordinatenrichtungen beansprucht. Die Bemessung ihrer Tragwerke steht unter dem Zwang begrenzter äußerer Abmessungen (Bezugslinien bzw. begrenzter Lichtraumbedarf) bei teilweise großen Stützabständen (bis 19 m) und hohen Punktlasten (Batteriekästen, Transformatoren). Die Eigenschwingungen dieser Konstruktionen werden wesentlich vom E-Modul der Werkstoffe bestimmt. Spezifische Leichtbaukonstruktionen (Doppelstockbauweise, Gelenkzüge mit kürzeren Fahrzeugmodulen) und i.d.R. wesentlich geringere Stückzahlen je Los (verglichen mit den Zahlen bei Straßenfahrzeugen) führen zu angepassten Fertigungs- und Fügemethoden. Fügemethoden mit Wärmeeintragung erfordern andere Werkstoffeigenschaften als Kaltfügeverfahren. Im tragenden Teil müssen die Fügeverbindungen jedoch hohe dynamische Belastungen bei hoher Zuverlässigkeit gewährleisten. Hohe Dichten der Antriebsleistung in Triebfahrzeugen, die über entsprechend dimensionierte Kraftleitwege auf die Schiene und an den Zughaken gebracht werden müssen, unterscheiden Schienenfahrzeuge wesentlich von anderen Landverkehrsmitteln, ebenso wie die im Hochgeschwindigkeitsverkehr erzielten Fahrgeschwindigkeiten.
- Je nach Bauteil/Baugruppe am Fahrzeug sind an die eingesetzten Werkstoffe unterschiedliche Forderungen zu stellen.

## Materialanforderungen

- Technische Anforderungen: EBO und BOStrab, UIC- und VDI-Vorschriften, z.B. zur Festigkeit (UIC 566, 515; VDV 152; DIN EN 12663), DIN EN ISO (z.B. 14040 und 14041 zur Ökobilanz),
- Fahrgast-Anforderungen: Personenbeförderungsgesetz, Verträglichkeit, Behaglichkeit,
- Sicherheits-Anforderungen: Lastannahmen, allg. Sicherheitsvorschriften, UIC651: Beschußfähigkeit, Stirnscheiben, UIC 564: Sicherheitsglas für Reisezugwagen,
- Brandschutz-Anforderungen allg. Brandschutzvorschrift, DIN 5510: Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen, z.B. spezielle Einrichtungen für brennbare Gase und Flüssigkeiten, Einsatz nichtbrennbarer Werkstoffe, Entflammbarkeit und Schutz brennbarer Werkstoffe,
- Instandhaltungs-Anforderungen: Instandhaltbarkeitsstudien: DIN IEC 60706 Schädigungsverhalten, RAMS - Forderungen, EN 50126 IEC 706-2: Maintainability of equipment, DIN 25448: Ausfalleffektanalyse,
- Umwelt-Anforderungen: Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, Altölverordnung, Bundesimmissionsschutzgesetz, VO zur Entsorgung halogener Lösemittel, sonst. Verordnungen...

In den Werken werden für die verschiedenen Zuliefer- und Einkaufsteile sog. Forderungsblätter aufgestellt. Die Forderungsblätter enthalten:

- alle wesentlichen technischen Forderungen, denen das Material/Zulieferteil genügen muß, damit es seinen Zweck im Schienenfahrzeug erfüllen kann
- alle relevanten mechanischen, technologischen, chemischen und thermischen Bedingungen, denen das Material/Zulieferteil entsprechen muß, damit die an das Material/Zulieferteil und an das gesamte Schienenfahrzeug gestellten Sicherheitsanforderungen, wie
  - Sicherheit gegen Zerstörung durch mechanische Beanspruchung
  - Sicherheit gegen Alterung
  - Sicherheit gegen Korrosion
  - Sicherheit hinsichtlich Entflammbarkeit und Brennbarkeit
- bei Zulieferteilen / Material, den Verwendungszweck, Abmessungen, Einbaubedingungen hinsichtlich der späteren Modernisierung der Fahrzeuge.

Die Vorgehensweise bei der **Werkstoffauswahl** im Konstruktionsprozeß kann wie folgt beschrieben werden:

- Sämtliche **Einsatzbedingungen** müssen hinreichend genau bekannt sein. Das umfaßt sowohl Betriebs- als auch Stillstandsphasen.

- Das aus den **Betriebsbedingungen** abgeleitete **Anforderungsspektrum** (Einsatzspiegel) an den Werkstoff muß von dessen **Eigenschaftsspektrum** lückenlos erfüllt werden.
- Sämtliche für den **Werkstoffeinsatz** wichtigen **Eigenschaften** müssen spezifiziert werden (Grundlage für Qualitätssicherung).
- Durch die **Verarbeitung** des Werkstoffs bei der Bauteilfertigung darf dessen **Eigenschaftsspektrum** nicht unzulässig verändert werden.
- Im Rahmen der **Qualitätssicherung** ist der Nachweis zu erbringen, daß der Werkstoff nach der Fertigung hinsichtlich der genannten Eigenschaften den **Spezifikationen** entspricht.

Bei der Auslegung stehen auf der einen Seite eine sicher zu betreibende Konstruktion (Fahrzeug) bekannter betriebsseitiger Beanspruchung und auf der anderen Seite im Labor einfach meßbare Kennwerte des zu verwendenden Werkstoffes. Das Bindeglied zwischen beiden Seiten wird in folgender Weise hergestellt:

- Ermittlung des örtlich wirksamen Spannungszustandes im betriebsbeanspruchten Bauteil (rechnerisch oder durch Messung an vorhandene Konstruktionen z.B. mittels Dehnmeßstreifen).
- Umrechnung des in der Regel mehrachsigen Spannungszustandes in einen gleichwertigen einachsigen Zustand (Vergleichsspannungshypothese).
- Werkstoffauswahl auf Basis des so berechneten Spannungswertes und der in einachsigen Laborprüfungen gemessenen sowie in Normen als Mindestwerte festgelegten Festigkeitskennwerte (unter Beachtung des Einflusses von Temperatur, korrosiven Wirkungen des Umgebungsmediums, zeitlich veränderlicher Belastungen).
- Verwendung von Sicherheitsfaktoren zur Festlegung der zulässigen Spannungen.

Bei der Werkstoff-Auswahl bieten sich aus Festigkeitsgründen meistens mehrere Werkstoffe oder Werkstoff-Gruppen an. Die endgültige Wahl des Werkstoffes erfolgt unter Berücksichtigung weiterer Aspekte wie: Kosten, Verfügbarkeit, Anforderungen an Herstellung, Ver- und Bearbeitung.

Neben den Materialdaten, insbesondere den aufgeführten Gebrauchswerteigenschaften sind bei der Betrachtung des life-cycle-optimierten Materialeinsatzes insbesondere Sicherheits-, Instandhaltungs-, Kreislauf- und Umwelteigenschaften maßgebend.

Bei tragenden Strukturen von Schienenfahrzeugen mit ihren großen räumlichen Ausdehnungen haben sich in Abhängigkeit der Werkstoffe spezielle Bauweisen und Herstellungstechnologien entwickelt. Bei der Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten sind insbesondere bei den Mischbauweisen wirtschaftliche Bauweisen zu erwarten.

Typische Werkstoffe für die tragenden Teile sind Stahl, Aluminium und Kunststoff. Die Aluminium-Leichtbauweise ist durch die mit großen stranggepreßten Trägern entwickelte schweißnahtarme Integralbauweise möglich geworden. Grenzen sind der Bauweise durch den geringeren E-Modul und die Mindestwanddicken der Profile infolge der Preßtechnologie gesetzt. Die Stahlbauweise bekommt Ganzheitlicher Materialeinsatz

durch die Entwicklung neuer räumlicher Leichtbaumodule wieder Aufschwung, jedoch sind auch hier durch die hohen zu übertragenden Beanspruchungen Grenzen gesetzt. Für den Leichtbau mit Faserverbundbauweisen werden durch neue Technologien (Wickeltechnik, Modulbauweise) interessante Einsatzmöglichkeiten geschaffen. Den Hybridbauweisen in der Kombination von Metallbauweisen mit Metall- bzw. Kunststoff-Sandwichelementen scheint die Zukunft zu gehören. Der damit aufgezeigte Trend zum verstärkten Kunststoffeinsatz führt zu völlig neuen Technologien, Strukturen bzw. Arbeitsteilungen mit signifikanten Auswirkungen auf die LCC und life-cycle-Verbräuche. Neben der hohen Maßgenauigkeit und Oberflächengüte, könnte mit kohlefaserverstärkten Kunststoffen bis zu 60% Gewicht zur Stahlbauweise und 40% des Gewichts gegenüber Aluminiumbauweisen eingespart werden. Dem Einsatz stehen die zur Zeit hohen Materialkosten entgegen. Mit Faserverbund-Bauweisen können allerdings sämtliche Funktionen, wie tragende Funktionen, Entdröhnen, Isolieren, Verkleiden, Versteifen, sichtbare Oberflächenstruktur (innen), etc. integriert werden– und damit können zusätzliche „Träger“ für diese Funktionen eingespart werden. Mit kohlefaserverstärkten Kunststoffen wird auch ein ausgezeichnetes Crashverhalten erreicht.

Durch „kalte“ Fügeverfahren, wie z.B. das Kleben der Scheiben, Fahrzeugköpfe und Sandwichdächer, werden deutlich sichtbare Unebenheiten im Material vermieden; außerdem verzichtet sich bei dieser Fügeverfahren die tragende Struktur nicht. Das nachträgliche Richten und Spachteln bewegt sich in vernachlässigbaren Dimensionen, während bei einem konventionellen Stahlrohbau bis zu 500 kg Spachtelmasse auf ein etwa 30 Meter langes Fahrzeug aufgetragen werden müssen. Die beim Schweißen, Spachteln und mechanischen Richten entstehenden Gase, Dämpfe und Stäube werden minimiert; Lärm wird ganz vermieden.

Das Optimum der Kosten- und Gewichtseinsparung wird mit fortschrittlicher Modulbauweise und verminderter Teilevielfalt erreicht. Entlastungen bei Energiebedarf und Fahrwegbeanspruchung sind bei den Leichtbauweisen zwangsläufig.

Anforderungen an das Recycling empfehlen ohnehin, die Konstruktion an den Universalwerkstoff anzupassen und nicht umgekehrt; generell ist auch aus Recyclinggründen eine Verringerung der Werkstoffsorten anzustreben.

Im folgenden ist eine Auswahl der erweiterten Werkstoff-Eigenschaften für den LC orientierten Schienenfahrzeugbau gelistet:

## Eigenschaften von Werkstoffen für Schienenfahrzeuge

- **Grunddaten:** Werkstoffgruppe, Werkstoffname, Werkstoffnummer, Werkstoffnorm, chem. Zusammensetzung, Verbundwerkstoff, Halbzeug,
- **Gebrauchs-Eigenschaften:** richtungsabhängig, temperaturabhängig
  - Dichte, Nennmaße, Masse, Reibwert,
  - Spannungs-Dehnungsverhalten,

- E-Modul, Prop.-grenze,
  - Bruchgrenze, Brucharbeit,
  - Kerbschlagzähigkeit, Kriechverhalten,
  - Ausdehnungskoeffizient,
  - Festigkeiten: Dauerfestigkeit,
  - Verschleißfestigkeit, Zug- Druck-Festigkeit,
  - Schub-Wechsel-Festigkeit,
  - Torsions-Wechsel-Festigkeit,
  - Biege-Wechsel-Festigkeit,
  - Streckgrenze, Bruchdehnung,
- Leitungs- bzw. Isolationseigenschaften:
  - spezifischer elektrischer Widerstand;
  - Magnetisierungseigenschaften,
  - spezifische Wärmeleitfähigkeit;
  - spezifische Wärmekapazität;
  - Temperatur-Koeffizient,
  - Lärm und Schwingungen,
  - Resistenzen: gegenüber Licht,
  - Wasser, Wasserdampf,
  - Öle, Fette, Benzin, Graffiti
  - Korrosion, Alterung,
  - Reinigungschemie,
- **Herstellungs-Eigenschaften:**
  - Fügeverfahren und -eigenschaften,
  - Schweißbarkeit, Wärmebehandlung
  - Formgebungsmöglichkeiten, (Biegen, Abkanten),
  - Kompatibilität mit anderen Werkstoffen,
  - Farbgebungsnotwendigkeit, - aufwand,
- **Sicherheits-Eigenschaften:**
  - Verformungs-Bruch-Verhalten (Crash-Verhalten),
  - Brennbarkeit, Rückfallebenen bei Ausfall,
  - Besonderheiten: Arbeitsschutz, Lagerung,..
  - Toxizität, Vandalismusresistenz,
- **Instandhaltungs-Eigenschaften:**
  - Austauschbarkeit, Instandhaltbarkeit,
  - Trennbarkeit, Richtbarkeit,
  - Aufarbeitbarkeit zur Weiterverwendung,
- **Kreislauf-Eigenschaften:**
  - Wiederverkaufswert,
- **Umwelt-Eigenschaften:**
  - Materialverbrauch, Energieverbrauch, Emissionen
  - Schadstoffe, Materialverträglichkeit, Wiederverwendung,
  - Weiterverwendbarkeit, Recycling

Bei den durch physikalische Größen bestimmbaren Eigenschaften (Tab.2) kann es lediglich Probleme mit der Beschaffbarkeit dieser Daten geben. Anders sieht es beispielsweise bei den technologischen Eigenschaften aus. Auch nach Konsultation von Werkstoffexperten (Prof. Zouhar) der TU Dresden konnten keine quantifizierbaren Werte ermittelt werden. Es gilt lediglich der Grundsatz, daß die Gebrauchswerteigenschaften durch eine Verarbeitung des Werkstoffs im Herstellungs- oder Instandhaltungsprozeß nicht oder nicht wesentlich verändert werden dürfen. Die Auswahl der Werkstoffe hängt eng mit der Bauteilform und der entsprechenden Herstellungs-Technologie zusammen. So ist von Aluminium-Strangpreßprofilen bekannt, daß es beim Zusammenschweißen von diesen zu Festigkeitsverlusten im

Schweißnahtbereich kommt. Neben einer besonderen Wärmebehandlung der Alu-Knetlegierungen sind Schweißnähte deshalb in weniger belastete Abschnitte zu verlegen, was u.U. erhebliche konstruktive Änderungen erfordert.

Die Trennbarkeit, Schneidbarkeit und Fügbarkeit von dünnen Metallblechen - die zunehmend auch im Schienenfahrzeugbau Verwendung finden - wird verbessert mit einer Reihe neuer Technologien (z.B. Wasserstrahlschneiden, Laserschweißen), für die hinsichtlich Werkstoff-Eigenschaften noch keine ausreichenden Erfahrungen vorliegen. Man muß anhand eines technologischen Prozesses die Werkstoff-Eigenschaften immer wieder neu abprüfen und auf die konkrete Situation anwenden.

Mit einer Werkstoff-Ident-Nummer kann die Verbindung zu den in einer Werkstoffdatenbank zusammengefaßten **Werkstoff- bzw. Gebrauchswerteigenschaften** hergestellt werden.

Die für das Materialkreislaufmodell wichtigsten (im TP9 abgestimmten) Werkstoff-Eigenschaften sind in der Tabelle 2 zusammengestellt und anhand zweier Beispiele mit konkreten Werten belegt.

**Tab.2** Werkstoffeigenschaften

| WS-Eigenschaften | Einheit                                     |                     | Beispiele                                      |                               |
|------------------|---|---------------------|--|-------------------------------|
|                  | richtungsabhängig                           | temperaturabhängig  | NiroSta (aus WS-HB nach EN) bei 20°C           | Silicon Carbid (SiC) nach CMS |
| allgemein:       | Werkstoffname                               | -                   | X6Cr13   | CF SC \$\$\$                  |
|                  | Werkstoffnummer                             | -                   | 1.400.26.02.0                                  | ?                             |
|                  | Halbzeug                                    | -                   | warmgewalztes Blech                            | Platten / Paneele             |
|                  | Dichte                                      | g/cm <sup>3</sup>   | 7,73   | 3...3,22                      |
|                  | WS-Kosten                                   | DM/kg               | 4...5  | 45...75                       |
|                  | Einzel-/Verbund-WS                          | -                   | Einzel-WS                                      | Einzel-WS                     |
| mechanisch:      | E-Modul                                     | MPa                 | 217.000  | 188...206 000                 |
|                  | Prop.(Streck)-grenze                        | N/mm <sup>2</sup>   | 195 (220)                                      | 175...192                     |
|                  | Bruchgrenze                                 | N/mm <sup>2</sup>   | 400...600                                      | 310...400                     |
|                  | Bruchdehnung                                | %                   | 19   | 14...15                       |
|                  | Dauerfestigkeit                             | N/mm <sup>2</sup>   | ?  | ?                             |
|                  | Zug-Druck-W.-Festigkeit                     | N/mm <sup>2</sup>   | ?  | ?                             |
| thermisch:       | Ausdehnungskoeffizient                      | 10 <sup>-6</sup> /K | 10,2   | ?                             |
|                  | (Erw.-)Schmelztemperatur                    | °C                  | 1100   | 2700...2827                   |
|                  | Entzündungstemperatur                       | °C                  | -  | -                             |
|                  | Brandverhalten, / -Test                     | -                   | -  | -                             |
|                  | Wärmeleitfähigkeit                          | W/(m*K)             | 25,9   | 90...200                      |
|                  | spezifische Wärmekapazität                  | J/(kg*K)            | 439  | 670...710                     |
| elektrisch:      | spez. elektr. Widerstand                    | Ω*m                 | 0,559*10 <sup>-6</sup>                         | 3...5*10 <sup>-8</sup>        |
|                  | Magnetisierungseigensch.                    | Sie/m <sup>2</sup>  | 10...6,7                                       | ?                             |
|                  | Verträglichkeit                             | -                   | entspr. Spannungsreihe                         | ?                             |
| technologisch:   | Fügbarkeit (heiß/kalt)                      | -                   | schweißbar                                     | kaltfügen                     |
|                  | Zerlegbarkeit(trennbar)                     | -                   | mechan. oder thermisch                         | mechanisch                    |
|                  | Richtbarkeit                                | -                   | vorhanden                                      | ?                             |
|                  | Austauschbarkeit                            | -                   | möglich  | möglich                       |
|                  | Wiederverwendbarkeit                        | -                   | möglich  | möglich                       |
|                  | Recyclingfähigkeit                          | %                   | 100  | 3...5                         |
|                  | Werkstoffverträglichkeit                    | -                   |  |                               |
| chemisch:        | Zusammensetzung (evtl. nur Zusatzstoffe <=) | %                   | C:0.08, Si,Mn:1, Cr:12-14, S:0.015, P:0.04, Fe | Si, C (Anteile nicht bekannt) |
|                  | Resistenzen gegen                           | -                   | Luft, Wasser, Reiniger                         | ?                             |
|                  | Wasserdurchlässigkeit                       | -                   | undurchlässig                                  | ?                             |
|                  | Alterungsbeständigkeit                      | -                   | sehr gut                                       | ?                             |
|                  | Korrosionsverhalten                         | -                   | beständig gegen interkristalline Korrosion     | ?                             |

|  |                      |   |                            |   |
|--|----------------------|---|----------------------------|---|
|  | Aussehen             | - | metallisch                 | ? |
|  | Oberflächenrauigkeit | - | glatt, je nach Bearbeitung | ? |

**B Life cycle costing des Materialeinsatzes**

Life cycle costing, LCC, ist „ein Verfahren zur Beurteilung von Investitionsalternativen und wird bei der Planung und Entwicklung von Systemen, Anlagen angewandt [2]. Ziel der LCC-Berechnung ist es, die Gesamtkosten sämtlicher Akteure im Lebensweg von Schienenfahrzeugen zu optimieren.

Die Anwendung des LCC nach DIN IEC 60300-3-3, Life cycle costing, erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Hersteller, Betreiber, Instandhalter und Recycler, um ein Kostenoptimum zum Vorteil aller Beteiligten zu erreichen. Insbesondere muß der Anbieter detaillierte Kenntnisse über die Infrastruktur des Käufers besitzen, [3]. Bei der erweiterten LCC werden auch die nachhaltigen Umweltaspekte über den gesamten Lebensweges berücksichtigt (s.Abschnitt C).

Die Kostenarten sind an anderer Stelle mehrfach beschrieben. U.a. beinhaltet das LCC-Modell die folgenden Kosten (Auszug, s. Ergebnisbericht Band 2)

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Beschaffungskosten    | Fahrzeuge, Dokumentation, Ausbildung  |
| Betriebskosten        | Energiekosten, Fahrwegkosten, Reinigungskosten,..   |
| Instandhaltungskosten | Korrektive und präventive Instandhaltung  |
| Recyclingkosten       | Wieder-/Weiterverwendung von Anlagen und Baugruppen<br>Wieder-/Weiterverwertung von Werkstoffen und Betriebsmitteln |
| Entsorgungskosten     | nicht verwertbare Teile/Materialien von Altfahrzeugen und Produktionsabfällen                                       |

Entscheidend für die Interpretation des Ergebnisses ist die Festlegung der Anforderungen sowie der Umfang der Untersuchung. Im allgemeinen sind verschiedene Alternativen, z.B. zum Antriebssystem, zur Raumaufteilung, zum Werkstoffeinsatz der tragenden Struktur, zur Zugbildungsmöglichkeiten, usw. zu vergleichen.

Materialkosten haben einen hohen Anteil am Beschaffungspreis (ca. 30 %). Darüberhinaus hat die Materialauswahl einen entscheidenden Einfluß auf die Kosten in der Nutzungsphase (z.B: Energie- und Instandhaltungskosten). Durch zunehmende Garantien zur Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltbarkeit wird die Materialauswahl verstärkt in der Entwicklung von Fahrzeugen, Anlagen und Baugruppen einbezogen, zumal, ähnlich wie auf dem Automobilmarkt, eine Rücknahme des Fahrzeugs zur stofflichen Verwertung zu erwarten ist.

Mit der LCC-Analyse können die Einsparpotentiale künftiger Fahrzeuggenerationen während des Betriebs und der Instandhaltung im Spannungsfeld der hohen Sicherheits- und Verfügbarkeitsanforderungen transparent gemacht werden [4].

---

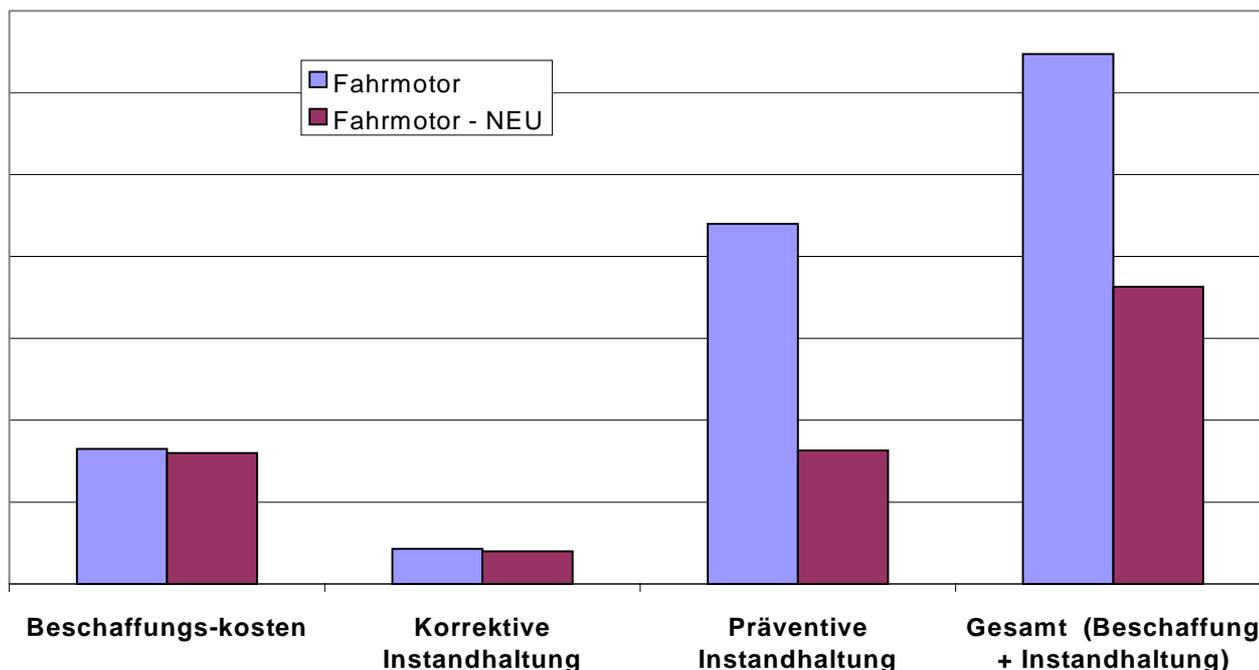
[2] Wübbenhorst, K.L., Life cycle costing for construction projects, in: Long range planning, 19 (1986), 87-97

[3] Trümpi A., ZEV+DET Glas.Ann.122 (1998), Heft 9/10

[4] Eberlein, M., Bedeutung der Datenmodellierung im LCC-Kenngrößen Management, VDI-Berichte 1334, S53-56 (1998)

Durch Einsatz eines Drehstrommotors, Verwendung von Hochleistungswerkstoffen, Einsatz von elektronischen Antriebssystemen sowie maßgeschneiderter Fristenpläne in der Instandhaltung können beispielsweise mehr als 30 % der im Laufe der Nutzungsdauer von 30 Jahren anfallenden Material- und Energiekosten eingespart werden. Beispiele: Fahrmotor ET 420, Bild 2, und ET 420, Bild 3.

**Bild 2:** Beschaffungs- und Instandhaltungskosten des Fahrmotors ET 420 im Vergleich

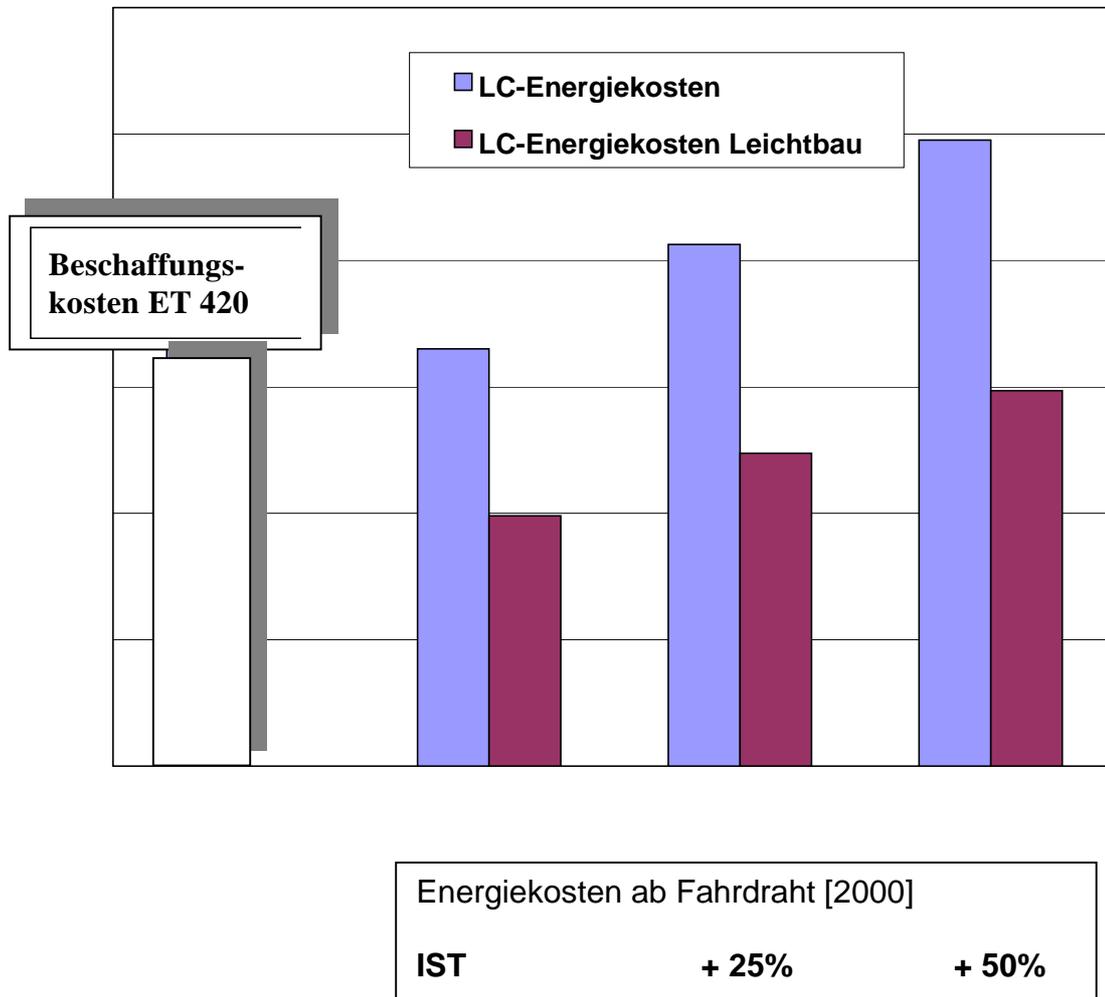


Neben dem technischen Potential der Bremsenergieerückspeisung um ca. 25 % können die Energiekosten wegen der fast linearen Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Masse bei einem Wechsel zu innovativen Leichtbauweisen deutlich reduziert werden. Für den ET 420 liegen die Energiekosten während einer 30 jährigen Nutzungsdauer trotz der günstigen Rechnung des Bahnstromtarifs ab Fahrdraht (Stand 1995) in der Größenordnung des Beschaffungspreises kompletter Schienenfahrzeuge! Unter Zugrundelegen geschätzter Entwicklungen der Energiekosten von ca.+20% innerhalb der nächsten 5 Jahre übersteigen die Energiekosten den Beschaffungspreis der Fahrzeuge. Unter nachhaltiger Anwendung der technisch machbaren „energy savings-Technologien (Rückspeisung, Leichtbau,..) kann der Ressourcenverbrauch mehr als halbiert werden.

Außerdem läßt sich Energie durch optimierte Fahrweise einsparen. Beim Fahren mit „Zeitrückhalt“ laufen die Fahrzeuge nach dem Beschleunigen und Halten der Höchstgeschwindigkeit ab einem bestimmten, vorher berechneten Punkt ohne Traktionsleistung aus.

Die energieoptimierte Fahrweise kann durch eine gewisse Zeitverzögerung und eine Begrenzung der Taktdichte erkauft werden. Hier muß der Betreiber den optimalen Mittelweg für sein Betriebskonzept finden. Technisch ist das Fahren mit Zeitrückhalt in automatisierten Systemen machbar.

**Bild 3** Vergleich der Energiekosten von ET 420 und einer Leichtbauweise (-40%) über den Lebensweg von 30 Jahren zu den Beschaffungskosten des ET 420 (rel.Einheiten) unter Zugrundelegung geschätzter Entwicklungen der Energiekosten



## C Umweltgerechter Materialeinsatz

Der umweltgerechte Materialeinsatz zielt auf das Wirtschaften in Kreisläufen und geht somit über die recyclinggerechte Konstruktion hinaus. Handlungsfelder bieten sich für alle am Produktlebenszyklus Beteiligten vom Produktentwickler, Hersteller über Betreiber, Instandhalter, Nachnutzer und Entsorger.

Allgemeine Ziele sind

- die Erhaltung wertvoller Ressourcen und
- die Vermeidung und Verringerung der ökologischen Belastungen beim Umgang mit Schienenfahrzeugen.

In der Literatur werden in großem Umfang Prinzipien zur recyclinggerechten Konstruktion beschrieben (u.a. Siemens Norm 36350). Die **Recyclinggerechtheit** drückt aus, in welchem Umfang das Produkt bereits bei der Herstellung auf die Erfordernisse der späteren Zerlegung, Werkstofftrennung und Entsorgung bzw. Aufbereitung zur Wieder- u. Weiterverwendung oder Wieder- u. Weiterverwertung vorbereitet ist. U.a. unterscheidet man das Materialrecycling von Produktionsabfällen und Materialfraktionen gebrauchter Produkte von dem Produktrecycling wieder-/weiterzuverwendender Komponenten, Baugruppen, Anlagen und Fahrzeuge. In diesem Zusammenhang wird auf die VDI-Richtlinie 2243 „Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte“ [5] verwiesen

In Erweiterung dieser Prinzipien auf den gesamten Lebensweg langlebiger Schienenfahrzeuge mit einer Nutzungsdauer von ca. 30 Jahren wird der Begriff „Kreislauffähigkeit“ neu definiert.

**Kreislauffähigkeit** ist eine komplexe Produkteigenschaft, die beschreibt, wie ein Produkt (Schienenfahrzeug, Komponente, Bauteil) auf die im Produktlebenszyklus unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten sinnvollen Recyclingkreisläufe vorbereitet ist. [s. Bahnkreis-Ergebnisdokument, TP 16]

**Kreislauffähige** Fahrzeuge, Anlagen, Baugruppen und Werkstoffe sind also solche Fahrzeuge, Anlagen, Baugruppen und Werkstoffe, „... bei denen sowohl hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften als auch seitens der im Entsorgungsmarkt vorhandenen Verwertungsverfahren und Kapazitäten Recyclingmöglichkeiten gegeben sind.“ [6].

Kreislauffähigkeit ist damit eine Eigenschaft, die sich relativ problemlos auf wieder-/weiterzuverwendende Fahrzeuge, Anlagen, Baugruppen und weiterzuverwertende sortenreine Werkstoffe in den Lebenswegphasen Herstellung, Instandhaltung und Recycling anwenden lässt.

---

[5] VDI 2243 Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte. VDI-Verlag, Düsseldorf 1993

[6] Koch, G.: Kreislaufforientierte Produktgestaltung und Bewertung der Recyclinggerechtigkeit von Schienenfahrzeugen. Vortrag zur 2. Schienenfahrzeugtagung RAD '97

Auf Produktebene wird die Kreislauffähigkeit neben der Wiederverwendung im gleichen Fahrzeug bei der Tauschteilwirtschaft der Instandhaltung und der Weiterverwendung in anderen Anwendungsgebieten insbesondere durch die Vielfalt der eingesetzten und maßgeschneiderten Materialien bestimmt. Auf Werkstoffebene wird die Kreislauffähigkeit nicht nur von den Materialeigenschaften, sondern vor allem von der Bauteilfunktion, den Abmessungen, der Verbindungstechnik (Werkstoffverbünde, Verbundwerkstoffe, Verbindungsarten), der Zugänglichkeit und den verfügbaren Verwertungstechnologien beeinflusst.

Angestrebt wird der Einsatz umweltgerechter, innovativer Fertigungstechnologien mit einem möglichst hohen Grad an Ressourceneffizienz während des Betriebs. Als Grundforderungen für die Fahrzeug-Konstruktion sind u.a. zu berücksichtigen (Auszug aus dem Umwelt-Vorsorgeprofil der Deutschen Bahn):

1. Die zeitliche Vorgabe hinsichtlich Produktlebensdauer und Baugruppentausch und Modernisierung, z.B. Innenausbau nach 7 Jahren.  
Verschleißteile (Lebensdauer <1 Jahr) sollen voll recyclingfähig sein; bei Austauschteilen (Lebensdauer 1 – 7 Jahre) soll die Recyclingquote mindestens 90% betragen – von langlebigen Fahrzeugteilen (= Lebensdauer Fahrzeug) soll die Recyclingquote mindestens 80% betragen.
2. Die Konstruktion soll auf effiziente Modernisierung, z.B. durch einfache Tausch- und Demontierbarkeit, ausgerichtet werden.
3. Werkstoffe und Werkstoffverbindungen mit hohem Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt sind vollkommen auszuschließen.
4. Werkstoffe und –Verbünde mit einem eco- toxikologischen Potential, für die u.a. eine Verwendungsbefristung besteht oder wahrscheinlich wird, sollen vermieden werden.
5. Der Traktionsenergiebedarf ist durch Leichtbau und optimierte Antriebstechnik zu reduzieren.
6. Energie von Brems- und Wärmeabführprozessen ist effizient weiterzunutzen.
7. Hochwertige Verwertungsmöglichkeiten der Baugruppen und Anlagen sind vor dem Materialrecycling darzustellen, um die Erlöse aus dem Recycling zu optimieren.
8. Betriebstoffsorgung, Demontage und Reinigung haben so zu erfolgen, daß keine umweltschädigenden Stoffe in Erdreich, Wasser oder Luft gelangen können.
9. Wiederverwendbare Stoffe sind der Wiederverwendung zuzuführen.
10. Nicht verwertbare Stoffe sind umweltverträglich zu entsorgen.

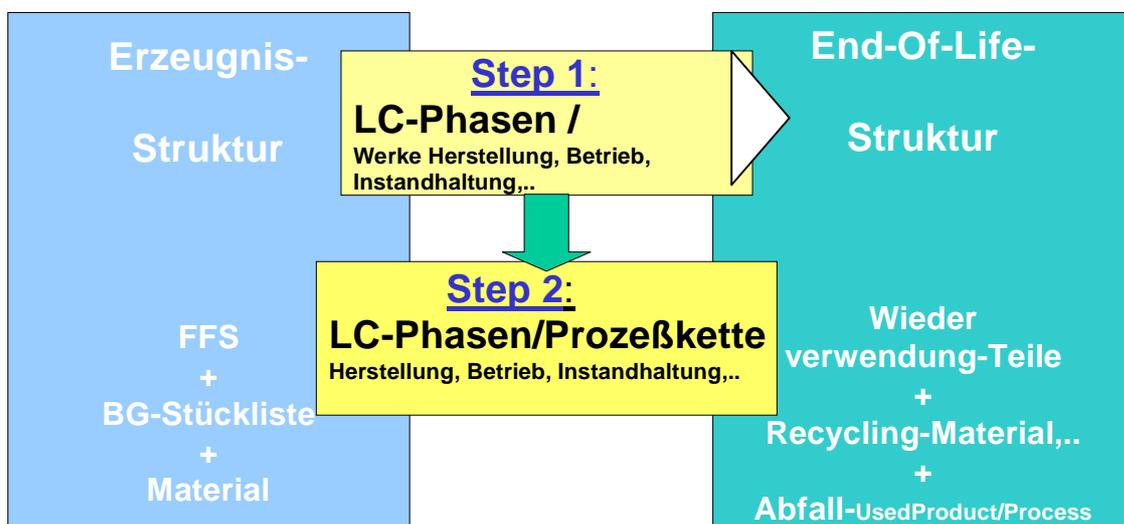
Forderungen der Kreislaufwirtschaft gelten für Baugruppen und Bauteile von Neubaufahrzeugen und werden nach Möglichkeit sinngemäß für eingesetzte und instandzuhaltende Fahrzeuge angewandt. Um zu klären in welchem Umfang in dem Fahrzeug Materialien eingebaut werden bzw. Betriebsstoffe verwendet werden, die den Forderungen der Kreislaufwirtschaft / Recyclingfähigkeit, Umweltverträglichkeit (nicht) entsprechen, sollten über alle Lebenszyklus-Phasen hinweg fahrzeugspezifische Materialübersichten erstellt werden.

Modernisierte und Neu- Fahrzeuge sollten hinsichtlich der Umweltverträglichkeit, der Recyclingfähigkeit, der Nichtbrennbarkeit der Werkstoffe etc. grundsätzlich besser sein als das bestehende Fahrzeug.

Mit Hilfe der ganzheitlichen Materialbewertung über dem gesamten Produktlebenszyklus soll eine kreislaufgerechte Produktentwicklung dokumentiert werden. Die Bewertung erfolgt im Rahmen einer **Erzeugnis-Prozeß-Struktur-Matrix** [7] in den Blöcken (Bild 4):

1. **Erzeugnisstruktur**
2. **Lebenswegphasen / Prozesse und**
3. **EndOfLife-Struktur (EOL)**

Bild 4: Schema der Erzeugnis-Prozeß-Struktur-Matrix



## C1 Erzeugnis-Struktur

Zur ganzheitlichen Bewertung des Materialeinsatzes der Fahrzeuge ist grundsätzlich eine Materialdatenerfassung der Fahrzeuge und Baugruppen notwendig. Hierzu wurde eine auf der funktionalen Fahrzeugstruktur, FFS, – für die zu untersuchenden Fahrzeuge in den Anlagen 1 und 2 dargestellt - aufbauende im Sinne einer erweiterten Stückliste durchgängig strukturierte Erfassungsmatrix gewählt.

[7] Bahnkreis Dokument: 9.5.2.: Festlegung der Untersuchungsmethode für die Material- und Energieflußanalyse

Der Umfang der Stücklistendaten umfaßt dabei

**Einheit – Benennung – Sach- Nr./ Normbezeichnung – Werkstoff – Masse**  
 der jeweiligen Betrachtungseinheit.

Die Ermittlung sämtlicher Materialdaten für alle Einzelteile eines Schienenfahrzeuges ist ein sehr aufwendiger Prozeß, da im Schienenfahrzeugbereiche noch keine spezifische Material-Datenbank existiert. Besonders erschwert ist die Ermittlung der Werkstoffzusammensetzung der Triebzüge ET 420, da sich die Lieferung der ausgewählten Bauserien über 30 Jahre erstreckt und die Triebzug-Serien von verschiedenen Konsortien stammen.

**In den Anlagen 1 und 2 sind die Massen der Baugruppen über der gesamten funktionalen Fahrzeugstruktur, FFS, des ET420 und des Doppelstockwagens, DoSto, nach folgendem Schema gelistet**

Quelle: ET 420: Siemens Verkehrstechnik, DoSto: Bombardier Transportation

|                         |                    |
|-------------------------|--------------------|
| <b>Schienenfahrzeug</b> | <b>z.B. ET 420</b> |
|-------------------------|--------------------|

|                       |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| <b>Anlagen</b>        | <b>z.B. Antriebssystem</b> |
| <b>Hauptbaugruppe</b> | <b>z.B. Antrieb</b>        |
| <b>Baugruppe</b>      | <b>z.B. Fahrmotor</b>      |

**Für die ganzheitliche Materialbewertung/-auswahl wird die FFS auf Bauteile, Komponenten und Werkstoffe erweitert [TP 9], s.Tab.3**

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| <b>Bauteile / Komponenten / Werkstoffe</b> | <b>z.B. Ständer (s.Tab.4)</b> |
|--|-------------------------------|

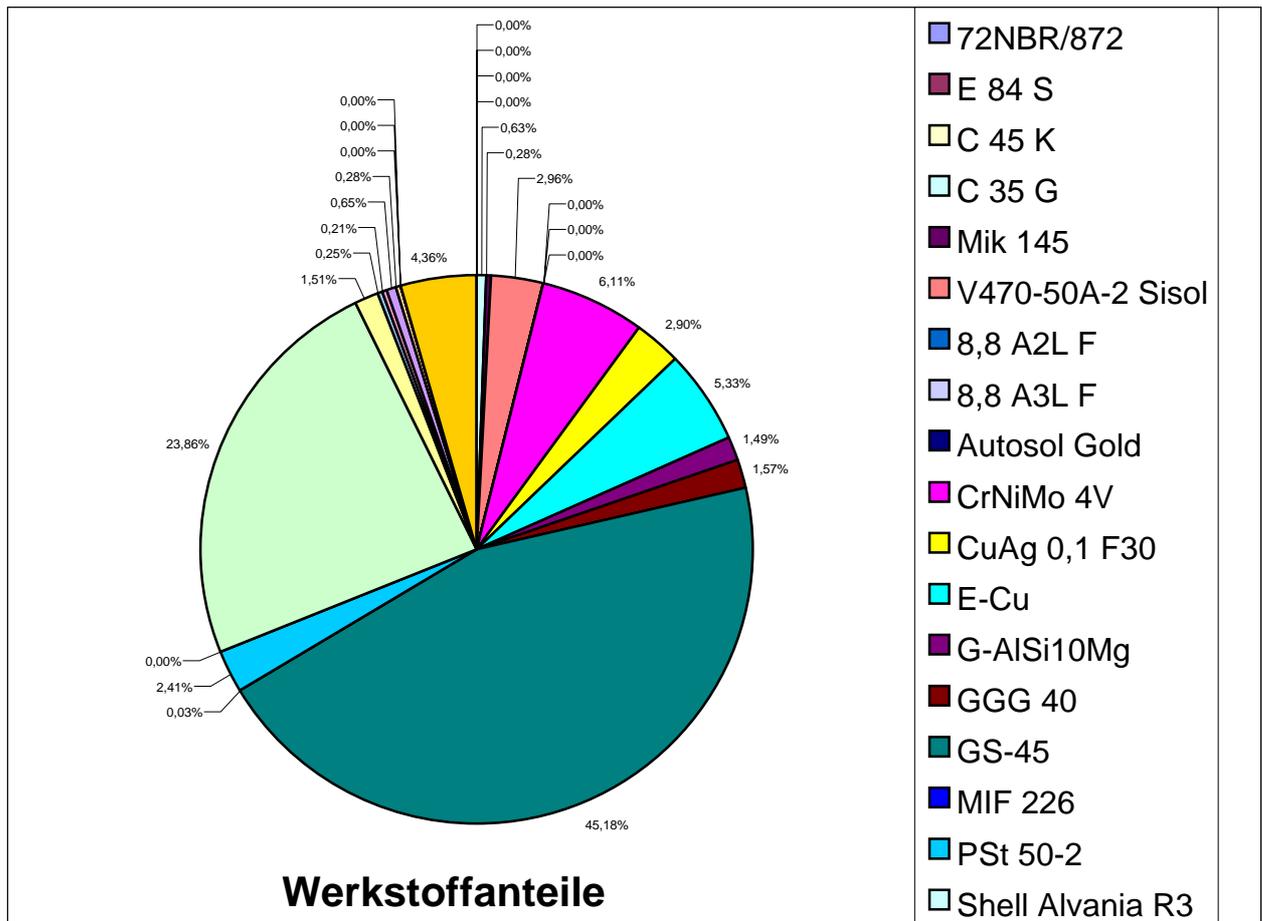
Die Materialdaten für den Fahrmotor des ET 420 sind in Tab. 3 zusammengefaßt (Materialerfassung: 1232 kg von ca.1300 kg). Verschwindende Anteile ohne Angabe.

| <b>Tabelle 3</b>    |                          | <b>Fahrmotor ET 420 /Zusammensetzung</b> |                                |                    | <b>1300</b>       |
|---------------------|--------------------------|--|--------------------------------|--------------------|-------------------|
| <b>FFS-Position</b> | <b>Einheit/Stückzahl</b> | <b>Benennung</b>                         | <b>Sach-Nr Normbezeichnung</b> | <b>Werkstoff</b>   | <b>Masse [kg]</b> |
| <b>4.4.1</b>        |                          | <b>Fahrmotor</b>                         |                                |                    | <b>1232,73</b>    |
| <b>4.4.1.1</b>      | <b>1</b>                 | <b>Ständer</b>                           |                                | GS-45              | 308,00            |
|                     |                          |  |                                | St 1003            | 243,00            |
|                     |                          |  |                                | U St 37-2          | 13,50             |
|                     |                          |  |                                | E-Cu               | 16,20             |
|                     |                          |  |                                | St 37-1 k          | 2,66              |
|                     |                          |  |                                | sonstiges          | 49,34             |
| <b>4.4.1.2</b>      | <b>1</b>                 | <b>Läufer</b>                            |                                | V470-50A-2 Sisol   | 133,60            |
|                     |                          |  |                                | 36 CrNiMo 4V       | 65,60             |
|                     |                          |  |                                | E-Cu kaptonisiert  | 41,00             |
|                     |                          |  |                                | GS 45              | 31,73             |
|                     |                          |  |                                | CuAg 0,1 F30       | 31,11             |
|                     |                          |  |                                | GGG 40             | 16,80             |
|                     |                          |  |                                | St 1203            | 12,20             |
|                     |                          |  |                                | PSt 50-2           | 9,00              |
|                     |                          |  |                                | C 35 G             | 6,71              |
|                     |                          |  |                                | St 60              | 3,05              |
|                     |                          |  |                                | Mik 145            | 3,05              |
|                     |                          |  |                                | MIF 226            | 0,30              |
|                     |                          |  |                                | sonstiges          | 7,00              |
| <b>4.4.1.3</b>      | <b>1</b>                 | <b>Lagerschild AS</b>                    |                                | GS-45              | 55,00             |
|                     |                          |  |                                | St 1003            | 8,00              |
|                     |                          |  |                                | St 1003            | 0,32              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Leitblech AS</b>                      |                                | St 1003            | 0,33              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Förderscheibe AS</b>                  |                                | St 52-3            | 7,00              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Lagerdeckel AS, außen</b>             |                                | PSt 50-2           | 2,50              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Labyrinthring, außen</b>              |                                | 72NBR/872          |                   |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Dichtring OR 115 2,5</b>              |                                | GS-45              | 90,00             |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Lagerschild BS</b>                    |                                |                    |                   |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Rillenkugellager</b>                  |                                | PSt 50-2           | 4,00              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Lagerdeckel BS, innen</b>             |                                | St 1003            | 0,24              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Leitblech BS</b>                      |                                | PSt 50-2           | 0,60              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Förderscheibe BS</b>                  |                                | PSt 50-2           | 5,00              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Lagerdeckel BS, außen</b>             |                                | 72NBR/872          | 1,35              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Dichtring 0R189,2-5,7</b>             |                                | C45 K              |                   |
|                     | <b>1</b>                 | <b>PAFED</b>                             |                                | PSt 50-2           | 4,80              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Lüfternabe</b>                        |                                | G-AlSi10Mg         | 16,00             |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Lüfterkranz</b>                       |                                | St 50-2            | 0,95              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Druckscheibe AS</b>                   |                                | St 50-2 oder 20Mn5 | 1,30              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Druckscheibe BS</b>                   |                                |                    | 0,19              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Dichtring D55 0142</b>                |                                | St 1003            | 4,10              |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Kommutatordeckel</b>                  |                                | 31,13 kg USt 37-2  | 33,00             |
|                     |                          |  |                                | 1,87 kg St 1203    |                   |
|                     | <b>1</b>                 | <b>Luft Eintrittshaub</b>                |                                | 2,1kg USt 37-2     | 4,20              |

|   |              |               |
|---|--------------|---------------|
|   | e            | 2,1kg St 1203 |
| 1 | Filterrahmen | E 84 S        |
| 1 | Kohlebürste  | 8,8 A3L F     |

Im Überblick ergeben sich folgende Materialarten und -sorten (Bild 5).

**Bild 5 Werkstoffanteile Fahrmotor ET 420**



Die Einteilung in Materialgruppen, -arten, -typen zur späteren Bewertung der Kreislauffähigkeit erfolgt DV-technisch nach der abgestimmten Stoffliste von TP 9.1.2.; sie ist Bestandteil des Wirkungsgefüges zur umweltgerechten Produktgestaltung. So wird im Bilanzierungsbericht u.a. über eine Datenbankabfrage ermittelt, welche Materialtyp/-arten/-gruppen in welchen Mengen im Fahrzeug eingesetzt werden, oder z.B. in welchen Erzeugniselementen Verbundwerkstoffe (Materialart) verwendet werden. Über die funktionale Fahrzeugstruktur und spezifische Werkstoff-Daten können die Werkstoffanteile ermittelt werden.

Mit der Angabe der Materialsorte sollen auch die Beziehungen zu den gesetzlich definierten Problemstoffe, den Materialhauptkomponenten und den Werkstoffeigenschaften hergestellt werden. Über die Klassifizierung in Werkstoffe, Hilfsstoffe, Betriebsstoffe, Rohstoffe... kann die

Datenbank danach abgefragt werden, wie viele Hilfsstoffe oder Gefahrstoffe im Erzeugnis sind. Von Werkstoffen mit problemstoffhaltigen Inhaltsstoffen werden die

**Problemstoff -Menge, - art und -Einstufung**

ermittelt. Über die erweiterte Erzeugnisstruktur kann so die Verteilung der Problemstoffe in Materialien, Bauteilen, Baugruppen, Anlagen und im Fahrzeug ermittelt und in das Wirkungsgefüge bei der Konstruktion neuer Fahrzeuge mit innovativen Instandhaltungs- und Recyclingkonzepten eingebracht werden.

Die weitere Zuordnung der Werkstoffe/Fahrmotor nach der Stoffliste aus TP 9.1.2 ist in Tab. 4 dargestellt. (Erfassung 1126 kg von ca.1300 kg).

**Tabelle 4** Stoffliste Fahrmotor

| Mat.erialart       | Materialtyp  | Material-sort       | Summe          | [%]    | Anwendung                                      |
|--------------------|--|---------------------|----------------|--------|--|
| <b>Stoffklasse</b> |  |                     | <b>1126 kg</b> |        |  |
| 1.1                | unlegierter Stahlguß/<br>mind. Zugfestigkeit von 440 Mpa,<br>0,20-0,30% C-Gehalt           | GS-45               | 484,73         | 37,29% | Maschinenbaus                                  |
| 1.1                |  | St 1003             | 255,99         | 19,69% | DIN 17100-80                                   |
| 1.2                | Sauerstoffhaltiges Cu mit >99,9 % Cu   | E-Cu                | 57,2           | 4,40%  | DIN 1787;                                      |
| 1.2                |  | CrNiMo 4V           | 65,6           | 5,05%  |  |
| 1.1                | Allgemeiner Baustahl (unlegiert)   | USt 37-2            | 46,73          | 3,59%  | Schweißkonstruktionen                          |
| 1.1                |  | V470-50A-2<br>Sisol | 31,73          | 2,44%  |  |
| 1.4                | Silberbronze mit 0,1% Ag-Gehalt,<br>mind. Zugfestigkeit von 300 MPa                        | CuAg 0,1 F30        | 31,11          | 2,39%  |  |
| 1.1                | allgemeiner Baustahl (unlegiert)<br>mit mind. Zugfestigkeit 500 Mpa,<br>C-Gehalt ca. 0,37% | PSt 50-2            | 25,9           | 1,99%  | <b>DIN 17100-80</b><br>Verwendung suchen       |
| 1.1                |  | St 1203             | 16,17          | 1,24%  | <b>DIN 17100-80</b>                            |
| 1.2                | Al-Gußlegierung, mit 10% AlSi-Anteil.<br>S.263   | G-AISI10Mg          | 16             | 1,23%  | warmaushärtbare<br>Gußstücke;<br>Zylinderköpfe |
| 1.1                | Gußeisen mit Kugelgraphit,<br>mind. Zugfest. 4MPa???                                       | GGG 40              | 16,8           | 1,29%  | <b>DIN 1693</b>                                |
| 1.1                | unlegierter Stahl mit 0,35% C,<br>weichgeglüht   | C 35 G              | 6,71           | 0,5%   | Hebel, Pleuelstangen                           |
| 1.1                | Allgemeiner Baustahl (unlegiert)   | St 37-1k            | 2,66           | 0,20%  | <b>DIN 17100-80</b>                            |
| 1.1                | Allgemeiner Baustahl (unlegiert)   | St 50-2             | 2,25           | 0,17%  | Kolbenstangen,<br>Bolzen,                      |
| 1.1                | Allgemeiner Baustahl (unlegiert)   | St 52-3             | 7              | 0,54%  | schweißbarer Stahl<br>hoher Festigkeit         |
| 1.1                | Allgemeiner Baustahl (unlegiert)   | St 60               | 3,05           | 0,23%  | für Verschleißteile                            |
| 1.1                |  | MK75 H+A+P          | Feder          |        |  |
|                    |  | Paste G             | Paste          |        |  |
|                    |  | F-LGG_P             | Isolierung     |        |  |
|                    |  | GLB 186             | Isolierung     |        |  |

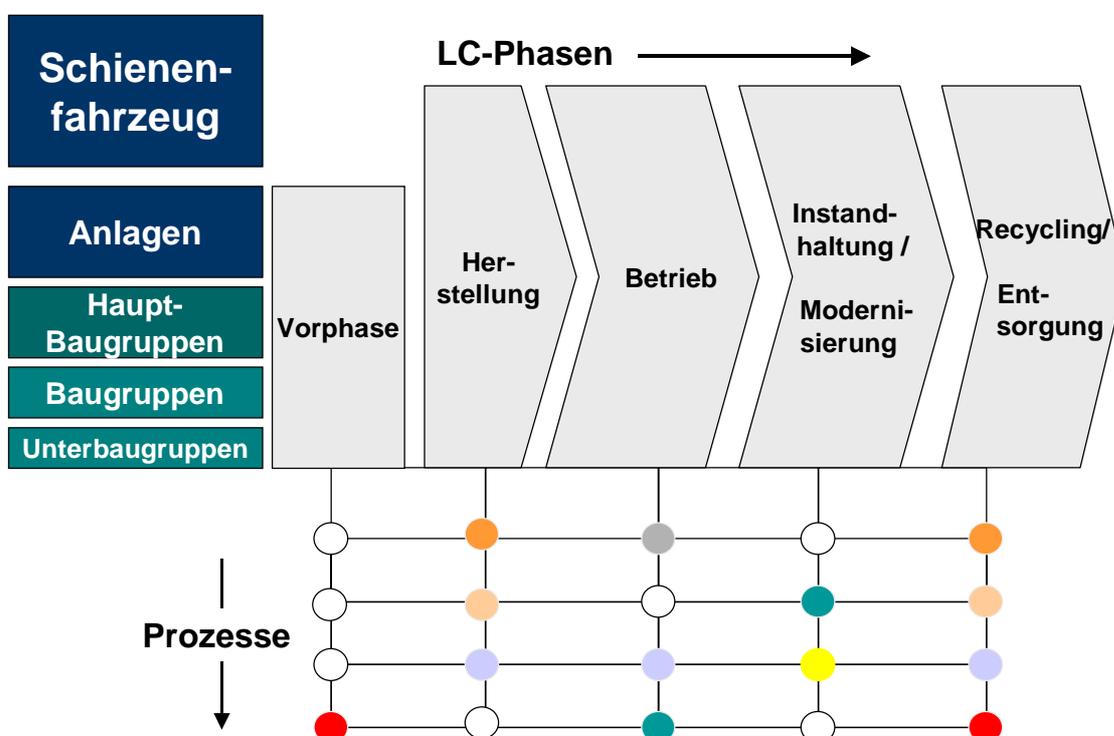
|  |           |       |       |
|--|-----------|-------|-------|
|  | Sonstiges | 56,34 | 4,33% |
|--|-----------|-------|-------|

## C2 Prozeßstruktur

Auf jeder Stufe der Erzeugnisstruktur erfolgt eine Betrachtung der Lebensweg-Prozesse. Ziel ist die jeweils durchgängige Analyse der Lebensweghauptphasen.

Die Prozeßstruktur bildet die Prozesse und Aktivitäten ab, die das betrachtete Erzeugnis (in diesem Fall die Baugruppe bzw. Teile bzw. Werkstoffe) über den gesamten Lebensweg durchläuft. Für jeden Abschnitt des Lebenswegs werden dann mit den Prozessen verbundene Material- und Energieflüsse erhoben (Bild 6).

Bild 6 Schema der Prozeßstruktur



Ziel ist die jeweils durchgängige Analyse der Lebensweghauptphasen. Es ist aber kaum zu erwarten, daß Materialeinsatz und Medienverbräuche zu sämtlichen Einzelprozessen zur Herstellung und Instandhaltung der Baugruppen und Anlagen ermittelt werden können.

Der **"2-Step-Approach"** bietet einen pragmatischen Lösungsansatz ([7], s. Bericht TP 9.5.2):

Vor jeder Detaillierung in Einzelprozesse soll eine Auswertung der signifikanten Beiträge der einzelnen Lebenswegphasen im Modell zum Gesamtergebnis erfolgen. Wenn aufgrund dieser Abschätzung bestimmte Lebenszyklusphasen besonders relevant erscheinen, sollen für diese Phasen die Prozeßketten genauer untersucht werden.

Zu folgenden Kriterien werden über den gesamten Lebensweg Daten ermittelt.

|  |   |
|--|---|
| 1. Materialinput / Konstruktion, Montage /                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Materialsorte, -art, -typ, -gruppe</li> <li>Masse</li> <li>Materialkosten</li> <li>Fertigungskosten</li> <li>Materialspezifische Eigenschaften</li> <li>Inhaltsstoffe / Problemstoffe (Stofflistenindex, Gesetze, VO)</li> </ul> |
| 2. Medienverbräuche / Herstellung, Betrieb, Instandhaltung, Entsorgung | <ul style="list-style-type: none"> <li>Energieverbrauch</li> <li>Betriebsmittel</li> <li>Emissionen (Wasser, Luft,..).</li> </ul>   |
| 3. Abfall  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menge,</li> <li>Materialtyp/ -sorte, Beschreibung / Zustand /</li> <li><u>Abfallschlüssel nach europäischem Abfallkatalog</u></li> <li>Verwertung/ Beseitigung</li> <li>Erlöse / Kosten</li> </ul>                               |

Als Beispiel sind die Daten zur Herstellungsphase des Fahrmotors in Tab. 5 zusammengefaßt. Die detaillierten Ergebnisse sind in den Dokumenten 9.5.3. gelistet.

**Tabelle 5** Prozeßdaten zur Herstellung eines Fahrmotors / ET420

| <b>Materialinput</b>      |                 |
|---------------------------|-----------------|
|                           | <b>kg/Motor</b> |
|                           | <b>1345,1</b>   |
| Elektrobleche, Stabstahl, | 1175,0          |
| Gußteile                  | 15,7            |
| Alu-Barren                | 49,5            |
| Kupfer                    | 90,5            |
| Isolierharze              | 6,3             |
| Lacke                     | 3,5             |
| diverse Öle               | 1,8             |

|   |                             |                   |
|---|-----------------------------|-------------------|
|   | Dieselmotorkraftstoff       | 2,8               |
| <b>Energie</b>                              |                             |                   |
|   |                             | <b>kWh/Motor</b>  |
| <b>Energieverbrauch</b>                     |                             | <b>1045,0</b>     |
|   | Erdgas (Trockenöfen)        | 44,0              |
|   | Strom                       | 519,0             |
|   | Fernwärme                   | 482,0             |
| <b>Wasser</b>                               |                             |                   |
|   |                             | <b>m³ / Motor</b> |
| <b>Wasserbezug</b>                          | öffentliches Netz           | 269,0             |
|   |                             | <b>kg /Motor</b>  |
| <b>Emissionen aus Energieverbrauch</b>      |                             | <b>507,0</b>      |
|   | CO2                         | 507,0             |
| <b>Emissionen organischer Lösungsmittel</b> |                             | <b>0,5</b>        |
|   | Lacklösemittel              | 0,3               |
|   | Styrol                      | 0,2               |
| <b>Lärm</b>                                 |                             |                   |
|   | Grenzwerte s. Arbeitsschutz |                   |

Durch Auswertung der Daten für den gesamten Lebensweg können die signifikanten Beiträge der Ziel- und Einflußgrößen ermittelt werden. In Rahmen der Material- und Energieflussanalyse,[8], wurden die Ergebnisse nach ISO 14040, Ökobilanz bzw. Life Cycle Assessments ausgewertet, s.TP 9.5.3. Die Wirkungsabschätzung nach den Zielgrößen Treibhauseffekt, terrestrische Eutrophierung, Ozonabbaupotential, Ressourcenverbrauch ergab, daß sich die Ergebnisse zwischen 88 und 99 % auf den Traktionsenergieverbrauch zurückführen lassen [9].

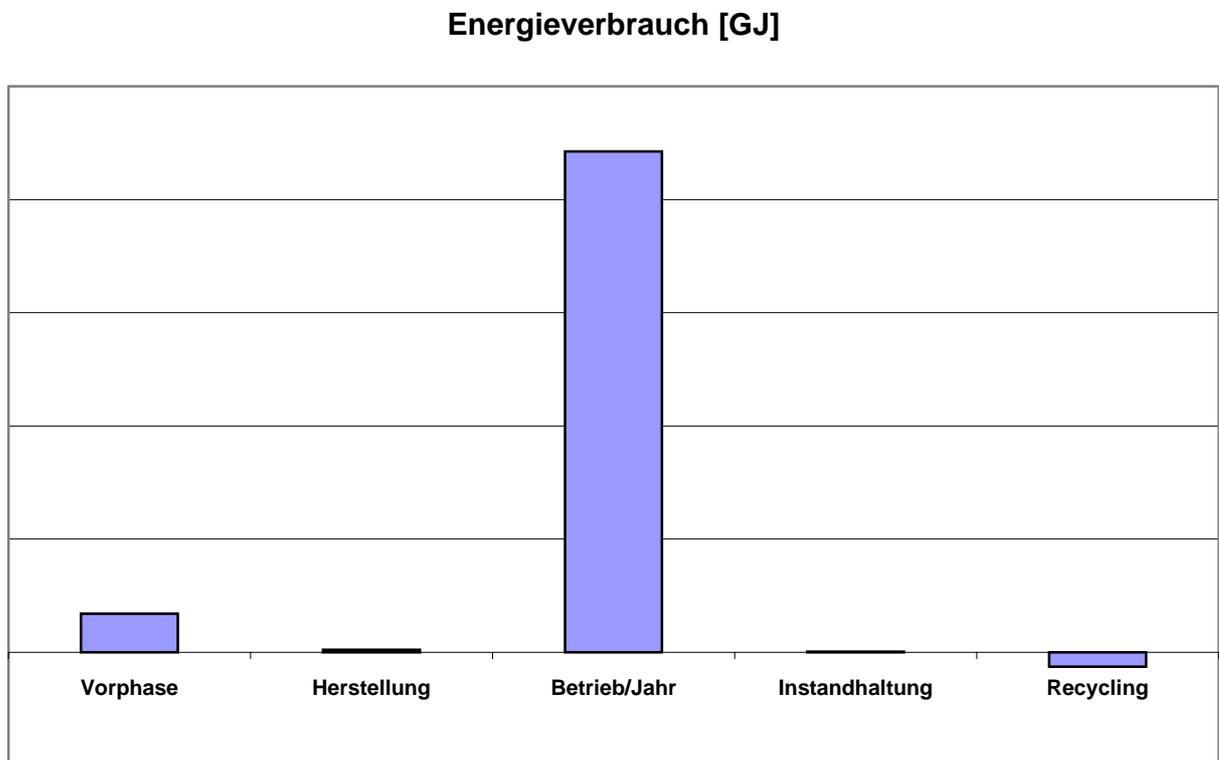
In Bild 7 ist der kumulierte Energieverbrauch des Fahrmotors, ET 420, dargestellt \*. Dabei wird deutlich, daß der Ressourceneinsatz während des Betriebs (Transportdienstleistung) die entscheidende ökologische Zielgröße darstellt. Für die Betrachtung ressourcenschonender Maßnahmen bei der Planung von Schienenfahrzeugen muß deshalb insbesondere der Energieverbrauch während des Betriebs modelliert werden. Das Energie-Einsparpotential durch Leichtbau ist im S-Bahn Betrieb direkt proportional zur Massereduzierung.  
s.Tab. 6 (Meßwerte der DB AG).

-----  
 [8] Bahnkreis Dokument: 9.5.3.: Material- und Energieflußanalyse des Fahrmotors, ET 420

[9] Trebst W., Fleischer G., Fischer W., Interdisziplinäres Forschungsprojekt „Nachhaltiges Wirtschaften am Beispiel von Schienenfahrzeugen (BAHNKREIS)“, ETR 2000 [in Druck]

\* Die detaillierten Ergebnisse sind dem Dokument des TP 9.5.3., Fahrmotor 420, entnommen. Die Datenerhebung und –auswertung der Phasen Vorphase, Instandhaltung und Entsorgung des Fahrmotors 420 sowie die Ökobilanzierung wurden von Frau Gerner, TU Berlin, durchgeführt.

**Bild 7 Kumulierter Energieverbrauch eines Fahrmotors / ET 420**



**Tabelle 6** Einsparpotential durch Leichtbau

Simulationsrechnungen und Messungen S3 München Ost - Nannhofen

| Massereduzierung | Traktionsenergieeinsparung |
|------------------|----------------------------|
| 10 %             | 8,6 %                      |
| 20 %             | 17,2 %                     |
| 30 %             | 25,8 %                     |
| 40 %             | 33,4 %                     |

### **C3 EndOfLife-Struktur, EOL**

Bei allen Prozessen des Lebensweges fallen Abfälle an. Daneben werden zunehmend ausgetauschte Anlagen oder Baugruppen in anderen Anwendungsgebieten weiterverwendet. Auch komplette Schienenfahrzeuge werden nach langjähriger Nutzungszeit nicht mehr ausschließlich verschrottet. Baugruppen und Anlagen von Schienenfahrzeuge sind, soweit sie nicht moralisch verschlissen sind, weiterverwendungsfähig.

Die EOL- Struktur gewährleistet nach festgelegten Kategorien und Abfallschlüsseln eine Zuordnung sämtlicher Abfälle/Abfallarten des Lebenswegs und weiterzuverwendender bzw. weiterzuverwertender Baugruppen/Teile und Materialien. Als Systemgrenze für die aus dem Lebensweg der Schienenfahrzeuge ausscheidenden Materialströme, wie Altfahrzeugteile und Produktionsabfälle, bietet die festzulegende EOL- Struktur eine meßbare und überprüfbare Grundlage zur Bestimmung der Einflußgrößen: Verwertbare Abfälle, zu beseitigende Abfälle, Problemstoffbelastete Abfälle. Die sich an die „Primär“- Nutzungszeit anschließenden (Kreislauf)-Prozesse werden im Rahmen des Modells nicht betrachtet.

Der Hersteller legt über die konstruktive Gestaltung des Erzeugnisses auch dessen Instandhaltbarkeit und Recyclebarkeit fest. Spätestens seit dem Kreislaufwirtschaftsgesetz von 1996 sind die Hersteller verpflichtet, die Recyclingaspekte verstärkt in die Produktentwicklung zu integrieren. Mit der präventiven Instandhaltung während der Nutzungsdauer erfolgt bereits eine regelmäßige und hochwertige Durchführung des Produkt- Recyclings. Die tatsächliche Reduzierung der Abfallmenge durch Mehrfachnutzung von Bauteilen und Baugruppen wird durch die Struktur der EOL- Fraktionen über sämtliche Lebenswegphasen analysiert. Als Beispiel sind die Produktionsabfälle mit Angabe der Verwertung bzw. Beseitigung bei der Motorfertigung (ET 420) in Tab.7 gelistet.

**Tabelle 7: Produktionsabfälle bei der Motorfertigung, ET 420**

| <b>Abfall</b>                 |                      | <b>kg/Motor</b> |
|-------------------------------|----------------------|-----------------|
| <b>Abfall zur Verwertung</b>  |                      | <b>55,7</b>     |
|                               | Eisenschrott         | 54,4            |
|                               | Aluminiumabfälle     | 0,6             |
|                               | Kabelabfälle         | 9,9             |
|                               | NE-Metallabfälle     | 1,1             |
|                               | Öl-Retentat, Altöl   | 1,3             |
| <b>Abfall zur Beseitigung</b> |                      | <b>2,7</b>      |
|                               | Lackierereiabfälle   | 1,4             |
|                               | Lösemittel           | 0,3             |
|                               | Verbrauchte Ölbinder | 0,2             |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| Imprägnierharze                 | 0,1 |
| Hydroxidschlamm, Schleifschlamm | 0,6 |
| Fixierbäder                     | 0,1 |

Voraussetzung für die Entwicklung eines umfassenden Recyclingkonzepts ist eine eingehende Materialanalyse der Erzeugnisstruktur, [s. Kapitel C1], und der Demontagefraktionen. Zur Realisierung des Recyclingpotentials kommt es vorrangig auf die fachliche Qualifikation der Recycler an. Um einen möglichst hohen Recyclingerlös zu erzielen, bedarf es neben der demontagerechten Konstruktion auch der Optimierung der Transportkosten.

Laut der Aussage einiger Verwerter liegen die Verwertungskosten für den ET 420 zur Zeit bei einigen 10 TDM. In Anbetracht des Einsatzes von hochwertigen Anlagen und Baugruppen, und der Masse von > 138 to kann für zukünftige kreislauf- orientierte Entwicklungen ein hohes Recyclingpotential erschlossen und Recyclingerlöse erzielt werden.

Im Materialkreislaufmodell sind hierzu folgende Ziel- und Einflußgrößen festgelegt worden:

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <u>Abfälle zur Verwertung</u>  | Anzahl, Volumen, Verteilung<br>Materialquote   |
| • Werkstoffliche Verwertung    | Menge,<br>Abfallart,<br>Materialvielfalt,<br>Demontagetiefe<br>Werkstoffverträglichkeit<br>Verunreinigungen<br>Recyclateigenschaften |
| • Rohstoffliche Verwertung     | Materialzusammensetzung,<br>Verunreinigungen<br>Problemstoffe  |
| • Energetische Verwertung      | Verunreinigung,<br>Problemstoffe   |
| <u>Abfälle zur Beseitigung</u> | Anzahl, Volumen, Verteilung  |
|                                | Deponie<br>Müllverbrennung<br>Sonderdeponie  |

Um die Marktsituation besser zu verstehen, ist das Recyclingverhalten der wesentlichen Werkstoffgruppen kurz dargestellt.

## Stahl / Eisen

Alle Metalle sind prinzipiell kreislauffähig und das Recycling von Stahl ist seit langem etabliert. Es empfiehlt sich, durch eine Vorsortierung für eine ausreichende Reinheit der Mengenströme zu sorgen.

## Nichteisen-Metalle

Kupfer und Aluminium können durch Elektrolyse in höchster Reinheit gewonnen werden.

## Thermoplaste

Da Thermoplaste schmelzbar sind, sind sie prinzipiell recycelbar, es gibt jedoch technische und wirtschaftliche Einschränkungen.

## Kabelisolierungen

Für Kabel- und Leitungsisolierungen gibt es etablierte Verwertungsbetriebe, die Leiter und Isolierstoffe zu Reinheiten von >99,5 % trennen.

## Duroplaste/Elastomere

Im allgemeinen wird die thermische und rohstoffliche Verwertung durchgeführt. Als hochwertige Füllstoffe werden recycelte Duroplaste zunehmend in Teilefertigungen eingesetzt.

Für die Recyclingfähigkeit müssen außer der Recyclingeignung des Materials und der Materialzusammensetzung, der Verträglichkeit der Werkstoffe und ihrer Trennbarkeit auch die Lebensdauer, die Beanspruchung im Betrieb und der Instandhaltungsaufwand einbezogen werden, s. Beispiel in Tab.8.

**Tabelle 8** Materialzusammensetzung / Lebensdauer / Recyclingfähigkeit

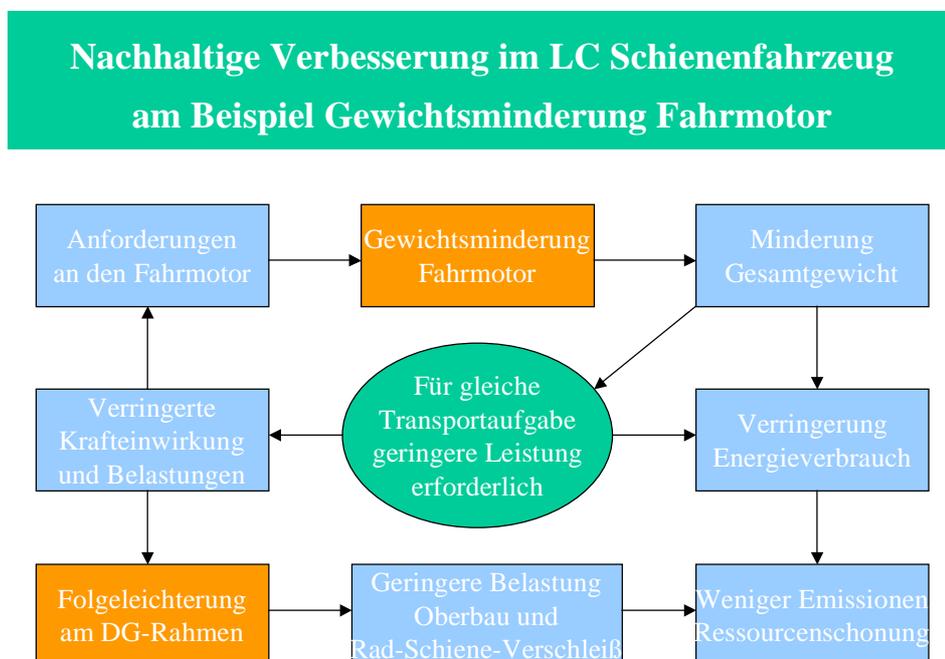
| Anlagen/<br>Baugruppen und<br>Material | Lebensdauer<br>Revision/<br>Wartung | Anlagen/<br>Baugruppen<br>Recycling   | Material-<br>zusammen-<br>setzung   | Material-<br>Recycling<br>Stand 2000 |
|--|-------------------------------------|---|---|--------------------------------------|
| <b>Fahrzeugkasten</b>                  | > 30 Jahre                          | <b>möglich</b><br><br><b>Problem:</b> hoher Energieverbrauch beim Betrieb von „schweren“ Fahrzeug/-Bauweisen    | Stahl /Eisen<br>Leichtmetall, Al<br>Kupfer<br>GFK-Kunststoff<br>Verbundglas | Ja<br>Ja<br>Ja<br>Ja<br>Nein         |
|  | Revision nach 8 bzw. 16 Jahren      | -   | Elastomere,<br>Klebstoffe<br>Antidröhnmaterial<br>PUR-EP                    | Nein<br>Nein<br>Nein<br>Nein         |
| <b>Fahrmotor</b>                       | Revision alle 8 Jahre               | <b>möglich</b><br><br><b>Ziel:</b> Austausch von Neuentwicklungen (z.B. Drehstrom-Motor) statt „Neuwicklungen“; | Stahl,<br>Dynamoblech<br>Kupfer<br>Messing<br>Isoliermaterial               | Ja<br>Ja<br>Ja<br>Ja<br>Nein         |
|  | Wartung jährlich                    | -   | Schmierfett   | Nein                                 |

## D Nachhaltige Entwicklung von Schienenfahrzeugen durch ganzheitlich optimierten Materialeinsatz

Es hat sich gezeigt, daß eine umweltgerechte Lösung in den meisten Fällen auch eine kostengünstige Lösung ist. Für den ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Materialeinsatz sind verstärkt alle an der Entwicklung, Herstellung, Betrieb und Instandhaltung beteiligten Partner einzubeziehen, vor allem müssen die ganzheitlichen Anforderungen zusammen mit den wirtschaftlichen und ökologischen Erkenntnissen aus den life-cycle bezogenen Variantenvergleichen konsequent in den Entwicklungsprozeß integriert werden.

Im Schema von Bild 8 ist am Beispiel der Gewichtsinderung des Fahrmotors aufgezeigt, wie nachhaltige Konzepte der Baugruppe „Fahrmotor“ konsequent die gesamte Bauweise des Schienenfahrzeugs erfassen. In einem dynamischen Regelkreis führen innovative Fahrzeugbauweisen zu weiteren nachhaltigen Verbesserungen bei Baugruppen, Anlagen und tragen so zu einer Verbesserung des gesamten Fahrzeug- Gebrauchswerts bei.

**Bild 8** Schema der nachhaltigen Verbesserung von Schienenfahrzeugen durch ganzheitlichen Materialeinsatz



Quelle: Innovationszentrum Bahntechnik Sachsen e.V

Damit wird klar, daß der Gebrauchswert der Fahrzeuge, der sowohl die Fragen der Fahrzeug / Fahrweg - Beanspruchung, des **verkehrlichen Nutzens** (u.a. der Leichtbaugrad [kg/m], der Motorisierungsgrad [kW/kg], die Personenbeförderungskapazität [Personen/Fahrzeug], Sitzplatzanteil, Anzugskraft, Zugkraft bei mittlerer Geschwindigkeit,...), des Komforts und der Sicherheit (Fahrsicherheit, Aufstoßsicherheit,..) berührt, durch die ganzheitliche Materialbetrachtung beeinflusst wird.

Der Trend, bei der Beschaffung nur grobe funktionale Vorgaben vom Betreiber zu erhalten und damit die Variantenbreite der Angebote zu erhöhen zwingt den Betreiber in zunehmenden Maße, die Auswahl der Fahrzeuge anhand der Triade Gebrauchswert - Wirtschaftlichkeit - Ökologie vorzunehmen. Im Sinne des stetig steigenden Mobilitätsbedarfs kann das Tempo für die Entwicklung von Leichtbaufahrzeugen nicht hoch genug gesetzt werden, um so früh wie möglich Schienenfahrzeuge einzusetzen, die um > 50% weniger wertvolle Ressourcen verbrauchen als konventionelle Fahrzeuge.

Beim jetzigen Arbeitsstand wird der Energieverbrauch des Fahrbetriebes als Meßwert in die Datenbank eingetragen. Bei Erweiterung der bestehenden Modelle unter Berücksichtigung streckenbezogener Einsatzbedingungen, d.h. genaue fahrdynamische Berechnungen, könnte der Energieverbrauch als wichtigste ökologische Zielgröße aus den Einsatzbedingungen über die funktionale Beziehungen zum Zugwiderstand, zur Geschwindigkeit, zu den Einsatzbedingungen (Haltestellenabstand, Bogenradien und Bogenwiderstände) und der Fahrzeugmasse (einschließlich der beförderten Personen) modelliert werden.

Mit dem Bahnkreismodell als Basis- Simulations- und Kommunikations- Tool ist man in der Lage, nach Analyse der funktionalen Beziehungen und Zusammenhänge Variantenrechnungen unter Berücksichtigung des Fahrzeuggebrauchswertes durchzuführen (Ergebnisbericht Band 2), u.a.

- 1 Ermittlung der LCC
- 2 Bewertung des Gebrauchswerts der Fahrzeuge
- 3 Ermittlung des Materialeinsatzes, des Energieverbrauchs, und der Recyclingquote auf jeder Ebene der funktionalen Fahrzeugstruktur und in jeder Lebensdauerphase
- 4 Ermittlung der Life cycle Kosten von Anlagen, Baugruppen und Werkstoffen
- 5 Einfluß des Leichtbaus auf den Energieverbrauch
- 6 Ermittlung der verwertbaren und zu beseitigenden Abfallarten und – Mengen
- 7 Ermittlung der Einflüsse des Recyclings auf den Ressourcenverbrauch der Vorphase, Herstellung Betrieb und Instandhaltung, (Vice versa)
- 8 Ermittlung der (kumulierten) Problemstoffe in Fahrzeugen, Anlagen, Baugruppen und Werkstoffen

**References**

- [1] Zeininger H., Jansen H., Schmidt H., Mit dem Eco-ComPass auf Faktor 4  
Kurs, VDI Berichte 1400 (1998) S.181
- [2] Wübbenhorst, K.L, Life cycle costing for construction projects, in: Long range  
planning, 19 (1986), 87-97
- [3] Trümpi A., ZEV+DET Glas.Ann.122 (1998), Heft 9/10
- [4] Eberlein, M., Bedeutung der Datenmodellierung im LCC - Kenngrößen  
Management, VDI-Berichte 1334, S53-56 (1998)
- [5] VDI 2243 Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte. VDI- Verlag,  
Düsseldorf 1993
- [6] Koch, G.: Kreislauforientierte Produktgestaltung und Bewertung der  
Recyclinggerechtheit von Schienenfahrzeugen. Vortrag zur 2.  
Schienenfahrzeugtagung RAD '97
- [7] Bahnkreis Dokument: 9.5.2.: Festlegung der Untersuchungsmethode für die  
Material- und Energieflußanalyse
- [8] Bahnkreis Dokument: 9.5.3.: Material- und Energieflußanalyse des Fahrmotors,  
ET 420
- [9] Trebst W., Fleischer G., Fischer W.; Interdisziplinäres Forschungsprojekt  
„Nachhaltiges Wirtschaften am Beispiel von Schienenfahrzeugen  
(BAHNKREIS)“, ETR 2000 [in Druck]

**Anlage 1 Funktionale Fahrzeugstruktur ET 420 mit Massen / Zugeinheit**

Quelle: Siemens Transportation Services

| FFS        | Bezeichnung                                    | Masse Zug [kg]    |
|------------|--|-------------------|
| <b>0</b>   | <b>Summe Gewichte</b>                          | <b>138.697,55</b> |
| <b>1</b>   | <b>Fahrzeugkasten</b>                          | <b>33.342,00</b>  |
| <b>1.1</b> | <b>Fahrzeugkastenrohbau</b>                    | <b>22.940,00</b>  |
| 1.1.1      | Seitenwand                                     | 7.200,00          |
| 1.1.2      | Führerstand, Führerhaus                        | 400,00            |
| 1.1.3      | Stirnwand                                      | 1.080,00          |
| 1.1.4      | Festes Dach                                    | 4.470,00          |
| 1.1.5      | Untergestell                                   | 8.890,00          |
| 1.1.6      | Anbauten an Fahrzeugkasten                     | 300,00            |
| 1.1.7      | Energieverzeherelemente                        | 600,00            |
| <b>1.2</b> | <b>Außengestaltung</b>                         | <b>900,00</b>     |
| <b>1.3</b> | <b>Einstiegseinrichtung</b>                    | <b>5.364,00</b>   |
| 1.3.1      | Außentür                                       | 5.040,00          |
| 1.3.1.1    | Außentür Fahrer                                | 324,00            |
| <b>1.4</b> | <b>Zug- und Stoßeinrichtung</b>                | <b>554,00</b>     |
| 1.4.1      | Mechanische Kupplung                           | 160,00            |
| 1.4.2      | Elektr. Kuppl. (Flachkuppl. Starkstrom, 16-p.) | 64,00             |
| 1.4.3      | Datenkupplung (Kabelkuppl. Schaku)             | 30,00             |
| 1.4.4      | Pneum. Hydraul. Kupplung                       | 300,00            |
| <b>1.5</b> | <b>Übergang</b>                                | <b>0,00</b>       |
| <b>1.6</b> | <b>Fenstersystem</b>                           | <b>3.464,00</b>   |
| 1.6.1      | Seitenfenster                                  | 3.024,00          |
| 1.6.3      | Frontscheibe                                   | 400,00            |
| 1.6.7      | Scheibenwischer / Waschanlage                  | 40,00             |
| <b>1.7</b> | <b>Außenbeleuchtungs- und Signaleinricht.</b>  | <b>120,00</b>     |
| 1.7.1      | Spitzensignal (Signalleuchte weiß oben)        | 40,00             |
| 1.7.2      | Schlußleuchten (Signalleuchte weiß und rot)    | 80,00             |
| <b>2</b>   | <b>Fahrwerk / Laufwerk</b>                     | <b>33.429,00</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>Tragende Strukturen (Rahmen, Fahrwerk)</b>  | <b>15.000,00</b>  |
| <b>2.2</b> | <b>Federung / Dämpfung</b>                     | <b>3.600,00</b>   |
| <b>2.3</b> | <b>Radsatzsystem</b>                           | <b>13.800,00</b>  |
| <b>2.4</b> | <b>Fahrwerk / Fahrzeugkastenverbindung</b>     | <b>300,00</b>     |
| <b>2.5</b> | <b>Fahrwerkenbauten, Hilfsfunktion</b>         | <b>714,00</b>     |
| 2.5.1      | Spurkranzschmierung                            | 100,00            |
| 2.5.2      | Sandung  | 100,00            |
| 2.5.4      | Konsolen, Aufhängung                           | 514,00            |
| <b>2.6</b> | <b>Schutz, Überwachung, Sensorik, Diagn.</b>   | <b>15,00</b>      |
| <b>3</b>   | <b>Energieversorgung</b>                       | <b>10.526,60</b>  |
| <b>3.1</b> | <b>Stromzuführung Netzspannungssystem</b>      | <b>470,10</b>     |
| 3.1.1      | Stromabnehmer                                  | 186,00            |
| 3.1.2.1    | Dachleitung (Hochspannungskupplung 15 kV)      | 244,00            |
| 3.1.2.2    | Dachdurchführung                               | 20,00             |
| 3.1.3.4    | Erdschutzdrossel                               | 20,00             |

|            |  |                  |
|------------|--|------------------|
| <b>3.2</b> | <b>Schutz-, Schalt- u. Erfassungseinr. Netzspg.</b>                                    | <b>536,50</b>    |
| 3.2.1      | Hauptschalter  | 280,00           |
| 3.2.4      | Trenner (Motortrennschütz, 2-polig)  | 145,50           |
| 3.2.5.1    | Schutzrelais (Erdstromrelais)  | 6,40             |
| 3.2.5.2    | E-Verbrauchsmesssystem (Oberspannungswandler, Oberstromwandler, Überspannungsableiter) | 134,60           |
| <b>3.3</b> | <b>Netzfilter</b>  | <b>0,00</b>      |
| <b>3.4</b> | <b>Haupttransformator</b>  | <b>9.520,00</b>  |
| 3.4.1      | Tafokessel mit Inhalt (Einphasentrafo 1252 kVA)  | 9.120,00         |
| 3.4.2      | Kühlung (Ölkühler mit Anbauten)  | 400,00           |
| <b>4</b>   | <b>Antriebssystem</b>  | <b>27.101,60</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Antriebssteuerung</b>   | <b>151,80</b>    |
| 4.1.1.3    | Stromwandler   | 151,80           |
| <b>4.2</b> | <b>Elektrische Leistungsumformung</b>  | <b>6.045,80</b>  |
| 4.2.3      | Antriebsumrichter, Glättungs-drossel für 2 Fahrmotoren                                 | 4.710,00         |
| 4.2.4      | Anker- und Feldstromrichter  | 430,00           |
| 4.2.5      | Ankerstromrichter  | 400,00           |
| 4.2.5.6    | Trafobedämpfung, Fahrwicklung 1 und 2  | 104,00           |
| 4.2.7      | Überstromrelais f. je 2 Motoren  | 19,80            |
| 4.2.7.3    | Richtungswender für 2 Motoren  | 138,00           |
| 4.2.11.1   | Stromrichterkühler (Drossel- und Stromrichterlüfter)                                   | 200,00           |
| 4.2.11.5   | Lüfter (Fahrmotordrossellüfter Axialventilator mit Antriebsmotor)                      | 44,00            |
| <b>4.3</b> | <b>Hydraul./mech. Leistungsumform.</b>   | <b>0,00</b>      |
| <b>4.4</b> | <b>Antrieb</b>   | <b>20.904,00</b> |
| 4.4.1      | Fahrmotor 650 V, 200 kW  | 15.720,00        |
| 4.4.1.1.1  | Ständergehäuse   | 3.696,00         |
| 4.4.1.1.1  | Ständerwicklung  | 3.780,00         |
| 4.4.1.1.3  | Bürstenträger  | 384,00           |
| 4.4.1.1.4  | Sonstiges  | 648,00           |
| 4.4.1.2.1  | Läufer ohne Wicklung   | 3.660,00         |
| 4.4.1.2.2  | Läuferspulen   | 504,00           |
| 4.4.1.2.3  | Kommutator   | 948,00           |
| 4.4.1.3    | Lagerschild  | 2.100,00         |
| 4.4.2      | Tatzrollenlagerung (ergänzt)   | 2.640,00         |
| 4.4.4      | Getriebe im Schutzkasten   | 2.544,00         |
| <b>5</b>   | <b>Bremssystem</b>   | <b>3.016,00</b>  |
| <b>5.1</b> | <b>Bremssteuerung</b>  | <b>358,00</b>    |
| 5.1.1.2    | Bremssteuerungsgerät   | 100,00           |
| 5.1.1.7    | Bremsschütz, mit Druckwächter und Ventilen   | 210,00           |
| 5.1.4      | Gleitschutz  | 48,00            |
| <b>5.2</b> | <b>Aktorik</b>   | <b>1.500,00</b>  |
| 5.2.1      | Aktorik, komplett  | 1.500,00         |
| <b>5.3</b> | <b>Generatorische Bremse</b>   | <b>1.158,00</b>  |
| 5.3.1      | Bremswiderstand für Fahrmotor  | 834,00           |
| 5.3.2      | Kühlung (Bremswiderstandslüfter, Axialventilator mit Antriebsmotor)                    | 324,00           |
| <b>6</b>   | <b>Hilfsbetriebeversorgung</b>   | <b>3.342,00</b>  |
| <b>6.1</b> | <b>Druckluftversorgung</b>   | <b>1.244,00</b>  |
| 6.1.1      | Druckluftherzeugung (Luftpresser mit Hilfseinrichtungen)                               | 344,00           |

|            |  |   |                  |
|------------|--|---|------------------|
| 6.1.2      |  | Druckluftspeicher   | 900,00           |
| <b>6.2</b> |  | <b>Hydraulikversorgung</b>  | <b>0,00</b>      |
| <b>6.3</b> |  | <b>Batterieanlage</b>   | <b>190,00</b>    |
| 6.3.1      |  | Batterie  | 100,00           |
| 6.3.3      |  | Batterieladeeinrichtung   | 20,00            |
| 6.3.6      |  | Steuerung, Schutz, Überwachung, Siebglied, Drossel<br>17,4 mH 30A | 70,00            |
| <b>6.4</b> |  | <b>Elektr. Hilfbetriebeversorgung</b>                             | <b>1.908,00</b>  |
| 6.4.3.4    |  | Wechselrichter 3000VA, 110 V DC                                   | 236,00           |
| 6.4.3.6    |  | Hilfsumrichter  | 1.672,00         |
| 6.4.3.2    |  | Hilfsgleichrichter 200 V DC                                       | 17,00            |
| <b>7</b>   |  | <b>Innenraum</b>  | <b>26.421,80</b> |
| <b>7.1</b> |  | <b>Innenraumausstattung</b>                                       | <b>24.750,00</b> |
| 7.1.1.1    |  | Bodenplatte   | 2.400,00         |
| 7.1.1.3    |  | Fußboden, Belag   | 600,00           |
| 7.1.2      |  | Verkleidung   | 4.200,00         |
| 7.1.3      |  | Sitze, Führerraum   | 360,00           |
| 7.1.4      |  | Sitze, Fahrgastraum   | 8.640,00         |
| 7.1.5      |  | Innenanstrich, Beschichtung                                       | 1.050,00         |
| 7.1.6      |  | Trennwand   | 1.800,00         |
| 7.1.7      |  | Innenausbau   | 5.700,00         |
| <b>7.2</b> |  | <b>Heizung, Klimatisierung, Lüftung</b>                           | <b>1.221,80</b>  |
| 7.2.1      |  | Heizug, Klima, Lüftung Fahrgastraum                               | 1.125,00         |
| 7.2.2      |  | Steuerung HKL Fahrgastraum (Heizschütz, 2-polig)                  | 34,80            |
| 7.2.4      |  | HKL Führerraum (Warmluftheizgerät 220 V)                          | 62,00            |
| <b>7.3</b> |  | <b>Innentürsystem</b>   | <b>300,00</b>    |
| <b>7.4</b> |  | <b>Wasser- und Sanitäranlage</b>                                  | <b>0,00</b>      |
| <b>7.5</b> |  | <b>Gastronomische Einrichtungen</b>                               | <b>0,00</b>      |
| <b>7.6</b> |  | <b>Innenbeleuchtung</b>   | <b>150,00</b>    |
| <b>8</b>   |  | <b>Zentrale Steuer. u. Kommunik.</b>                              | <b>1.245,55</b>  |
| <b>8.1</b> |  | <b>Zug- und Fahrzeugleittechnik</b>                               | <b>125,55</b>    |
| 8.1.1.1    |  | Zentrales Steuergerät   | 12,00            |
| 8.1.1.2    |  | Fahrzeugsteuergerät   | 40,00            |
| 8.1.7      |  | Sifa  | 48,00            |
| 8.1.11     |  | Anfahrüberwachung (Druckwächter für Anfahrsperr)                  | 25,55            |
| <b>8.2</b> |  | <b>Diagnosesystem</b>   | <b>440,00</b>    |
| 8.2.1.1    |  | Diagnose Zug (Elektronikschrank1)                                 | 240,00           |
| 8.2.1.2    |  | Diagnose Fahrzeug (Elektronikschrank 2)                           | 160,00           |
| 8.2.2      |  | Mess- und Anzeigeeinrichtung                                      | 40,00            |
| <b>8.3</b> |  | <b>Datenübertragung</b>   | <b>150,00</b>    |
| <b>8.4</b> |  | <b>Inform.- und Kommunikationssystem</b>                          | <b>530,00</b>    |
| 8.4.2.4    |  | Sprachbus (Kabelsystem)   | 450,00           |
| 8.4.2.7    |  | Beschallung   | 80,00            |
| <b>9</b>   |  | <b>Betriebsleittechnik</b>  | <b>273,00</b>    |
| <b>9.1</b> |  | <b>Betriebliche Kommunikation</b>                                 | <b>198,00</b>    |
| 9.1.1.1    |  | Zugbahnfunk, Zentraler Gerätesatz                                 | 150,00           |
| 9.1.1.3    |  | Verteiler (Siebkette für ZBF und LA)                              | 48,00            |
| <b>9.2</b> |  | <b>Fernsteuerung</b>  | <b>0,00</b>      |
| <b>9.3</b> |  | <b>Punktförmige Zugbeeinflussung</b>                              | <b>75,00</b>     |
| 9.3.2      |  | Signalverarbeitung (Indusi I 60R im Gehäuse)                      | 70,00            |

|       |  |  |      |
|-------|--|--|------|
| 9.3.3 |  | Beeinflussungseinrichtung (Bremswirkgruppe 24V /LZB) | 5,00 |
|-------|--|--|------|

**Anlage 2 : Funktionale Fahrzeugstruktur Doppelstockwagen mit Massen**

Quelle: Bombardier Technologies

| Funktionale Fahrzeugstruktur | Bezeichnung                                    | Masse [kg]   |
|------------------------------|--|--------------|
| <b>0</b>                     | <b>Doppelstockwagen Bauart DABz 756</b>        | <b>45715</b> |
| <b>1</b>                     | <b>Fahrzeugkasten</b>                          | <b>18495</b> |
| <b>1.1</b>                   | <b>Fahrzeugkastenrohbau/ Struktur</b>          | <b>13290</b> |
| 1.1.1                        | Seitenwand                                     | 3703         |
| 1.1.10                       | Zwischendecke/-boden                           | 837          |
| 1.1.12                       | Zwischenwand/Schottwand fest                   | 225          |
| 1.1.3                        | Stirnwand                                      | 786          |
| 1.1.4                        | Festes Dach                                    | 1495         |
| 1.1.5                        | Untergestell                                   | 4975         |
| 1.1.6                        | Anschweißteile und Anbauten Fahrzeugkasten     | 250          |
| 1.1.6.4                      | Aufhängung                                     | 190          |
| 1.1.6.5                      | Wasserablauf/ Regenrinne                       | 5            |
| 1.1.8                        | ( abnehmbare ) Aufbauten                       | 180          |
| 1.1.8.1                      | Lüftungsgitter Seitenwand                      | 180          |
| 1.1.9                        | Isolierung, Entdröhnung                        | 839          |
| 1.1.9.1                      | Isolierung,                                    | 269          |
| 1.1.9.2                      | Entdröhnung (Kunstharzdispersion Terophon 123) | 580          |
| <b>1.2</b>                   | <b>Außengestaltung</b>                         | <b>699</b>   |
| 1.2.2                        | Farbgebung-Außenanstrich                       | 541          |
| 1.2.2.1                      | EP-Metallgrund                                 | 215          |
| 1.2.2.2                      | Spachtel                                       | 50           |
| 1.2.2.3                      | 1K Hydrolack                                   | 78           |
| 1.2.2.4                      | EPC-Dickschichter                              | 198          |
| 1.2.3                        | Beschriftung, Beschilderung, Piktogramme       | 2            |
| 1.2.3.1                      | äußere   | 1            |
| 1.2.3.2                      | innere   | 1            |
| 1.2.4                        | Haltegriffe, Handläufe, Rangiertritte          | 104          |
| 1.2.4.1                      | Haltestangen im Einstieg                       | 40           |
| 1.2.4.2                      | Haltestange Querwand rechts                    | 1            |
| 1.2.4.3                      | Haltestange Querwand links                     | 1            |
| 1.2.4.4                      | Anordnung Haltestange WE 1                     | 8            |
| 1.2.4.5                      | Anordnung Haltestange WE 2                     | 8            |
| 1.2.4.6                      | Haltestange an Decke Einstieg                  | 6            |
| 1.2.4.7                      | Haltestange an Decke Einstieg                  | 6            |
| 1.2.4.8                      | Geländer WE 1 und WE 2                         | 34           |
| 1.2.5                        | Bugklappe, Schürzen, Klappen, Deckel           | 52           |
| 1.2.5.6                      | Seitenwand-Klappe/-deckel                      | 52           |
| <b>1.3</b>                   | <b>Einstiegs- und Ladeeinrichtungen</b>        | <b>1369</b>  |
| 1.3.1                        | Außentür                                       | 1369         |
| 1.3.1.2                      | Seiteneingangstür mit Trittstufe               | 1369         |
| <b>1.4</b>                   | <b>Zug- und Stoßeinrichtung, Kupplung</b>      | <b>1024</b>  |
| 1.4.5                        | Stoßeinrichtung, Stoßverzehrelement            | 680          |

|            |  |              |
|------------|--|--------------|
| 1.4.5.1    | Seitenpuffer                                       | 680          |
| 1.4.6      | Zugeinrichtung                                     | 344          |
| 1.4.6.1    | Zughaken   | 68           |
| 1.4.6.2    | Zughakenführung                                    | 42           |
| 1.4.6.3    | Zugfeder, Zugeinrichtung                           | 158          |
| 1.4.6.4    | Schraubenkupplung                                  | 75           |
| <b>1.5</b> | <b>Übergang</b>                                    | <b>320</b>   |
| 1.5.1.3    | Wulsteinrichtung                                   | 140          |
| 1.5.5      | Verriegelungseinrichtung                           | 2            |
| 1.5.7      | Übergangsbrücke                                    | 86           |
| 1.5.8      | Übergangstür                                       | 92           |
| 1.5.8.1    | Stirnwandschiebetür                                | 92           |
| <b>1.6</b> | <b>Fenstersystem</b>                               | <b>1406</b>  |
| 1.6.0.1    | Anordnung der Fenster                              | 112          |
| 1.6.1      | feste Seitenfenster                                | 360          |
| 1.6.1.1    | Festfenster  | 360          |
| 1.6.2      | bewegliche Seitenfenster                           | 934          |
| 1.6.2.2    | Klappfenster                                       | 934          |
| <b>1.7</b> | <b>Außenbeleuchtungs- und -signaleinrichtungen</b> | <b>67</b>    |
| 1.7.2      | Fahrzeug-Schlußsignal                              | 7            |
| 1.7.4      | Fahrtrichtungsanzeiger                             | 60           |
| <b>1.8</b> | <b>Treppen</b>                                     | <b>320</b>   |
| 1.8.1      | Oberstocktreppe, vollst. WE 1                      | 112          |
| 1.8.2      | Oberstocktreppe, vollst. WE 2                      | 112          |
| 1.8.3      | Treppe Unterstock                                  | 96           |
| <b>2</b>   | <b>Fahrwerk</b>                                    | <b>13400</b> |
| <b>5</b>   | <b>Bremssystem</b>                                 | <b>1010</b>  |
| <b>5.1</b> | <b>Bremssteuerung</b>                              | <b>948</b>   |
| 5.1.1      | Steuerung / Bedienung Betriebsbremse               | 50           |
| 5.1.2      | Steuerung / Bedienung Feststellbremse              | 40           |
| 5.1.3      | Steuerung/ Bedienung Notbremse                     | 20           |
| <b>5.2</b> | <b>Aktorik Bremse</b>                              | <b>900</b>   |
| 5.2.2      | Kraftübertragung                                   | 900          |
| <b>6</b>   | <b>Hilfs- und Nebenbetriebeversorgung</b>          | <b>1560</b>  |
| <b>6.3</b> | <b>Batterieanlage</b>                              | <b>544</b>   |
| <b>6.4</b> | <b>elektrische Hilfsbetriebe</b>                   | <b>1016</b>  |
| 6.4.1      | Zugsammelschiene                                   | 176          |
| 6.4.1.3    | ZS-Kupplung, -kabel                                | 67           |
| 6.4.7      | Energieverteilung                                  | 245          |
| 6.4.8      | Schaltschränke                                     | 595          |
| <b>7</b>   | <b>Innenraum</b>                                   | <b>10918</b> |
| <b>7.1</b> | <b>Innenraumausstattung</b>                        | <b>8152</b>  |
| 7.1.1      | Fußboden/ Belag                                    | 2280         |
| 7.1.1.1    | Bodenplatte  | 1645         |
| 7.1.1.2    | Dämmung (Schwingung, Schall, Wärme)                | 144          |
| 7.1.1.4    | Fußbodenbelag                                      | 491          |
| 7.1.2      | Verkleidung  | 2405         |
| 7.1.2.2    | Wandverkleidung Fahrgastraum                       | 1050         |
| 7.1.2.3    | Wandverkleidung WC                                 | 130          |

|            |   |             |
|------------|---|-------------|
| 7.1.2.6    | Deckenverkleidung Fahrgastraum              | 1210        |
| 7.1.2.7    | Deckenverkleidung WC                        | 15          |
| 7.1.4      | Sitzsystem Fahrgastraum                     | 2322        |
| 7.1.4.1    | Sitze, komplett                             | 2272        |
| 7.1.4.5    | Klappsitz                                   | 50          |
| 7.1.6      | Trennwand                                   | 620         |
| 7.1.6.1    | Trennwand tragend                           | 462         |
| 7.1.6.2    | Trennwand Glas                              | 158         |
| 7.1.7      | Innenausbau                                 | 256         |
| 7.1.7.3    | Geschränk                                   | 65          |
| 7.1.7.4    | Gepäckablage                                | 191         |
| 7.1.8      | Inneneinrichtung                            | 266         |
| 7.1.8.11   | Sonderausstattung ( Feuerlöscher )          | 20          |
| 7.1.8.5    | Rollo,Gardine                               | 150         |
| 7.1.8.6    | Abfallbehälter                              | 99          |
| <b>7.2</b> | <b>Heizung/Lüftung/Klimatisierung (HLK)</b> | <b>1506</b> |
| 7.2.1      | HLK-Einrichtung für Fahrgastraum            | 1506        |
| 7.2.1.1    | Luftbehandlungsgerät/-aggregat              | 150         |
| 7.2.1.5    | Konvektionsheizung (Zwischenstock WE1)      | 10          |
| 7.2.1.7    | Vorraumheizung (Zwischenstock WE1 +2)       | 121         |
| <b>7.3</b> | <b>Innentürsystem</b>                       | <b>112</b>  |
| 7.3.1      | Innentür                                    | 112         |
| 7.3.1.4    | WC-Tür, Einbau                              | 27          |
| 7.3.1.7    | Trenntür                                    | 85          |
| <b>7.4</b> | <b>Wasser- und Sanitäranlage</b>            | <b>687</b>  |
| 7.4.1      | Frischwasserversorgung                      | 82          |
| 7.4.1.2    | Wassertank mit Überlauf                     | 57          |
| 7.4.1.3    | Füllstutzen                                 | 3           |
| 7.4.2      | WC-Anlage, incl. Fäkalienentsorgung         | 383         |
| 7.4.2.2    | WC-Deckelgarnitur                           | 3           |
| 7.4.2.4    | Vakuum Spoon                                | 1           |
| 7.4.2.5    | WC-Rollenhalter                             | 1           |
| 7.4.2.6    | Vakuum-Anlage                               | 21          |
| 7.4.2.7    | Fäkalienbehälter                            | 146         |
| 7.4.2.8    | Heizung Fäkalienbehälter                    | 3           |
| 7.4.3      | Abwasseranlage                              | 37          |
| 7.4.3.1    | Entwässerung                                | 15          |
| 7.4.3.2    | Wasserauslauf/ Abfluß                       | 21          |
| 7.4.3.3    | Füllstandsanzeige Abwasser                  | 1           |
| 7.4.4      | Wasch- und Duscheinrichtung                 | 178         |
| 7.4.4.1    | Waschbecken/-tisch                          | 2           |
| 7.4.4.3    | Handtuchhalter/ -spender                    | 1           |
| 7.4.4.4    | Seifenspender                               | 1           |
| 7.4.5      | Steuerung/ Bedienung                        | 6           |
| 7.4.5.1    | WC-Steuertafel                              | 5           |
| 7.4.6      | Schutz- und Überwachung, Sensorik           | 1           |
| <b>7.6</b> | <b>Innenbeleuchtung</b>                     | <b>461</b>  |
| 7.6.11     | Einstiegraum WE 1 und WE 2                  | 11          |
| 7.6.4      | Abteil-/ Hauptbeleuchtung                   | 448         |
| 7.6.4.1    | Ober- und Unterstock                        | 134         |
| 7.6.4.2    | Ober- und Unterstock                        | 134         |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 7.6.4.3    | Ober- und Unterstock                          | 77         |
| 7.6.4.4    | Ober- und Unterstock                          | 77         |
| 7.6.4.5    | Zwischenstock WE 1                            | 13         |
| 7.6.4.6    | Zwischenstock WE 1                            | 13         |
| 7.6.6      | WC-Beleuchtung                                | 2          |
| <b>8</b>   | <b>Zentrale Steuerung und Kommunikation</b>   | <b>332</b> |
| <b>8.1</b> | <b>Zug- und Fahrzeugleittechnik</b>           | <b>214</b> |
| 8.1.13     | FMZ-Anlage                                    | 150        |
| 8.1.3      | Datenkommunikation im Fahrzeug                | 53         |
| 8.1.3.2    | UIC-Leitung                                   | 53         |
| 8.1.8      | Bedien- und Anzeigeelemente                   | 11         |
| <b>8.4</b> | <b>Informations- und Kommunikationssystem</b> | <b>118</b> |
| 8.4.2      | Fahrgastinformation                           | 113        |
| 8.4.2.7    | Beschallung, LAR-Verstärker                   | 53         |
| 8.4.2.8    | Fahrziel- und Zuglaufanzeige                  | 60         |
| 8.4.4      | Fahrgastkommunikation                         | 5          |
| 8.4.4.1    | Telefon/ Fax                                  | 5          |

Anlage 3 Gliederungsstruktur der Material- und Mediengruppen, s. 9.1.2

| Ebene<br>Material-gruppe              | Ebene:<br>Materialart                     | Ebene:<br>Materialtyp                    | Ebene:<br>Materialsorte,<br>[Namenskriterium], <b>Beispiel</b>      |
|---------------------------------------|---|--|---|
| 1 Metalle                             | 1.1 Eisenmetalle                          | 1.1.1 unlegierte Stähle                  | [Stahlsorte]z.B.: <b>ST-37-Rundstahl</b>                            |
|                                       |   | 1.1.2 legierte Stähle                    | [Legierungsart], z.B.: <b>X5CrNi18-10</b>                           |
|                                       |   | 1.1.3 Stahlguß                           | [Legierungsart]   |
|                                       |   | 1.1.4 Grauguß                            | [Legierungsart]   |
|                                       | 1.2 Nichteisenmetalle/<br>Leichtmetalle   | 1.2.1. Aluminium                         | [Legierungsart]<br>z.B.: <b>Alu-Knetlegierung AlMg5F26</b>          |
|                                       |   | 1.2.2 Magnesium                          | [Legierungsart]   |
|                                       |   | 1.2.3 Titan                              | [Legierungsart] z.B.:<br><b>Ti-Knetlegierung TiAl6V4F89</b>         |
|                                       | 1.3 Nichteisenmetalle/<br>Schwermetalle   | 1.3.1 Kupfer                             | [Legierungsart]   |
|                                       |   | 1.3.2 Zinn                               | [Legierungsart]   |
|                                       | 1.4 Nichteisenmetalle/<br>Edelmetalle     | 1.4.1 Silber                             | [Legierungsart]   |
|                                       |   | 1.4.2 Gold                               | [Legierungsart]   |
|                                       |   | 1.4.3 Platin                             | [Legierungsart]   |
|                                       | 2. Glas/Keramik                           | 2.1 Keramikwerkstoffe                    | 2.1.1 Porzellan   |
| 2.1.2 Steinzeug                       |   |  | Steinzeug   |
| 2.2 Glas                              |   | 2.2.1 ESG                                | ESG   |
|                                       |   | 2.2.2 andere Gläser                      | [Glasart]   |
| 2.3 Sand,<br>Mineralstoffe            |   | 2.3.1 Sand                               | z.B. <b>Natursand</b>   |
|                                       |   | 2.3.2 Kalkstein                          | Kalkstein   |
| 3. Naturstoffe                        | 3.1 Holz                                  | [Holzart]                                | z.B. <b>Buche</b>   |
|                                       | 3.2 Papier, Pappe                         |  |   |
| 4. Polymerwerkstoffe<br>(Kunststoffe) | 4.1 Thermoplaste                          | [Name des Polymers]                      | z.B. <b>PE-HD</b>   |
|                                       | 4.2 Duroplaste                            | [s.o.]                                   | z.B. <b>PUR</b>   |
|                                       | 4.3 Elastomere                            | [s.o.]                                   | z.B. <b>SBR-Kautschuk</b>   |
|                                       | 4.4 Künstliche Fasen                      | [s.o.]                                   | z.B. <b>PA66-Faser</b>  |
| 5 Verbundwerkstoffe                   | 5.1 Faserverbund-<br>werkstoffe           | 5.1.1 GFK                                | [Matrixart und Faseranteil], z.B. <b>PE-GFK, 60% Faseranteil</b>    |
|                                       |   | 5.1.2 PFK                                | [Matrixart und Faseranteil], z.B. <b>PE /Aramidfaser; 60% Faser</b> |
|                                       |   | 5.1.3 CFK                                | [Matrixart und Faseranteil], z.B. <b>PUR-CFK, 60% Faseranteil</b>   |
|                                       | 5.2 Schichtverbund-<br>werkstoffe         | 5.2.1 Sperrholz                          | [Holzart] z.B. <b>Birkensperrholz</b>                               |
|                                       |   | 5.2.2 VSG                                |   |
| 5.3                                   |   |  |   |
| 6 Beschichtungsstoffe                 | 6.1 organisch                             | 6.1.1 Bitumen<br>(Antidröhnmasse)        |   |
|                                       |   | 6.1.2 Korrosionsschutz-<br>grundierungen |   |
|                                       |   | 6.1.3 Decklacke                          |   |
| 7 Klebstoffe                          | 7.1 Physikalisch<br>abbindende Klebstoffe | 7.1.1 Kontaktklebstoffe                  |   |
|                                       |   | 7.1.2 Schmelzklebstoffe                  |   |
|                                       |   | 7.1.3 Plastisole                         |   |
|                                       | 7.2 Reaktions-<br>klebstoffe              | 7.2.1 Polymerisations-<br>klebstoffe     |   |
|                                       |   | 7.2.2<br>Polyadditionsklebstoffe         |   |

| Ebene<br>Material-gruppe           | Ebene:<br>Materialart           | Ebene:<br>Materialtyp                  | Ebene:<br>Materialsorte,<br>[Namenskriterium], <b>Beispiel</b> |
|------------------------------------|---------------------------------|--|--|
|                                    |                                 | 7.2.3 Polykondensations-<br>klebstoffe | z.B. Phenol-Formaldehyd-Klebstoffe                             |
| 8 Techn,Fluide<br>(Betriebsstoffe) | 8.1 Luft                        | 8.1.1 Druckluft,<br>[Herkunftsprozeß]  | z.B. Druckluft mit 50 Pa, aus<br>Kompressoren                  |
|                                    | 8.2 Wasser                      | 8.2.1 [Wasserqualität]                 | z.B. Trinkwasser aus öff. Netz                                 |
|                                    | 8.3 Hydraulik-<br>flüssigkeiten | 8.3.1                                  | [1]  |
|                                    | 8.4 Schmierstoffe               |  | z.B. HD- Motorenöl   |
|                                    | 8.5 Kältemittel                 |  | z.B. CFC-12  |
|                                    | 8.6 Batterieflüssigkeit         |  |  |
|                                    | 8.7 Kraftstoffe                 |  | z.B. Diesekraftstoff   |



## **Verbundprojekt BAHNKREIS**

Förderkennzeichen des BMBF:  
02PV21334

---

### **Band 5**

# **Modellanwendung**

#### **Verfasser:**

Herr Dr.- Ing. P. Strauß

DB AG Forschungs- und Technologiezentrum

Herr Dipl.- Ing. A. Altmann

DB AG Systemverbund Bahn, Verbundprozesse

Herr Dipl.-Ing.(FH) Ch. Lichthardt

DB AG Forschungs- und Technologiezentrum

Brandenburg-Kirchmöser

8. November 2000

## Verzeichnis der Ergebnisberichte

|        |  |
|--------|--|
| Band 1 | Ausgangssituation, Ziele, Prozesse, Datenbasis |
| Band 2 | LC-Modell                                      |
| Band 3 | Baugruppenmodell                               |
| Band 4 | Ganzheitlicher Materialeinsatz                 |
| Band 5 | <b>Modellanwendung</b>                         |
| Band 6 | Anforderungen an Schienenfahrzeuge             |

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkreiskennzeichen 02PV21334 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Inhalt Band 5

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>Die Funktionale Fahrzeugstruktur</b>          | <b>5</b>  |
| <b>3</b> | <b>Auswahl der Strecken</b>                      | <b>11</b> |
| 3.1      | Die Regionalbereiche                             | 11        |
| 3.1.1    | Der Regionalbereich Rheinland                    | 12        |
| 3.1.2    | Der Regionalbereich Rhein-Main                   | 13        |
| 3.2      | Die Referenzstrecken                             | 14        |
| <b>4</b> | <b>Die Beispielfahrzeuge</b>                     | <b>19</b> |
| 4.1      | Der elektrische Triebzug der Baureihe ET 420/421 | 19        |
| 4.2      | Der Doppelstockreisezugwagen DABz 756            | 21        |
| 4.3      | Datenbeschaffung und -erfassung                  | 23        |
| <b>5</b> | <b>Resümee</b>                                   | <b>31</b> |

## Verzeichnis der Abbildungen

|   |    |
|---|----|
| Unterschiedliche Strukturen zur Beschreibung eines Schienenfahrzeuges | 6  |
| Grundzüge einer funktionalen Schienenfahrzeug-Struktur                | 8  |
| Verkehrsgebiet der Reinland GmbH /3/                                  | 12 |
| Regionalbereich Rhein-Main /3/  | 13 |
| Einsatzbedingungen der S-Bahn Rhein-Main (Stand 08/2000) /2/          | 16 |
| Einsatzbedingungen im Reinland /2/                                    | 16 |
| ET 420/421 im Hbf Frankfurt (M)      Foto: Altmann                    | 19 |
| Doppelstock-Reisezugwagen DABz <sup>756</sup> Foto: Altmann           | 22 |
| Fristenplan ET 420/421 (Sollzustand) /2/                              | 26 |
| Zeitverteilung /2/  | 28 |
| prozentuale Verteilung der Instandhaltungsstufen /2/                  | 29 |
| Anzahl der Instandhaltungsmaßnahmen /2/                               | 30 |

## **1 Einleitung**

Betreiber von Schienenfahrzeugen müssen sich trotz starker Aktivitäten im Bereich der Neubeschaffung und umfassender Modernisierung von Schienenfahrzeugen ständig die Frage nach den Kosten und der Umweltgerechtigkeit gefallen lassen. Im Rahmen der allgemeinen Zielsetzung, die Gesamtkosten des Verkehrssystems zu verringern, hat sich die durchgehende Betrachtung des Lebensweges von Schienenfahrzeugen als zweckmäßig erwiesen. In diesem Zusammenhang treten auch immer mehr ökologische Aspekte in den Vordergrund. In den vergangenen Jahren sind auf diesem Gebiet auch verschiedene neue Standards entstanden, wie z.B. das Kreislaufwirtschaftsgesetz und DIN ISO 14040.

Seit April 1998 befasst sich das BMBF-Projekt BAHNKREIS mit dem Themenbereich „Wirtschaften in Kreisläufen am Beispiel von Schienenfahrzeugen“.

In diesem Firmenverbund stellte die DB Regio AG einen der größten und einen praxisorientierten Partner dar. DB Regio als Fahrzeughalter ist Prozessführer über die verschiedenen Lebensphasen von Schienenfahrzeugen. So finden bei der DB Regio AG der Betrieb, die Instandhaltung, die Modernisierung und schließlich ggf. auch die Entsorgung statt.

Um eine Grundlage für die Arbeiten zur LC-Modellierung innerhalb des Projektes BAHNKREIS zu schaffen, wurde wie folgt vorgegangen /1/.

1. Produktstrukturierung
2. Festlegung der Referenzfahrzeuge
3. Produktdefinition der Verkehrsdienstleistung
4. Evaluierung / Analyse vorhandener Produktstrukturen
5. Sammlung / Abgleich der Strukturierungen
6. Untersuchung technischer Schnittstellen
7. Strukturierung des Produktes

## 2 Die Funktionale Fahrzeugstruktur

Parallel zu dem Projekt Bahnkreis hat sich der Kreis der Hersteller und der Betreiber von Schienenfahrzeugen auf eine einheitliche funktionale Erzeugnisstrukturierung geeinigt, die sogar in eine Vorlage für die DIN 25 002 mündete. Dies FFS (Funktionale Fahrzeug Struktur) ist Grundlage für eine einheitliche Gliederung des Schienenfahrzeuges in seine Baugruppen und Unterbaugruppen unter funktionalen Gesichtspunkten. Die Notwendigkeit einer solchen Gliederung liegt darin, dass der Life Cycle eines Schienenfahrzeuges die verschiedensten in /2/ beschriebenen Phasen überspannt; z.B.

- Konzept und Entwurf
- ÜbergabeEntwicklung, Konstruktion und Fertigungsvorbereitung
- Fertigung, Einbau und IBS
- Betrieb
- Instandhaltung
- Modernisierung/Rekonstruktion
- Entsorgung

Um die einzelnen Phasen effizient bearbeiten zu können, ist jeweils eine angepasste Fahrzeugstruktur erforderlich, die Inhalt und Aufgabenstellung der betroffenen Abschnitte exakt berücksichtigt.

Da unterschiedliche Aufgaben zu erledigen sind, sind auch unterschiedliche Strukturen erforderlich. Bild 1 zeigt drei Beispiele.

Das Fahrzeug besteht aus elektrischen (E-) und mechanischen (M-) Elementen, die im Betriebsmittelverzeichnis (betrifft E-Teile), Softwareverzeichnis (betrifft Programmmodule) und Zeichnungsverzeichnis (betrifft M-Teile) gelistet sind. Im Idealfall werden die o.g. Dokumente durch ein Konfigurations-Management-Tool unterstützt. Bei der Bildung der Struktur werden diese zunächst "strukturlosen Ausrüstungsgegenstände" entsprechend zusammengefasst und hierarchisch geordnet.

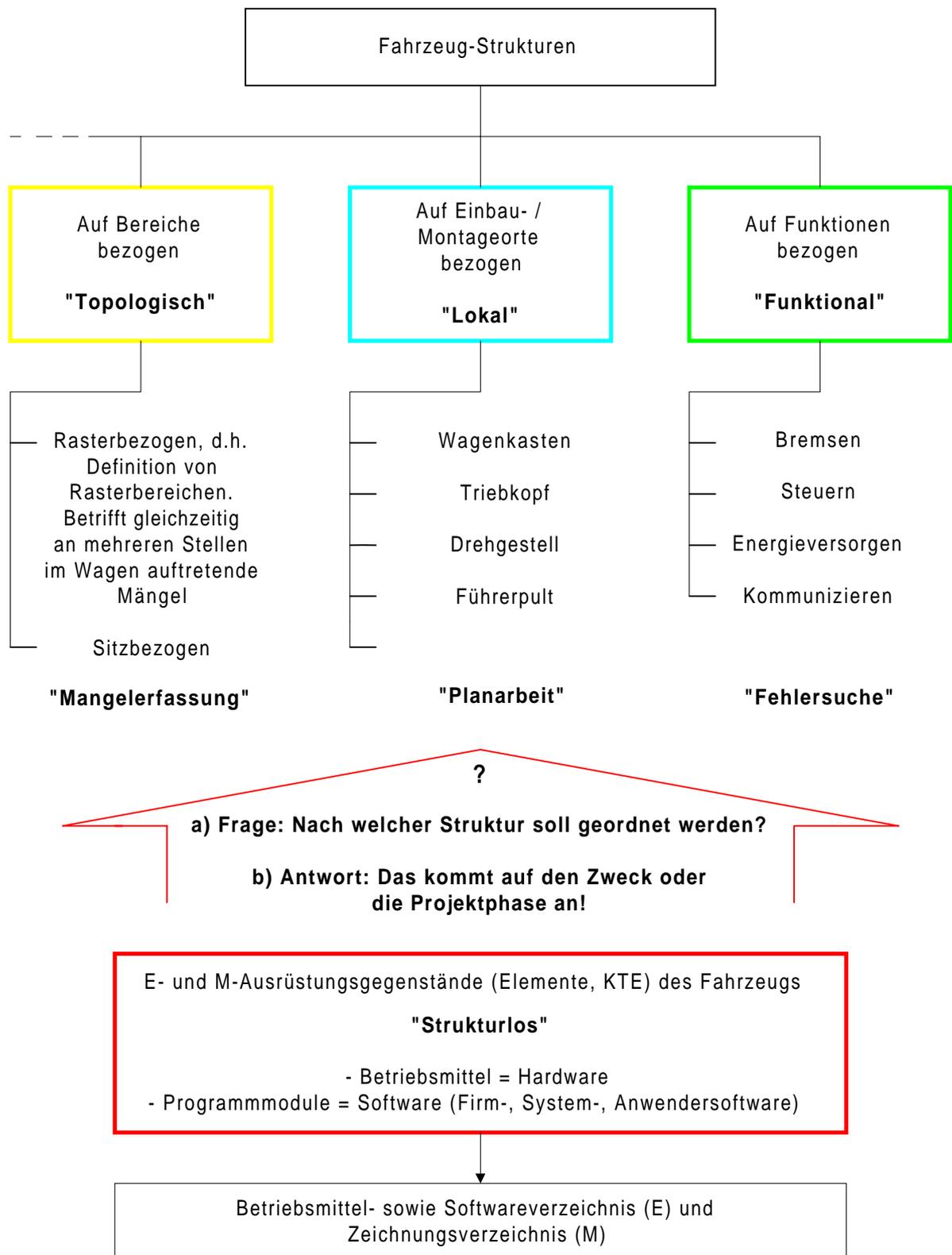


Bild 1: Unterschiedliche Strukturen zur Beschreibung eines Schienenfahrzeuges

1. Topologische (auf Lage/Anordnung geometrischer Gebilde im Raum bezogen) Strukturen werden bei der Erfassung von Fahrzeugmängeln benutzt.
2. Lokale (auf den Ort bezogen) Strukturen eignen sich zur Beschreibung und Ablauforganisation von Planarbeiten. Bei Planarbeiten am Drehgestell z.B. werden dabei Arbeiten erledigt die mehrere Funktionen berühren, z.B.
  - - Fahren  $\Rightarrow$  Kontrolle der Dämpfer
  - - Bremsen  $\Rightarrow$  Erneuern der Bremsbeläge
  - - Führen  $\Rightarrow$  Prüfen der Lauffläche der Radscheibe (Laufwerk)
  - - Antreiben  $\Rightarrow$  Kontrolle der Antriebseinheiten, Drehzahlgeber usw.

Ein anderes, typisches Beispiel sind Reinigungsarbeiten im Fahrzeug. Hier wird das Element nicht in seiner Funktion betrachtet, sondern als isolierter Gegenstand am Einbauort.

3. Zur Beschreibung von physikalischen und funktionalen Beziehungen ist dagegen eine funktionale Struktur erforderlich. Es werden die Elemente zusammengefasst, die eine Funktion bilden. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist die Fehlersuche.

Je nach Anwendungsfall existieren weitere Strukturen, die andere Aspekte berücksichtigen, wie Kosten, Lagerbewegungen oder Pünktlichkeit und Umlaufzeiten der Fahrzeuge. Zulieferer z.B. gliedern oft aus der Sicht des Fahrzeugbauers weder funktional noch ortsbezogen. Hier wäre eine Einteilung nach Gewerken denkbar. Eine weitere Orientierung, die aus Sicht der Vertriebe häufig praktiziert wird, ist die Strukturierung nach Produkten, Produktmerkmalen oder Funktionen.

An dieser Stelle ist die Frage zu beantworten, welches Strukturmerkmal auf die gemeldeten Ereignisse an Bord und die damit verknüpften nachfolgenden Instandsetzungsmaßnahmen angewendet werden muss:

1. Eine Instandsetzungsmaßnahme wird durch das Auftreten von Fehlern, Mängeln oder Ausfällen der Einheiten an Bord sowie durch gestörte Einzelfunktionen initiiert. Da diese Ereignisse im Zusammenhang mit den technischen Funktionen stehen, liegt es nahe, bei der Bearbeitung der Probleme auch funktional zu gliedern.

2. Weiter ist es folgerichtig, die Elemente des erforderlichen Schadensursachenforschungs-Systems zur Abbildung der durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen ebenfalls in Form einer funktionalen Fahrzeugstruktur zu gliedern.

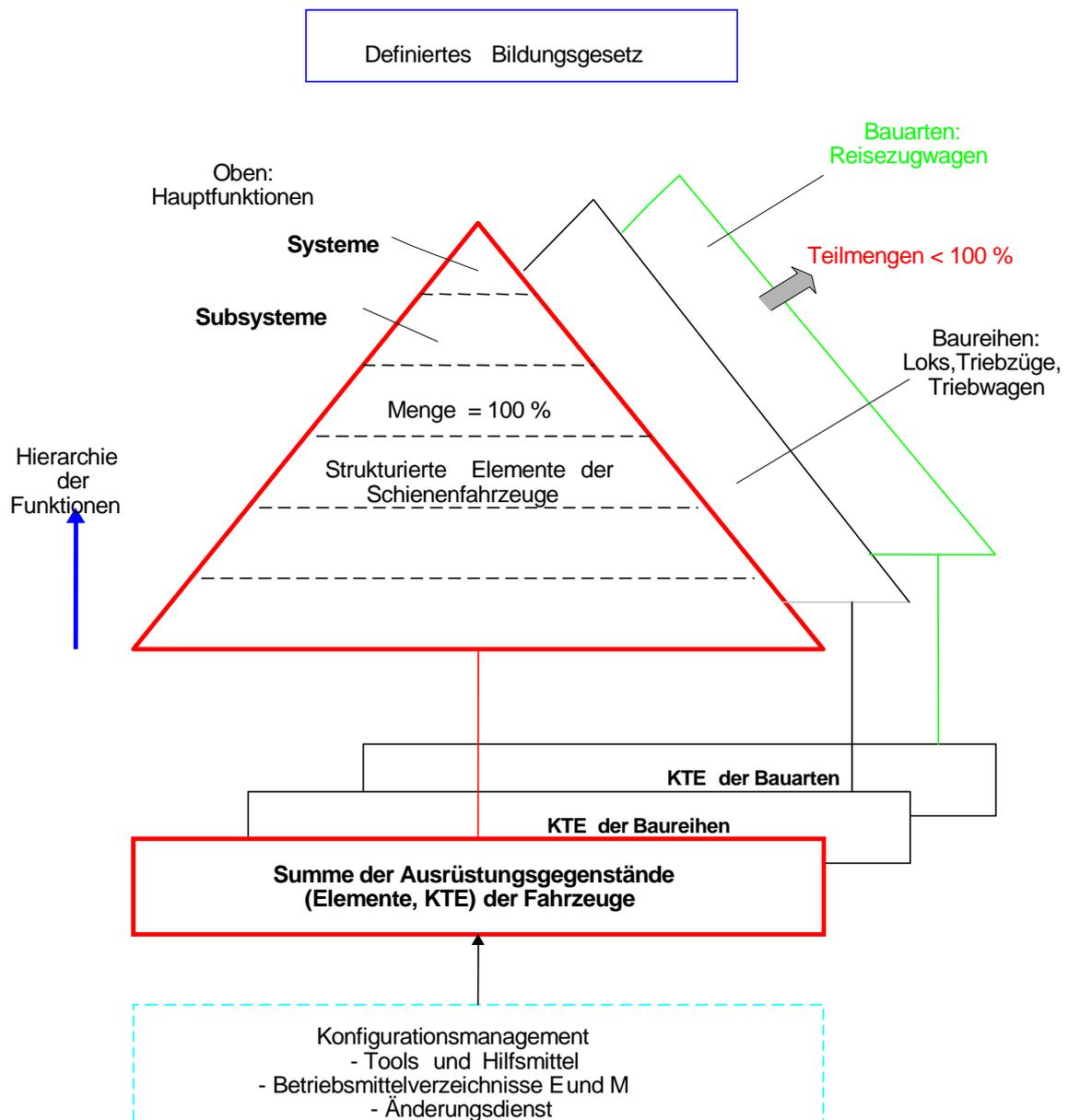


Bild 2: Grundzüge einer funktionalen Schienenfahrzeug-Struktur

Bildungsgesetz und grundsätzlicher Aufbau einer so gearteten funktionalen Struktur zeigt Bild 2.

Die Summe der Ausrüstungsgegenstände, aus denen das Fahrzeug besteht, wird derart gegliedert, dass sich mit ihnen die technischen Fahrzeugfunktionen bilden lassen. Zusätzlich erfolgt eine hierarchische Ordnung hinsichtlich ihrer Komplexität. Daraus lassen sich „von oben nach unten“ die Strukturelemente System, Subsystem, Subsystemkomponente, Baugruppe und Bauteil beschreiben. Wie tief die Hierarchiestufen in der Praxis zu erfassen sind, muss im konkreten Fall entschieden werden. An dieser Stelle kommt es darauf an, dass sie eindeutig definiert sind und als eine Art Platzhalter dienen! Diese Platzhalter sind in der Datenbank des BAHNKREIS auch freigehalten worden. Wie in dem bereits erwähnten Bild 2 dargestellt, wird die funktionale Struktur einer Teilmenge, d.h. Baureihen und Bauarten, aus der einmal und umfassend definierten Gesamtstruktur der Schienenfahrzeuge abgeleitet. Dieses alleine garantiert eine fachliche Durchgängigkeit bei Vermeidung von Redundanzen. Inwieweit eine derartige umfassende Realisierung möglich ist, muss die Praxis zeigen.

In der Anwendung im Projekt BAHNKREIS haben sich die Partner auf zwei Strukturierungstiefen geeinigt. Um eine fundierte LCC-Analyse auf Fahrzeugebene durchzuführen sind die Beispielfahrzeuge bis zur Dritten Ebene der FFS gegliedert worden. Eine tiefere Strukturierung wurde zum einen, aus Gründen des hohen Aufwandes von den Projektpartnern als nicht sinnvoll eingeschätzt und zum anderen würde eine tiefere Strukturierung keinen wesentlichen Erkenntniszuwachs bedeuten.

Auf der Ebene der Baugruppen, kann durch die geringere Komplexität einer Baugruppe, eine tiefere Zergliederung auch mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden. An dieser Stelle sei auch noch einmal zu Bedenken gegeben, dass die Gliederung eines Systems immer eine Gliederung der Prozesse und der Materialströme verlangt. Es darf also bei der Entscheidung, bis zu welcher Tiefe eine Gliederung satt finden soll, dieser Aspekt in keinem Fall außer acht gelassen werden. Für das Baugruppenmodell hat man sich für die Vierte Ebene entschieden.

Der folgende Auszug aus der FFS soll die mögliche Komplexität dieser Struktur darstellen.

| Glied. Nr. | (Funktionale) Bezeichnung   | Glied. Nr. | (Bauteil-) Bezeichnung         |
|------------|---|------------|--------------------------------|
| 1000       | Fahrzeugkasten  |            |                                |
| 1100       | Fahrzeugkastenrohbau/Struktur                                     |            |                                |
| 1110       | Seitenwand  |            |                                |
| 1120       | Führerstand/Führerhaus/Führerraum<br>Fahrzeugkopf                 |            |                                |
| 1130       | Stirnwand   |            |                                |
| 1140       | Festes Dach   | 1141       | Dachhaube/-segment             |
|            |   | 1142       | Dach-Klappe/-Luke              |
|            |   | 1143       | Stromabnehmerdach              |
| 1150       | Untergestell  | 1151       | Vorbau                         |
|            |   | 1152       | Mittelteil                     |
|            |   | 1153       | Hauptquerträger                |
|            |   | 1154       | Langträger                     |
|            |   | 1155       | Kopfträger                     |
| 1160       | Anschweißteile und Anbauten Fahr-<br>zeugkasten                   | 1161       | Gerätekasten                   |
|            |   | 1162       | Konsole/Lagerbock              |
|            |   | 1163       | Blech/Kappe                    |
|            |   | 1164       | Aufhängung                     |
|            |   | 1165       | Wasserablauf/Regenrinne        |
|            |   | 1166       | Anschläge                      |
| 1170       | Energie-Absorptionselemente                                       | 1171       | Rammbock                       |
| 1180       | (Abnehmbare) Anbauten   | 1181       | Lüftungsgitter Seitenwand      |
|            |   | 1182       | Lüftungsgitterdach             |
|            |   | 1183       | Dachverkleidung                |
| 1190       | Isolierung, Entdröhnung   |            |                                |
| 1110       | Zwischendecke/-boden  |            |                                |
| 1111       | Sattelboden   |            |                                |
| 1112       | Zwischenwand/Schottwand fest                                      |            |                                |
| 1113       | Zwischenwand beweglich  |            |                                |
| 1200       | Außengestaltung   |            |                                |
| 1210       | Außenverkleidg., Vorbaut, Bugmaske                                |            |                                |
| 1220       | Außenanstrich, Beschichtung                                       |            |                                |
| 1230       | Beschriftung, Beschilderung, Piktogramme                          |            |                                |
| 1240       | Haltegriffe, Handläufe, Rangiertritte,<br>Zier- und Schutzleisten |            |                                |
| 1250       | Bugklappe, Schürzen, Klappen, Deckel                              | 1251       | Bugklappe (ohne Antrieb)       |
|            |   | 1252       | Antrieb für Bugklappe          |
|            |   | 1253       | Steuerung, Bedienung Bugklappe |
|            |   | 1254       | Schürze                        |

| Glied. Nr. | (Funktionale) Bezeichnung           | Glied. Nr. | (Bauteil-) Bezeichnung                        |
|------------|-------------------------------------|------------|---|
|            |                                     | 1255       | Spoiler                                       |
|            |                                     | 1256       | Seitenwand-Klappe/-deckel                     |
|            |                                     | 1257       | Stirnwand-Klappe/-deckel                      |
|            |                                     | 1258       | Schürzenklappe                                |
| 1260       | Außenspiegel                        |            |   |
| 1270       | Schneeschutz/Schutzgitter           |            |   |
| 1300       | Einstiegs-/Ladeeinrichtungen        |            |   |
| 1310       | Außentür                            | 1311       | Einstiegstür Triebfahrzeugführer              |
|            |                                     | 1312       | Einstiegstür Fahrgast                         |
|            |                                     | 1313       | Ladetür                                       |
| 1320       | Tritte, Klapptritte                 | 1321       | Tritt fest                                    |
|            |                                     | 1322       | Klapptritt                                    |
|            |                                     | 1323       | Trittabdeckung                                |
| 1330       | Rollstuhlrampe, -hublift, Laderampe |            |   |
| 1340       | Beladeeinrichtung/-hilfe            |            |   |
| 1350       | Entladeeinrichtung                  |            |   |
| 1360       | Bewegliches Dach                    | 1361       | Rolldach/Faltdach                             |
|            |                                     | 1362       | Schiebe-/Hub-Schiebedach                      |
|            |                                     | 1363       | Schwenddach                                   |
|            |                                     | 1364       | Betätigungseinrichtung                        |
| 1370       | Ladegutsicherung                    |            |   |
| 1380       | Einstiegsbeleuchtung                |            |   |
| 1390       | Antrieb                             | 1391       | Tür   |
|            |                                     | 1392       | Tritt   |
|            |                                     | 1393       | Rollst.-rampe, -hublift, Laderampe            |
|            |                                     | 1394       | Beladeeinrichtung                             |
|            |                                     | 1395       | Entladeeinrichtung                            |
| 1310       | Steuerung, Bedienung                | 13101      | Betätigungselement                            |
|            |                                     | 13102      | Schaffnerschalter                             |
|            |                                     | 13103      | Notentriegelung                               |
|            |                                     | 13104      | Bewegungsmelder                               |
|            |                                     | 13105      | Türblockierung                                |
|            |                                     | 13106      | Elektrisch, Elektronisch,<br>Pneumatisch      |
|            |                                     | 13107      | Stg./Bedg. Rollstuhl., -hublift,<br>Laderampe |
|            |                                     | 13108      | Beladeeinrichtung/Entladeeinrichtung          |
| 1311       | Schutz und Überwachung Sensorik     |            |   |
| 1400       | Zug- u Stoßeinrichtung, Kupplung    |            |   |
| 1410       | Mechanische Kupplung                | 1411       | Mittelpufferkupplung                          |

### **3 Auswahl der Strecken**

Bei der Auswahl der Referenzstrecken für den BAHNKREIS waren grundsätzlich alle Strecken der DB AG, auf denen Regionalverkehr statt findet, geeignet. Um jedoch das Maß der zu untersuchenden Strecken auf eine vertretbare Größenordnung zu beschränken, einigten sich die Partner auf bestimmte Auswahlkriterien.

- Es mussten Umläufe gefunden werden, auf denen ausschließlich Fahrzeuge eines beteiligten Partners verkehren.
- Bei den Herstellern mussten ausreichende Informationen über die Fahrzeuge vorhanden sein.
- Die Sicherung der Akzeptanz und Kooperation in den Werken von DB Regio, Siemens und Bombardier musste erwirkt werden.
- Die groben Einsatzprofile mussten festgelegt werden.
- Die Qualität der Dokumentation aus Betrieb und Instandhaltung musste überprüft werden.
- Betriebliche Randbedingungen, Eckdaten der Fahrzeuge und Bauweisen mussten beachtet werden.
- Die Produktdefinition der Verkehrs-Dienstleistung musste vorgenommen werden.
- Eine Überprüfung / ein Abgleich der Einsatzstrecken hinsichtlich Marktanforderungen wurde angestrebt.
- Der Zustand der Strecken war zu beachten um „Normalbetrieb“ abzubilden.
- Eine Umfangsbegrenzung der Baureihen / Bauarten musste vorgenommen werden.

#### **3.1 Die Regionalbereiche**

Nach dem die umfangreichen Vorarbeiten abgeschlossen waren, standen noch zwei Regionalbereiche in der engeren Wahl .

Zum Einen der Regionalbereich Rhein-Main und zum Anderen der Regionalbereich Rheinland.

Ein Hintergrund der Auswahl dieser beiden RB war auch einen Vergleich von zwei Ballungsräumen zu erhalten.

### 3.1.1 Der Regionalbereich Rheinland

Der RB Rheinland ist seit einiger Zeit eine GmbH, an der die DB Regio AG mit 100% Geschäftsanteil beteiligt ist .

Der Zuständigkeitsbereich der DB Regionalbahn Rheinland GmbH erstreckt sich im wesentlichen über das Land Nordrhein-Westfalen, im Südwesten bis an die Städte Euskirchen und Bonn, im Westen bis an die belgische und im Nordwesten bis an die holländische Grenze. Erreicht im Norden und Osten über Gronau, Herford und Paderborn bis an die Weser sowie über Brilon Wald hinaus und umfasst im Süden das Siegerland und den bereits im Bundesland Rheinland-Pfalz liegenden Raum Betzdorf. Es befinden sich ca. 323 aktive Bahnhöfe und Haltepunkte der DB AG in diesem RB.

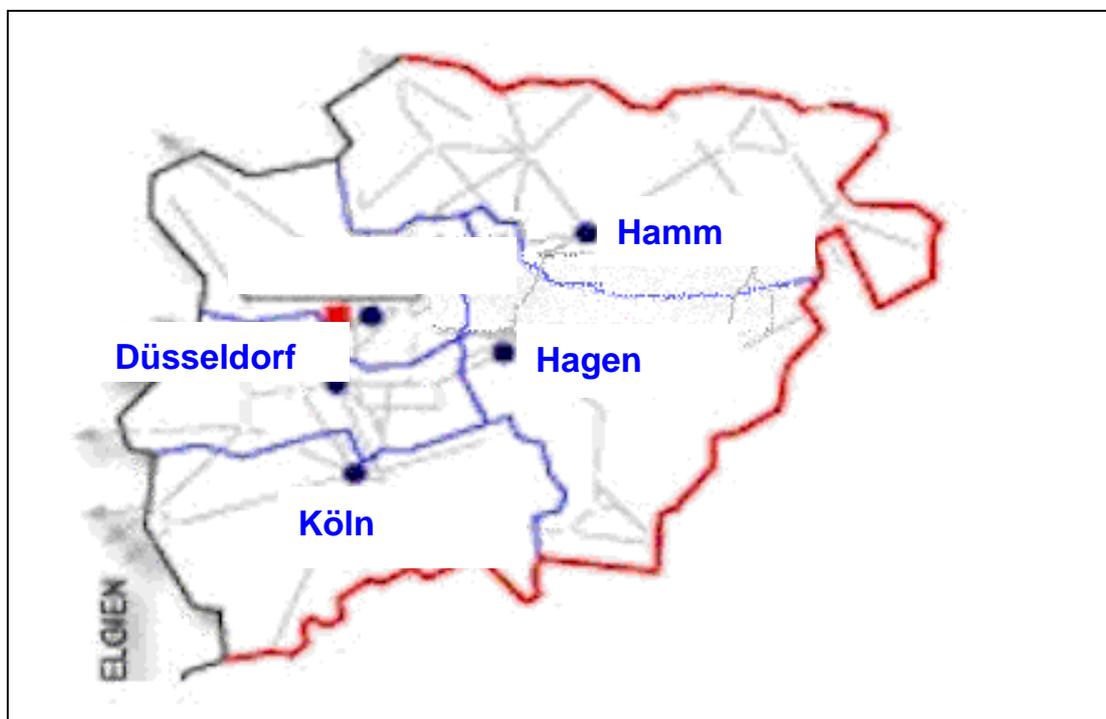


Bild 3: Verkehrsgebiet der Reinland GmbH /3/

### 3.1.2 Der Regionalbereich Rhein-Main

Der RB Rhein-Main umfasst im wesentlichen das Gebiet des Bundeslandes Hessen. Die Grenzen des RB sind im Süden Heppenheim, in Norden Kassel, im Osten Bebra und im Westen Limburg/Lahn. Es befinden sich ca. 540 aktive Bahnhöfe und Haltepunkte der DB AG in diesem RB. Ein Teil umfasst das Verkehrsgebiet des Rhein-Main-Verkehrsverbundes. Der RMV ist ein Verkehrsdienstleister aus verschiedenen Verkehrssystemen. So werden Regionalexpresszüge, Regionalbahnen, Nahverkehrszüge, S-Bahnen sowie U-Bahn-, Straßenbahn- und Busverbindungen angeboten. Der RMV betreibt u.a. 43 S-Bahn- und Regionalbahnlinien mit ca. 400 Haltestellen. Die Verkehrsleistung des RMV betrug im Jahr 1999, nach eigenen Angaben, ca. 38 Millionen Zugkilometer auf einem Streckennetz von 1.500 km. Aus diesem Streckennetz wurden verschiedene Referenzstrecken ausgewählt.

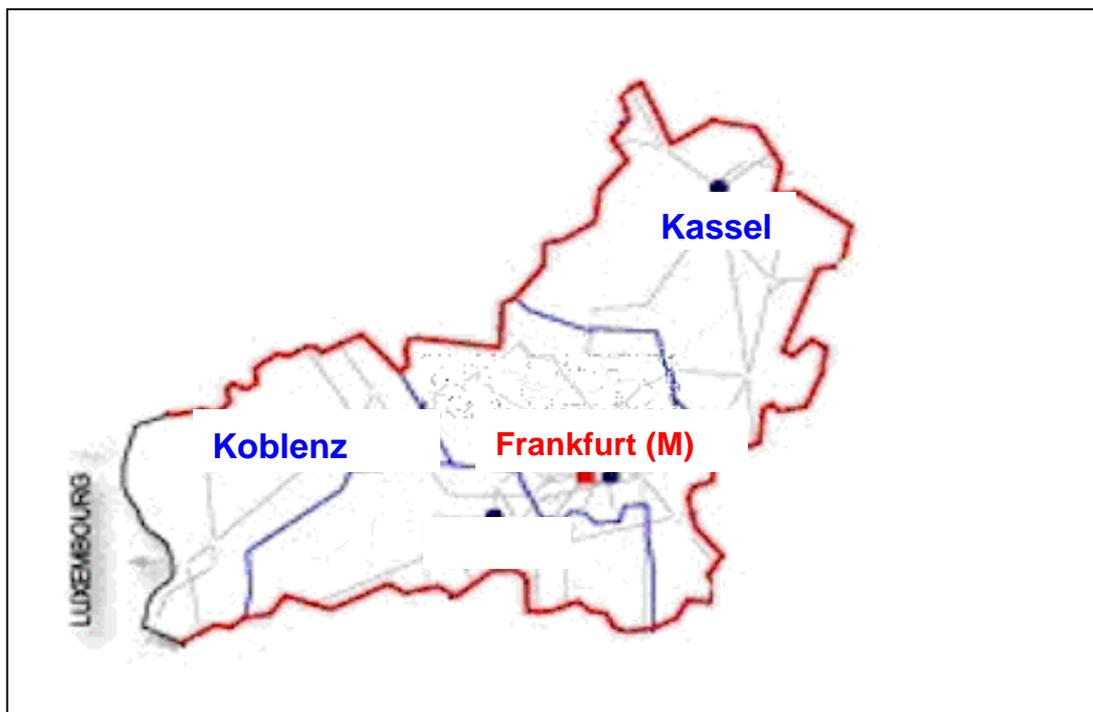


Bild 4: Regionalbereich Rhein-Main /3/

### **3.2 Die Referenzstrecken**

Bei der Auswahl einer geeigneten Referenzstrecke sind die Partner wie folgt vorgegangen /1/.

Es wurden:

- eine Auswahl der Referenzstrecke vorgenommen,
- der Umlauf der Fahrzeuge aufgenommen,
- die Kilometerlaufleistung der Umläufe aufgenommen,
- Analysen zur Auslastung (Fahrgastzählungen) abgefragt ,
- die Referenzstrecken definiert,;
- Festlegungen der zu betrachtenden Fahrzeuge mit allen Fahrzeugnummern vorgenommen und
- die Flottenzusammensetzung in den betreffenden Einsatzdienststellen geprüft

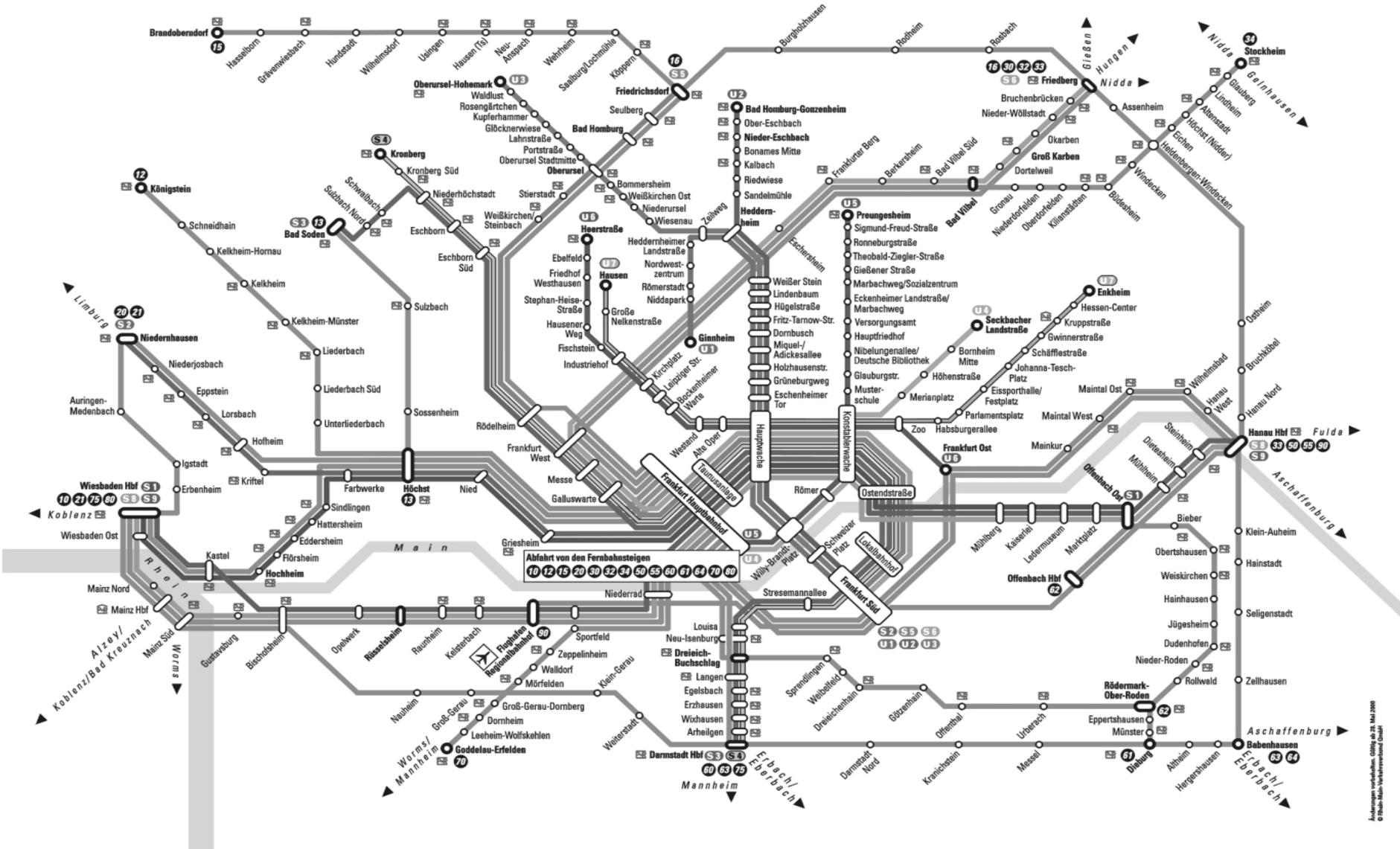
Das S-Bahn-Netz des RMV umfasst eine Streckenlänge von 319 km und 147 Haltestellen. Ein großer Anteil der Haltestellen wird auch von anderen Verkehrssystemen benutzt. So muss sich die S-Bahn in die Takte des Fern- und Regionalverkehrs einfügen. Gerade in den größeren Bahnhöfen nutzen alle Verkehrssysteme sehr häufig den selben Bahnsteig. Daraus resultiert auch die Forderung nach einer hohen Anfahrbeschleunigung der Fahrzeuge.

Am Beginn der Untersuchungen gingen die Partner davon aus, eine bestimmte Linienführung zu untersuchen. Nach eingehender Prüfung und Expertenbefragungen erwies sich dies aber als ungünstig, da für eine Linie nicht etwa eine konkret nach Fahrzeugnummern festzulegende Teilflotte zum Einsatz kommt. Die Disposition der Fahrzeuge erfolgt für das gesamte S-Bahnnetz. Dem entsprechend wurde das gesamte S-Bahnnetz des RMV als Referenzstrecken definiert.



Rhein-Main-Verkehrsverbund

### Schnellbahnplan



Änderungen vorbehalten. Gültig ab 28. Mai 2006  
© Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH

| Linie        | Lauf   | Entfernung | Fahrzeit   | Halte      | V <sub>Durchschn.</sub> | Abstand H  |
|--------------|--|------------|------------|------------|-------------------------|------------|
|              |  | [km]       | [min]      | [Anz.]     | [km/h]                  | [km]       |
| S1           | Offenbach(Main)Ost /<br>Wiesbaden Hbf          | 54         | 59         | 21         | 55                      | 2,6        |
| S2           | Frankfurt(Main)Süd /<br>Niedernhausen(Ts)      | 38         | 44         | 16         | 52                      | 2,4        |
| S3           | Darmstadt Hbf /<br>Bad Soden(Taunus)           | 50         | 62         | 26         | 48                      | 1,9        |
| S4           | Langen(Hess) /<br>Kronberg(Taunus)             | 34         | 46         | 20         | 44                      | 1,7        |
| S5           | Frankfurt(Main)Süd /<br>Friedrichsdorf(Taunus) | 30         | 38         | 16         | 47                      | 1,9        |
| S6           | Frankfurt(Main)Süd /<br>Friedberg(Hess)        | 40         | 51         | 20         | 47                      | 2,0        |
| S8           | Hanau /Wiesbaden                               | 73         | 83         | 28         | 53                      | 2,6        |
| <b>Summe</b> |  | <b>319</b> | <b>383</b> | <b>147</b> | <b>50</b>               | <b>2,2</b> |

Bild 5: Einsatzbedingungen der S-Bahn Rhein-Main (Stand 08/2000) /2/

Bei der Wahl der zweiten Referenzstrecke waren die Einsatzbedingungen der Fahrzeuge stärker zu berücksichtigen. Es musste ein Umlauf gefunden werden, der ausschließlich aus Fahrzeugen bestand, die für die Belange des Projektes in Frage kamen.

| Linie | Lauf                               | Entfernung | Fahrzeit | Halte  | V <sub>Durch.</sub> | Abstand Halte | Verbindungen pro Tag und Richtung |
|-------|------------------------------------|------------|----------|--------|---------------------|---------------|-----------------------------------|
|       |                                    | [km]       | [min]    | [Anz.] | [km/h]              | [km]          | [Anz.]                            |
| RE 1  | Aachen Hbf /<br>Bielefeld Hbf      | 263        | 218      | 11     | 72                  | 23,9          | 17                                |
| RE 4  | Aachen Hbf /<br>Münster(Westf.)Hbf | 209        | 181      | 28     | 69                  | 7,46          | 13                                |

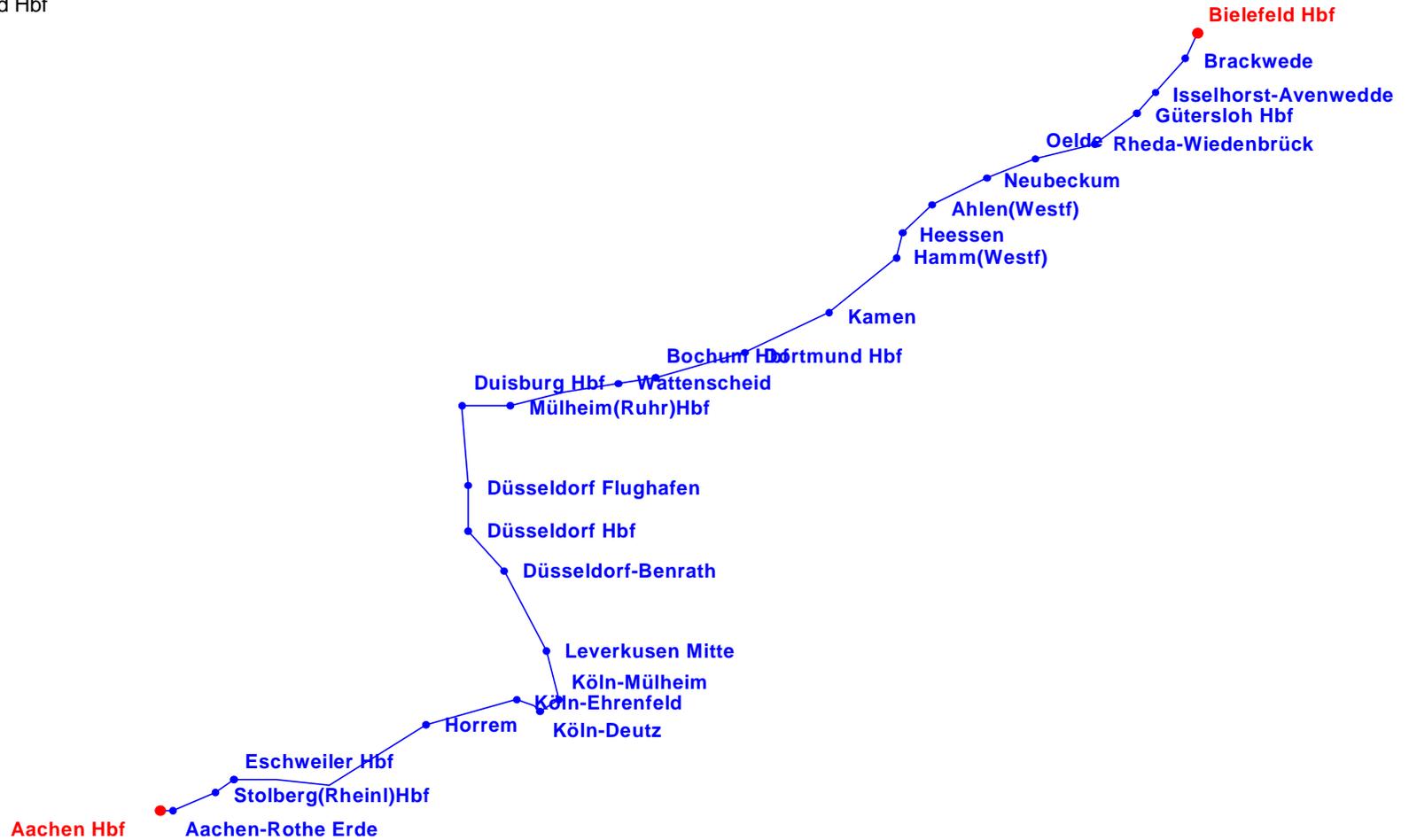
Bild 6: Einsatzbedingungen im Reinland /2/

Band 5

RE 1

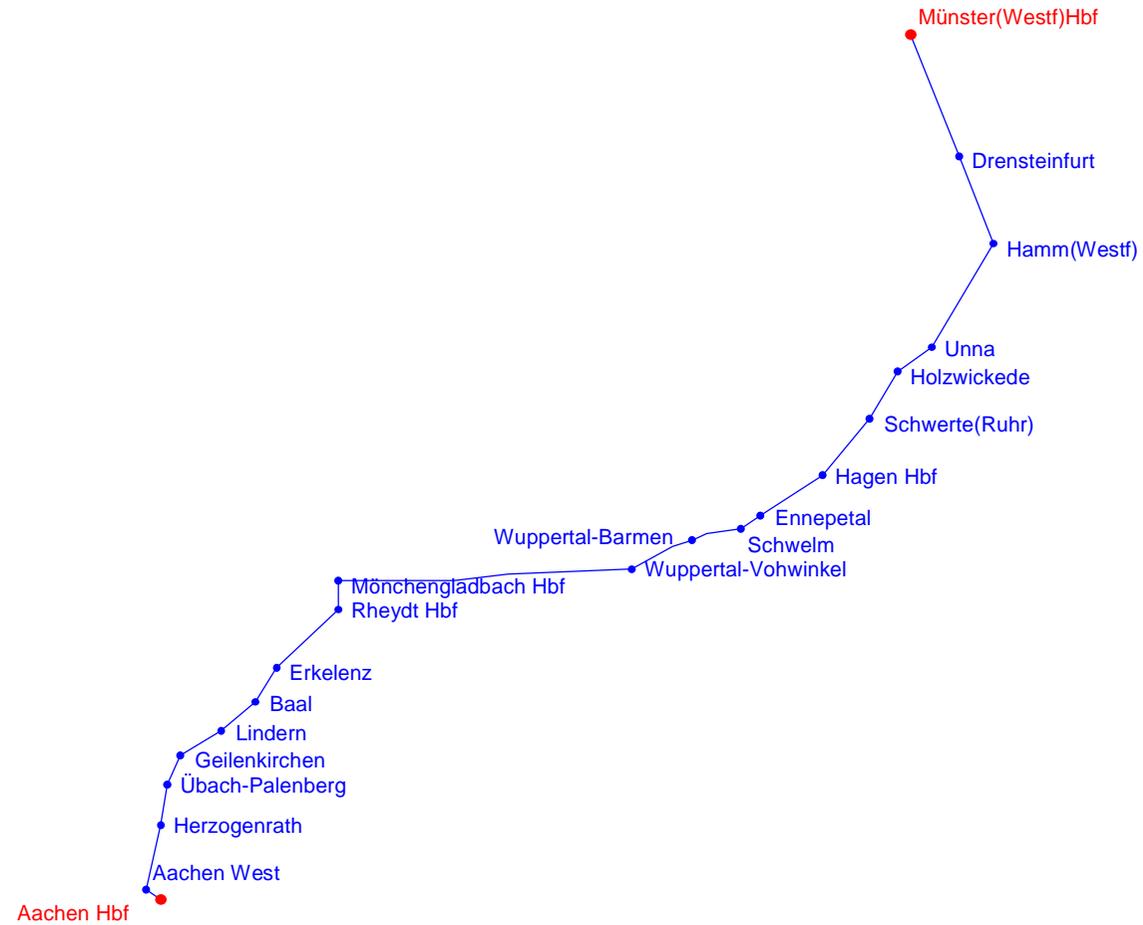
Aachen Hbf --> Bielefeld Hbf

- Aachen Hbf
- Aachen-Rothe Erde
- Stolberg(Rheinl)Hbf
- Eschweiler Hbf
- Langerwehe
- Düren
- Horrem
- Köln-Ehrenfeld
- Köln Hbf
- Köln-Deutz
- Köln-Mülheim
- Leverkusen Mitte
- Düsseldorf-Benrath
- Düsseldorf Hbf
- Düsseldorf Flughafen
- Duisburg Hbf
- Mülheim(Ruhr)Hbf
- Essen Hbf
- Wattenscheid
- Bochum Hbf
- Dortmund Hbf
- Kamen
- Hamm(Westf)
- Heessen
- Ahlen(Westf)
- Neubeckum
- Oelde
- Rheda-Wiedenbrück
- Gütersloh Hbf
- Isselhorst-Avenwedde
- Brackwede
- Bielefeld Hbf



RE 4  
Aachen Hbf --> Münster (Westf.)Hbf

- Aachen Hbf
- Aachen West
- Herzogenrath
- Übach-Palenberg
- Geilenkirchen
- Lindern
- Baal
- Erkelenz
- Rheydt Hbf
- Mönchengladbach Hbf
- Neuss Hbf
- Düsseldorf Hbf
- Wuppertal-Vohwinkel
- Wuppertal Hbf
- Wuppertal-Barmen
- Wuppertal-Oberbarmen
- Schwelm
- Ennepetal
- Hagen Hbf
- Schwerte(Ruhr)
- Holzwickede
- Unna
- Hamm(Westf)
- Drensteinfurt
- Münster (Westf.) Hbf



## 4 Die Beispielfahrzeuge

Am Beginn des Projektes stellte sich die Frage nach der Auswahl geeigneter Beispielfahrzeuge. Die Entscheidung für eine Baureihe wurde durch viele Restriktionen beeinflusst. Es mussten einerseits Fahrzeuge untersucht werden, bei denen der Projektpartner als Konsorte oder Hersteller wirkte, andererseits sollten ausreichende Informationen über die Lebensphasen des Fahrzeuges vorliegen.

### 4.1 Der elektrische Triebzug der Baureihe ET 420/421

Mit der Auswahl des elektrischen Triebzuges der Baureihe ET 420/421 fiel die Wahl auf ein Fahrzeug, an dem der Projektpartner Siemens Verkehrstechnik als Hersteller beteiligt war und viele Erfahrungen aus Betrieb und Instandhaltung vorhanden sind.



Bild 9: ET 420/421 im Hbf Frankfurt (M) Foto: Altmann

Der ET 420/421 ist ein aus drei Triebwagen bestehender Triebzug mit der Radsatzfolge Bo'Bo'+Bo'Bo'+Bo'Bo'. Bedingt durch seinen Einsatz, mit kurzen

Haltestellenabständen in den Kerngebieten und größeren Haltestellenabständen in den Randgebieten, werden von diesem Triebzug hohe Anfahrbeschleunigungs- und Bremswerte gefordert. Um jedoch auch zwischen den „Fernzügen“ ohne separate S-Bahn-Trasse zum Einsatz zu kommen, ist die zu erreichende Höchstgeschwindigkeit mit 120 km/h gefordert worden. Um dieses anspruchsvolle Leistungsprogramm zu erfüllen, wurden 2400 kW Dauerleistung je Einheit installiert. Diese installierte Leistung ermöglicht bis zu einer Geschwindigkeit von 60 km/h eine Anfahrbeschleunigung von  $1\text{m/s}^2$ . Die Reisebeschleunigung bis zur Höchstgeschwindigkeit beträgt  $0,9\text{ m/s}^2$ . Die elektrische Widerstandsbremse erreicht eine Bremsverzögerung von  $0,9\text{ m/s}^2$ . Angetrieben wird der Triebzug durch insgesamt 12 Tatzlagermotoren mit einseitigem Getriebe und gefedertem Großrad.

Die Fahrzeuge sind so ausgelegt, dass ein Betrieb als „Langzug“ mit bis zu drei Treibwageneinheiten, in Mehrfachtraktion gesteuert vom jeweils vordersten Triebwagen aus, möglich ist. Für die Fahrzeuge dieser Bauserie wurde eine geringe Fußbodenhöhe, 1 m über Schienenoberkante, gefordert, diese Forderung bedingte, die Fahrzeuge ohne Stufen zu konstruieren. Diese Forderung bedingte aber auch eine sehr platzsparende und kompakte Anordnung der elektrischen Ausrüstung in Unterflurcontainern.

Ein Triebzug vermag bei einer Maximalauslastung mit 6 Personen/m<sup>2</sup> bis zu 575 Personen zu befördern. Um bei diesem hohen Beförderungsvermögen einen zügigen Fahrgastwechsel zu ermöglichen, ist die Einheit mit 12 Doppel-Taschen- bzw. Doppel-Schwenk-Schiebetüren mit Druckluftantrieb und 1.000 mm Durchgangsweite ausgerüstet.

Der Wagenkasten der Endtriebwagen der ersten Bauserie ist im Stahlleichtbau, der Mitteltriebwagen in Aluminium-Strangpressprofilbauweise gefertigt. Ab der zweiten Bauserie ist der gesamte Triebzug eine hauptsächlich aus Strangpressprofilen geschweißte, selbsttragende, verwindungssteife Aluminium-Röhrenkonstruktion in Spanten- und Schalenbauweise.

Die erste Bauserie dieser Fahrzeuge wurde 1969 ausgeliefert. Der letzte und damit 390ste Zug wurde Mitte 1990 an die Deutsche Bundesbahn übergeben. Die Fahrzeuge sind derzeit ausschließlich in den Ballungsräumen Rhein-Main-Gebiet, im Raum Stuttgart und in München beheimatet und eingesetzt, von einem zeitweisen Einsatz im Ruhrgebiet einmal abgesehen.

Für die Untersuchungen im Rahmen des Projektes BAHNKREIS entschied man sich für die Untersuchung der Einsatzstaffel im Rhein-Main-Gebiet. Hintergrund

dieser Entscheidung war das Mitwirken des Rhein-Main Verkehrsverbundes als Projektpartner in diesem Projekt. Auf diesem Wege standen nicht nur technische und betriebliche Daten über diese Baureihe dem Projekt zur Verfügung, sondern auch Informationen über die Akzeptanz der Fahrzeuge bei den Kunden.

Durch die Bündelung der Schienenwege im Verkehrsknoten Frankfurt am Main weist das Kernnetz extreme topografische Verhältnisse auf. In diesen Bereichen ist mit sehr steilen Rampen und engsten Gleisbögen zu rechnen. Dadurch werden die Fahrzeuge in sehr hohem Maß beansprucht.

### **Die Wahl des Untersuchungsgebietes grenzt die Fahrzeuge auf eine Teilflotte der ET 420/421 ein, die zweite und dritte Bauserie.**

Die Teilflotte bzw. Einsatzstaffel im Rhein-Main-Gebiet umfasst 130 Einheiten, die alle in Frankfurt-Griesheim beheimatet sind. In diesem Werk erfolgen die präventiven und korrektiven Instandhaltungen während der betrieblichen Vorhaltungszeit. In der „ET-Leitstelle“, die sich ebenfalls in Frankfurt-Griesheim befindet, erfolgt die Disposition der Triebzüge.

Nach der entsprechenden Laufleistung erfolgt die Revision (EBO-Untersuchung) der Fahrzeuge im Werk Nürnberg, die oft auch mit Modernisierung und Designwechsel verbunden wird.

## **4.2 Der Doppelstockreisezugwagen DABz 756**

Ursprünglich sollten neben den gesamten in Aachen beheimateten Doppelstockreisezugwagen auch einige Fahrzeuge aus dem Bw Frankfurt-Griesheim als Referenzfahrzeuge in die Untersuchungen durch den BAHNKREIS einbezogen werden /1/.

| Fahrzeugbauart        | Anzahl | Beheimatung   |
|-----------------------|--------|---------------|
| DBz <sup>751</sup>    | 27     | Aachen        |
| DBz <sup>751</sup>    | 32     | Frankfurt (M) |
| DBpz <sup>753</sup>   | 1      | Aachen        |
| DBpz <sup>753</sup>   | 19     | Frankfurt (M) |
| DBpkz <sup>7531</sup> | 6      | Aachen        |
| DABz <sup>756</sup>   | 30     | Aachen        |
| DABz <sup>756</sup>   | 14     | Frankfurt (M) |

|                        |    |               |
|------------------------|----|---------------|
| DABpz <sup>758</sup>   | 3  | Aachen        |
| DBbzf <sup>761</sup>   | 8  | Frankfurt (M) |
| DBbzf <sup>7612</sup>  | 17 | Aachen        |
| DBpbzf <sup>763</sup>  | 1  | Aachen        |
| DBpbzf <sup>763</sup>  | 12 | Frankfurt (M) |
| DABpbzf <sup>764</sup> | 1  | Frankfurt (M) |

Im Verlauf der Datenbeschaffung wurde die Bauartenvielfalt beschränkt. Als Gründe dafür sind sowohl ein unerwartet hoher Abstimmungsbedarf mit DB Regio als auch Bedenken in Hinsicht auf statistische Sicherheit der ermittelten Werte, gerade bei Fahrzeugbauarten mit wenigen vorhandenen Exemplaren im Untersuchungskreis, zu nennen. In Abstimmung mit allen Partnern hat man sich für die Bauart DABz 756 des RB Rheinland als Referenzfahrzeug entschieden. Der DABz<sup>756</sup> ist ein Doppelstockreisezugwagen von der Deutschen Wagonbau AG (DWA). Er wurde im Werk Görlitz in Sachsen konstruiert und hergestellt.



Bild 10 Doppelstock-Reisezugwagen DABz<sup>756</sup>

Foto: Altmann

Das Fahrzeug besitzt Fahrgastgroßräume im Unter- und Oberstock sowie einen Fahrgastraum am Wagenende 1 und eine Toilette am Wagenende 2. Seine Länge über Puffer beträgt 26,8m. Er ist für eine maximale

Geschwindigkeit von 140 km/h zugelassen. Die Masse des Wagens ist mit 47,9 t angegeben.

Die Wagen sind mit einer Zugsammelschiene zur Energieversorgung ausgerüstet, die die autarken Batterieladegeräte speist. Die Fahrzeuge laufen auf luftgefederten Drehgestellen der Bauart Görlitz VIII. Diese Bauart DABz 756 unterscheidet sich nur durch je je ein 1.-Klasse-Bereich im Ober- und Unterstock von der Bauart DBz 751. Aus diesem Grund haben beide Fahrzeuge gleiche Instandhaltungsanweisungen und einen einheitlichen Instandhaltungsplan. Die Doppelstockreisezugwagen der Bauart DABz 756 werden auf den in 3.2 beschriebenen Linien im Rheinland eingesetzt.

Die Fahrzeuge sind in Aachen beheimatet und werden dort nach dem System RIGA (Reisezugwagen-Instandhaltung im Ganzzug) instandgehalten. Die Zugverbände verkehren im Normalfall als lokbespannter Zug mit vier Wagen, wovon zwei DABz 756 sind. Als Lokomotive ist im Planfall die BR 111 mit zeitmultiplexer Wendezugsteuerung (ZWS) im Einsatz. Bisweilen werden auch Lok der BR 143 mit ZDS/ZWS verwendet.

### **4.3 Datenbeschaffung und -erfassung**

Grundlage für die Datenerfassung ist ein abgeschlossenes und von allen Partnern bestätigtes Datenmodell des Projektes BAHNKREIS. Die Datenanforderungen gelten für den ET 420/421 und die Beispielbaugruppe Fahrmotor sowie für den Doppelstockreisezugwagen DABz 756 mit der Beispielbaugruppe Zwischenfußboden. Nach den formulierten Anforderungen wurden die Daten in den entsprechenden Werken der DB AG recherchiert. Dabei war zu beachten, dass oft Fahrzeugdaten, insbesondere Kostendaten, als sensibel einzuschätzen sind. Aus diesem Grund war es notwendig, bestimmte Informationen zu filtern.

Bedingt durch unterschiedliche Detaillierungstiefen der beiden Programmmodule war das Vorgehen bei der Datenbeschaffung unterschiedlich. In der folgenden Tabelle, die in /6/ durch alle Projektpartner vereinbart wurde, soll ergänzend zu Band 2 Punkt 3, ein kurzer Überblick über die für beide Beispielfahrzeuge notwendigen Daten gegeben werden. Anbei sind die Formen des Vorliegens der Ausgangsdaten bemerkt.

| <b>Prozessdaten</b>   | <b>ET 420/421</b>                           | <b>DoSto DBz <sup>751</sup>/DABz <sup>756</sup></b> |
|---|---|---|
| Prozessdauer  | Arbeitszettel, Tagebuch, Dispositionsbogen  | AAR-System  |
| Laufkilometer Fahrzeug  | Betriebsbücher, Tagebuch                    | teilweise PC-Dispo, DaRT-System, Zählerstände       |
| Änderungen der Zusammensetzung Fahrzeug (Baugruppen, Werkstoffe)    | Arbeitszettel, AAR                          | AAR-System  |
| Information über Fahrzeugzustand (Alter, Zuverlässigkeit etc.)      | Tagebuch, Betriebsbuch                      | Betriebsbuch, PC-Dispo                              |
| Laufkilometer Baugruppe (nur für überwachungspflichtige Baugruppen) | Dateien                                     | Dateien   |
| Änderungen der Zusammensetzung Baugruppe (Bauteile, Werkstoffe)     | Arbeitszettel, AAR                          | AAR-System  |
| Information über Baugruppenzustand (Alter, Zuverlässigkeit etc.)    | Arbeitszettel                               | Dateien, Papier                                     |
| diverse Gemeinkosten  | AAR, SAP                                    | AAR-System, SAP                                     |
| diverse Einzelkosten  | AAR, Arbeitszettel                          | AAR-System  |
| Werkstoffeinsatz, Art und Menge                                     | AAR, Materialverlangsscheine, Arbeitszettel | AAR-System  |
| Medienverbrauch, Art und Menge                                      | AAR, Materialverlangsscheine, Arbeitszettel | AAR-System  |
| Energie, Art und Menge  | Verbrauchsmessungen in den Werken           | Verbrauchsmessungen in den Werken                   |
| Abfälle/Materialoutput, Art und Menge                               | indirekt Arbeitszettel                      | indirekt AAR-System                                 |
| Schad- und Problemstoffe, Art und Menge                             | Erhebung vor Ort                            | Erhebung vor Ort                                    |
| Schallemissionen  | Erhebung vor Ort                            | Erhebung vor Ort                                    |

| <b>Fahrzeugdaten</b> | <b>ET 420/421</b>      | <b>DoSto DBz <sup>751</sup>/DABz <sup>756</sup></b> |
|----------------------|------------------------|---|
| Baureihe             | Betriebsbücher, Papier | Betriebsbücher, Papier, PC-Dispo                    |
| Bauart               | Betriebsbücher, Papier | Betriebsbücher, Papier, PC-Dispo                    |
| Wagennr.             | Betriebsbücher, Papier | Betriebsbücher, Papier, PC-Dispo                    |
| Hersteller           | Betriebsbücher, Papier | Betriebsbücher, Papier, PC-Dispo                    |
| Baujahr              | Betriebsbücher, Papier | Betriebsbücher, Papier,                             |

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  | PC-Dispo   |
| Datum Indienststellung   | Betriebsbücher, Papier                                   | Betriebsbücher, Papier,<br>PC-Dispo                      |
| Abnahmedatum   | Betriebsbücher, Papier                                   | Betriebsbücher, Papier,<br>PC-Dispo                      |
| Regionalbereich  | Betriebsbücher, Papier                                   | Betriebsbücher, Papier,<br>PC-Dispo                      |
| Heimatbahnhof  | Betriebsbücher, Papier                                   | Betriebsbücher, Papier,<br>PC-Dispo                      |
| ursprüngliche<br>Fahrzeugeigenschaften<br>(Gewicht, Zusammensetzung<br>aus verschiedenen<br>Baugruppen, Zuverlässigkeit,<br>Platzkapazität, Sonstiges) | Baubeschreibungen,<br>Betriebsbücher,<br>Zeichnungssätze | Baubeschreibungen,<br>Betriebsbücher,<br>Zeichnungssätze |

| <b>Werkstoffdaten</b>  | <b>ET 420/421</b>                             | <b>DoSto DB<sup>751</sup>/DABz<sup>756</sup></b> |
|--|---|--|
| Werkstoffgruppe<br>(Werkstoffgruppe)                               | Einteilung nach /5/                           |  |
| Werkstoffbezeichnung u. -typ<br>(Werkstoffnummer und<br>Werkstoff) | nach DIN, Materialdatenbank                   |  |
| Werkstoffpreise  | relative Werkstoffkosten (nach VDI 2225)      |  |
| chemische Zusammensetzung  | Werkstoffeigenschaften aus Werkstoffdatenbank |  |
| Elastizitätsmodul  |   |  |
| Proportionalitätsgrenze  |   |  |
| Ausdehnungskoeffizient   |   |  |
| ertragbare statische<br>Druckspannung/Zugspannung                  |   |  |
| Dauerfestigkeit  |   |  |
| Bruchgrenze  |   |  |
| Brucharbeit  |   |  |
| Entflammbarkeit  |   |  |

Dieser Auszug aus einer Vielfalt von Informationen zeigt die Problematik der Datenbeschaffung und die Wichtigkeit und des Datenmanagements.

Für den ET 420/421 wurden folgende Ansprechpartner befragt:

- Zentrale DB Regio AG
- Werk Nürnberg
- Werk Frankfurt-Griesheim
- ET-Leitstelle in Frankfurt-Griesheim

Für den DABz 756 wurden folgende Ansprechpartner befragt:

- Zentrale DB Regio AG
- Werk Wittenberge
- Werk Aachen

Am Beispiel des ET 420/421 sollen einige Ergebnisse kurz dargestellt werden. Die Untersuchungen beziehen sich auf eine Teilflotte von 30 Triebzügen aus der Teilflotte von 130 Fahrzeugen aus Frankfurt(M). Eine weitere Einschränkung der Betrachtungseinheiten wurde im Verlauf der Datenerhebung im Werk Frankfurt-Griesheim als erforderlich eingeschätzt. Als Grund für diese erneute Verringerung der Betrachtungseinheiten und damit im Grunde genommen Verringerung der statistischen Sicherheit ist die unerwartet hohe Datenmenge zu sehen. Diese Datenmenge lag jedoch nur in Papierform vor und war damit rechentechnisch nur mit sehr hohem Aufwand verwertbar. Der ET 420 wird nach einem laufwegabhängigen Fristenplan instandgehalten. Der zulässige Laufweg zwischen zwei IS 200 (Nachschau) beträgt 7.500 km. Nach 30.000 km absolvierten Laufweg muss eine Frist, deren Umfang nach dem Gesamtlaufweg festgelegt wird, stattfinden. Da die Laufwege umlaufbedingt nicht immer eingehalten werden können, wird eine Abweichung von 10 % vom Eisenbahn-Bundes-Amt geduldet.

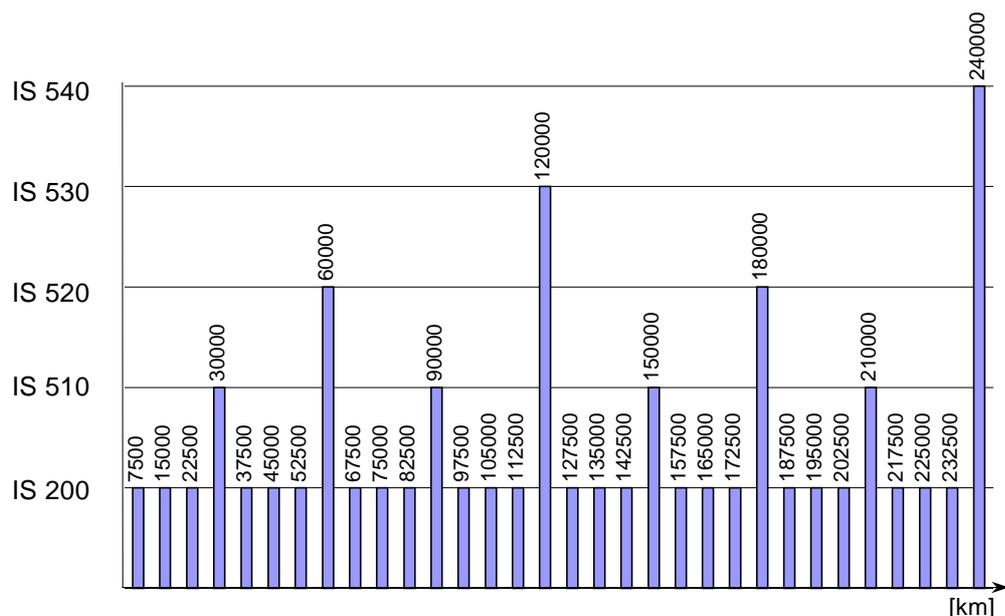


Bild 11: Fristenplan ET 420/421 (Sollzustand) /2/

Grundlage der in Bild 12, Bild 13 und Bild 14 dargestellten Werte sind Aufschreibungen der ET-Leitstelle in Frankfurt-Griesheim von 1997. Die Werte beziehen sich auf reine Werkstattaufenthaltszeiten und sind keine Fertigungsstunden. Weiterhin kann anhand der Werte nicht festgestellt werden, ob ein Zug plan- oder außerplanmäßig zugeführt wurde. Im Untersuchungszeitraum hatten viele der Triebwagen einen Aufenthalt in einem Ausbesserungswerk (C-Werk).

### Verteilung der Zeiten ET 420

30 Züge ET 420 aus der Einsatzflotte Frankfurt/Main 1997

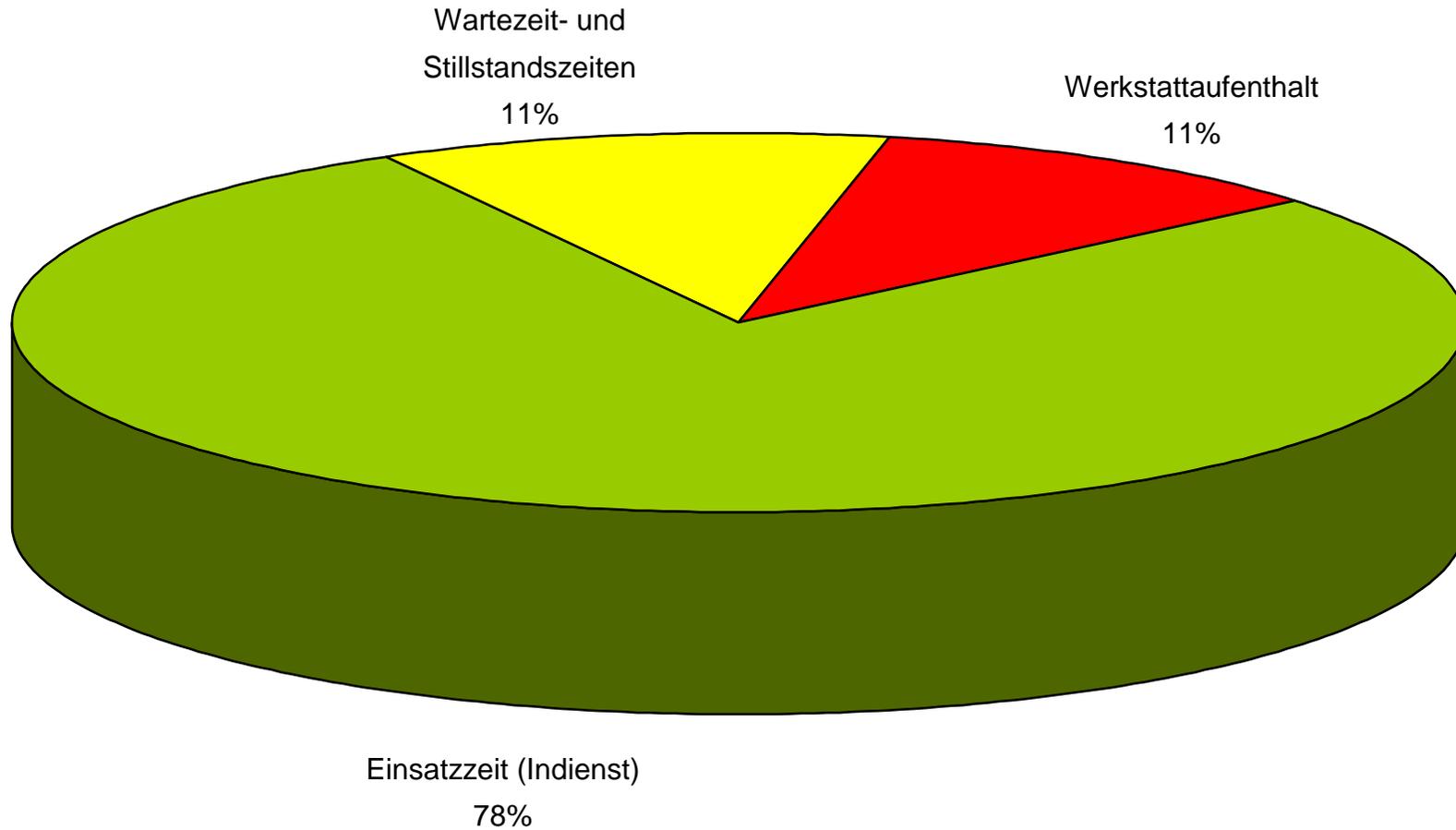


Bild 12: Zeitverteilung /2/

## Verteilung der Instandhaltungsstufen ET 420

30 Züge ET 420 aus der Einsatzflotte Frankfurt/Main 1997

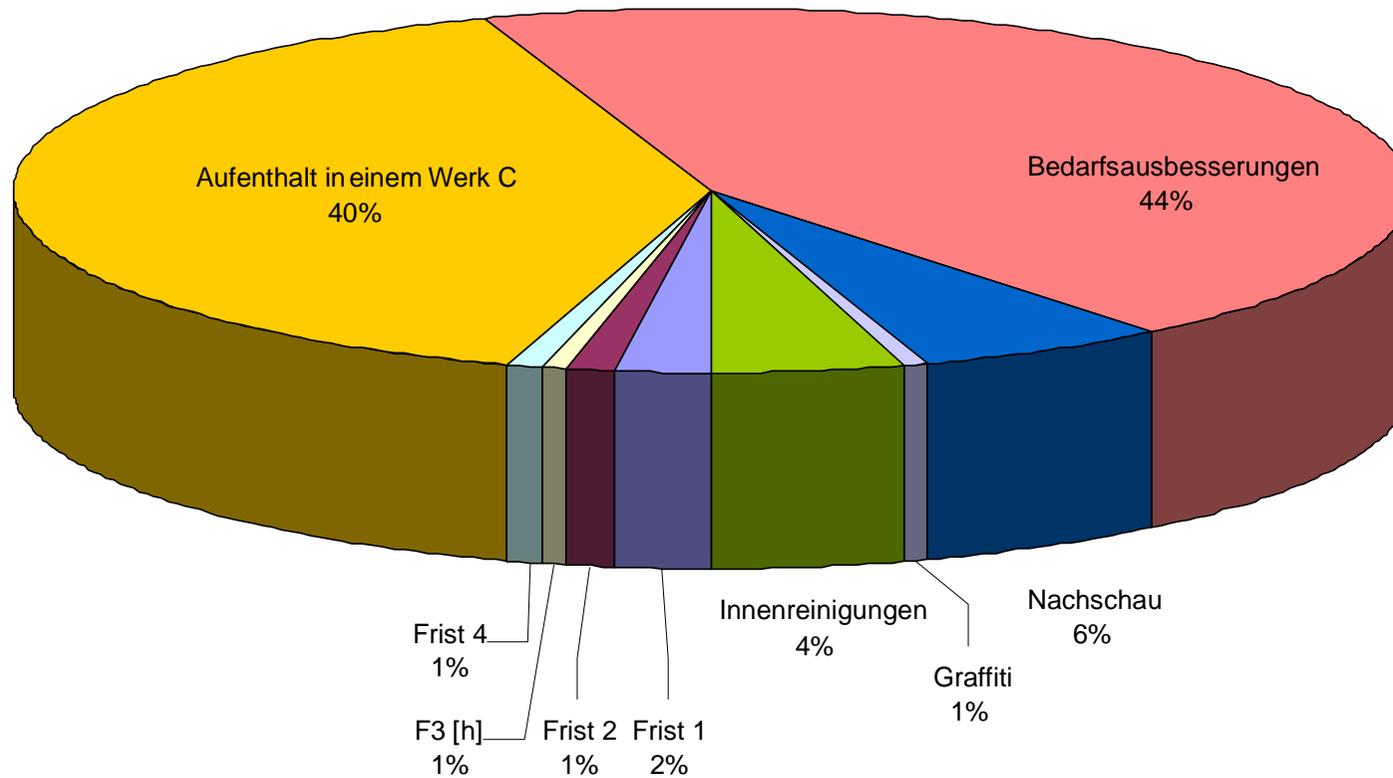


Bild 13: prozentuale Verteilung der Instandhaltungsstufen /2/

### Anzahl der Instandhaltungsstufen ET 420

30 Züge ET 420 aus der Einsatzflotte Frankfurt/Main 1997

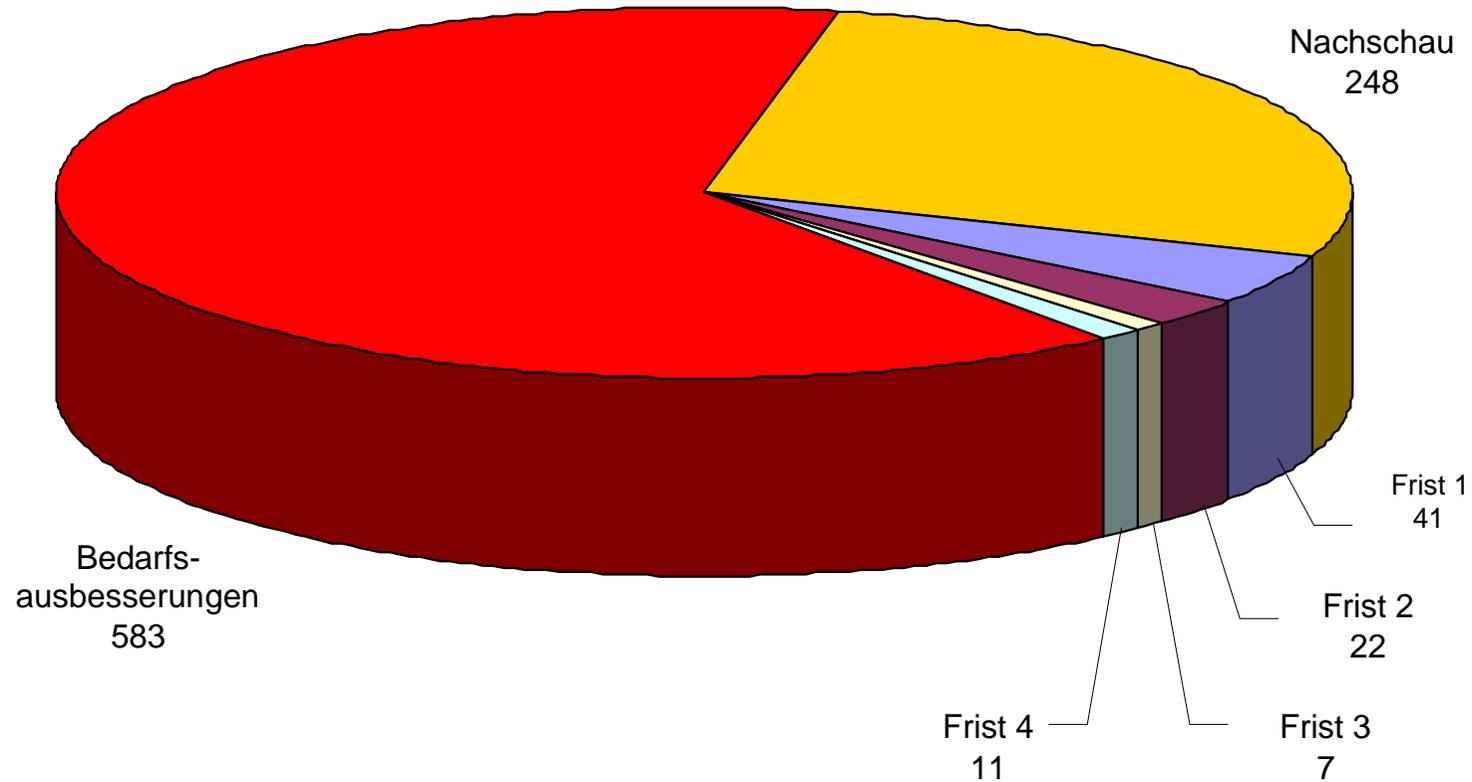


Bild 14: Anzahl der Instandhaltungsmaßnahmen /2/

## 5 Resümee

Ein LCC-Modell ist wie jedes andere Modell eine vereinfachte Wiedergabe der Realität. Jedoch können sich die Sichtweisen auf die Realität mit dem Standpunkt des Betrachters ändern. Die allgemeine Sicht orientiert sich an dem Lebenszyklusprozess, beginnend mit der Konzeptionsphase, schließt die Entwicklung, Konstruktion und Herstellung ebenso ein, wie den Betrieb, die Instandhaltung und die Entsorgung mit einer ökologisch verträglichen Wiedereingliederung der Werkstoffe in den Materialkreislauf.

Bisher haben LCC-Modelle, die von einzelnen Unternehmen entwickelt wurden und demzufolge auf die unternehmensspezifischen Besonderheiten ausgerichtet sind, immer einen eingeschränkten Bilanzkreis abgebildet. Die dabei abgebildeten Kostenstrukturen unterscheiden sich bezüglich Hersteller und Betreiber durchaus. Aber, und darauf kommt es an, jede Modelldefinition führt zwangsläufig zu einem „Gesamtkostendenken“. Nicht die isolierte Kosteneinsparung in einzelnen Lebensphasen gilt es zu erzielen, sondern eine Kostenminimierung über den gesamten Lebensweg hinweg.

Wie jedes theoretische Modell hat auch ein LCC-Modell mit den bekannten gegenläufigen Zielstellungen der Realitätskonformität und der Operationalität zu kämpfen. Einerseits muss das Modell vollständig gültig für den jeweiligen Zweck sein, also alle wesentlichen Relationen enthalten und trotz dem so einfach sein, dass es möglich ist, mit vertretbarem Aufwand optimale bzw. suboptimale Lösungen zu finden. Der konkreten Abgrenzung des realen Sachverhaltes im Modell und der darin enthaltenen Einflussgrößen kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Ein Modell, das aufgrund seiner Komplexität keine praktikable Lösung hervorbringt, ist ebenso wertlos wie eines, welches die Realität nur unzureichend abbildet. Andererseits muss der Aufwand für die Bereitstellung der Daten auch mit vertretbarem Aufwand möglich sein. Es muss ein Kompromis zwischen Komplexität und Handhabbarkeit des Modells gefunden werden, so dass der Nutzen aus der Modellanwendung größer ist als der Aufwand für eine exakte Datenbereitstellung. An dieser Stelle ist ein geeignetes Datenmanagement notwendig. Wer in der Lage ist, der gesamten LC-Prozess zu modellieren und virtuell darzustellen, hat Vorteile. Dieses gilt gleichermaßen für Hersteller und

Betreiber. Wer aber darüber hinaus in der Lage ist, die realen Eingangsgrößen bereit zu stellen, hat die Chance auf nachhaltigen wirtschaftlichen Erfolg. Die Bereitstellung exakter Daten ist also als Bestandteil der Wertschöpfungskette zu sehen und muss unternehmensweit vom Management auch unter diesem Aspekt behandelt werden. Das vielfach anzutreffende Unvermögen, in der Praxis die benötigten Daten auch in der benötigten Form bereitzustellen, zeigt die Aktualität dieser Problematik und die Notwendigkeit einer systematischen wissenschaftlichen Untersuchung auf.

Dieser Antagonismus von LCC-Modellen wurde bereits ausführlich in /7/ dargestellt.

## Literaturverzeichnis

- /1/ Projekt Analysephase, Ergebnisdokument Teilprojekt 1  
Bahnkreis Produktstrukturierung, Berlin März 1999, (unveröffentlicht)
  
- /2/ Projekt Ergebnisdokument Teilprojekt 14/15 „Anforderungen an  
Bahnkreis Schienenfahrzeuge aus Besteller- und Betreibersicht“,  
Brandenburg-Kirchmöser August 2000 (unveröffentlicht)
  
- /3/ DB AG Intranetseiten der DB Netz AG (nicht öffentlich)
  
- /4/ DB AG HaCon Fahrplanauskunft der DB AG  
Version 4.6w
  
- /5/ Projekt Abschlussbericht Projekt BAHNKREIS Band 4  
Bahnkreis „Ganzheitlicher Materialeinsatz“
  
- /6/ Projekt Analysephase, Ergebnisdokument Teilprojekt 6  
Bahnkreis Datendefinition und –strukturierung
  
- /7/ Dr. Strauß P Generierung von LifeCycleCost-Basisdaten  
Vortrag zur Rad 2000, Dresden Oktober 2000



## Verbundprojekt **BAHNKREIS**

Förderkennzeichen des BMBF: 02PV21334

---

## Band 6

### **Anforderungen an Schienenfahrzeuge aus Sicht von Besteller, Betreiber und Hersteller unter besonderer Berücksichtigung der Kreislauffähigkeit**

#### **Verfasser:**

Frau Dipl.-Geogr. B. Radgen

Frau Dipl.-Ing. K. Gerner

Herr Dipl.-Ing. G. Koch

Herr Dr.-Ing. M. Ehinger

Herr Dr.-Ing. G. Löffler

Herr Dr.-Ing. habil. R. Oettel

Herr Dipl.-Ing. H. Schwarz

Herr Dipl.-Ing.(FH) Ch. Lichthardt

Rhein-Main-Verkehrsverbund

Technische Universität Berlin

Bombardier Transportation CE

Technische Universität Dresden

Technische Universität Dresden

Technische Universität Dresden

DB AG Bahnumweltzentrum

DB AG Forschungs- und Technologiezentrum

Brandenburg-Kirchmöser  
8. November 2000

# Verzeichnis der Ergebnisberichte

|        |                                    |
|--------|------------------------------------|
| Band 1 | Projektgrundlagen                  |
| Band 2 | LC-Modell                          |
| Band 3 | Materialkreislaufmodell            |
| Band 4 | Ganzheitlicher Materialeinsatz     |
| Band 5 | Modellanwendung                    |
| Band 6 | Anforderungen an Schienenfahrzeuge |

## **Inhalt Band 6**

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>EINLEITUNG GESAMTDOKUMENT</b>                               | <b>5</b>  |
| <b>2</b>   | <b>FAHRGASTBEFRAGUNG DES RHEIN-MAIN-VERKEHRSVERBUND</b>        | <b>7</b>  |
| 2.1        | Konzept und Durchführung                                       | 7         |
| 2.2        | Auswertung   | 7         |
| <b>3</b>   | <b>KUNDENANFORDERUNGEN</b>                                     | <b>10</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Aufstellung Komfortmerkmale</b>                             | <b>10</b> |
| 3.1.1      | Eingänge, Durchgänge und Übergänge                             | 10        |
| 3.1.2      | Zugänglichkeit für mobilitätseingeschränkte Personen           | 10        |
| 3.1.3      | Schwingungs- und Sitzkomfort                                   | 10        |
| 3.1.4      | Klimatisierung, Heizung  | 11        |
| 3.1.5      | Fahrgastinformationssysteme und Serviceeinrichtungen           | 12        |
| 3.1.6      | Modularität der Inneneinrichtung                               | 12        |
| 3.1.7      | Beleuchtung im Innenraum                                       | 13        |
| 3.1.8      | Schallschutz   | 13        |
| 3.1.9      | Toiletten  | 13        |
| <b>3.2</b> | <b>Aufstellung Sicherheitsmerkmale</b>                         | <b>14</b> |
| 3.2.1      | Durchgängigkeit, Videoüberwachung und Notrufeinrichtungen      | 14        |
| 3.2.2      | Vandalismushemmende Inneneinrichtung                           | 14        |
| <b>3.3</b> | <b>Anforderungen des Arbeits-, Brand- und Personenschutzes</b> | <b>15</b> |
| 3.3.1      | Arbeitsschutz  | 15        |
| 3.3.2      | Brandschutz  | 15        |
| <b>4</b>   | <b>ANFORDERUNGEN AUS DEM BETRIEB DES FAHRZEUGES</b>            | <b>17</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Einsatzspiegel</b>  | <b>17</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Fahrzeughauptabmessungen</b>                                | <b>17</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Zug- und Antriebskonzept</b>                                | <b>17</b> |
| 4.3.1      | Antriebskonzept  | 17        |
| 4.3.2      | Laufwerke  | 19        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>4.4</b> | <b>Einstiegstüren</b>   | <b>20</b> |
| <b>4.5</b> | <b>Platzverteilung</b>  | <b>20</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Beeinflussungen</b>  | <b>21</b> |
| <b>4.7</b> | <b>Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit</b>  | <b>21</b> |
| <b>5</b>   | <b>ANFORDERUNGEN AUS DER INSTANDHALTUNG</b>   | <b>22</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Instandhaltung und Instandhaltbarkeit</b>  | <b>22</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Reinigungsfähigkeit der Inneneinrichtung</b>   | <b>23</b> |
| <b>6</b>   | <b>BETRACHTUNG DER KREISLAUFFÄHIGKEIT VON<br/>SCHIENENFAHRZEUGEN</b>                        | <b>24</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Vorbemerkungen</b>   | <b>24</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Definition der Kreislauffähigkeit</b>  | <b>24</b> |
| <b>6.3</b> | <b>Allgemeingültige Regeln der Kreislauffähigkeit</b>                                       | <b>25</b> |
| 6.3.1      | Konzeptionelle Gestaltung   | 25        |
| 6.3.2      | Bauweisen, Fügeverfahren und Fertigungsverfahren  | 27        |
| 6.3.3      | Materialauswahl   | 29        |
| 6.3.4      | Medienverbrauch und Emissionen  | 30        |
| <b>7</b>   | <b>UMSETZUNG DER ANFORDERUNGEN DURCH DEN HERSTELLER AN<br/>HAND EINER BEISPIELBAUGRUPPE</b> | <b>32</b> |
| <b>8</b>   | <b>ABLEITUNG VON ANFORDERUNGEN UND ERKENNTNISSEN</b>  | <b>33</b> |
|            | <b>ANLAGEN</b>  | <b>34</b> |
|            | <b>VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN</b>  | <b>35</b> |
|            | <b>LITERATURVERZEICHNIS</b>   | <b>36</b> |
|            | <b>VERZEICHNIS DER NORMEN UND RICHTLINIEN</b>   | <b>38</b> |

## 1 Einleitung Gesamtdokument

Das Freizeit- und Arbeitsverhalten in den Ballungsräumen hat sich in den letzten Jahren stark verändert. Daraus resultierend erhöhte sich auch das Mobilitätsbedürfnis und damit die Nachfrage nach Verkehrsleistungen. Aus diesem Grund müssen die Betreiber auf eine aktive Marktstrategie setzen, also verstärkt auf Personen zugehen, die nicht notwendigerweise öffentliche Verkehrsmittel benutzen, sondern bei ihrer Verkehrsmittelwahl auch auf andere Alternativen zurückgreifen können. Diesem Personenkreis müssen überzeugende Argumente und Angebote unterbreitet werden, sich für den SPNV zu entscheiden. Somit stehen die Verkehrsdienstleister im Spannungsfeld einerseits auf die betriebswirtschaftliche Effizienz ihrer Leistungserstellung zu achten und andererseits den Leistungsparametern und Ansprüchen gerecht zu werden, die der Kunde erwartet. [SPARMANN; 1997]

Ziel dieses Dokuments ist es, diese Anforderungen für Schienenfahrzeuge aus Sicht aller Beteiligten am Lebenszyklus als Überblick zu formulieren, dazu gehören der Besteller einer Verkehrsdienstleistung, der Betreiber und die daraus resultierenden Anforderungen an den Hersteller. Der Nutzer dieser Dokumentation soll hiermit kein Lastenheft für ein Schienenfahrzeug erhalten, sondern Anhaltspunkte, die aus heutiger Sicht für Schienenfahrzeuge im Regionalverkehr und im SPNV als üblichen Anforderungen gelten.

Der Band 6 bildet die Forderungen der Besteller und der Betreiber sowie mögliche Lösungsansätze des Herstellers ab. Weiterhin sind grundlegende Informationen zu Schienenfahrzeugen enthalten. Es wurde eine Fahrgastbefragung zur Evaluation der Kundenanforderungen an Schienenfahrzeuge durchgeführt und deren Ergebnisse dargestellt und aufbereitet.

Im Kapitel 6 werden Anforderungen an Schienenfahrzeuge hinsichtlich ihrer Kreislauffähigkeit dargestellt. In diesen Abschnitt sind insbesondere Herstellererfahrungen eingeflossen. Die Erfahrungen zeigen, dass Akzeptanz und Marktchancen neuer Erzeugnisse zunehmend mit der Forderung nach umweltgerechten Produkten verbunden sind. Dabei bezieht sich der Aspekt der Umweltverträglichkeit auf alle Phasen des Produktlebenszyklusses, von der Herstellung über den Gebrauch bis hin zur Entsorgung und ist in diesem Zusammenhang auch ein Ausdruck der Kreislauffähigkeit des Produktes.



**Der Kunde**

**und seine Wünsche**

Bild 1: Der Kunde

## 2 Fahrgastbefragung des Rhein-Main-Verkehrsverbund

### 2.1 Konzept und Durchführung

Neben der technischen Betrachtung von Schienenfahrzeugen stehen für die Betreiber und Besteller der Verkehrsdienstleistungen vor allem die Ansprüche der Fahrgäste an die Fahrzeuge im Vordergrund. Die Anschaffungen von neuen Fahrzeugen bzw. die Modernisierung vorhandener Fahrzeugbestände (Re-Design) sollte sich immer auch an den Bedürfnissen der Fahrgäste orientieren.

Im Rahmen des Projekts BAHNKREIS sollte den Ansprüchen der Fahrgäste aus diesem Grund ein angemessenes Gewicht eingeräumt werden. Der Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV) hat zu diesem Zweck Fahrgastbefragungen in den Fahrgastbeiräten durchgeführt. Fahrgastbeiräte des RMV setzten sich sowohl aus Nutzern des ÖPNV wie auch aus Nutzern des Individualverkehrs und Vertretern aus Verbänden (VCD, Pro Bahn und Bus, ADFC) zusammen und arbeiten für jeweils 3 Jahre zusammen. Die Befragungen fanden zwischen November 1999 und Februar 2000 im Regionalen Fahrgastbeirat und in weiteren lokalen Fahrgastbeiräten statt.

Der Befragungsbogen besteht aus folgenden Teilen (siehe auch Fragebogen):

- Angaben zur Person (Geschlecht, Alter)
- Art, Dauer und Häufigkeit der Nutzung des ÖPNV
- Tableau von 22 Ausstattungsmerkmalen für S-Bahn und Doppelstockreisezugwagen
- Anmerkungen (Möglichkeit für weitere Anregungen/Kritik)

Ziel der Befragung war, die Nutzungsstruktur der befragten Fahrgäste zusammen mit ihren Ansprüchen und Vorstellungen an die Fahrzeuge darzustellen. Im Hauptteil der Befragung wurde deshalb unter der Prämisse erhöhter Fahrpreise nach Wünschen in der Ausstattung gefragt, um die relative Ernsthaftigkeit des Bedürfnisses nach den einzelnen Produkten nachvollziehen zu können. Einer reinen Wunschliste, der kein monetärer Gegenwert gegenüber steht, hätte für den späteren Nutzer des Modells keine Aussagekraft.

Bei unvollständig ausgefüllten Bögen (Keine Angaben) wurde unter Frage 5 („Wie häufig nutzen Sie die einzelnen RMV-Produkte?“) ein „Nie“ angenommen und als „3“ gewertet, bei den Fragen 7 und 8 („Ausstattungsmerkmale“) ein „Nicht sinnvoll“ angenommen und als „0“ gewertet.

### 2.2 Auswertung

Die befragten Personen waren überwiegend männlich (67%). Über die Hälfte der Befragten waren zwischen 30 und 49 Jahre alt (54%), etwa ein Drittel 50 Jahre und älter (35%) und 11 % zwischen 18 und 29 Jahren alt. Annähernd drei Viertel der Befragten (74%) nutzen öffentliche Verkehrsmittel täglich oder mehrmals wöchentlich, während nur 23 % selten oder nie mit öffentlichen Verkehrsmitteln unterwegs sind.

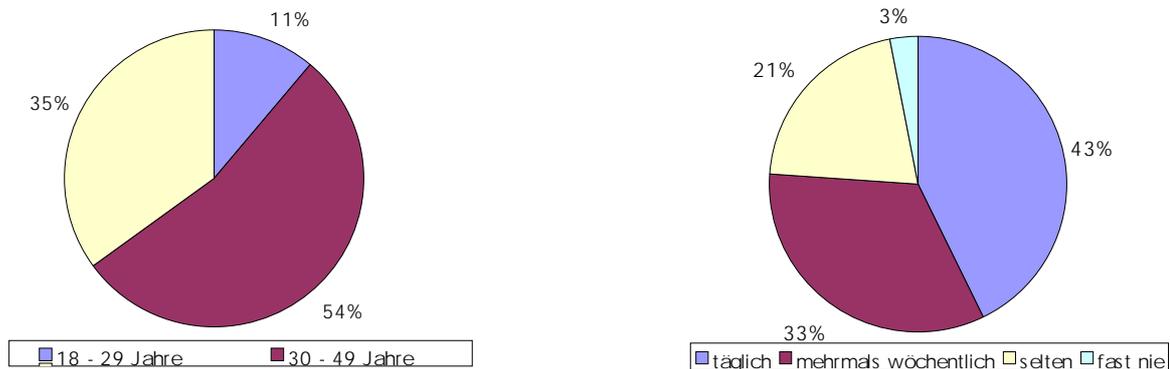
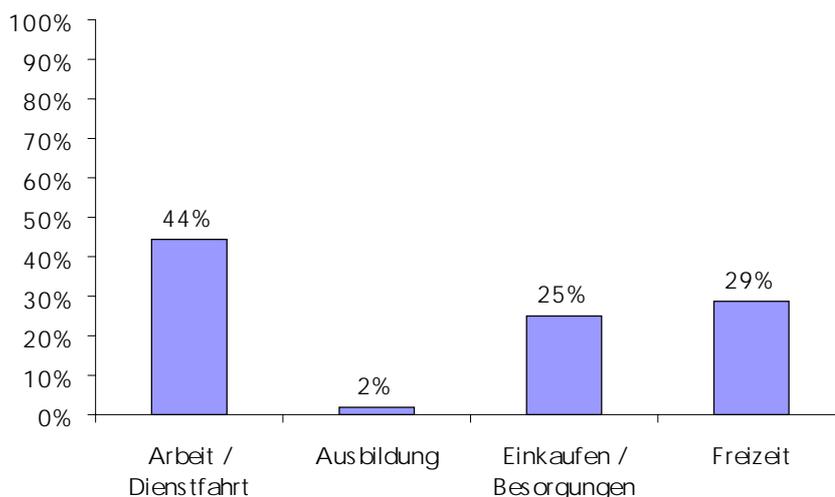


Bild 2: Struktur der befragten Personen

Bei den Fahrtzwecken überwiegt deutlich die Fahrt zum Arbeits- bzw. Ausbildungsplatz oder Dienstfahrten mit 46 % deutlich vor der Nutzung des ÖPNV in der Freizeit (29%) und den Einkaufsfahrten (25%). Mehrfachnennungen waren möglich.

Bild 3: Fahrtzwecke



Bei mir ist Bild 3 irgendwie doppelt, welche Zahlen stimmen?

Im Vergleich der Nutzungshäufigkeiten zwischen S-Bahn und Doppelstockreisezugwagen wird für die S-Bahn eine größere Nutzungshäufigkeit angegeben (53% zu 28% bei der Angabe „häufig“).

Besonders umfangreich waren die Fragen zu den einzelnen Ausstattungsmöglichkeiten, die für beide Fahrzeuge getrennt abgefragt wurden. Aus einem Katalog von 24 Merkmalen sollten die Befragten auf einer Skala von 1-5 die „Sinnhaftigkeit“ der Ausstattungsmerkmale unter der Prämisse eines höheren Fahrpreises bewerten. Es bestand zusätzlich die Möglichkeit, ein Merkmal als „nicht sinnvoll“ zu klassifizieren. Diese Angaben sind im folgenden Diagramm als „Nullwert“ dargestellt.

Die Merkmale sind in die Kategorien „Sicherheit“, „Service“ und „Komfort“ strukturiert. Da einige Merkmale nur in einer der beiden untersuchten Zugkategorien sinnvoll bzw. andere bereits umgesetzt sind, unterscheiden sich die Merkmalslisten beider Fahrzeuge in einigen Punkten.

Die Ergebnisse der Befragung stehen als Grundlage für Lastenheftforderungen der Besteller von Fahrzeugen zur Verfügung. Auch für das Modell zur LCC/LCA-Betrachtung ermöglicht die Bewertung der ökologischen und Wirtschaftlichen Auswirkungen im Modell.

Die Ergebnisse bei allen Ausstattungsmerkmalen liegen nah zusammen (Ausstattungsmerkmale), größere Abweichungen sind nicht erkennbar.

Deutlich ist der Wunsch nach sicherheitsrelevanten Ausstattungen wie z. B. einer Kameraüberwachung durch Fahrpersonal und die Durchgängigkeit bei S-Bahn-Zügen. Die Durchgängigkeit kann als großer sicherheitsrelevanter Bestandteil des Fahrzeugs angesehen werden, dem bereits durch das Re-Design des bestehenden Fahrzeugbestands (höhere Transparenz im Wagen) im Rahmen der technischen Machbarkeit Rechnung getragen wurde, z.B. besonders die erhöhte Personalpräsenz als zusätzliches Sicherheitsmerkmal wird von den Fahrgästen geschätzt und für wichtig erachtet. Ähnliches gilt für den Bereich der permanenten Reinigung, der von den Fahrgästen erwartet wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein gewisses "Schmuddelimage" im ÖPNV eine erhebliche Wirkung auf das Verkehrsmittelwahlverhalten der Fahrgäste hat.

Informationen über ein automatisches Fahrgastinformationssystem (FIS) werden ebenso wie die Möglichkeit im Doppelstockreisezugwagen Sitzplätze reservieren zu können hoch bewertet.

Kleinere zusätzliche Komfortmerkmale wie Tische, Leselampen und Steckdosen am Platz werden von den Befragten durchaus als positiver Mehrnutzen angesehen. Die gewünschte Klimaanlage in den Doppelstockreisezugwagen als Komfortmerkmal kann als relevantes Signal bewertet werden, was dem Trend der Fahrzeugentwicklung entspricht.

Für beide Fahrzeuge werden verschließbare Gepäckfächer, Bewirtungsmöglichkeiten Kartentelefone, Sonnenrollos (S-Bahn) und Spiegel als wenig relevant eingeschätzt.

Die bestehende Ausstattungsqualität der Böden (Gummi oder Textilbelag) und der Sitze (Textilbezüge) werden von den Fahrgästen ebenso akzeptiert, wie die Anzahl der Türen im Doppelstockreisezugwagen. Man kann also davon ausgehen, dass in diesen Bereichen eine Qualität in den untersuchten Fahrzeugen erreicht wurde, die von den Fahrgästen akzeptiert wird und nicht weiter ausgebaut werden muss.

Die insgesamt eher geringe Streuung der Mittelwerte lässt sich durch zwei Dinge begründen. Erstens wurde nur nach Ausstattungsmerkmalen gefragt, die aus Sicht vorhandener Erkenntnisse der Marktforschung sinnvoll und gewünscht sind, und zweitens wurde damit kombiniert die Zahlungsbereitschaft der Fahrgäste für neue Ausstattungsmerkmale abgefragt, um die Ernsthaftigkeit der Angaben zu prüfen.

### **3 Kundenanforderungen**

#### **3.1 Aufstellung Komfortmerkmale**

##### **3.1.1 Eingänge, Durchgänge und Übergänge**

Eingänge an Schienenfahrzeugen müssen von außen gut erkennbar sein, um somit dem Fahrgast bereits beim Einfahren der Fahrzeuge in die Station den Eingangsbereich sichtbar zu machen. Die Fahrgäste können sich so positionieren und damit die Dauer des Ein- und Aussteigeprozesses verkürzen. Auf weitere Details wird in Punkt 4.4 eingegangen.

Nach den Türen schließt sich im Fahrzeug der Eingangs- bzw. Ausgangsbereich an. Diese Bereiche sollen so geräumig gestaltet werden, dass ein großer Teil der Fahrgäste vor dem Aus- bzw. nach dem Einsteigen gesammelt werden kann. Weiterhin bietet sich eine teilweise Nutzung als Abstellraum für Fahrräder, Kinderwagen, Rollstühle und Gepäck an. Nach dem Vorraum schließt sich der Sitzbereich mit mehreren Abteilen oder als Großraumabteil an. Der Fahrgast muss die Sitze auf dem kürzesten Weg und bequem erreichen können. Die Gangbreiten in den Fahrzeugen sind abhängig von der Gefäßgröße (siehe 4.2) und der Sitzverteilung (siehe 3.1.3). Im Bereich der 1. Klasse ist mit einer geringeren Gangbreite zu Gunsten der Sitzbreite zu rechnen.

##### **3.1.2 Zugänglichkeit für mobilitätseingeschränkte Personen**

Um mobilitätseingeschränkten Personen einen leichten Zugang zu den Fahrzeugen zu verschaffen, ist es notwendig, einen Niveauabgleich zwischen der Ebene des Fahrzeugbodens und dem Bahnsteig zu schaffen. Dazu können verschiedene Wege beschriftet werden. Ein möglicher Weg ist die normale Niveauregelung der Fahrzeuge, die jedoch nur an eine bestimmte Bahnsteighöhe angepasst ist.

Ein weiterer möglicher Weg ist es, über Klapprampen oder Hublifte dem Fahrgast einen stufenlosen Zugang zum Fahrzeug zu ermöglichen. Bei der Auslegung der Bauteile sind die typischen Belastungen zu beachten. Die mechanischen Baugruppen unterliegen gerade in den Wintermonaten großen Belastungen durch Eis, Flugschnee und Streugut. Hublifte und Klapprampen sind vorzugsweise an beiden Seiten des Fahrzeuges an den zum Führerraum nächstliegenden Einstiegen vorzusehen.

##### **3.1.3 Schwingungs- und Sitzkomfort**

Eine große Bedeutung für die Akzeptanz eines Fahrzeuges ist der erste Gesamteindruck beim Betreten des Innenraumes. Dieser Gesamteindruck wird u. a. geprägt durch die Anordnung der Sitze im Raum. Nach der „ersten Fahrt“ kommt zum visuellen Eindruck das Fahrgefühl hinzu. Letzterer wird durch die Fahrzeugschwingungen wesentlich beeinflusst.

Um dem Reisenden ein angenehmes Fahrgefühl zu vermitteln, müssen Resonanzen zwischen Fahrwerk und Fahrzeugkasten vermieden werden. Daher sind die Eigenfrequenzen des Fahrzeugkastens in komplett ausgerüstetem Zustand im Verhältnis zu den Eigenfrequenzen des Fahrwerkes kleiner  $\sqrt{2}$  auszulegen. [DB; 1993]

Der Sitzkomfort hängt von verschiedenen Einzelfaktoren ab, die jedoch nicht nur die Abmessungen des Sitzes sondern auch seine Anordnung im Abteil und seine Form betreffen.

Als Sitzform unterscheidet man Sitzbänke oder Einzelsitze. Für den SPNV können beide Sitzformen zum Einsatz kommen. Für Fahrzeuge, die hauptsächlich im S-Bahnbereich verkehren, haben sich aus Platzgründen Sitzbänke durchgesetzt. Für Fahrzeuge im Regionalverkehr und in der 1. Klasse werden häufig Einzelsitze vorgesehen. Die Sitzform beeinflusst somit die Sitzbreite. Diese muss, unbequem zu sitzen, mindestens 450 mm betragen. Aus psychologischen Gründen bietet es sich an, eine fahrtrichtungsabhängige Verteilung der Sitze vorzunehmen. Bei Fahrzeugen mit geringer Breite können die Sitze auch in Fahrzeuggängsrichtung angeordnet werden. Bei dieser Anordnung kommt es aber zu Einbußen im Fahrkomfort durch unangenehme Beschleunigungswirkungen auf die Fahrgäste. [GROCHE; 1980]

Für den Regionalverkehr ist die günstigste Anordnung eine 2+2-Sitzteilung. Eine weitere Bestuhlungsvariante ist die 3+1-Sitzteilung. Untersuchungen ergaben jedoch, dass der Dreiteiler schlechter ausgenutzt wird als der Zweireiher [KOTTENHOFF; 1996]. Weiterhin wurde festgestellt, dass eine bestimmte Anzahl der Fahrgäste eine Reihenbestuhlung der Vis-a-Vis-Bestuhlung vorzieht [GROCHE; 1980]. Aus diesem Grund ist es von Vorteil, beide Bestuhlungsarten in den Fahrzeugen zu ermöglichen (Modulkonzept). In den Vis-a-Vis-Sitzgruppen können Tische und Kindersitze vorgesehen werden. Um dem Fahrgast einerseits das Gefühl eines großen Raumes zu vermitteln, aber andererseits eine Unterteilung des Fahrgastraumes vorzunehmen, sind Großraumwagen in zwei bis drei Abteile zu untergliedern.

### **3.1.4 Klimatisierung, Heizung**

Die Behaglichkeit ist von verschiedenen Parametern abhängig. Dazu gehören die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Luftgeschwindigkeit und der Luftwechsel. Liegt lediglich einer dieser Parameter außerhalb des Normbereiches, kann dies schon zu einer Beeinträchtigung der Behaglichkeit führen. Beispielsweise können bereits Luftgeschwindigkeiten ab 2 m/s als unangenehm empfunden werden [LÖFFLER, 2000]. Die erforderlichen Normwerte für diese Parameter sind unter anderem im UIC-Merkblatt 553 aufgeführt.

Das Fahrzeugklima ist als ganzheitliches System mit allen Einflussgrößen zu betrachten. Insbesondere sollten Wärmebrücken, Zugluft und thermische Kurzschlüsse durch mangelhafte Trennung von Frischluft- und Kondensatluftkanälen vermieden werden. In Niederflerfahrzeugen ist auch der Fußboden mit einer ausreichenden Wärmedämmung auszurüsten, um eine Beeinträchtigung des Wohlbefindens der Fahrgäste zu vermeiden [HENATSCH; 1980].

Die Klimaanlage muss über eine Regelung verfügen, die individuell und den Gegebenheiten entsprechend einstellbar ist. Dabei muss beachtet werden, dass für den Führerraum des Fahrzeuges andere Anforderungen gelten, als für Fahrgasträume. Z. B. führt ein zu geringer Luftwechselkoeffizient zur schnelleren Ermüdung des Triebfahrzeugführers [DB; 1994]. Schon aus diesem Grund muss der Klimatechnik besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Als Kühlmittel sollten Stoffe Verwendung finden, die dem Stand der Technik entsprechen. D.h. es muss bei der Entscheidung über die Bauart der Klimaanlage geprüft werden, welche Alternativen zum Kühlmittel R134a unter ökonomischen, brandschutztechnischen und ökologischen Aspekten bestehen.

Um längere Ausfallzeiten der Klimaanlage zu vermeiden, muss das Klimagerät so aufgebaut sein, dass es innerhalb kürzester Zeit komplett getauscht und außerhalb des Fahrzeugs instandgesetzt werden kann.

### **3.1.5 Fahrgastinformationssysteme und Serviceeinrichtungen**

Da im Nahverkehr mit einem sehr häufigen Fahrgastwechsel und in Spitzenzeiten auch mit einem sehr hohen Fahrgastaufkommen zu rechnen ist, sind in diesen Fahrzeugen Informationssysteme und Serviceeinrichtungen zur Abwicklung eines reibungslosen Verkehrs unverzichtbar.

Dazu können verschiedene Einrichtungen zur Fahrgastinformation in den Fahrzeugen vorgesehen werden:

- Ansageeinrichtungen innen
- Ansageeinrichtungen außen
- Zugzielanzeige an den Zugspitzen und Fahrzeugseitenwänden
- Innere Zugziel -und Stationsanzeige
- digitaler Sprachspeicher
- Streckenpläne als Aufkleber

Im Regionalverkehr sind in modernen Fahrzeugen Getränke und Imbissautomaten eingerichtet. Dieser von den Reisenden häufig genutzte Service ist entsprechend den Möglichkeiten und dem Einsatzzweck der Fahrzeuge auszuweiten. Es ist bei der Auswahl der Automaten darauf zu achten, dass eine entsprechende Eignung für den Einsatz in Schienenfahrzeugen gewährleistet wird.

### **3.1.6 Modularität der Inneneinrichtung**

Gerade in ÖPNV-Bereichen kann es notwendig werden, die Inneneinrichtung von Fahrzeugen entsprechend dem Verkehrsaufkommen anzupassen. Dabei ist es denkbar, in Abhängigkeit von Saison und Wochentag, Sportgeräte u.ä. zu transportieren. Als Beispiele seien Fahrräder, Skier, Schlitten und Surfbretter genannt. Weiterhin muss im Innenraum auch für Rollstühle und Kinderwagen ein Platz vorgesehen werden. Es bietet sich an, in diesem Bereich Klappsitze für Begleitpersonen vorzusehen. Um auf dieses breite Spektrum von Kundenwünschen einzugehen, ist es von Vorteil, bestimmte Bereiche des Fahrzeuges für eine schnelle Umrüstung vorzusehen. So bietet sich der Raum in der Nähe der Einstiege als ein „modularer Raum“ an. Dieser Bereich soll innerhalb von kurzer Zeit, z. B. in Betriebspausen, an die jeweiligen Erfordernisse angepasst werden können.

Ein weiterer Aspekt der Modularität ist die gemeinsame Nutzung des gleichen Sitzsystems in verschiedenen Fahrzeugen, um Instandhaltungs- und Logistikaufwand zu minimieren.

### 3.1.7 Beleuchtung im Innenraum

Die Beleuchtung des Fahrzeuginneren muss den Anforderungen des Fahrgastes gerecht werden. Daher ist es notwendig, die Beleuchtung der verschiedenen Räume individuell zu gestalten. Während z. B. der Fahrgastraum unterschiedliche Anforderungen wie Ruhe, Lesen, objektives und subjektives Sicherheitsgefühl etc. erfüllen muss, werden an den Türraum in erster Linie Anforderungen im Sinne des sicheren Fahrgastwechsels gestellt (Durchgangszone) [GROCHE; 1980]. Demnach werden an die Beleuchtung eines Fahrzeugs die unterschiedlichsten Anforderungen gestellt, die nur durch eine differenzierte Lichtarchitektur erfüllt werden können. Diese muss das Zusammenspiel von direkter und indirekter Beleuchtung sowie die Farbgebung von Decke und Wänden berücksichtigen.

Die Innenbeleuchtung ist als Allgemein- und Notbeleuchtung auszulegen. Um Ausfälle der Beleuchtung zu vermeiden, muss die Beleuchtung über die Fahrzeugbatterie geschaltet sein [DB; 1995]. Zur Wagenreinigung und bei Ausfall der Batterieladung muss zudem die Beleuchtung je Einzelwagen und für den ganzen Zug über eine Fernsteuerung geschaltet werden können. Die Beleuchtungsstärken sind in dem UIC-Merkblatt 555 aufgeführt. Bei der Auslegung der Führerraumbeleuchtung ist auf ausreichende, den neuesten Erkenntnissen und Normen entsprechende Beleuchtung zu achten (siehe auch 3.3.1). Eine Blendung des Triebfahrzeugführers durch die Fahrgastraumbeleuchtung ist auszuschließen [DB, 1994].

### 3.1.8 Schallschutz

Um die Innengeräusche im Fahrgastraum abzusenken, ist der Fahrgastraum von den Vorräumen zu trennen. Der Schallpegel im Fahrgastraum sollte bei S und U-Bahnen 75 db auf keinen Fall überschreiten. Im Regionalverkehr ist ein Schallpegel von 68 db der Grenzwert. Diese Werte werden bei  $V_{max}$  nach Bedingungen der DIN 45 638 in der Mitte des Fahrgastraumes gemessen. Vom Hersteller ist an den Fahrzeugen eine geeignete Schalldämmung vorzunehmen. [DB, DWA; 1994]

### 3.1.9 Toiletten

In den Fahrzeugen des Regionalverkehrs sind Toiletten vorzusehen (Regionalbahn, Regionalexpress) [GROCHE; 1980]. Die Fahrzeuge der S- und U-Bahn wurden bisher nicht mit Toiletten ausgerüstet, was in erster Linie durch die kurze durchschnittliche Fahrtdauer begründet wird. Ob die Entwicklung in den nächsten Jahren dennoch zu Toilettensystemen auch in den Fahrzeugen der S- und U-Bahnen geht, bleibt abzuwarten.

Die Toiletten in den Fahrzeugen des SPNV müssen für mobilitätseingeschränkte Personen ohne weiteres benutzbar und mit handelsüblichen Elektrorollstühlen befahrbar sein. Daraus ergeben sich insbesondere Anforderungen an die Größe der Toilette und Zugänge sowie Zusatzeinrichtungen wie Haltegriffe und Handläufe [DB; 1995]. Die Toilette muss als reinigungsfreundliche, gegen Spritzwasser abgedichtete Zelle mit Bodenwanne und Abfluss konstruiert sein. Die Ausstattung erfolgt gemäß dem UIC-Merkblatt 563.

In den Fahrgasträumen des Fahrzeuges sollten Piktogramme den Weg zur nächstgelegenen Toilette weisen. Zusätzlich sollte im Fahrgastraum eine leicht einzusehende, elektrische „Frei-Besetzt-Anlage“ der Toilette installiert sein. Eine Integration in die FIS-Anlage ist sinnvoll.

Um den Anforderungen bezüglich des Umweltschutzes gerecht zu werden, ist die Toilette als geschlossenes System mit Abwassersammelbehälter auszuführen. Geschlossene WC-Anlagen müssen sämtliche einschlägigen UIC-Forderungen für Reisezugwagen, DIN- und VDE-Vorschriften erfüllen, insbesondere die UIC-Merkblätter 508-1, 508-2, 557, 563. [DB; 1995]

Die Leistungsfähigkeit des Toilettensystems orientiert sich an den Anforderungen eines Reisezugwagens des Nahverkehrs. Laut UIC-Merkblatt 563 muss mit 0,23-0,25 Toilettenbenutzungen pro Sitzplatz und Einsatzstunde gerechnet werden.

Der Wasserverbrauch pro Spülgang und Handwäsche muss so bemessen sein, dass sowohl den Anforderungen der Hygiene als auch den Anforderungen an einen möglichst geringen Wasserverbrauch genügt wird.

Die Ausführung des Toilettensystems muss frostsicher und Instandhaltungsarm sein. Auch benutzungsunübliche Gegenstände wie Hygieneartikel sollen ohne Funktionsstörung durch das System „geschluckt“ werden. Betriebsspitzen müssen durch das Toilettensystem zuverlässig verarbeitet werden. An den Systemkomponenten durchzuführende Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sind an das Instandhaltungsregime des Fahrzeugbetreibers anzupassen.

## **3.2           Aufstellung Sicherheitsmerkmale**

### **3.2.1       Durchgängigkeit, Videoüberwachung und Notrufeinrichtungen**

Um jedem Fahrgast ein Sicherheitsgefühl zu vermitteln und ihm die Möglichkeit einzuräumen, sich im Notfall aus dem gesamten Zug an das Begleitpersonal oder andere Fahrgäste zu wenden, wird eine Durchgängigkeit oder zumindest eine Durchsichtigkeit des Zugverbandes gefordert. Notrufstellen in jedem Einstiegsraum sollen im Notfall eine Sprechverbindung mit dem Triebfahrzeugführer oder dem Begleitpersonal ermöglichen. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass in bestimmten Bereichen durch eine Videoüberwachung die Sicherheitslage verbessert wird.

### **3.2.2       Vandalismushemmende Inneneinrichtung**

Ein zunehmender Kostenfaktor der Instandhaltung ist die Behebung von Vandalismusschäden, den sogenannten „Schäden durch Dritte“. Diese Schäden sind hauptsächlich im Innenbereich und dort im Bereich der Sitze und der Fensterscheiben zu finden. Im Außenbereich sind es meist Graffiti, die Sonderzuführungen und -arbeiten bedingen.

Durch bestimmte Maßnahmen, wie Drahtgewebe in den Sitzbezügen, Transparenz der Fahrzeuge, geschickte Gestaltung und günstige Werkstoffauswahl, können Schäden vermindert werden.

Sind dennoch Schäden an den Fahrzeugen entstanden, müssen die entsprechenden Bauteile wie Sitze oder Fenster möglichst schnell getauscht werden können (Instandhaltbarkeit), da unansehnliche Fahrzeuge zu einem Imageverlust führen.

### 3.3 Anforderungen des Arbeits-, Brand- und Personenschutzes

Schienenfahrzeuge müssen den Anforderungen des Arbeits-, Brand- und Personenschutzes gerecht werden. Daher müssen in die Konstruktion von Schienenfahrzeugen unter Beachtung eines gesamtheitlichen Betriebskonzepts stets die neuesten Regelungen und Erkenntnisse nach dem Stand der Technik integriert werden [DB; 2000]. Dies setzt voraus, dass sich Hersteller und Betreiber von Schienenfahrzeugen bereits in der Planungsphase intensiv abstimmen. Dabei sollten neben den gesetzlichen Vorschriften u. a. folgende Fragen Berücksichtigung finden:

- Wie kann die Belastung des Personals minimiert und die Unfallverhütung von Seiten der Innenrichtungsgestaltung unterstützt werden?
- Wie kann einem Brand vorgebeugt werden und wie kann ein Brand im Brandfall bekämpft werden?
- Wie können Selbstrettung und Fremdrettung von Fahrgästen und Personal im Notfall durchgeführt werden?

#### 3.3.1 Arbeitsschutz

Die Arbeitsplätze des Personals (z. B. Triebfahrzeugführer und Zugbegleitpersonal) sowie alle mit dem Betrieb und der Instandhaltung des Fahrzeuges anfallenden Tätigkeiten sind unter Beachtung der Ergonomie und des Standes der Technik und Arbeitsmedizin einzurichten. Beispielhaft seien hier die Anforderungen an Führerräume genannt, die in der DIN 5566 geregelt sind. Zusätzlich gelten für Führerräume auch

- das UIC-Merkblatt 651
- die gesetzlichen Unfallverhütungsvorschriften (z.B. GUV 5.6 §16) sowie
- die DB-interne Richtlinie E 132.0133 „Arbeitsschutz und vorbeugender Brandschutz an und in Schienenfahrzeugen“, die im Entwurf vorliegt.

Die Einzelanforderungen an das Fahrzeug sind aus Gefährdungs- und Belastungsanalysen entsprechend dem Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) § 5 zu ermitteln und zu dokumentieren. Zu diesem Zweck müssen auch Erkenntnisse, die sich aus dem Unfall-, Brand- und Störschehen anderer Fahrzeuge ergeben haben, in der Gefährdungsanalyse berücksichtigt werden. [DB, 2000]

Ebenso ist dabei zu untersuchen, ob das Schienenfahrzeug mit zusätzlichen Personen- und Sachschutzeinrichtungen auszurüsten ist. Denkbar wären hier Rauch- und Brandmelder sowie raumabschottende Systeme zur Brandeingrenzung und Unterbindung der Rauchgasausbreitung.

#### 3.3.2 Brandschutz

Die Bestimmungen für den Brandschutz in Schienenfahrzeugen sind in der DIN 5510 „Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen“ festgelegt. Zusätzlich gelten u.a. die Regelungen

- des UIC-Merkblatts 564-2 „Vorschriften über Brandverhütung und Feuerbekämpfung für die im internationalen Verkehr eingesetzten Schienenfahrzeuge, in denen Reisende befördert oder die der Reisezugwagenbauart zugeordnet werden können“
- des UIC-Merkblatts 642 „Besondere Bestimmungen über Brandverhütung und Feuerbekämpfung für die im internationalen Verkehr eingesetzten Triebfahrzeuge und Steuerwagen“

- der DB-interne Richtlinie E 132.0133 „Arbeitsschutz und vorbeugender Brandschutz an und in Schienenfahrzeugen“, die im Entwurf vorliegt.

Hierin geregelt werden z. B. die Einordnung des Fahrzeugs in eine Brandschutzklasse (DIN 5510 Teil 1 bzw. EBA-Verwaltungsvorschrift), welche Materialien und Komponenten aus Sicht des vorbeugenden Brandschutzes für die Verwendung in Schienenfahrzeugen verwendungsfähig sind (DIN 5510 Teil 1), sowie die Ausrüstung der Fahrzeuge mit Brandbekämpfungsmitteln (DIN 5510 Teil 6, UIC-Merkblatt 564-2 sowie EBA-Verwaltungsvorschrift).

Gegebenenfalls sind weitergehende Brandschutzmaßnahmen vorzusehen. Dem Schutz und Erhalt der Handlungsfähigkeit des Triebfahrzeugführers bei notwendiger Weiterfahrt ist hierbei besondere Beachtung zu schenken. Da bei Bränden insbesondere die Rauchentwicklung für Personenschäden verantwortlich ist, könnte z. B. durch die Abschottung und separate Belüftung des Führerraums im Brandfall ein deutlicher Schutz des Triebfahrzeugführers erreicht werden [DB, 2000]. Um im Brandfall die Entwicklung besonders schädlicher Rauchgase zu verhindern, sollten zusätzlich im gesamten Fahrzeug halogen- und bromfreie Kabel, Leitungen und Kanäle verwendet werden.

## 4 Anforderungen aus dem Betrieb des Fahrzeuges

### 4.1 Einsatzspiegel

Um das Fahrzeug optimal an die Bedürfnisse des Kunden und des Betriebs anzupassen wird empfohlen, einen Einsatzspiegel zu erstellen.

Im Einsatzspiegel sollen alle Einsatzbedingungen, denen das Schienenfahrzeug auf seinem Lebensweg ausgesetzt ist, formuliert sein. Es werden die Anteile der Einsatzarten ebenso wie der Einsatzumfang definiert. Mit dem Einsatzspiegel können Erkenntnisse für realitätsnahe Lastgrößen als Grundlage für die Entwicklung bis hin zur Erprobung eines Fahrzeuges gewonnen werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Überschneidungen verschiedener Einzellastgrößen, die im Betrieb auftreten z. B. in Abhängigkeit von konkreten Streckendaten (max. Neigung, min. Bogenhalbmesser, usw.), darzustellen. [EHINGER; 2000]

Für neue Fahrzeuge kann der Einsatzspiegel durch Analogieschlüsse von in Dienst stehenden Fahrzeugen erstellt werden. Wenn veraltete Fahrzeuge durch Neubeschaffungen ersetzt werden sollen, könnten diese Informationen genutzt werden, um das Fahrzeug an die Bedürfnisse des Kunden anzupassen.

### 4.2 Fahrzeughauptabmessungen

Die Hauptabmessungen der Fahrzeuge richten sich nach dem vom Betreiber vorgegebenen Lichtraum. Die Gefäßgröße kann dabei im wesentlichen frei gewählt werden, sinnvollerweise sollte eine Länge von 27,50 m nicht überschritten werden. Je kürzer ein Fahrzeug wird, um so breiter kann es ausgeführt werden. Anhand der vorhandenen Fahrzeugumgrenzungslinie und vorgegebener Fahrzeuglänge wird dann mit Hilfe der Einschränkungsberechnung die mögliche Fahrzeugbreite festgelegt.

### 4.3 Zug- und Antriebskonzept

Das Zugkonzept beinhaltet die Art der Fahrzeugzusammensetzung, die Laufwerksanordnung und das Konzept des Antriebes eines Zugverbandes.

#### 4.3.1 Antriebskonzept

Der lokbespannte Zug besteht aus autarken Einzelwagen und mindestens einem Triebfahrzeug. Bei diesem Zugkonzept wird eine eindeutige Verteilung der Funktionen vorgenommen. Die Aufgaben der Triebfahrzeuge sind nur die Erbringung der Traktionsleistung und die Bereitstellung der Energie für die einzelnen Wagen. Die Wagen übernehmen die Transportfunktion. Soll diese Zugart als Wendezug fahren, muss am Wagenende des Zuges ein Steuerwagen oder ein weiteres Triebfahrzeug vorgesehen werden. Lokbespannte Züge können entsprechend dem Verkehrsaufkommen bzw. der Saison gestärkt oder geschwächt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Leistung des Triebfahrzeuges konstant bleibt. Hat

der Wagenzug eine Grenzanhängelast erreicht, muss ein Triebfahrzeug höherer Leistung bereitgestellt oder in Mehrfachtraktion gefahren werden.

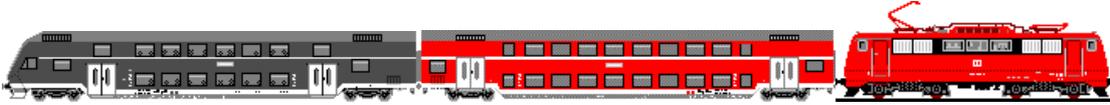


Bild 4: Lokbespannter Zug mit BR 111, DABz 756 und DBpbzf 763.5

Triebzüge bestehen aus einem oder mehreren, meist kurz gekuppelten Triebwagen, Beiwagen und/oder Steuerwagen, die betrieblich nicht getrennt werden. Triebwagen sind Triebfahrzeuge, die Fahrgäste befördern können. Entsprechend dem Antriebskonzept unterscheidet man in Elektrotriebwagen und Verbrennungstriebwagen.

Triebzüge können, ebenso wie Lokzüge, entsprechend dem Verkehrsaufkommen angepasst werden, jedoch verhält sich nur beim Triebzug die installierte Leistung proportional zur Gesamtzugmasse. Die Raumausnutzung bei Triebzügen ist gegenüber dem Lokzug höher, da die Antriebsanlage meist Unterflur angeordnet ist. Das hohe Leistungs-Masse-Verhältnis erlaubt hohe Anfahrbeschleunigungen. Ein Triebzug aus nicht selbstständig verfahrbaren Fahrzeuggliedern wird Gliederzug genannt (Bild 7).

Vorteilhaft beim Triebzug ist die gleichmäßige Verteilung des Antriebes auf den gesamten Zugverband und damit Wegfall eines zusätzlichen Triebfahrzeuges.

Ein wesentlicher Nachteil von Triebzügen ist, dass bei Ausfall der Antriebsanlage auch der Transportraum unverfügbar ist. Triebzüge erfordern außerdem einen höheren Aufwand bei der Instandhaltung.



Bild 5: Dieseltriebwagen BR 172

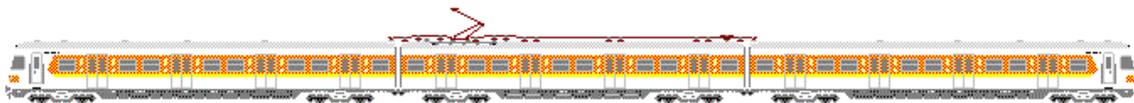


Bild 6: elektrischer Triebwagenzug BR 420/421

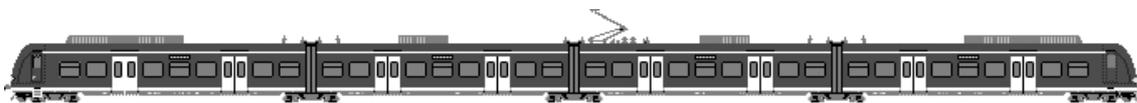


Bild 7: Triebwagengliederzug BR 425

Unter dem Antriebskonzept ist die Art der Energiebereitstellung und -übertragung im Fahrzeug zu verstehen. Dabei kann unterschieden werden, woher die für den Antrieb notwendige Energie bezogen wird und wie die Energie im Fahrzeug zur Bewegung gewandelt wird.

Es wird unterschieden in elektrische, dieselektrische und dieselhydraulische Antriebe. Die Art der Energiebereitstellung und -umwandlung im Fahrzeug hängt sehr stark von den äußeren Randbedingungen des Einsatzes ab. Auf die Wirkprinzipien soll an dieser Stelle nur kurz eingegangen werden.

### **Dieselelektrischer Antrieb**

Die Leistung des Dieselmotors wird in einem Generator in elektrische Leistung umgewandelt und den Fahrmotoren zugeführt. Die Übertragung der mechanischen Energie erfolgt über das Ritzel des elektrischen Fahrmotors auf das Großrad eines oder mehrerer Triebradsätze. Dieselelektrische Triebfahrzeuge verfügen über einen stetigen und gut regelbaren Zugkraftverlauf. Die Fahrtrichtung wird durch Richtungswender geändert [FEIL; 1997].

Der dieselelektrische Antrieb hat den Vorteil der einfachen Verbindung (elektr. Kabel) zwischen Generator (im Lokkasten) und Fahrmotoren (in den Drehgestellen). Außerdem können Werkstatteinrichtungen sowie Personal für elektrische Triebfahrzeuge gleichermaßen genutzt werden. Im Weltmaßstab arbeiten etwa 80% der Dieseltriebfahrzeuge nach dem dieselelektrischen Prinzip. Nachteilig ist die durch mehrmalige Energieumwandlung bedingte Masse des Antriebsstranges und deren hoher Instandhaltungsaufwand.

Als Fahrzeuge aus dem Regionalverkehr mit dieser Antriebsart sind die Baureihen 610 als Triebzug mit Neigetechik oder die BR 234 als Streckendiesellokomotive zu nennen.

### **Dieselhydraulischer Antrieb**

Die Leistung des Dieselmotors wird an ein Strömungsgetriebe abgegeben. Die Drehmomentübertragung vom Strömungsgetriebe auf die Verteilergetriebe und Radsatzgetriebe erfolgt über Gelenkwellen. Dieselhydraulische Fahrzeuge verfügen über eine im gesamten Geschwindigkeitsbereich stetige Zugkraft. Es ist möglich, ohne Gefahr für den Antrieb hohe Anfahrzugkräfte aufzubringen. Die Zugkraft lässt sich durch Drehzahlregelung des Dieselmotors und die Füllung des Strömungsgetriebes regeln [FEIL, 2000].

Das Einsatzgebiet von dieselhydraulischen Fahrzeugen beschränkt sich auf den mitteleuropäischen Raum. Dieselhydraulische Fahrzeuge stellen in der Instandhaltung hohe Anforderungen an die technische Ausrüstung der Werkstätten und die Qualifikation des Personals.

### **Elektrischer Antrieb**

Die elektrische Energie wird in der Regel über die Fahrleitung bereitgestellt und durch einen Stromabnehmer abgegriffen. Im Fahrzeug erfolgt die Umwandlung der Energie in die für die Fahrmotoren günstigste und wirtschaftlichste Form. Weitere Parameter und Eigenschaften dieser komplexen Steuerungs- und Antriebstechnik sind für jedes Triebfahrzeug separat zu spezifizieren. Aus diesem Grund wird auf weitere Details nicht eingegangen.

#### **4.3.2 Laufwerke**

Ein weiteres Kriterium ist die Art des Laufwerkes. So können Fahrzeuge mit freien Lenkradsätzen, Drehgestellen oder Einzelrädern ausgerüstet sein.

Die größte Anzahl der Fahrzeuge sind mit Drehgestellen ausgerüstet. Sie zeichnen sich durch gute Bogenläufigkeit, Eignung für hohe Geschwindigkeiten und hohe Tragfähigkeit aus. Drehgestelle eignen sich für die Ausrüstung mit der im Personenverkehr üblichen zwei-stufigen Federung.

Die Laufgüte ist von zahlreichen Fahrzeug- und Gleisparametern abhängig, wesentliche Elemente sind die Federung und die Dämpfung. Moderne Nahverkehrsfahrzeuge sind mit Luft- oder hydrodynamischen Federungen und hydraulischer Dämpfung ausgerüstet. Diese Abfederungssysteme ermöglichen gleichzeitig eine Niveauregulierung. Die für die Niveauänderung nötigen Verstelleinrichtungen werden in Abhängigkeit von dem für das Bremssystem benötigten Medium angetrieben. Für Fahrzeuge im Vollbahnbereich erfolgt die Regelung des Niveaus über Veränderung des Luftdruckes in den Luftfedern. Im Straßenbahnbereich ist es jedoch üblich, das Bremssystem als Hydraulikanlage auszulegen. Dementsprechend erfolgt die Niveauregelung oft über eine hydro-pneumatische Federung (HP-Feder), bei der die

passive Luftfeder mit einem Hydraulikstempel gekoppelt ist. Eine „weiche“ Ankoppelung des Wagenkastens an das Fahrwerk, mit ausreichenden Federwegen in vertikaler und horizontaler Richtung und die weiche Koppelung der Radsätze an den Fahrwerksrahmen, vermindern die Übertragung von Stößen aus dem Oberbau auf den Wagenkasten. Geringe Massenträgheitsmomente um die Z-Achse (Hochachse) des Fahrzeuges vermeiden Wankbewegungen des Wagenkastens.[MADEYSKI, 1999]

#### 4.4 Einstiegstüren

Türen gewährleisten den Fahrgastwechsel an Haltestellen. Türen stellen aber mit ihrer komplexen Antrieb- und Überwachungstechnik auch Schwachstellen in der Zuverlässigkeit des Fahrzeuges dar. Die Türausschnitte unterbrechen auch die tragende Struktur des Wagenkastens. Aus diesen Gründen sind die Anzahl, die Art und die Größe der Türen auf die Bedingungen des Einsatzes zu optimieren.

Eine gleichmäßige Verteilung der Einstiegstüren über die Zuglänge ermöglicht den zügigsten Fahrgastwechsel. Ein Maß für die Verteilung der Türen ist der **Türabstand**. Unter Türabstand ist das Verhältnis von geringster zu weitester Entfernung von einer Tür zur nächsten Tür am Fahrzeug oder im Zugverband zu verstehen. Er sollte im SPNV nach FEIL (1997) 1-2,5 nicht überschreiten, um einen zügigen Fahrgastwechsel zu gewährleisten.

Die **Türbreite** ist neben der Gesamtürzahl entscheidend für die Geschwindigkeit des Fahrgastwechsels.

Unter der **Türspur** versteht man die von einer Person beanspruchte Türbreite. Die Türspuranzahl ist direkt von der Türbreite abhängig. Eine Türspur muss so breit sein, dass auch Rollstuhlfahrer und Kinderwagen ungehindert passieren können. Im SPNV sind zweispurige Türen üblich. Um eine Kanalisierung der Tür zu erreichen, und damit den Fahrgaststrom zu leiten, werden bei sehr breiten Türen Mittelstangen vorgesehen. [GROCHE, 1980]

Im Nahverkehr sind automatische Türöffnungs- und -schließeinrichtungen Stand der Technik. Forderung ist aber weiterhin die Betätigung von Hand.

Um den Fahrbetrieb zügig abzuwickeln und die Sicherheit der Fahrgäste zu gewährleisten, ist eine vom Lokführer steuerbare seitenselektive Freigabe- und Schließmöglichkeit nach UIC-Merkblatt 560 vorzusehen. Darüber hinaus sollen die Seitentüren nach Betätigung der Schaffnertaste, durch Betätigung des Drucktasters (innen) sowie bei einer Geschwindigkeit von 5km/h schließen. Davon ausgenommen ist die Tür, von der aus "geschlüsselt" wird. [DB, DWA; 1994]

Weiterhin ist jede Seitentür mit einer Lichtschranke, einem akustischem Signal und einem Einklemmschutz auszurüsten, um die Sicherheit der Fahrgäste zu erhöhen.

#### 4.5 Platzverteilung

Die Platzverteilung ist auf den Einsatz des Fahrzeuges abzustimmen (dazu auch 3.1.3). Für einen häufigen Fahrgastwechsel werden eine höhere Anzahl von Stehplätzen vorzusehen sein. Es sind also Unterschiede zwischen S-Bahnfahrzeugen, Fahrzeugen für den Regionalverkehr und Fahrzeugen für den Fernverkehr zu berücksichtigen.

#### 4.6 Beeinflussungen

Es ist sicher zu stellen, dass weder Signalanlagen noch Fernmeldeanlagen durch das Tzf. unzulässig störend beeinflusst werden. Dies gilt nicht nur für den ordnungsgemäßen Betrieb, sondern auch für den Störfall. Beim Überschreiten der Grenzwerte ist eine sichere automatische Abschaltung des Verursachers vorzusehen. Ein Netzfilter zur Einhaltung der Werte ist zu vermeiden [DB, 1994].

#### 4.7 Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

**Zuverlässigkeit** ist die Fähigkeit einer Einheit, eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen und für ein gegebenes Betriebsintervall bzw. Zeitintervall zu erfüllen [WOLTER, 2000].

**Verfügbarkeit** ist die Fähigkeit einer Einheit, sich in einem Zustand zu befinden, in dem diese unter vorgegebenen Bedingungen zu einem vorgegebenen Zeitpunkt oder während einer vorgegebenen Zeitspanne unter der Voraussetzung, dass die erforderlichen äußeren Betriebsmittel bereitstehen, eine geforderte Funktion erfüllen kann [WOLTER, 2000].

Diese wichtigen Kenngrößen werden im wesentlichen durch die Auswahl der Komponenten der Fahrzeuge bestimmt. Sind Kennwerte der Zuverlässigkeit und Instandhaltbarkeit (siehe 5.1) bekannt, kann die Verfügbarkeit rechnerisch bestimmt werden. Um eine hohe Verfügbarkeit zu erreichen, ist ein Minimum an präventiven Instandhaltungsarbeiten und korrektiven Instandsetzungen anzustreben. Das TP 16 befasst sich mit den konstruktiven Möglichkeiten der Erhöhung der Verfügbarkeit.

## 5 Anforderungen aus der Instandhaltung

### 5.1 Instandhaltung und Instandhaltbarkeit

**Instandhaltung**, nach DIN 31051, sind Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustandes sowie zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes von technischen Mitteln eines Systems [WOLTER, 2000].

Bezogen auf Schienenfahrzeuge ist nach WÖHL (1997) die Instandhaltung also die Gesamtheit aller Maßnahmen zur Erhaltung, Wiederherstellung und teilweisen Erhöhung der Gebrauchseigenschaften des Fahrzeuges.

**Instandhaltbarkeit** ist die Fähigkeit einer Einheit, dass an dieser unter gegebenen Einsatzbedingungen eine bestimmte Instandhaltungsmaßnahme innerhalb einer festgelegten Zeitspanne ausgeführt werden kann, wenn die Instandhaltung unter festgelegten Bedingungen erfolgt und festgelegte Verfahren und Hilfsmittel eingesetzt werden [WOLTER, 2000].

Grundsätzlich ist eine Armut von Instandhaltungsmaßnahmen anzustreben. Um eine hohe Instandhaltbarkeit und die Instandhaltungsarmut zu erreichen, ist der Instandhalter rechtzeitig in die Entwicklung und Konstruktion des Fahrzeuges einzubeziehen. Der Instandhalter seinerseits muss konstruktionsgerechte und pönalisierte Instandhaltung garantieren. Um notwendige Werkstattaufenthalte zu minimieren, muss der Zugang und der Tausch aller Bauteile möglichst ohne jeglichen Ausbau von benachbarten Teilen möglich sein. Um die Wartung des Fahrzeuges im Betrieb zu vereinfachen, sind z. B. Schmierstellen zu kennzeichnen. Durch die Verwendung ausreichend erprobter Baugruppen wird eine hohe Zuverlässigkeit und damit eine Optimierung des Instandhaltungsaufwandes erreicht.

Ebenfalls großes Optimierungspotential besteht auf dem Gebiet der Zusammenarbeit zwischen Hersteller, Betreiber und Instandhalter. Dies setzt eine vertrauensvolle Zusammenarbeit aller Partner voraus, die noch verbessert werden muss.

Das Optimierungsziel der Instandhaltung ist im wesentlichen von drei Faktoren und deren Zusammenwirken abhängig. Die Abhängigkeiten werden im Tetramodell nach OETTEL dargestellt.

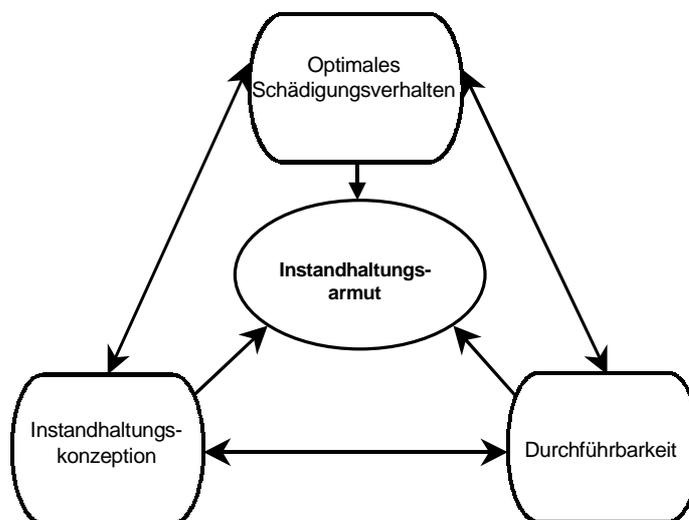


Bild 8: Tetramodell nach OETTEL

### **Instandhaltungskonzeption**

Bei ausreichend erprobten Baugruppen ist der Schädigungsverlauf bekannt und die präventive Instandhaltung kann entsprechend ausgelegt werden. Bei Fahrzeugen mit längerer Betriebserfahrung ist ein mit dem Hersteller abgestimmter und auf Schadensursachen bezogener Instandhaltungsplan auszuarbeiten.

Die Abstände der präventiven Maßnahmen müssen entsprechend den Beanspruchungen ausgelegt sein. Durch iterative Veränderung des Instandhaltungsplanes ist eine zustandsbezogene Instandhaltung als Optimum anzusteuern.

Um eine hohe Arbeitsproduktivität in der Instandhaltung zu erreichen und bisherige Werkstättenerfahrungen optimal zu nutzen, ist innerhalb einer Fahrzeugserie relative Bauteilkonstanz anzustreben. Eine Baugruppenerneuerung darf nur bei technischen Vorteilen und einer kompletten Fahrzeugserie erfolgen, da die Artenvielfalt sonst einen erheblichen Kostenverursacher darstellt.

### **Optimales Schädigungsverhalten**

Unter optimalem Schädigungsverhalten von Baugruppen ist die Zuverlässigkeit und die Überlebenswahrscheinlichkeit zu verstehen. Der Hersteller der Baugruppe hat eine hohe Zuverlässigkeit durch ein geeignetes Wirkprinzip zu garantieren. Durch Mehrfachanwendungen gleicher Baugruppen, Modularbauweise, Minimierung der Bauteilanzahl und Austauschbau wird ein ähnliches Schädigungsverhalten verschiedener Funktionalitäten erreicht. Durch beanspruchungsgerechte Dimensionierung und Abstimmung des Schädigungsverhaltens bestimmter Baugruppen kann ein abgestimmter Fristenplan erstellt werden.

### **Durchführbarkeit**

Am Fahrzeug müssen geeignete Einrichtungen zur Lokalisierung und Diagnose einer Schädigung vorhanden sein. Um Arbeiten an Baugruppen durchzuführen, muss ausreichende Zugänglichkeit und ausreichender Handhaberraum vorgesehen sein. Fügestellen sind entsprechend der Häufigkeit des Eingreifens auszulegen und damit eine gute Demontierbarkeit bzw. Montierbarkeit zu gewährleisten. Bei der Demontage von Hauptbaugruppen ist die Konstruktion so auszulegen, dass andere Baugruppen nicht demontiert werden müssen. Die Nutzung von Spezialwerkzeugen ist zu vermeiden.

## **5.2 Reinigungsfähigkeit der Inneneinrichtung**

Der Fahrzeuginnenraum muss so ausgestaltet sein, dass der Reinigungsvorgang in möglichst kurzer Zeit und mit minimalem Einsatz von Reinigungsmittel, Wasser und Reinigungshilfsstoffen möglich ist. Dies führt zu einem kostenminimalen Reinigungsvorgang, der ebenfalls ökologischen Anforderungen entspricht.

Die Reinigungsfähigkeit des Fahrzeuginnenraumes ist von verschiedenen Einflussgrößen abhängig. Für jede Baugruppe des Fahrzeuginnenraumes können verschiedene Einflussgrößen für das Wirkungsgefüge Baugruppe/Reinigungsfähigkeit definiert werden [DB, 1993]. Beispielhaft sollen an dieser Stelle Sitze, Fußboden, WC sowie Wand- und Deckenverkleidung betrachtet werden. Als allgemeiner Grundsatz für die reinigungsfreundliche Konstruktion gilt: Ecken und Kanten sind auszurunden sowie für eine manuelle Reinigung schlecht zugängliche Bereiche sind zu vermeiden [DB, 1994].

Weitere Hinweise sind in der DIN 25150 „Reinigung der Innenräume von Schienenfahrzeugen (konstruktive Anforderungen)“ aufgeführt.

## 6 Betrachtung der Kreislauffähigkeit von Schienenfahrzeugen

### 6.1 Vorbemerkungen

Die in den vorangehenden Kapiteln dargestellten Anforderungen an Schienenfahrzeuge aus Sicht des Bestellers einer Verkehrsdienstleistung und des Betreibers bilden die Rahmenbedingungen, unter denen der Hersteller sein Produkt optimieren muß. Ein Teil dieser Rahmenbedingungen, wie z.B. Sicherheitsanforderungen oder vom Betreiber des Schienenfahrzeuges geforderte Ausstattungsmerkmale (vgl. Kapitel 3) sind vom Hersteller als in ihren Grundzügen nicht veränderbare Tatsachen hinzunehmen. Wenn ein Betreiber z.B. eine Klimaanlage fordert, so ist diese einzubauen, hier ist der Optimierungsspielraum des Herstellers nur aus die richtige Dimensionierung und die optimale Bauweise beschränkt. Optimierungspotentiale hängen hier stark vom jeweiligen Einzelfall ab.

Dennoch besitzt der Hersteller sehr weitgehende Einflußmöglichkeiten, um das Produkt Schienenfahrzeug über dessen gesamten Produktlebensweg zu optimieren. Er kann unter Beachtung der obengenannten Bedingungen Materialien- Herstellungsprozesse und Bauweisen frei wählen und somit Betrieb, Instandhaltung und Entsorgung beeinflussen. Dies wird landläufig als Produktverantwortung des Herstellers bezeichnet. Vor allem ökologische Anforderungen an Schienenfahrzeuge können nur unter Berücksichtigung des gesamten Lebensweges optimiert werden. In diesem Kapitel werden diese ökologischen Anforderungen an das Schienenfahrzeug unter dem Schlüsselwort Kreislauffähigkeit betrachtet.

Kreislauffähigkeit ist mehr als nur Orientierung auf eine spätere Entsorgung. Handlungsfelder für ein Wirtschaften in Kreisläufen bieten sich für alle am Produktlebenszyklus Beteiligten. Akteure in diesem Prozess sind Produktentwickler und Hersteller, Betreiber, Kunden, Entsorger unter Beachtung der entsprechenden gesetzlichen Rahmenbedingungen. Die hier gewählte Sichtweise bezieht sich speziell auf den am Anfang der Kette stehenden Hersteller und knüpft damit an das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) an, in dem ausdrücklich die Produktverantwortung des Herstellers bei der Durchsetzung von Zielen der Kreislaufwirtschaft betont wird. Begründet wird dies damit, dass in der Phase der Produktentwicklung letztendlich über die umweltgerechte und zugleich wirtschaftliche Gestaltung und somit über eine weitgehende Kreislauffähigkeit des Produktes entschieden wird.

Anknüpfend daran sollen die folgenden Anforderungskatalog methodische Unterstützung bei der Produktentwicklung leisten. Das Dokument liefert Anregungen; Entscheidungen trifft jedoch letztendlich der Entwickler.

### 6.2 Definition der Kreislauffähigkeit

Kreislauffähigkeit ist eine Eigenschaft, die sich relativ problemlos auf Werkstoffe anwenden lässt,

Für *Produkte* läuft die Kreislauffähigkeit auf eine mehrdimensionale Gesamteigenschaft hinaus, die die folgenden wichtigsten Kriterien berücksichtigen muss:

- Baustruktur
- Montagegerechte Gestaltung
- Teilevielfalt
- Vielfalt der Verbindungsarten
- Materialauswahl
- Materialvielfalt
- Werkstoffkennzeichnung
- Werkstoffverbunde
- Demontageaufwand (so wenig Demontage wie möglich, so viel Demontage wie nötig)
- Werkzeugbedarf
- Lösbarkeit
- Zugänglichkeit
- Prüf- und sortiergerechte Gestaltung
- Aufarbeitungsgerechte Gestaltung
- Vorhandene bzw. zu erwartende Verwertungsverfahren für die verwendeten Werkstoffe

Aus dieser Aufstellung wird die Komplexität des Begriffs **Kreislauffähigkeit** deutlich.

Unter **Kreislauffähigkeit** soll eine komplexe Produkteigenschaft verstanden werden, die beschreibt, wie ein Produkt (Schienenfahrzeug, Komponente, Bauteil) auf die im Produktlebenszyklus unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten sinnvollen Recyclingkreisläufe vorbereitet ist.

### 6.3 Allgemeingültige Regeln der Kreislauffähigkeit

In der Literatur werden in großem Umfang Prinzipien zur recyclinggerechten Konstruktion beschrieben. In diesem Zusammenhang wird auf die VDI-Richtlinie 2243 „Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte“ [VDI] sowie die Literaturangaben [Brinkmann], [Käufer] und [Renken] verwiesen. Im vorangegangenen Abschnitt wurde ein sehr enger Zusammenhang zwischen einer recyclinggerechten Produktgestaltung und der Kreislauffähigkeit dargestellt. Prinzipien recyclinggerechter Konstruktion können somit als eine Grundlage für allgemeingültige Regeln der Kreislauffähigkeit genutzt werden.

Im folgenden sollen diese Prinzipien unter Berücksichtigung einer lebenszyklusbezogenen Anwendbarkeit auf Schienenfahrzeuge dargestellt werden

#### 6.3.1 Konzeptionelle Gestaltung

Grundprinzip einer kreislaufgerechten Produktenwicklung ist eine gesamtheitliche Betrachtung des Produktlebenszyklus unter Berücksichtigung von Recyclingkreisläufen in allen Lebenszyklusphasen. Dieses Grundprinzip muss in die konzeptionelle Gestaltung einfließen.

Grundsätzlich sind in den einzelnen Phasen folgende Kreisläufe zu beachten:

| Lfd. Nr. | Phase                        | Kreislauf  | Anmerkungen  |
|----------|------------------------------|--|--|
| 1.1      | Vorketten                    | Materialrecycling<br>Energetische Prozesse<br>Emissionen                         | wird nur in Ausnahmen näher betrachtet   |
| 1.2      | Prozesse beim Zulieferer     | Materialrecycling<br>Energetische Prozesse<br>Emissionen                         | wird nur in Ausnahmen näher betrachtet   |
| 1.3      | Transport                    | Energetische Prozesse<br>Emissionen  | wird nur in Ausnahmen näher betrachtet   |
| 1.4      | Herstellung                  | Produktionsrücklaufrecycling<br><br>Energetische Prozesse<br>Emissionen          | <u>Wiederverwertung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe<br><u>Weiterverwertung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe<br><u>Beseitigung:</u><br>Betriebsstoffe, Hilfsstoffe   |
| 1.5      | Betrieb (einschl. Reinigung) | Materialrecycling<br><br>Energetische Prozesse<br>Emissionen                     | <u>Wiederverwertung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe<br><u>Weiterverwertung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe<br><u>Beseitigung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe   |
| 1.6      | Instandhaltung               | Materialrecycling<br><br>Produktrecycling<br>Energetische Prozesse<br>Emissionen | <u>Wiederverwertung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe<br><u>Weiterverwertung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe<br><u>Beseitigung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe<br><u>Wiederverwendung (Aufarbeitung)</u><br><u>Weiterverwendung</u>  |
| 1.7      | Modernisierung               | Materialrecycling<br><br>Produktrecycling<br>Energetische Prozesse<br>Emissionen | <u>Wiederverwertung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe<br><u>Weiterverwertung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe<br><u>Beseitigung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe<br>Wiederverwendung (Aufarbeitung von Baugruppen)<br>Weiterverwendung |
| 1.8      | Entsorgung                   | Materialrecycling<br><br>Energetische Prozesse<br>Emissionen x                   | <u>Wiederverwertung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe<br><u>Weiterverwertung:</u><br>Werkstoffe, Betriebsstoffe, Hilfsstoffe<br><u>Beseitigung:</u><br>Betriebsstoffe, Hilfsstoffe   |

### 6.3.2 Bauweisen, Fügetechniken und Fertigungsverfahren

Kreislauffähigkeit ist keine rein werkstoffspezifische Eigenschaft, sondern wird vor allem bei einer wirtschaftlichen Beurteilung von Bauweisen, Fügetechniken und Fertigungsverfahren beeinflusst. Im Folgenden werden zwei prinzipielle Bauweisen aus Kreislaufsicht dargestellt:

| Lfd. Nr. | Prinzip              | Erläuterung  | Wirkung in LC-Phase                         |
|----------|----------------------|--|---|
| 2.1      | Integralbauweise     | <u>Vorteile:</u><br>Begünstigung von Einstoffprodukten<br>Reduzierung von Demontageaufwand<br>häufig Reduzierung von Montageaufwand<br><u>Nachteile:</u><br>aufwendige Integralteile<br>hohe Herstellungskosten<br>kritische Belastungen entscheiden über Werkstoffauswahl für gesamtes Bauteil<br>im Schadensfall keine Teildemontage möglich | Herstellung<br>Instandhaltung<br>Entsorgung |
| 2.2      | Differentialbauweise | <u>Vorteile:</u><br>differenzierte Werkstoffauswahl möglich<br>Austausch einzelner Teile möglich<br>i.d.R. Begünstigung einer Leichtbauweise<br><u>Nachteile:</u><br>aufwendige Montage und Demontage<br>Demontage zum Recycling jedoch nur erforderlich, wenn Werkstoffe untereinander nicht verträglich sind                                 | Herstellung<br>Instandhaltung<br>Entsorgung |

Weiterhin können folgende Strategien zur kreislaufgerechten Gestaltung unterschieden werden:

| Lfd. Nr. | Prinzip                                   | Optimierungsansatz  | Wirkung in LC-Phase                         |
|----------|---|---|---|
| 2.3      | Komplexität der Baustrukturen beschränken | Hierarchisch aufgebaute Baustrukturen wählen (Baumstruktur)   | Herstellung<br>Instandhaltung<br>Entsorgung |
| 2.4      | Demontagegerechte Gestaltung              | so wenig Demontage wie möglich, so viel Demontage wie nötig   | Instandhaltung<br>Entsorgung                |
| 2.5      | Demontagegerechte Gestaltung              | Vielfalt der Verbindungsarten reduzieren  | Instandhaltung<br>Entsorgung                |
| 2.6      | Demontagegerechte Gestaltung              | Hoher Standardisierungsgrad von Bauteilen und Verbindungen<br>Standardisierte Verbindungselemente mit geringer Sorten- und Größenvielfalt   | Instandhaltung<br>Entsorgung                |
| 2.7      | Demontagegerechte Gestaltung              | Modularer Aufbau  | Instandhaltung<br>Entsorgung                |
| 2.8      | Demontagegerechte Gestaltung              | Einschränkung des Werkzeugbedarfes, insbesondere an Spezialwerkzeugen   | Instandhaltung<br>Entsorgung                |
| 2.9      | Demontagegerechte Gestaltung              | Gewährleistung der Lösbarkeit unter Beachtung von Sicherheit, Lebensdauer und zu erwartender Korrosion<br>Schutz zu lösender Verbindungen vor Verschmutzung, Korrosion und mechanischen | Instandhaltung<br>Entsorgung                |

| Lfd. Nr. | Prinzip                              | Optimierungsansatz   | Wirkung in LC-Phase           |
|----------|--------------------------------------|--|-------------------------------|
|          |                                      | Schäden  |                               |
| 2.10     | Demontagegerechte Gestaltung         | Zugänglichkeit gewährleisten   | Instandhaltung<br>Entsorgung  |
| 2.11     | Reinigungsgerechte Gestaltung        | Beachtung von Reinigungsvorgängen für Austauschteile<br>Einschränkung von Verschmutzungsmöglichkeiten (glatte statt rauher Oberflächen; Rundungen statt Kanten; Vermeidung von Hinterschneidungen, Stegen, Rippen u. Sacklöchern)<br>kreislaufgerechte Reinigungsmedien vorschlagen bzw. berücksichtigen | Instandhaltung                |
| 2.12     | Reinigungsgerechte Gestaltung        | Reinigungsvorgänge im Betrieb beachten<br>Zugänglichkeit gewährleisten<br>Reinigungsfreundliche Oberflächen wählen<br>kreislaufgerechte Reinigungsmedien vorschlagen bzw. berücksichtigen  | Betrieb                       |
| 2.13     | Prüf- und sortiergerechte Gestaltung | Gewährleistung von Zugänglichkeit  | Instandhaltung<br>Entsorgung  |
| 2.14     | Prüf- und sortiergerechte Gestaltung | Verschleißzustand muß leicht und eindeutig identifizierbar sein  | Instandhaltung                |
| 2.15     | Aufarbeitungsgerechte Gestaltung     | Gewährleistung von Zugänglichkeit  | Instandhaltung                |
| 2.16     | Aufarbeitungsgerechte Gestaltung     | Verschleißlenkung auf ausgewählte Bauteile und Bereiche (möglichst wertmäßig untergeordnet)  | Instandhaltung                |
| 2.17     | Aufarbeitungsgerechte Gestaltung     | Lösbarkeit von Verbindungen unter Beachtung der Lebensdauer und zu erwartender Korrosion gewährleisten<br>Schäden beim Demontieren vermeiden   | Instandhaltung                |
| 2.18     | Wiedermontagegerechte Gestaltung     | Einfache und eindeutige Wiedermontage vorsehen   | Herstellung<br>Instandhaltung |
| 2.19     | Wiedermontagegerechte Gestaltung     | Modularen Aufbau anstreben   | Herstellung<br>Instandhaltung |
| 2.20     | Modernisierungsgerechte Gestaltung   | Vorausschauende Berücksichtigung von Entwicklungstrends  | Herstellung<br>Modernisierung |
| 2.21     | Modernisierungsgerechte Gestaltung   | Modularer Aufbau zur wirtschaftlich günstigen Anpassung an veränderte technische und gestalterische Erfordernisse  | Herstellung<br>Modernisierung |
| 2.22     | Modernisierungsgerechte Gestaltung   | Vermeidung kurzlebiger Gestaltungstrends   | Herstellung<br>Modernisierung |
| 2.23     |                                      | Korrosion konstruktiv vermeiden:<br>keine Spalte unter 0,5 mm (Spaltkorrosion; z.B. an Schweißteilen)<br>Kontaktkorrosion vermeiden:<br>Werkstoffe unterschiedlicher elektrochemischer Potentiale nicht miteinander kombinieren  |                               |

### 6.3.3 Materialauswahl

Kreislauffähigkeit eines Systems wird zunächst durch eine geeignete Materialauswahl bestimmt. Dabei sollten folgende Kriterien beachtet werden:

| Lfd. Nr. | Prinzip   | Erläuterung  | Wirkung in LC-Phase                            |
|----------|---|--|--|
| 3.1      | Berücksichtigung der Entsorgungsphase im Entwicklungsprozeß | Mögliche Verwertungswege unter Beachtung vorhandener bzw. zu erwartender Verwertungsverfahren, Berücksichtigung der wirtschaftlich sinnvollsten Lösungen                     | Instandhaltung<br>Modernisierung<br>Entsorgung |
| 3.2      | Auswahl kreislauffähiger Materialien                        | Bevorzugung recyclingfähiger Werkstoffe unter Berücksichtigung wirtschaftlich durchführbarer Verwertung  | Instandhaltung<br>Modernisierung<br>Entsorgung |
| 3.3      | Auswahl kreislauffähiger Materialien                        | Prüfung von Einsatzmöglichkeiten biologisch abbaubarer Werkstoffe  | Instandhaltung<br>Modernisierung<br>Entsorgung |
| 3.4      | Auswahl kreislauffähiger Materialien                        | Prüfung von Einsatzmöglichkeiten nachwachsender Rohstoffe  | Betrieb<br>Entsorgung                          |
| 3.5      | Auswahl kreislauffähiger Materialien                        | Prüfung von Einsatzmöglichkeiten von Recyclaten  | Betrieb<br>Entsorgung                          |
| 3.6      | Materialvielfalt  | Einstoffprodukte bevorzugen bzw. Werkstoffvielfalt auf funktionell bedingtes Mindestmaß einschränken   | Instandhaltung<br>Modernisierung<br>Entsorgung |
| 3.7      | Werkstoffverbunde   | Werkstoffverbunde vermeiden  | Entsorgung                                     |
| 3.8      | Werkstoffverbunde   | Bei funktionsbedingt unvermeidlichen Werkstoffverbunden ist die Werkstoffverträglichkeit bei gemeinsamer Verwertung zu beachten  | Entsorgung                                     |
| 3.9      | Werkstoffverbunde   | Bei funktionsbedingt unvermeidlichen Werkstoffverbunden sollte eine verfahrenstechnisch wirtschaftliche Trennung und Separierbarkeit ohne manuelle Vorzerlegung möglich sein | Entsorgung                                     |
|          |   | Nicht abtrennbare Verbindungselemente identisch oder verträglich zum Werkstoff des Bauteiles wählen.   |  |
|          |   | Verbindungselemente aus unverträglichen Werkstoffen leicht abtrennbar gestalten.   |  |
| 3.10     | Schadstoffe   | Vermeidung schadstoffhaltiger Werkstoffe   | Instandhaltung<br>Modernisierung<br>Entsorgung |
| 3.11     | Schadstoffe   | Nicht vermeidbare Schadstoffe sind in geeigneter Weise zu kennzeichnen und trennbar bzw. entlehrbar anzuordnen   | Instandhaltung<br>Modernisierung<br>Entsorgung |
| 3.12     | Werkstoffkennzeichnung                                      | Nicht eindeutig identifizierbare Werkstoffe sind in geeigneter Weise zu kennzeichnen.  | Entsorgung                                     |
| 3.13     | Dokumentation   | Die eingesetzten Werkstoffe sind mengenmäßig baugruppenbezogen zu dokumentieren; dabei sind auch alle Zulieferteile zu berücksichtigen                                       | Entsorgung                                     |
| 3.14     | Minimierung von Zusatz- u. Hilfsstoffen                     | Wahl hilfsstoffarmer Fertigungsverfahren   | Herstellung                                    |
| 3.15     | Minimierung von Zusatz- u. Hilfsstoffen                     | Beschränkung auf kreislauffähige Zusatz- u. Hilfsstoffe ohne umweltschädliche Auswir-  | Herstellung,<br>Betrieb,                       |

| Lfd. Nr. | Prinzip                                 | Erläuterung  | Wirkung in LC-Phase                              |
|----------|---|--|--|
|          |   | kungen   | Instandhaltung, Entsorgung                       |
| 3.16     | Minimierung von Zusatz- u. Hilfsstoffen | Verzicht auf Zusatz- u. Hilfsstoffe durch Wahl hochwertiger Werkstoffe (z.B. korrosionsbeständige Werkstoffe)  | Herstellung, Betrieb, Instandhaltung, Entsorgung |
| 3.17     | Ressourcenschonung Kunststoffeinsatz    | Vermeidung eines extensiven Einsatzes von Kunststoffen → Ressourcenknappheit Erdöl, Andererseits ist ein Einsatz zur Gewichtsreduzierung sinnvoll, sofern dies zu erheblichen Einsparungen von Antriebsenergie führt |  |
| 3.18     | Ressourcenschonung Kunststoffeinsatz    | Wenn Kunststoffe verwendet werden, sind toxikologisch unbedenkliche und recyclingfähige Stoffe zu bevorzugen   |  |

### 6.3.4 Medienverbrauch und Emissionen

Über die Aspekte der Werkstoffwahl und Gestaltung hinaus, werden in diesem Dokument auch andere ökologische Prinzipien berücksichtigt durch welche der Hersteller des Schienenfahrzeuges die Medienverbräuche und Emissionen des Produktes im gesamten Lebensweg verringern kann. Erst unter Berücksichtigung dieser Aspekte über den gesamten Lebensweg kann die Kreislauffähigkeit eines Produktes beurteilt werden. Es ist keine Kreislauffähigkeit um jeden Preis anzustreben, sondern der über den gesamten Lebensweg ökologisch und ökonomisch gesehen optimale Grad der Kreislauffähigkeit.

| Lfd. Nr. | Prinzip   | Erläuterung  | Wirkung in LC-Phase    |
|----------|---|--|------------------------|
| 4.1      | Wirkungsgrad der Energieumwandlung beachten                                     | Energiearten mit hohem Wirkungsgrad bevorzugen   | Betrieb                |
| 4.2      | Energieknappheiten beachten   | Anteil regenerativer Energien erhöhen  | Betrieb                |
| 4.3      | Energieknappheiten beachten   | Einsatz nachwachsender Rohstoffe als Alternative zu fossilen Rohstoffen prüfen   | Herstellung<br>Betrieb |
| 4.4      | Minimierung des Energieverbrauchs in der Herstellung                            | Wahl energiesparender Fertigungsverfahren  | Herstellung            |
| 4.5      | Minimierung des Energieverbrauchs im Betrieb                                    | Energieverbrauchsenkung durch Massereduzierung   | Betrieb                |
| 4.6      | Minimierung des Emissionsausstoßes in der Herstellung                           | Wahl emissionsarmer Fertigungsverfahren (z.B. Beschichtungen)  | Herstellung            |
| 4.7      | Minimierung des Emissionsausstoßes im Betrieb                                   | Reduzierung von Emissionsausstoß durch Senkung des Energieverbrauchs   | Betrieb                |
| 4.8      | Minimierung des Emissionsausstoßes und Energieverbrauches im Betrieb            | Reduzierung von Emissionsausstoß durch Minimieren des Abriebs bzw. des Schmiermittelbedarfes an mechanisch belasteten Baugruppen | Betrieb                |
| 4.9      | Minimierung des Emissionsausstoßes und Energieverbrauches im Betrieb            | Reduzierung von Emissionsausstoß durch leicht zu reinigende Materialien  | Betrieb                |
| 4.10     | Minimierung des Emissionsausstoßes und Energieverbrauches in der Instandhaltung | Reduzierung von Emissionsausstoß durch aufarbeitungsgerechte Gestaltung, Prüf- und Sortiergerechte Gestaltung                    | Instandhaltung         |

| <b>Lfd. Nr.</b> | <b>Prinzip</b>  | <b>Erläuterung</b>   | <b>Wirkung in LC-Phase</b> |
|-----------------|---|--|----------------------------|
| 4.11            | Minimierung des Emissionsausstoßes und des Energieverbrauches in der Modernisierung | Reduzierung von Emissionsausstoß durch modernisierungsgerechte Gestaltung                          | Modernisierung             |
| 4.12            | Minimierung des Emissionsausstoßes und des Energieverbrauches in der Entsorgung     | Reduzierung von Emissionsausstoß durch kreislauffähige Materialien, Minimierung von Problemstoffen | Entsorgung                 |

## **7 Umsetzung der Anforderungen durch den Hersteller an Hand einer Beispielbaugruppe**

Kreislaufgerechtheit ist eine extrem komplexe Produkteigenschaft (vgl.6.2). Daher ist es weder zielführend noch vom Datenbedarf her möglich, die Kreislaufgerechtheit eines gesamten Schienenfahrzeuges zu untersuchen. Daher wurden im Rahmen des Teilprojektes 16 zwei Baugruppen ausgewählt, die an Hand der im Abschnitt 7 aufgestellten allgemeinen Regeln auf Kreislauffähigkeit untersucht wurden.

- Der Doppelstock-Zwischenboden. Für diese Baugruppe erfolgte im Projekt eine detaillierte Datenerhebung, die Baugruppe konnte hier also genau analysiert werden.
- Die Luftkanäle des Oberstocks. Diese zweite Baugruppe wurden speziell für die Arbeiten in TP16 untersucht, hier ist der Detaillierungsgrad der Datenerhebung geringer aber ausreichend für die Beurteilung der Kreislauffähigkeit.

Die Struktur der Untersuchung ist allgemeingültig gehalten und bildet so die Grundlage für einen fortschreibungsfähigen Katalog. Weitere Baugruppen können nach diesem Vorbild untersucht werden. Dabei hängt die notwendige Detailtiefe von der Datenlage und der Bedeutung der Baugruppe im Schienenfahrzeug ab. Der Konstrukteur sollte dabei den individuell adäquaten Detaillierungsgrad auswählen.

In der Anlage Beispielbetrachtung zur Kreislauffähigkeit ist die Untersuchung der Baugruppe Zwischenfußboden dargestellt.

## 8 Ableitung von Anforderungen und Erkenntnissen

Der Besteller einer Verkehrsdienstleistung und der Betreiber von Schienenfahrzeugen leben von den Bahnkunden, dem Fahrgast. Werden Kundenwünsche unterbewertet, sind Ertragsrückgänge vorprogrammiert. Hat sich ein Kunde für die Bahn entschieden, dann erwartet er die Systemvorteile der Eisenbahn als Leistungsbestandteil, den er mit dem Fahrpreis bezahlt hat [WOLTER; 2000].

Jedoch hat die Bahn ihren Systemvorteil erst praktisch umgesetzt, wenn

- die Kundenerwartungen bezüglich Sicherheit, Pünktlichkeit und Bequemlichkeit umgesetzt sind,
- das Preis-Leistungsverhältnis den Anforderungen des Verkehrsmarktes entspricht
- und ein kostendeckender Betrieb erhalten werden kann.

Um in diesem Spannungsfeld Lösungswege zu finden und zu optimieren, sind vom Besteller bzw. Betreiber Anforderungen zu formulieren, die durch den Hersteller umzusetzen sind. Diese Anforderungen sind in den RAMS-Bedingungen definiert und durch LCC-Betrachtungen zu validieren.

Die Erfahrungen des Betreibers und des Herstellers sind eine wirksame Unterstützung beim Streben nach einem betriebs- und instandhaltungsgerechten Schienenfahrzeug, sofern beide Seiten einen Erfahrungsaustausch ermöglichen.

Ein intensiver Dialog zwischen allen Beteiligten entlang des Lebenszyklus von Schienenfahrzeugen ist der beste Weg zur Sicherung bzw. Verbesserung der Fahrzeugqualität und damit zur Zufriedenheit des Fahrgastes.

Dazu gehört auch die in Kapitel 6 im Detail behandelte Kreislauffähigkeit des Schienenfahrzeuges. Analog zu den in RAMS – Kennwerten beschriebenen Qualitätsanforderungen wird auch die Anforderung der Kreislauffähigkeit im Lastenheft zu berücksichtigen sein. Ihr werden in der erweiterten Lebenszyklusbetrachtung die dafür benötigten ökonomischen und ökologischen Aufwände gegenübergestellt. Nur wenn auch diese Aspekte in die Optimierungsbemühungen eingeschlossen werden, kann das Grundvertrauen des Kunden, mit dem Schienenfahrzeug ein ökologisches Verkehrsmittel gewählt zu haben, erfüllt werden.

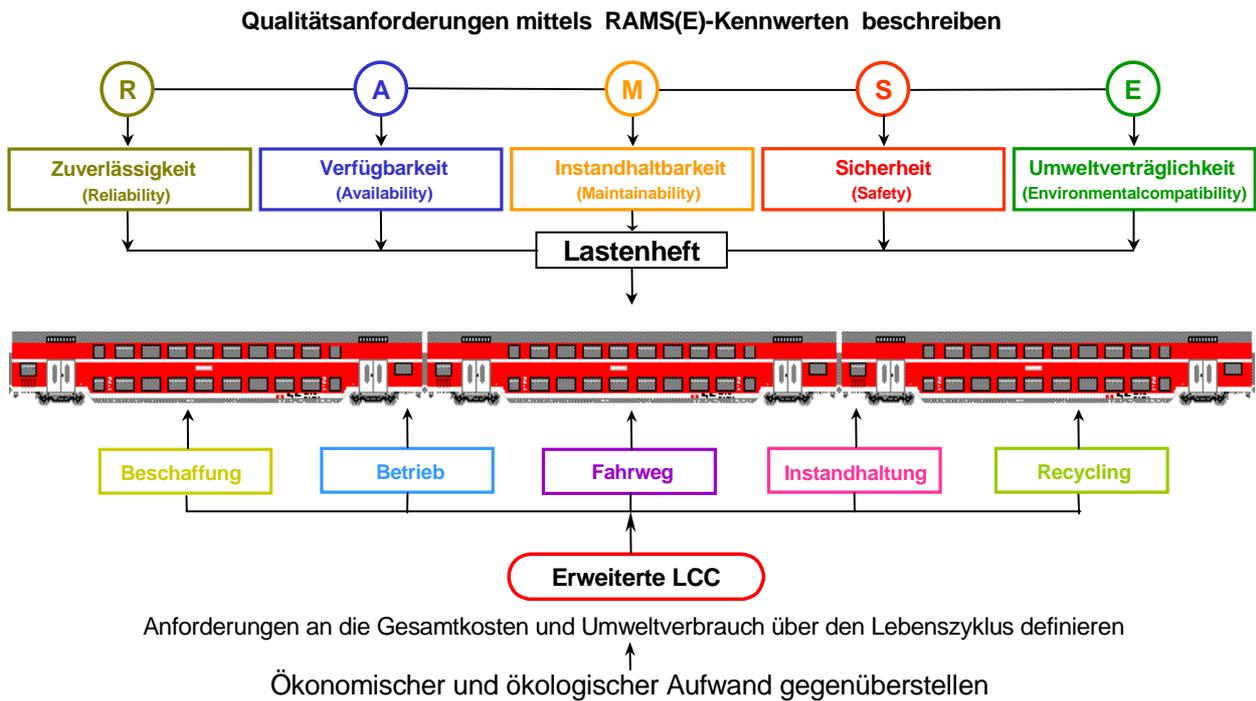


Bild 9: Anforderungen und Aufwand in Bezug auf die Betriebs- und Instandhaltungsqualität

## Anlagen

- Anlage I Fragebogen der Fahrgastbefragung
- Anlage II Ausstattungsmerkmale
- Anlage III Einsatzbedingungen
- Anlage IV Katalog der Kennzahlen
- Anlage V Zwischenfußboden
- Anlage VI Qualitätsanforderungen

## Verzeichnis der Abkürzungen

|         |   |
|---------|---|
| ADFC    | Allgemeiner Deutscher Fahrradclub   |
| BR      | Baureihe  |
| BSeuchG | Bundes-Seuchen-Gesetz   |
| DoSto   | Doppelstockreisezugwagen  |
| EBA     | Eisenbahn Bundesamt   |
| EBO     | Eisenbahn Bau- und Betriebsordnung  |
| FFM     | Frankfurt am Main   |
| FIA     | Fahrgast-Informations-Anlage (Zuglaufanzeiger)  |
| FIS     | Fahrgast-Informations-System  |
| FOK     | Fußboden-Oberkante  |
| GAP     | Geteiltes-Arbeits-Paket   |
| GUV     | Gesetzliche Unfallverhütungsvorschrift  |
| HLK     | Heizung, Lüftung, Klima   |
| LCC     | Lebenszykluskosten (life cycle costs)   |
| LCA     | Öko-Bilanz (life cycle assessment)  |
| ÖPNV    | Öffentlicher Personen Nahverkehr  |
| R 134a  | Tetrafluorethan   |
| RAMS    | Ausfallverhalten, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (engl.: Reliability, Availability, Maintainability, Safety) |
| RIGA    | Reisezugwagen-Instandhaltung im Ganzzug   |
| RMV     | Rhein-Main-Verkehrsverbund  |
| SFS     | Schnellfahrstrecke  |
| SFZ     | Schienenfahrzeug  |
| SPNV    | Schienenpersonennahverkehr  |
| Tfz     | Triebfahrzeug   |
| TP      | Teilprojekt   |
| UIC     | Union Internationale des Chemins de fer   |
| VCD     | Verkehrsclub Deutschland  |
| VDE     | Verband der Elektrotechnik Informationstechnik e.V.   |
| ZWS     | Zeitmultiplexe (zentrale) Wendezug-Steuerung  |

## Literaturverzeichnis

- BAHNKREIS            Projekt Bahnkreis. Analysephase, Ergebnisdokument Teilprojekt 1  
Produktstrukturierung, Berlin März 1999, (unveröffentlicht)
- Brinkmann, T.  
Ehrenstein, G  
Steinhilper, R.        Umwelt- und recyclinggerechte Produktentwicklung  
WEKA Fachverlag, Augsburg 1994
- Deutsche Bahn  
AG                    Lastenheft des Elektrischen Triebwagens der Baureihe ET 423  
für die Deutsche Bahn AG, 1994, (unveröffentlicht)
- Deutsche Bahn  
AG                    Technische Rahmenforderungen für Ausschreibung und Beschaffung von Doppelstock-  
steuerwagen, 1995, (unveröffentlicht)
- Deutsche Bahn  
AG                    Ril E 132.0133 (DB-interner Richtlinienentwurf). Arbeitsschutz und vorbeugender Brand-  
schutz an und in Schienenfahrzeugen, Deutsche Bahn AG, 2000, (unveröffentlicht)
- Deutsche Bahn  
AG, Waggonbau  
Görlitz GmbH        Vierachsiger Doppelstocksitzwagen Baujahr 1994,  
1. und 2. Klasse DABz 756, Kurzbeschreibung,  
Delitzsch, Dezember 1994
- Deutsche  
Bundesbahn           Arbeitsmappe für die Aus- und Fortbildung von Triebfahrzeugführern auf den Elektrischen  
Triebzügen der BR 420, März 1987, (unveröffentlicht)
- Deutsche  
Bundesbahn           Lastenheft für werkstofftechnologische Anforderungen an polsterbildende Sitzwerkstoffe,  
April 1992, (unveröffentlicht)
- Deutsche  
Bundesbahn           Rahmenvorgaben zum Design künftiger S-Bahn-Fahrzeuge, Juni 1993, (unveröffentlicht)
- Ehinger, M.; Frik-  
ke, H.                Projekt Technische Sicherheit. T1.4.2 Einsatzspiegel und Messstellenkonzept SPNV  
Fahrzeuge, Einsatzspiegel der S-Bahn;  
Institut für Schienenfahrzeugtechnik der TU Dresden,  
Dresden, April 2000, (unveröffentlicht)
- Feil, J.                Die Diesellokomotive, Aufbau, Technik und Auslegung  
transpress-Verlag Stuttgart, 1997
- Groche, G.; Thie-  
mer, E.                Handbuch für den Öffentlichen-Personen-Nahverkehr ÖPNV  
Otto Elsner Verlagsgesellschaft mbH & Co KG, 1980
- Henatsch, H.;  
Schmidt, M.;  
Machanko, M.G.;  
Sidorow, J.P.        Schienenfahrzeugtechnik. Klimaanlagen Berechnung und Bewertung, VEB-Verlag für  
Verkehrswesen, Berlin, 1980
- Joop  
Lemmens            Verträglichmacher für Kuststoffe  
in: Die Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, Brandrup, Bittner, Michaelis, Menges  
(Hrsg.) , Hanser-Verlag, München, Wien 1995
- Käufer,H  
Kießling, B.;  
Wach, J.             Recyclinggerechtes Konstruieren. Kunststoffe 79 (1989) Nr.4  
Güterzuglokomotiven der Baureihe 152  
Der Eisenbahningenieur Heft 10/1997, S. 48-55
- Koch, G.             Kreislauforientierte Produktgestaltung und Bewertung der Recyclinggerechtheit von  
Schienenfahrzeugen. Vortrag zur 2. Schienenfahrzeugtagung RAD '97

- Kottenhoff, K;  
Troche, G. Innengestaltung von Reisezugwagen  
Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 7/8 1996, S. 427-433
- Löffler, G.  
Lichthardt, Ch. Protokoll Arbeitssitzung TP 14/15, Dresden 13.07.2000, (unveröffentlicht)
- Madeyski, T. von Fahrwerkstechnik im Zusammenwirken mit dem Fahrweg und den Fahrzeuglasten,  
Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 9, 1999, S. XX
- Manz, G. Das Neuartige bei dem jüngsten DB-Triebzug 420 für S-Bahnstrecken, Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 3, 1970, S. 108-118
- Meyer, H. Recyclingorientierte Produktgestaltung.  
VDI-Berichte Reihe 1, Nr 98. Düsseldorf: VDI-Verlag 1983
- Oettel, R.  
Lichthardt Ch. Protokoll Arbeitssitzung TP 14/15, Dresden 19.07.2000, (unveröffentlicht)
- Pappenglück, W. Neue Triebzüge der Deutschen Bundesbahn für Ballungsräume  
Elektrische Bahnen, Heft 11/1969, S. 244-254
- Renken, M. Nutzung recyclingorientierter Bewertungskriterien während des Konstruierens. Dissertation. TU Braunschweig, Institut f. Konstruktionslehre, Bericht Nr. 48, 1996
- Seiler, E Eigenschaften und Anwendungen von Rezyklaten aus Polypropylen  
in: Die Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, Brandrup, Bittner, Michaelis, Menges (Hrsg.) , Hanser-Verlag, München, Wien, 1995
- Sparmann, V. Anforderungen des Marktes und der Betreiber im Personennahverkehr  
Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 7/8, 1997
- Wöhl, G. Instandhaltung von Schienenfahrzeugen, Skript zur Vorlesung, HTW Dresden (FH), Dresden, 1997
- Wolter, W. Zuverlässige und Kostengünstige Schienenfahrzeuge  
Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 1/2, 2000, S. 51-56
- Zöller, H.  
Hartmann, B. Modifizierte siebte Bauserie des S-Bahntriebzuges BR 420/421 der Deutschen Bundesbahn, Elektrische Bahnen, Heft 4/1999, S. 198-202

## Verzeichnis der Normen und Richtlinien

|                      |  |
|----------------------|--|
| Arbeitsschutzgesetz  | Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (ArbSchG), Bundesgesetzblatt I Nr. 85, 1998  |
| DIN 5510             | Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen -<br>Teil 1: Brandschutzstufen, brandschutztechnische Maßnahmen und Nachweise, Beuth-Verlag, 1988<br>Teil 2: Brennverhalten und Brandnebenerscheinungen von Werkstoffen und Bauteilen; Klassifizierungen, Anforderungen und Prüfverfahren, Beuth-Verlag, 1996<br>Teil 4: Konstruktive Gestaltung der Fahrzeuge; Sicherheitstechnische Anforderungen, 1988<br>Teil 5: Elektrische Betriebsmittel; Sicherheitstechnische Anforderungen, Beuth-Verlag, 1988<br>Teil 6: Begleitende Maßnahmen; Funktion der Notbremseinrichtung, Informationssysteme, Brandmeldeanlagen, Brandbekämpfungseinrichtungen; Sicherheitstechnische Anforderungen, Beuth-Verlag, 1988 |
| DIN 5566             | Schienenfahrzeuge – Führerräume<br>Teil 1 (Vornorm): Allgemeine Anforderungen, Beuth-Verlag, 2000<br>Teil 2 (Vornorm): Zusatzanforderungen an Regelfahrzeuge nach EBO, Beuth-Verlag, 2000<br>Teil 3 (Vornorm): Zusatzanforderungen an Nahverkehrs-Schienenfahrzeuge, Beuth-Verlag, 2000<br>Teil 4 (Norm-Entwurf): Zusatzanforderungen an Rangierlokomotiven, Beuth-Verlag, 1999  |
| DIN 25150            | Schienenfahrzeuge; Innenräume; Konstruktive Anforderungen für die Reinigung, Beuth-Verlag, 1990  |
| DIN 31051            | Instandhaltung; Begriffe und Maßnahmen, Beuth-Verlag, 1985   |
| DIN 45 638           | Innengeräuschemessungen in Schienenfahrzeugen, Beuth-Verlag, 1971  |
| UIC-Merkblatt 505-1  | Railway transport stock - Rolling stock construction – gauge, UIC, 1997  |
| UIC-Merkblatt 508-1  | Zusammenwirken von ortsfesten Anlagen mit Fahrzeugen des Personenverkehrs, UIC, 1994   |
| UIC-Merkblatt 508-2, | Anlagen zur Behandlung und betriebsbereiten Abstellung von Fahrzeugen des Personenverkehrs, UIC, 1994  |
| UIC-Merkblatt 515-1  | Reisezugwagen - Laufdrehgestelle - Laufwerke - Allgemeine Bestimmungen für die Baugruppen von Laufdrehgestellen, UIC, 1994   |
| UIC-Merkblatt 553    | Lüftung, Heizung und Klimatisierung der Reisezugwagen, UIC, 1990   |
| UIC-Merkblatt 555    | Elektrische Beleuchtung in Reisezugwagen, UIC, 1978  |

|                     |  |
|---------------------|--|
| UIC-Merkblatt 557   | Diagnostik in Reisezugwagen, UIC, 1998   |
| UIC-Merkblatt 560   | Türen, Einstiege, Fenster, Tritte und Griffe der Personen- und Gepäckwagen, UIC, 1990  |
| UIC-Merkblatt 563   | Hygiene- und Sauberkeitsanlagen der Reisezugwagen, UIC, 1990   |
| UIC-Merkblatt 564-2 | Vorschriften über Brandverhütung und Feuerbekämpfung für die im internationalen Verkehr eingesetzten Schienenfahrzeuge, in denen Reisende befördert oder die der Reisezugwagenbauart zugeordnet werden können, UIC, 1991 |
| UIC-Merkblatt 642   | Besondere Bestimmungen über Brandverhütung und Feuerbekämpfung für die im internationalen Verkehr eingesetzten Triebfahrzeuge und Steuerwagen, UIC, 1983   |
| UIC-Merkblatt 651   | Gestaltung der Führerräume von Lokomotiven, Triebwagen, Triebwagenzügen und Steuerwagen, UIC, 1994   |
| VDI 2243            | Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte. VDI-Verlag, Düsseldorf 1993  |
| Ril E 132.0133      | (DB-interner Richtlinienentwurf) Arbeitsschutz und vorbeugender Brandschutz an und in Schienenfahrzeugen, Deutsche Bahn AG 2000  |



## **Verbundprojekt BAHNKREIS**

Förderkennzeichen des BMBF:  
02PV21334

---

### **Anlage I zum Band 6**

**Anforderungen an Schienenfahrzeuge aus Sicht von  
Besteller, Betreiber und Hersteller unter besonderer  
Berücksichtigung der Kreislauffähigkeit**

## **Fragebogen zur Evaluation der Kundenanforderungen an Schienenfahrzeuge**

Der RMV ist seit 1998 an einem Forschungsprojekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zur Kreislaufwirtschaft von Schienenfahrzeugen engagiert.

Im sog. "Bahnkreis"-Projekt sollen die Lebenszykluskosten aus ökonomischen und ökologischen Bereichen der S-Bahn und der Doppelstock-Mittelwagen untersucht werden. Zu diesem Zweck wird ein Computerprogramm zur Berechnung der Kosten und ökologischen Auswirkungen entwickelt.

Beeinflusst werden die Lebenszykluskosten von variablen Einflußgrößen, wie z. B. von Ausstattungsmerkmalen. Bei einer Änderung der Ausstattungsmerkmalen werden bei verschiedenen Modellberechnungen die Auswirkungen auf die gesamten Lebenszykluskosten oder einzelner Lebensphasen deutlich.

Das Interesse des RMV in diesem Projekt liegt hauptsächlich im Bereich der Kosten während der Betriebsphase. Die dort anfallenden Kosten werden ursächlich durch die Ausstattungsmerkmale der Fahrzeuge beeinflusst (z. B. Einbau einer Klimaanlage, Art der Sitzbezüge). Ein Ziel des Projektes ist es, einen Anforderungskatalog für die ausgewählten Schienenfahrzeuge zu erarbeiten.

Anhand eines Fragebogens sollen durch Sie als Mitglied des Fahrgastbeirats, die Ausstattungswünsche der Fahrgäste, verknüpft mit der Bereitschaft evtl. höhere Fahrpreise zu zahlen, abgefragt werden.

Die Ergebnisse dieser Befragung können auf absehbare Zeit nicht realisiert werden. Es handelt sich hierbei um ein Forschungsprojekt, das lediglich langfristige Tendenzen für neue Fahrzeuggenerationen deutlich machen kann.

### **Der Fragebogen**

Die folgenden Fragen beziehen sich immer auf die bereits in Betrieb stehenden Fahrzeuge S-Bahn und Doppelstock-Mittelwagen.

Es werden einige mögliche Ausstattungsmerkmale der Fahrzeuge abgefragt, die u. U. von den Fahrgästen des RMV gewünscht werden. Dabei ist immer unterstellt, daß durch diese Einbauten der Fahrpreis steigen würde.

Wir möchten jetzt von Ihnen wissen, ob Ihnen diese Sicherheitsmaßnahmen oder Komforteinrichtungen grundsätzlich einen höheren Fahrpreis wert sind. Über das Ausmaß der Erhöhung soll keine Aussage getroffen werden.

**1. Angaben zur Person:**

- männlich
- weiblich

**2. Alter:**

- 18 - 29 Jahre
- 30-49 Jahre
- 50 Jahre und älter

**3. Wie oft nutzen Sie die öffentlichen Verkehrsmittel im RMV?**

- täglich
- mehrmals wöchentlich
- selten
- fast nie

**4. Wie lange sind Sie in der Regel mit dem ÖPNV unterwegs?**

- unter 15 min
- bis zu 30 min
- bis zu 60 min
- mehr als 1 Stunde

**5. Wie häufig nutzen Sie die einzelnen RMV-Produkte?**

|  | häufig                | selten                | nie                   |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="checkbox"/> Bus                                     | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <input type="checkbox"/> Straßenbahn                             | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <input type="checkbox"/> U-Bahn                                  | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <input type="checkbox"/> S-Bahn                                  | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <input type="checkbox"/> Doppelstockzug                          | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <input type="checkbox"/> andere Züge                             | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <input type="checkbox"/> Sonstiges (z. B. Anrufsammeltaxi (AST)) |                       |                       |                       |
| .....  | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

**6. Für welche Fahrtzwecke nutzen Sie hauptsächlich die Produkte des RMV?**

- Arbeit /Dienstfahrt
- Ausbildung
- Einkaufen / Besorgungen
- Freizeit

**7. In der nachfolgenden Liste sind mögliche zusätzliche Ausstattungsmerkmale für die S-Bahn aufgeführt.**

**Welche der Ausstattungsmerkmale halten Sie für sinnvoll und sind bereit, einen höheren Fahrpreis zu akzeptieren?**

1 = sinnvoll und rechtfertigt in jedem Fall einen höheren Fahrpreis  
5 = sinnvoll aber rechtfertigt auf keinen Fall einen höheren Fahrpreis  
2 – 4 = mögliche Abstufungen

| <b>SICHERHEIT</b>   | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     | nicht sinnvoll        |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Notruf-Knopf am Platz   | <input type="radio"/> |
| Kameraüberwachung durch Zugpersonal   | <input type="radio"/> |
| Durchgangsmöglichkeit zwischen den Wagen                                    | <input type="radio"/> |
| mehr Sicherheitspersonal im Zug   | <input type="radio"/> |
| abschließbare Gepäckfächer  | <input type="radio"/> |
| <b>SERVICE</b>  |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| dynamisches Fahrgastinformationssystem                                      | <input type="radio"/> |
| Getränke-/Snack-Automaten   | <input type="radio"/> |
| Bistro / Kiosk  | <input type="radio"/> |
| permanente verstärkte Reinigung der Fahrzeuge durch mobile Reinigungsstrups | <input type="radio"/> |
| Zugangshilfen (Hublift/Rampe)   | <input type="radio"/> |
| <b>KOMFORT</b>  |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Klimaanlage   | <input type="radio"/> |
| Kartentelefon   | <input type="radio"/> |
| textile Böden im Fahrzeug   | <input type="radio"/> |
| hochwertige Sitze (Velours, Leder)  | <input type="radio"/> |
| mehr Beinfreiheit   | <input type="radio"/> |
| Leselampe am Platz  | <input type="radio"/> |
| Tisch am Platz  | <input type="radio"/> |

Noch zur S-Bahn:

|   | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     | nicht sinnvoll        |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Steckdosen am Platz für Laptops / Handys) | <input type="radio"/> |
| größere Gepäckabstellmöglichkeiten        | <input type="radio"/> |
| Sonnenrollos                              | <input type="radio"/> |
| Spiegel                                   | <input type="radio"/> |
| Sonnsiges                                 | <input type="radio"/> |

**8. In der nachfolgenden Liste sind mögliche zusätzliche  
Ausstattungsmerkmale für den Doppelstock-Zug aufgeführt.**

**Welche der Ausstattungsmerkmale halten Sie für sinnvoll und sind  
bereit, einen höheren Fahrpreis zu akzeptieren?**

- 1 = sinnvoll und rechtfertigt in jedem Fall einen höheren Fahrpreis  
5 = sinnvoll und rechtfertigt auf keinen Fall einen höheren Fahrpreis  
2 – 4 = mögliche Abstufungen

| <b>SICHERHEIT</b>   | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     | nicht sinnvoll        |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Notruf-Knopf am Platz   | <input type="radio"/> |
| Kameraüberwachung durch Zugpersonal   | <input type="radio"/> |
| mehr Sicherheitspersonal im Zug   | <input type="radio"/> |
| abschließbare Gepäckfächer  | <input type="radio"/> |
| dynamisches Fahrgastinformationssystem  | <input type="radio"/> |
| Getränke- / Snack-Automaten   | <input type="radio"/> |
| Bistro / Kiosk  | <input type="radio"/> |
| Sitzplatzreservierung   | <input type="radio"/> |
| permanente verstärkte Reinigung der<br>Fahrzeuge durch mobile Reinigungsgruppen | <input type="radio"/> |
| Zugangshilfen (Hublift/Rampe)   | <input type="radio"/> |
| Klimaanlage   | <input type="radio"/> |
| Kartentelefon   | <input type="radio"/> |
| textile Böden im Fahrzeug   | <input type="radio"/> |

*Noch zum Doppelstockzug:*

|   | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     | nicht sinnvoll        |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| hochwertige Sitzbezüge (Velours, Leder) | <input type="radio"/> |
| mehr Beinfreiheit                       | <input type="radio"/> |
| verstellbare Sitze                      | <input type="radio"/> |
| Leselampen am Platz                     | <input type="radio"/> |
| Tische am Platz                         | <input type="radio"/> |
| größere Gepäckabstellmöglichkeiten      | <input type="radio"/> |
| Sonnenrollos                            | <input type="radio"/> |
| Spiegel                                 | <input type="radio"/> |
| Sonnsiges                               | <input type="radio"/> |

## 9. Anmerkungen

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



## **Verbundprojekt BAHNKREIS**

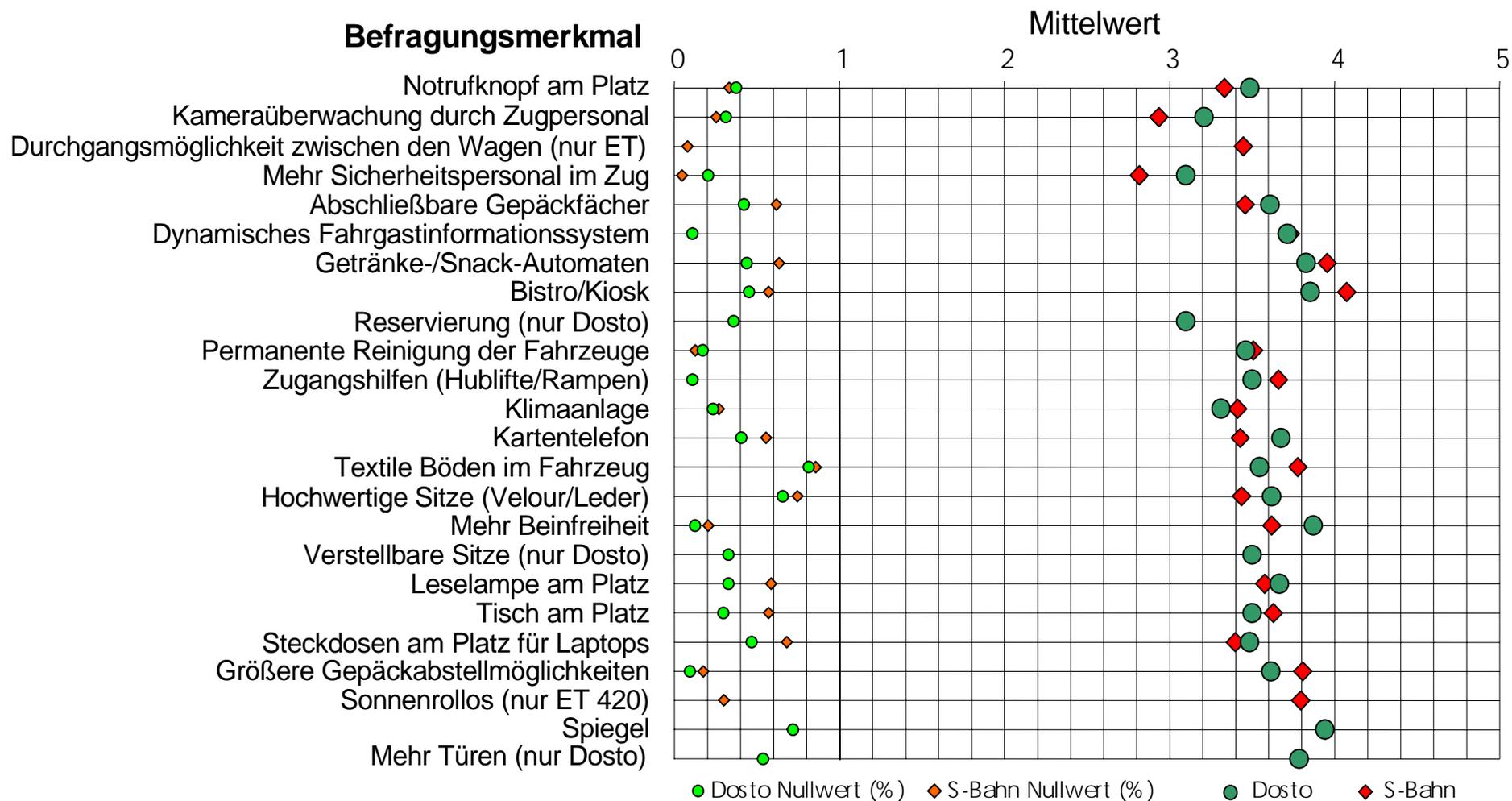
Förderkennzeichen des BMBF:  
02PV21334

---

### **Anlage II zum Band 6**

**Anforderungen an Schienenfahrzeuge aus Sicht von  
Besteller, Betreiber und Hersteller unter besonderer  
Berücksichtigung der Kreislauffähigkeit**

## Ergebnisse der Fahrgastbefragung





## Verbundprojekt **BAHNKREIS**

Förderkennzeichen des BMBF: 02PV21334

---

### **Anlage III zum Band 6**

**Anforderungen an Schienenfahrzeuge aus Sicht von  
Besteller, Betreiber und Hersteller unter besonderer  
Berücksichtigung der Kreislauffähigkeit**

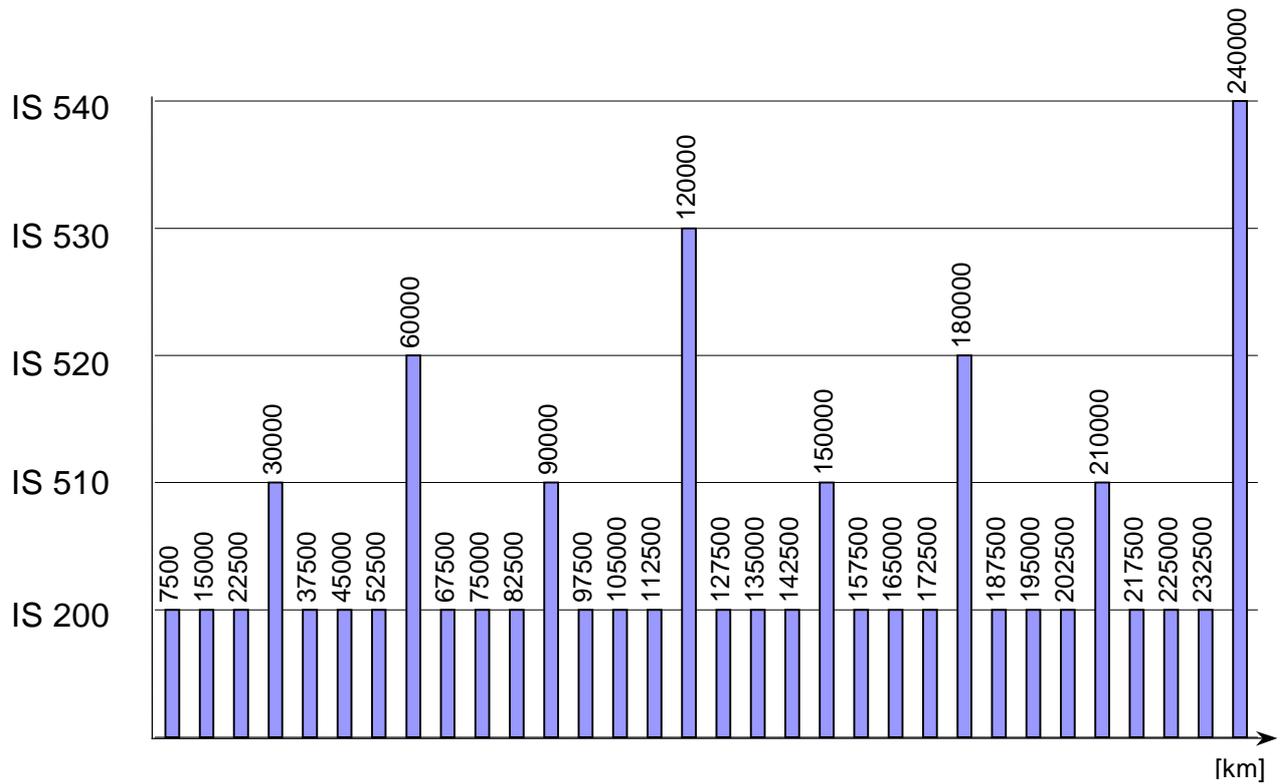
## Der ET 420

Der ET 420 ist in drei Ballungsräumen, im Rhein-Main-Gebiet, im Raum Stuttgart und im Raum München, bei der DB AG eingesetzt. Die Untersuchungen beziehen sich auf eine Teilflotte von 30 Triebzügen aus dem Rhein-Main-Gebiet. Diese Triebzüge sind in Frankfurt-Griesheim beheimatet. Die Instandhaltung nach dem Fristenplan erfolgt ebenfalls im Werk Frankfurt-Griesheim. Revisionen an den Fahrzeugen werden im Werk Nürnberg durchgeführt.

| Linie | Lauf                                      | Entfernung | Fahrzeit   | Halte      | V <sub>Durchschn</sub> | Abstand H  |
|-------|---|------------|------------|------------|------------------------|------------|
|       |   | [km]       | [min]      | [Anz.]     | [km/h]                 | [km]       |
| S1    | Offenbach(Main)Ost /Wiesbaden Hbf         | 54         | 59         | 21         | 55                     | 2,6        |
| S2    | Frankfurt(Main)Süd /Niedernhausen(Ts)     | 38         | 44         | 16         | 52                     | 2,4        |
| S3    | Darmstadt Hbf /Bad Soden(Taunus)          | 50         | 62         | 26         | 48                     | 1,9        |
| S4    | Langen(Hess) /Kronberg(Taunus)            | 34         | 46         | 20         | 44                     | 1,7        |
| S5    | Frankfurt(Main)Süd /Friedrichdorf(Taunus) | 30         | 38         | 16         | 47                     | 1,9        |
| S6    | Frankfurt(Main)Süd /Friedberg(Hess)       | 40         | 51         | 20         | 47                     | 2,0        |
| S8    | Hanau /Wiesbaden                          | 73         | 83         | 28         | 53                     | 2,6        |
| Σ     |   | <b>319</b> | <b>383</b> | <b>147</b> | <b>50</b>              | <b>2,2</b> |

Einsatzbedingungen der S-Bahn Rhein-Main (Stand 08/2000)

Der ET 420 wird nach einem laufwegabhängigen Fristenplan instandgehalten. Der zulässige Laufweg zwischen zwei IS 200 (Nachschau) beträgt 7.500 km. Nach 30.000 km absolvierten Laufweg muss eine Frist, deren Höhe nach dem Gesamtlaufweg festgelegt wird, stattfinden. Da die Laufwege umlaufbedingt nicht immer eingehalten werden können, wird eine Abweichung von 10 % vom Eisenbahn-Bundes-Amt geduldet.



Fristenplan ET 420/421 (Sollzustand)

### Bildungsmatrix der Fristenfolge

|   |   |   |    |            |
|---|---|---|----|------------|
| N | N | N | F1 | 30.000 km  |
| N | N | N | F2 | 60.000 km  |
| N | N | N | F1 | 90.000 km  |
| N | N | N | F3 | 120.000 km |
| N | N | N | F1 | 150.000 km |
| N | N | N | F2 | 180.000 km |
| N | N | N | F1 | 210.000 km |
| N | N | N | F4 | 240.000 km |

## Der DABz 756

Die Doppelstockreisezugwagen der Bauart DABz 756 werden auf den in der RE 1 und RE 4 (Tabelle unten) ersichtlichen Linien im Rheinland eingesetzt. Die Fahrzeuge sind in Aachen beheimatet und werden dort nach dem System RIGA (Reisezugwagen-Instandhaltung im Ganzzug) instandgehalten. Die Zugverbände verkehren im Normalfall als lokbespannter Zug mit vier Wagen, wovon zwei DABz 756 sind. Als Lokomotive ist die BR 111 mit Zugwende-steuerung im Einsatz.

| Linie | Lauf                           | Entfernung | Fahrzeit | Halte  | $V_{\text{Durch.}}$ | Abstand Halte | Verbindungen pro Tag und Richtung |
|-------|--------------------------------|------------|----------|--------|---------------------|---------------|-----------------------------------|
|       |                                | [km]       | [min]    | [Anz.] | [km/h]              | [km]          | [Anz.]                            |
| RE 1  | Aachen Hbf / Bielefeld Hbf     | 263        | 218      | 11     | 72                  | 23,9          | 17                                |
| RE 4  | Aachen Hbf / Münster(Westf)Hbf | 209        | 181      | 28     | 69                  | 7,46          | 13                                |

Einsatzbedingungen für den DABz 756 (Stand 08/2000)

Die Doppelstockreisezugwagen werden nach dem System RIGA instandgehalten. Bei diesem System sind die Fristenplanarbeiten einer Frist in 12 Arbeitspakete unterteilt. Der Zugverband ist im Abstand von drei bis fünf Tagen im Betriebswerk. Dort wird dann das fällige GAP (Geteiltes-Arbeits-Paket) durchgeführt. Durch diese Verfahrensweise sinkt der Anteil der korrektiven Instandhaltung stärker, als dass sich der präventive Anteil an der Instandhaltung erhöht. Durch diese Maßnahmen erhöht sich die Verfügbarkeit der Fahrzeuge, da Fehler relativ früh erkannt und behoben werden können.



## **Verbundprojekt BAHNKREIS**

Förderkennzeichen des BMBF:  
02PV21334

---

### **Anlage IV zum Band 6**

**Anforderungen an Schienenfahrzeuge aus Sicht von  
Besteller, Betreiber und Hersteller unter besonderer  
Berücksichtigung der Kreislauffähigkeit**

## Katalog der Kennzahlen/Eckdaten

| Kennwerte                 | Richtwert, Forderung,<br>Bemerkungen  | DABz 756   | ET 420/421                                     |
|---------------------------|---------------------------------------|--|--|
| Türabstand                | max/min 1-2,5<br>(nicht größer als 4) | ≈ 1  | 1,3-2,5  |
| Türbreitenverhältnis      | $B_{\text{Tür}}/L_{\text{Sfz}}$       | 22,4   | 23,3   |
| Türbreite                 |                                       | 1830mm   | 1000mm   |
| Türspur                   | $n_{\text{Pers.}}/n_{\text{Türen}}$   | 3  | 2  |
| Türsteuerung              | seitenselektive Steuerung             | seitenselektive Steuerung  | seitenselektive Steuerung                      |
| Stehplätze/m <sup>2</sup> |                                       | 4  | 6  |
| Stehplätze/Tür            | ca. 40/Tür                            | 57   | 23,8   |
| Sitzplätze/Tür            | ca. 18/Tür                            | 61,5   | 12,1   |
| Sitzplätze                |                                       | Oberstock:<br>2. Klasse: 33 Sitze<br>1.Klasse: 25 Sitze<br><br>Unterstock:<br>2. Klasse: 41 Sitze<br>1. Klasse: 17 Sitze | 2. Klasse: 161 Sitze<br><br>1.Klasse: 33 Sitze |

| <b>Kennwerte</b>             | <b>Richtwert, Forderung,<br/>Bemerkungen</b> | <b>DABz 756</b>  | <b>ET 420/421</b>  |
|------------------------------|--|--|--|
| Sitzbreite                   | 450-500 mm                                   | 2. Klasse: 450mm<br>1. Klasse: 490mm   | 2. Klasse: 1000mm (Doppelsitz)<br>1.Klasse: 485mm (Einzelsitz) |
| Vis-a-vis Sitzteilung        |  | 2. Klasse<br>1710mm<br>1. Klasse<br>2000mm   | 2. Klasse: 1650mm<br>1. Klasse: 1850mm                         |
| Sitzteilung                  | 720-900 mm                                   | 2. Klasse: 820mm<br>1. Klasse: 1000mm  | 2. Klasse: 710mm<br>1. Klasse: 2000mm                          |
| Gangbreite                   |  | Oberstock:<br>2. Klasse: 540mm<br>1.Klasse: 517mm<br><br>Unterstock:<br>2. Klasse: 500mm<br>1. Klasse: 476mm | 2. Klasse: 540mm<br>1. Klasse: 500mm                           |
| Beleuchtung im Innenraum     | 150lux 0,85m über FOK                        |  |  |
| Belüftung                    | HLK  | Heizleistung (ca. 60 kW);<br>Lüftung   | Heizung, Lüftung   |
| Klimaanlage / Klimaautomatik |  | nein   | nein   |

| Kennwerte                         | Richtwert, Forderung, Bemerkungen                                | DABz 756         | ET 420/421          |
|-----------------------------------|--|------------------|---------------------|
| Temperaturen                      | Für Außentemperaturen von – 30 bis 50°C                          | bedingt regelbar | bedingt regelbar    |
| Schallpegel Innen                 | Führerraum/Einstieg: max 80db                                    |                  |                     |
|                                   | Fahrgastraum: max 75db   |                  |                     |
| Schallpegel außen                 | nach 25m 78db  |                  |                     |
|                                   | nach 100m XX   |                  |                     |
| Laufgüte                          | Federungsart   | Luftfederung     | Luftfederung        |
| Adhäsionsanteil (Triebzüge)       | Verhältnis der angetriebenen Radsätze zu den nicht angetriebenen | ohne Antrieb     | 1                   |
| Traktionsleistung / Dauerleistung | $P_T$  | ohne Antrieb     | 2400kW bei 72 km/h  |
| Masse/Sitzplatz                   |  | 374kg            | 665kg               |
| Leistung/Masse                    | $P_T / m_r$  | ohne Antrieb     | 18,6kW/t bei 72km/h |
| Beschleunigungsvermögen           | $a=0,3-1,2m/s^2$   | ohne Antrieb     | 0,9m/s <sup>2</sup> |
| $V_{max}$                         |  | 140km/h          | 120km/h             |

| <b>Kennwerte</b>                               | <b>Richtwert, Forderung,<br/>Bemerkungen</b> | <b>DABz 756</b> | <b>ET 420/421</b> |
|--|--|-----------------|-------------------|
| Bogenradius                                    |  | 150m            | 120m              |
| Bogen- Gegenbogenradius<br>ohne Zwischengerade |  | 190m            | 150m              |
| Streckeneneigung                               |  | 40‰             | 40‰               |
| Laufkilometerzähler                            |  | keiner          | ja                |
| Energieverbrauchszähler                        |  | nein            | teilweise         |
| Brandschutz                                    | Brandschutzstufe 2<br>SFS Tunnelfähig        |                 |                   |
| Streckenklasse                                 |  | B (18t)         | A (16t)           |
| Antriebskonzept (Triebwagen;<br>lokbespannt)   |  | Lokbespannung   | Triebzug          |
| Fahrzeugkonzept (DoSto,<br>Normalwagen)        | Bahnsteiglängen                              | zwei Ebenen     | eine Ebene        |
| Fahrzeugdiagnose                               |  | keine           | keine             |
| Diagnosedatenübertragung                       |  | keine           | keine             |

| Kennwerte  | Richtwert, Forderung, Bemerkungen  | DABz 756                      | ET 420/421              |
|--|--|-------------------------------|-------------------------|
| getrennte Datenübertragungssysteme                         | Diagnose, FIS, ZWS mit Redundanz   | UIC-Leitung                   |                         |
| Beeinflussungen  | Signal- und Leittechnik  | keine                         | keine                   |
|  | Fernmeldetechnik   | keine                         | keine                   |
| Ausfallverhalten, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit (RAMS) | Vorgaben von Verfügbarkeitswerten durch Betreiber                                | nein                          | nein                    |
|  | Beschaffungsanzahl   | 91                            | 480                     |
| WC-System  | 1 WC/100 Sitzplätze<br>geschlossenes System<br>behindertengerecht                | geschlossen (Vakuum- Prinzip) | kein WC                 |
| Modularität der Inneneinrichtung                           | Fahrradabteil, Traglastenabteil, Skiabteil, Rollstuhlgerecht, Kinderwagengerecht | keine                         | keine                   |
| Fahrgastleitsysteme  | Stationsanzeigen   | innen                         | keine                   |
|  | Zugzielanzeigen  | innen/außen                   | außen                   |
|  | Beschallung  | innen                         | innen/außen<br>selektiv |

| Kennwerte  | Richtwert, Forderung,<br>Bemerkungen           | DABz 756  | ET 420/421           |
|--|--|---|----------------------|
| Notrufeinrichtungen,<br>Überwachungseinrichtungen                              |  | ja  | nein                 |
| Vandalismushemmende<br>Innengestaltung   |  | ja  | ja                   |
| Einstiegshilfen<br>mobilitätseingeschr. Personen                               |  | Klapptritt  | Bord                 |
| Niveauunterschied<br>Bahnsteig / Einstieg                                      |  |   | 50-270mm             |
| Einheitsführerstände   |  | ohne  | modifiziert          |
| Reinigungsfähigkeit von Sitzen,<br>Wand- und Deckenverkleidung<br>und Fußboden |  | gut   | teilweise            |
| Farbkonzept der Fahrzeuge  | Zuordnung,<br>Wiedererkennbarkeit              | nicht einheitlich   | nicht einheitlich    |
| Lichtraumprofil  | Einschränkungsrechnungen<br>Fahrzeugumgrenzung | Wagenkasten<br>UIC 505<br>G2 (EBO)<br><br>Drehgestelle<br>UIC 505 | UIC<br>Regelprofil 2 |

Die Werte für die Beispielfahrzeuge sind für den ET 420 aus ZÖLLER [1990], MANZ [1970] und DB [1987] sowie für den Doppelstockreisezugwagen aus DB, DWA [1994] entnommen.



## Verbundprojekt **BAHNKREIS**

Förderkennzeichen des BMBF: 02PV21334

---

### Anlage V zum Band 6

**Anforderungen an Schienenfahrzeuge aus Sicht von  
Besteller, Betreiber und Hersteller unter besonderer  
Berücksichtigung der Kreislauffähigkeit**

# Inhaltsverzeichnis

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>SYSTEMBESCHREIBUNG</b>  | <b>4</b>  |
| <b>1.1</b> | <b>Allgemeines</b>   | <b>4</b>  |
| <b>1.2</b> | <b>Randbedingungen der Konstruktion</b>                                | <b>4</b>  |
| 1.2.1      | Standards und Normen   | 4         |
| 1.2.2      | Allgemeine Forderungen   | 5         |
| 1.2.3      | Spezielle Forderungen  | 5         |
| 1.2.3.1    | Akustische Anforderungen   | 5         |
| 1.2.3.2    | Brandschutzanforderungen   | 5         |
| 1.2.3.3    | Sonstige Anforderungen (an Fußbodenoberfläche)                         | 5         |
| 1.2.4      | Forderungen des Kunden   | 5         |
| 1.2.5      | Belastungen  | 6         |
| <b>2</b>   | <b>BESCHREIBUNG DES LEBENSWEGES</b>                                    | <b>6</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>Herstellung</b>   | <b>6</b>  |
| 2.1.1      | Technologie der Herstellung  | 6         |
| 2.1.2      | Medienaufwendungen / Hilfsstoffe                                       | 6         |
| 2.1.3      | Umweltbelastungen  | 7         |
| 2.1.4      | Kosten   | 7         |
| 2.1.5      | Kritik am Ist-Stand  | 8         |
| <b>2.2</b> | <b>Betrieb</b>   | <b>8</b>  |
| 2.2.1      | Beschreibung der Belastungs- und Instandhaltungszyklen                 | 8         |
| 2.2.2      | Jährliche Laufleistung Fahrzeug / Bauteil                              | 8         |
| 2.2.3      | Optimales Schädigungsverhalten   | 8         |
| 2.2.4      | Bekannte Schäden   | 9         |
| 2.2.5      | Zuverlässigkeit Bauteil / Auswirkungen auf Zuverlässigkeit Fahrzeug    | 9         |
| 2.2.6      | Instandhaltungsfreundlichkeit des Bauteiles                            | 9         |
| 2.2.7      | Medienaufwendungen / Hilfsstoffe im Fahrbetrieb und bei Instandhaltung | 9         |
| 2.2.8      | Abfälle  | 10        |
| 2.2.9      | Umweltbelastungen  | 10        |
| 2.2.10     | Kosten   | 10        |
| 2.2.11     | Kritik am Ist-Stand  | 11        |
| <b>2.3</b> | <b>Entsorgung - End of Life</b>  | <b>11</b> |
| 2.3.1      | Medienaufwendungen / Hilfsstoffe                                       | 11        |
| 2.3.2      | Umweltbelastungen  | 12        |
| 2.3.3      | Kosten   | 12        |

---

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 2.3.4      | Kritik am Ist-Stand .....   | 12        |
| <b>3</b>   | <b>ANFORDERUNGEN AN DIE BAUGRUPPE HINSICHTLICH<br/>KREISLAUFGERECHTER GESTALTUNG .....</b>                      | <b>12</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Darstellung des Ist-Zustandes .....</b>  | <b>12</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Konzeptionelle Gestaltung der Baugruppe .....</b>  | <b>13</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Anforderungen an die Baugruppe hinsichtlich Bauweisen, Füge-<br/>techniken und Fertigungsverfahren .....</b> | <b>15</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Anforderungen an die Baugruppe hinsichtlich Materialauswahl .....</b>  | <b>16</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Anforderungen an die Baugruppe hinsichtlich Medienverbrauch und<br/>Emissionen .....</b>                     | <b>17</b> |

## 1 Systembeschreibung

### 1.1 Allgemeines

|   |   |
|---|---|
| Bauteilbenennung                                  | <u>Einzelteile:</u><br>Bodenplatten<br>Anschlagleisten<br>Profile (C-Schienen)<br>Belag<br>Klebstoff<br>Distanzstücke<br>Bleche<br>Blechschrauben<br>Holzschrauben<br>Holzleisten<br>Keilleisten<br>Klebebänder<br>Fugenmasse   |
| Zugehörigkeit Baugruppe, Hauptbaugruppe, Fahrzeug | Hauptbaugruppe AO Fußböden<br>Bereich Innenausbau<br>Fahrzeug Doppelstockwagen  |
| Stückzahl am Fahrzeug                             | In Abhängigkeit von betrachteter Strukturtiefe  |
| Geplante Lebensdauer                              | 30 Jahre / evtl. 15 Jahre, in Abhängigkeit vom Modernisierungsumfang  |
| Normteil / Tauschteil                             | Nein  |
| Sicherheitsbauteil                                | nein  |
| Funktionsbeschreibung                             | Lastaufnahme aus Sitzbefestigung, Begehung<br>Kraftübertragung zum Wagenkastenrohbau<br>Schalldämpfung (Körperschall)<br>Schalldämmung (Luftschall) zum Unterstock<br>Laufsicherheit (rutschfest)<br>Verhinderung des Eindringens von Flüssigkeiten in die Fahrzeugstruktur<br>Designfunktion<br>Gewährleistung von Brandsicherheit |

### 1.2 Randbedingungen der Konstruktion

#### 1.2.1 Standards und Normen

|            |  |
|------------|--|
| UIC 564-2  | Vorschriften über Brandverhütung und Brandbekämpfung   |
| DIN 5510   | Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen   |
| UIC 566    | Beanspruchungen von Reisezugwagenkästen und deren Anbauteilen  |
| UIC 561    | Gestaltung der Führerräume von Lokomotiven, Triebwagen, Triebwagenzügen und Steuerwagen  |
| EN 50125-1 | Bahnanwendungen – Umweltbedingungen für Betriebsmittel   |
| ISO 3381   | Akustik; Lärmmessung in Schienenfahrzeugen   |
| ISO 9001   | Qualitätsmanagementsysteme – Modell zur Qualitätssicherung/QM-Darlegung in Design/Entwicklung, Produktion, Montage und Wartung |
| VDI 2243   | Recyclinggerechte Konstruktion   |

## **1.2.2 Allgemeine Forderungen**

- Fußbodenoberfläche muss in sich und gegenüber den Wänden wasserdicht sein.
- Alle für Fußboden einschl. seiner Lagerung, Befestigung und Isolation verw. Materialien müssen gegen Feuchtigkeit beständig sein.
- Bei der Gesamtkonzeption ist der Schalldämmung die größte Aufmerksamkeit zu widmen.
- Schalldämmplatten bzw. Sperrholzplatten als Unterlage
- Gummibeläge in Fahrgasträumen (ohne Noppen) auf Platten geklebt
- Schrägen mit Rutschschutz, z.B. Noppen

## **1.2.3 Spezielle Forderungen**

### **1.2.3.1 Akustische Anforderungen**

- Aus Schallgründen ist Fußboden schwimmend zu lagern. Fußböden der Fahrgast-, WC- und Waschräume sowie der Seitengänge wannenförmig gestalten. Unebenheiten des Fußbodens sind zu beseitigen. Fugen zwischen Sperrholzplatten sind zeichnungsgemäß zu überdecken.
- Auflageflächen für Innenausbau (Wandverkleidungen, Kämpfer- und Deckenleisten) sind zur Verhinderung knirschender Geräusche mit Zwischenlagen zu versehen.

### **1.2.3.2 Brandschutzanforderungen**

- Einordnung des Fahrzeuges auf Grund der Ausschreibungsunterlagen in eine Brandschutzstufe nach DIN 5510-1 (z.B. Brandschutzstufe 1)
- Anforderungen zusätzlich zur DIN 5510 und zum UIC-Merkblattes 564-2:
  - Verwendung bestimmter Materialien (z.B. schwerentflammbare und selbstverlöschende sowie halogenfreie Materialien).
  - Vorlage der Prüfzeugnisse bzw. Prüfbescheide über die Einhaltung der brandschutztechnischen Anforderungen der beim Bau der Fahrzeuge verwendeten Werkstoffe und Bauteile vorzulegen durch den AN, soweit es sich um nachweispflichtige Fahrzeugteile handelt.
  - Vorlage der Mengenangaben (Flächen-, Massenangaben, Spez. Gewichtsangaben) sowie Heizwertangaben für die verwendeten Werkstoffe und Bauteile zur Berechnung der Brandlast der Fahrzeuge.
- Alle Materialien bzw. Baugruppen müssen den entsprechend der DIN 5510-2 aufgeführten Anforderungen auf Klassifikation erfüllen:
- Futterhölzer sind aus Eiche, Esche oder holztechn. gleichwertigen Hölzern zu fertigen. Buchenholz ist nicht zugelassen! Auflageflächen an der Fahrzeug- und Verkleidungsseite müssen gehobelt sein, Für Kunde DB AG: alle Holzteile (Ausnahme Sichtflächen) sind mit Brandschutzfarbe nach TL 918 301 zu beschichten.

### **1.2.3.3 Sonstige Anforderungen (an Fußbodenoberfläche)**

- Fußböden sind wasserdicht auszuführen
- Gesamte Fußbodenoberfläche aus rutschfestem Belag versehen, der auswechselbar sein muss

## **1.2.4 Forderungen des Kunden**

- Ansprechende Designgestaltung (Farbe, Material)
- Keine scharfkantigen Konturen, keine Angriffsflächen für Vandalismus und Zündquellen
- Leichte Reinigungs- (auch Nass-) und Reparaturmöglichkeiten, insbes. von Teilbereichen
- Befestigungsschrauben möglichst gering und so anordnen, dass Demontage ohne Beschädigung der Trägerplatten durchgeführt werden kann.

### 1.2.5 Belastungen

- Für begehbaren Fußboden mind. 12 mm dicke wasserfeste verleimte Sperrholzplatten od. 15 mm dicke wasserfest verleimte Verbundplatten verwenden. Für nichtbegehbare Bereiche dürfen unter Beachtung der Schalldämmung auch dünnere Materialien verwendet werden.
- Insbes. Für Fußbodenbeläge Werkstoffe, die
  - Alterungsbeständig unter Einwirkung von Reinigungsmitteln sind,
  - Hohe Schlag- und Kratzfestigkeit aufweisen,
  - Formstabil, funktionsbeständig und verrottungsfest sind,
  - Pflegeleicht und reinigungsfreundlich sind.

## 2 Beschreibung des Lebensweges

Der Zwischenboden besteht aus einer 16 mm dicken Sperrholzplatte. Diese Sperrholzplatte wird aus 11 Einzelplatten zusammengesetzt. Die Sperrholzplatten werden auf den Rohbau aufgelegt und verschraubt. Dabei werden Gummiauflagen verwendet, um eine Schallentkoppelung zu erreichen [Martens 1994, S. 13]. Einlegeplatten aus Stahl ermöglichen eine stabile Verschraubung. Bodenprofile stellen den Abschluss des Zwischenbodens zur Fahrzeuginnenwand dar. Weitere Sperrholzanschlüsse und absorbierende Isolierstreifen werden aufgeklebt. Der Bodenbelag aus Kautschuk hat eine Dicke von 2 mm und wird mit einem 2 Komponentenkleber auf Polyurethanbasis verklebt.

### 2.1 Herstellung

#### 2.1.1 Technologie der Herstellung

Der Zwischenboden wird im Werk Görlitz der DWA gefertigt. Sperrholzplatten, Bodenbelag, Profile, Winkelschienen, Anschlüsse und Schrauben werden von Zulieferern bezogen.

Die Herstellung des Zwischenbodens bei der DWA erfolgt in folgenden Arbeitsschritten:

- 1) Die Verlegung des Holzbodens:
  - mit selbstklebenden Gummibeilagen Rohbau-Auflageflächen für Fußbodenplatte ausgleichen, ausfluchten, ablängen und Klebeflächen Reinigen
  - Fußbodenplatten einpassen, anreißen und nachschneiden, Nute und Federn verkleben.
  - Schrauben anreißen, bohren, Einlegeplatte einlassen, Fußbodenplatten anschrauben.
- 2) Verlegung der Profile und des Bodenbelages
  - Bodenprofile mit Anschlüssen anreißen, ausrichten, bohren und anschrauben
  - Isolierstreifen ankleben
  - Mit Ausgleichsmasse Schraubenköpfe, Einlegeplatte und Plattenstöße spachteln und schleifen und reinigen
  - Zuschneiden des Bodenbelages
  - Anrühren des 2 Komponentenklebers auf Polyurethanbasis
  - Aufkleben und anwalzen des Fußbodenbelages
  - Sockelkanten mit Kontaktkleber ankleben
  - Fugen abdichten und glätten.

#### 2.1.2 Medienaufwendungen / Hilfsstoffe

Für die Verlegung des Holzbodens

- 1) Materialverbrauch

| Stoffbezeichnung            | Menge | Einheit |
|-----------------------------|-------|---------|
| Gummi Auflagen EPDM         | 0,46  | kg      |
| Kleber für Sperrholzplatten | 0,35  | kg      |
| Primer                      | 0,23  | kg      |

|  |       |                |
|--|-------|----------------|
| Legierter Stahl für Einlegeplatte                          | 7,6   | kg             |
| Sperrholzplatte  | 42,5  | m <sup>2</sup> |
| Bohr- und Senkschrauben, Sechskantmutter, Unterlegscheiben | 2,4   | kg             |
| Ausfugmasse  | 0,2   | Kg             |
| Kautschuk Bodenbelag                                       | 43,8  | m <sup>2</sup> |
| Flüssigwachs   | 0,4   | kg             |
| Kleber   | 11,25 | kg             |
| Okapren Kleber für Details                                 | 0,02  | kg             |
| Sperrholz für den Anschlag                                 | 2     | kg             |
| Bodenprofile, Winkelschienen und Holzschrauben zur         | 6,6   | kg             |

## 2) Energieverbrauch

Für eine Format-Kreissäge (1,5 KW, 0,5h), eine Tischfräse (3kW 0,75 h), 2 Tellerschleifmaschinen (jeweils 2 kW, 2h) und 3 Bohrmaschinen ( jeweils 0,55 kW, 3h) ergibt sich bei Berücksichtigung eines Abminderungsfaktors von 0,5 einen geschätzten Stromverbrauch von 23 MJ.

## 3) Hilfsstoffe

| Stoffbezeichnung  | Menge | Einheit |
|-------------------|-------|---------|
| Entferner_Sika    | 0,1   | Liter   |
| Haftreiniger_Sika | 0,12  | Liter   |
| Verdünnung        | 3     | g       |

Darüber hinaus wird ein Grundreiniger für die Erstreinigung des Bodenbelages nach dem Verlegen benötigt, dessen Verbrauch jedoch nicht quantifiziert werden konnte. Die verwendeten Materialien und Hilfsstoffe werden von Zulieferern bezogen, dafür wurden ergeben sich und etwa 400 tkm Transportarbeit von Zulieferern zum Werk Görlitz.

### 2.1.3 Umweltbelastungen

Es war nicht möglich die Umweltbelastungen des Werkes Görlitz hinsichtlich ihrer Quellen soweit aufzuschlüsseln, dass Anteile dem Zwischenfußboden zugewiesen werden konnten. Prinzipiell sind Lösemittlemissionen durch die Anwendung von Klebern, Entfernern und Verdünnern zu erwarten, Staubemissionen durch den Zuschnitt Bohren und Abschleifen der Sperrholzplatten sowie Lärmbelastungen durch die verwendeten Maschinen. Eine Abwasserbelastung durch die Herstellung des Zwischenboden ist nicht zu erwarten, wenn Reinigungsprozesse der Fertigungshalle und der Maschinen vernachlässigt werden können.

Abfälle: Es fallen etwa 26 kg Sperrholzplatte und 13 kg Bodenbelag als Verschnitt an. Darüber entstehen Reste an Kleber, Primer, Entferner und Haftreiniger und deren Verpackungen. Die Mengen dieser Reststoffe wurden nicht quantifiziert. Nicht ausgehärteter Kleber muss als Sonderabfall entsorgt werden, ausgehärteter Kleber kann als hausmüllähnlicher Abfall entsorgt werden.

Ausschuss an Schrauben, Muttern und Blechstreifen werden als Stahlschrott verwertet.

Umweltbelastungen aus den Herstellungsprozessen für die verwendeten Materialien- Hilfs- und Betriebsstoffe werden hier nicht gesondert aufgeführt.

### 2.1.4 Kosten

Wurden im Rahmen der Untersuchung nicht erhoben. Prinzipiell sind zu berücksichtigen:

- Kosten für die aufgeführten Materialien und Hilfsstoffe
- Kosten für 23 MJ Strom bei verwendeter Spannung.
- Personalkosten für das eingesetzte Personal
- Maschinenkosten für 0,5h Kreissäge, 0,75h Tischfräse, 9 h Bohrmaschine und 4 h Tellerschleifmaschine.
- Gemeinkosten, die auf die Herstellung des Zwischenbodens umgeschlagen werden.

## 2.1.5 Kritik am Ist-Stand

Es sollte versucht werden die Lösemittlemissionen, Staubemissionen und die entstehenden Verpackungsabfälle zu ermitteln.

Wenn Angaben zu entstehenden Emissionen und Abfällen vorhanden sind, kann über eine Verminderung dieser Emissionen nachgedacht werden.

## 2.2 Betrieb

### 2.2.1 Beschreibung der Belastungs- und Instandhaltungszyklen

a) Betrieb: Aus den Umläufen und Plangarnituren für die Referenzstrecken sind berechnet sich eine mittlere Tagesleistung von 1100 km. Es wird eine Verfügbarkeit von 94% [Ivanaukas 1994] angenommen .

b) Reinigung: Die Baugruppe Fußboden wird in der Innenreinigung des Fahrzeuges gereinigt. Reinigungsintervalle werden analog zu den Bestimmungen der DS 910 wie folgt angenommen :

| Reinigungsstufe | Zeitfrist        | Aktivität am Zwischenboden           |
|-----------------|------------------|--------------------------------------|
| I0              | Bei Bedarf       | Keine                                |
| I1              | Täglich          | Fegen                                |
| I2              | 1x pro Woche     | Nasswischen und saugen, nachpolieren |
| I3              | Alle 6 Wochen    | Scheuern, Nasssaugen, nachpolieren   |
| I4              | Zweimal pro Jahr | Scheuern, Nasssaugen, nachpolieren   |

c) Instandhaltung: Die korrektive Instandhaltung für die Baugruppe Zwischenboden umfasst lediglich das Ausbessern oder erneuern von beschädigten Bodenbelägen bei Fristarbeiten. ([Pötzsch 1991] Dabei besichtigt ein Tischler den Fußboden auf Zustand und Beschädigungen und repariert beschädigte Bodenbeläge. Aktuellere Angaben lagen nicht vor. Für die Ausbesserungsarbeiten wird ein Verschnitt von 10% angenommen. Aufgrund der geringen Mengen wird angenommen, dass der Bodenbelag direkt mit dem hausmüllähnlichen Abfall entsorgt wird, ohne ihn zu schreddern. Die präventive Instandhaltung findet für die Baugruppe Zwischenboden nur in Form der Nachschau statt.

Bei der Revision oder Hauptuntersuchung wird der Fußbodenbelag als Verschleißschicht erneuert. [Martens 1994, S. 6]. Dafür wird der alte Bodenbelag mit manuellen Hilfswerkzeugen herausgerissen. Danach wird der Holzfußboden abgeschliffen und neuer Bodenbelag zugeschnitten und verklebt Da keine Angaben zum Stromverbrauch in der Revision bekannt sind, wurden für das Abschleifen Energieverbräuche aus der Neuverlegung übernommen.

Eine Modernisierung des Doppelstockreisezugwagens ist immer mit einem Re-Design verbunden, wenn also neue Sitze verwendet werden sollen, passen die Verankerungen nicht mit den alten Bohrungen und Stützen überein. Daher wird zunächst der Bodenbelag entfernt, dann die Schrauben zur Befestigung des Zwischenbodens "abgebrannt" , dann der Zwischenboden entfernt. Dabei wird der Boden meist so beschädigt, dass er nicht weiter zu verwenden ist. Eine Modernisierung impliziert also das Auswechseln des Bodenbelages und des Zwischenbodens. Der Prozess entspricht dabei einer Neufertigung des Bauteiles

### 2.2.2 Jährliche Laufleistung Fahrzeug / Bauteil

Es ergibt sich eine Gesamtlauflistung von 373104,33 km im Jahr. Dabei wurde eine Verfügbarkeit von 94% zu Grunde gelegt sowie pauschal für korrektive Instandhaltungs- und Reinigungsmaßnahmen einen Ausfall von 100 Tagen über die 25 Jahre Lebensdauer berücksichtigt.

### 2.2.3 Optimales Schädigungsverhalten

Nur des Bodenbelages, Probleme am Sperrholzfußboden wurden bis jetzt nicht beobachtet.

## 2.2.4 Bekannte Schäden

Verschleiß des Bodenbelages.

## 2.2.5 Zuverlässigkeit Bauteil /Auswirkungen auf Zuverlässigkeit Fahrzeug

Angenommen wurde ein Ersatz von 10% der Bodenbelages im Rahmen der Nachschau zwischen zwei Hauptuntersuchungen. Der Bodenbelag wird in Rahmen der Überplanarbeiten in der Nachschau durchgeführt. Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit des Fahrzeuges entstehen nicht.

## 2.2.6 Instandhaltungsfreundlichkeit des Bauteiles

Ein bekanntes Problem ist die schlechte Lösbarkeit der Klebverbindung zwischen Bodenbelag und Bodenplatte. z.B. Zugänglichkeit, Montage- und Demontagefreundlichkeit, mangelnde Betriebstüchtigkeit.

## 2.2.7 Medienaufwendungen / Hilfsstoffe im Fahrbetrieb und bei Instandhaltung

a) Betrieb: Einen direkten Medienverbrauch im Betrieb gibt es nicht. Von Gesamtenergieverbrauch des Zuges (194 MJ/km) werden 0,136 MJ/km auf den Zwischenboden angerechnet.

b) Reinigung: (über 25 Jahre Lebensdauer aggregiert)

| Stoffbezeichnung        | Menge      | Einheit | Prozess                               |
|-------------------------|------------|---------|---------------------------------------|
| Jahresrol Innenreiniger | 5          |         | I2 – Bodenbelag<br>I3/I4 – Bodenbelag |
| Strom, Niederspannung   | 25<br>7    | MJ      | I2 – Bodenbelag<br>I3/I4 – Bodenbelag |
| Trinkwasser             | 289<br>140 | L       | I2 – Bodenbelag<br>I3/I4 – Bodenbelag |
| Scheuerscheiben         | 30         | Stk     | I3/I4 – Bodenbelag                    |
| Verschmutzter Wischmop  | 253        | Stk     | I2 – Bodenbelag<br>I3/I4 – Bodenbelag |

Die 253 verschmutzten Wischmops werden direkt gewaschen und erneut eingesetzt, wodurch folgende Medienverbräuche wofür 1 kg Waschmittel, 1139 l Trinkwasser und 8 MJ Strom verwendet werden.

c) Instandhaltung:

Unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen zum Verschleiß des Bodenbelages, fallen durch die Ausbesserung des Fußbodens während der korrektiven Instandhaltung im Rahmen der Nachschau und Revision folgende Hilfs- und Betriebsstoffverbräuche an. Eventuelle Stromverbräuche durch Handmaschinen wurden vernachlässigt.

| Stoffbezeichnung      | Menge | Einheit | Prozess                   |
|-----------------------|-------|---------|---------------------------|
| Bodenbelag            | 9     | m2      | Korrektive Instandhaltung |
| Kleber                | 6     | kg      | Korrektive Instandhaltung |
| Ausfugmasse           | 0,425 | kg      | Revision                  |
| Bodenbelag            | 93    | m2      | Revision                  |
| Flüssigwachs          | 1     | kg      | Revision                  |
| Kleber                | 24    | kg      | Revision                  |
| OkaprenKK extra       | 0,04  | kg      | Revision                  |
| Stahlprofile          | 14    | kg      | Revision                  |
| 16 mm Sperrholzplatte | 4     | kg      | Revision                  |
| Strom öff. Netz       | 18,36 | MJ      | Revision                  |

Der Grundreiniger und Verdünnung in der Revision wurden vernachlässigt.

Bei einer Modernisierung wird zur Demontage der Baugruppe Strom und Brenngas verbraucht. Diese Verbräuche konnten nicht quantifiziert werden, sind aber vermutlich zu vernachlässigen. Darüber hinaus entstehen durch die Neufertigung des Bauteils Verbräuche wie unter 2.1.2 angegeben.

## 2.2.8 Abfälle

- a) im Betrieb: keine  
b) in der Reinigung:

| Stoffbezeichnung          | Menge | Einheit | Prozess         |
|---------------------------|-------|---------|-----------------|
| Hausmüll ähnliche Abfälle | 130   | Kg      | I1- Bodenbelag  |
|                           | 18    |         | I2 – Bodenbelag |

- c) in der Instandhaltung.

| Stoffbezeichnung   | Menge | Einheit | Prozess                          |
|--------------------|-------|---------|----------------------------------|
| Bodenbelagsabfälle | 38    | Kg      | Nachschau (korr. Instandhaltung) |
|                    | 28    |         | Revision                         |
|                    | 147   |         | Modernisierung                   |
| Sperrholzreste     | 396   | Kg      | Modernisierung                   |

Darüber hinaus fallen durch die Neufertigung des Bauteiles Abfälle analog zu 2.1.3 an.

## 2.2.9 Umweltbelastungen

- a) Im Betrieb gehen vom Bauteil keine Umweltbelastungen aus.  
b) In der Reinigung:

| Stoffbezeichnung | Menge | Einheit | Prozess            |
|------------------|-------|---------|--------------------|
| Abwasser         | 271   | L       | I2 – Bodenbelag    |
|                  | 130   |         | I3/I4 – Bodenbelag |

Emissionen in die Luft konnten für die Reinigungsprozesse nicht quantifiziert werden. Prinzipiell können flüchtige Anteile der verwendeten Reinigungsmittel verdunsten, sowie Staub oder Aerosolemissionen bei den Reinigungsprozessen auftreten. Diese Emissionen sind jedoch vermutlich vernachlässigbar.

In vorgelagerten Prozessen der Trinkwasseraufbereitung, Stromerzeugung, Herstellung von Hilfsstoffen, sowie in den nachgelagerten Prozessen der Abwasserreinigung und Deponierung fallen Luft- und Wasseremissionen an.

Durch die Reinigung der verschmutzten Wischmops entstehen 1138 l Abwasser. Das Abwasser wird vorgereinigt. (Über die dabei entstehenden Medienverbräuche, Abfälle und Umweltbelastungen liegen keine Angaben vor.). Danach wird das Abwasser in das öffentliche Abwassernetz eingeleitet

c) Instandhaltung:

In der Nachschau (korrektive Instandhaltung), Revision und Modernisierung wurden keine Emissionen ermittelt. Prinzipiell ist mit Lösemittelmissionen aus dem Kleber und der Verdünnung zu rechnen. Darüber hinaus sind Staubemissionen durch das Abschleifen des Zwischenbodens zu erwarten. Darüber hinaus entstehen Umweltbelastungen in den Prozessen der Werkstoffherstellung, Energieerzeugung und der Entsorgung der Abfälle.

In der korrektiven Instandhaltung werden für den Transport von Hilfsstoffen sowie Abfällen 17 tkm Transportarbeit benötigt, in den Revisionen 210 tkm und in der Modernisierung 21 tkm Transportarbeit zuzüglich der Transportarbeit für die Neufertigung.

In der Modernisierung entstehen Umweltbelastungen in der gleichen Höhe wie bei einer Neufertigung. Darüber hinaus entstehen Umweltbelastungen durch den Transport der Demontageabfälle (5 tkm).

## 2.2.10 Kosten

Wurden im Rahmen der Untersuchung nicht erhoben Prinzipiell sind zu berücksichtigen:

- Kosten für die aufgeführten Materialien und Hilfsstoffe
- Kosten für 32MJ Strom bei verwendeter Spannung in der Reinigung.
- Personalkosten für das eingesetzte Personal in Reinigung, Revision und Modernisierung.

- Maschinenkosten für die Reinigung: Nasssauger (15 min je I2/I3 oder I4) und Scheuermaschine (15 min je I3 oder I4). Für die Modernisierung können Maschinenkosten der Neufertigung verwendet werden.

Gemeinkosten des Betriebes, der Reinigung und der Instandhaltung, die auf den Zwischenboden umgeschlagen werden.

### 2.2.11 Kritik am Ist-Stand

Der Werkstoff des Bodenbelages bestimmt die Reinigungsfrequenz, die verwendeten Reinigungsmittel, die Anzuwendenden Reinigungsverfahren und deren Verbräuche. Es ist darauf zu achten, einen Werkstoff zu verwenden, der leicht zu reinigen ist.

- In den niedrigsten Reinigungsstufen (I1 und I2) ist eine Trockenreinigung durch Fegen anzustreben.
- Eine Nassreinigung mit chlorfreien Reinigungsmitteln sollte möglich sein.
- Die Oberfläche des Bodenbelages sollte bei einer Nassreinigung möglichst wenig Wasser aufsaugen um somit die Trocknungszeit zu verkürzen und das Nasssaugen zu minimieren.

Genauso wird durch die Wahl des Bodenbelages und des Klebers die Prozesse der Instandhaltung beeinflusst:

- Ein möglichst verschleißfester Bodenbelag verringert die Aufwände durch Ausbessern in der Nachschau.
- Durch den verwendeten 2 Komponentenkleber ist eine Trennung von Bodenbelag und Bodenplatte schwer durchzuführen, das erschwert Arbeiten in Revision und führt in der Modernisierung dazu, dass der gesamte Zwischenboden neu gefertigt werden muss.

Es ist zu analysieren ob eine komplette Neufertigung der Baugruppe in der Modernisierung wirklich nötig ist, oder ob durch eine andere Materialwahl oder Befestigung der Sitze dies vermieden werden könnte.

## 2.3 Entsorgung - End of Life

Da für die relativ neuen Referenzfahrzeuge noch keine Praxisdaten zur Entsorgung des Fahrzeuges nach Ende der Lebensdauer vorliegen, basieren die Angaben in diesem Abschnitt auf theoretischen Annahmen. Es wird davon ausgegangen, dass zunächst der Bodenbelag entfernt wird. Danach wird der Zwischenboden durch „Abbrennen“ der Schraubverbindungen zum Wagenkasten demontiert. Der Bodenbelag und der Sperrholzboden können dann getrennt geschreddert werden. Danach wird der Bodenbelag auf einer Hausmülldeponie (Klasse II) deponiert. Die Sperrholzabfälle werden in einer Hausmüllverbrennungsanlage unter Wärmegewinnung verbrannt, die Schlacke und Flugasche deponiert.

Diese Art der Entsorgung stellt einen theoretisch günstigen Entsorgungsweg dar, da eine Trennung von Bodenbelag und Sperrholzplatte angenommen wird. Dies ist nach jetzigem Kenntnisstand fraglich. Eine werkstoffliche Verwertung der gebrauchten Bodenbeläge ist aufgrund der Polymerart, der langen Nutzung und der Verunreinigung mit PUR-Klebstoff unter jetzigen technologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen eher unwahrscheinlich. Die Verbrennung der Bodenbelagsreste ist zwar auch unter Wärmenutzung möglich, ihre Zulässigkeit hängt aber von der Art der Rauchgasreinigung der jeweiligen Müllverbrennungsanlage ab. Diese Entsorgungsprozesse wurden in allgemeiner Form bilanziert. Es ist keine konkrete Müllverbrennungsanlage und Deponie bilanziert worden, da dafür noch zu viele Informationen über die Art der Entsorgung der entstehenden Abfälle fehlen.

### 2.3.1 Medienaufwendungen / Hilfsstoffe

Unter den oben beschriebenen Annahmen entstehen folgende Verbräuche

| Stoffbezeichnung | Menge | Einheit | Prozess                                       |
|------------------|-------|---------|---|
| Strom, öff. Netz | 8     | MJ      | Shreddern von Bodenbelag und Sperrholzplatten |

### 2.3.2 Umweltbelastungen

Für den Transport der Bodenbelag- und Sperrholzshredderfraktionen zur Deponie bzw. zur Müllverbrennung wird eine Transportarbeit von 41 tkm benötigt. Es werden 147 kg Bodenbelag deponiert und 398 kg Sperrholz verbrannt.

Durch die Rückgewinnung von Energie in der Verbrennung des Sperrholzes entsteht eine Gutschrift von 648 MJ. Die Ergebnisse der ökologischen Zielgrößen ergibt

| Wirkungskat.                | Indikatorwert | Einheit                         |
|-----------------------------|---------------|---------------------------------|
| Versauerung                 | -0,6          | kg SO <sub>2</sub> –Äquivalente |
| Treibhauseffekt             | 660           | kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente |
| Terrestrische Eutrophierung | 0,04          | kg Nitrat-Äquivalente           |
| Ozonabbaupotential          | -2,7 E-05     | kg CFC-11 Äquivalente           |
| Ökotoxizität                | -2,3          | Kg Benzol Äquivalente           |
| KEA                         | -2,44         | GJ                              |
| Humantoxizität              | -0,2          | Kg Benzol Äquivalente           |
| Aquatische Eutrophierung    | -0,00213789   | kg Phosphatäquivalente          |

### 2.3.3 Kosten

Wurden im Rahmen der Untersuchung nicht erhoben Prinzipiell sind zu berücksichtigen:

- Kosten für die Entsorgung von 147 kg Bodenbelag und 398 kg Sperrholzshredderabfälle.
- Kosten für 8MJ Strom bei verwendeter Spannung beim Shreddern.
- Personalkosten für das eingesetzte Personal in Demontage.
- Maschinenkosten für das Shreddern. Es wurde ein Shredder mit einem Maximaldurchsatz von 25 t/h bilanziert. Es ergeben sich daraus nur 1,5 min Durchlaufzeit für Bodenbelag und Sperrholz. Darüber hinaus sollten Rüst- und Reinigungszeiten ggf. berücksichtigt werden.
- Gemeinkosten des Betriebes, der Demontage und des Schredderns, die auf den Zwischenboden umgeschlagen werden.

### 2.3.4 Kritik am Ist-Stand

Die getroffenen Annahmen setzen eine getrennte Demontage und werkstoffreine Entsorgung bzw. thermische Verwertung der Baugruppe voraus. Dies kann nur geschehen wenn dafür technische (und hier nicht weiter betrachtete ökonomische) Voraussetzungen erfüllt sind. Dazu zählen:

- Trennbarkeit von Bodenbelag und Sperrholzboden
- Zugänglichkeit der Verbindungsschrauben zwischen Boden und Wagenkasten
- Sortenreines Shreddern und Auffangen der einzelnen Fraktionen
- Keine Verwendung von z.B. halogenhaltigen Holzschutzmitteln, die eine thermische Verwertung der Sperrholzabfälle verhindern.

Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt so müsste ggf. der gesamte Zwischenboden geschreddert und deponiert werden. Wird – im ungünstigsten Fall - der Zwischenboden gemeinsam mit gefahrstoffhaltigen Baugruppen geschreddert, kann sogar eine Deponierung oder Verbrennung als besonders überwachungsbedürftige Abfälle in Frage kommen.

## 3 Anforderungen an die Baugruppe hinsichtlich kreislaufgerechter Gestaltung

### 3.1 Darstellung des Ist-Zustandes

Fußböden von Nahverkehrsfahrzeugen werden nahezu ausschließlich aus einem Holzkern und darauf aufgeklebtem Fußbodenbelag gefertigt. Während Holz mit seinen hervorragenden Dämmeigenschaften ein ausgezeichneter Fußboden-Werkstoff ist, der als Recyclingmaterial kein Problem darstellt und unter diesen Aspekt nicht ersetzt werden sollte, besteht beim Fußbodenbelag noch ein erhebliches

Entwicklungspotential. Neben der Wahl eines geeigneten Werkstoffes ist insbes. die Klebeverbindung zum Untergrund problematisch. Weitere Verbesserungspotentiale werden in der aufwendigen Fertigung, Reinigung und Reparatur des Fußbodens gesehen.

### 3.2 Konzeptionelle Gestaltung der Baugruppe

Grundprinzip einer kreislaufgerechten Produktenwicklung ist eine gesamtheitliche Betrachtung des Produktlebenszyklus mit konstruktiver Berücksichtigung von Recyclingkreisläufen in allen Lebenszyklusphasen. Analog Abschnitt 6.3.1 sind in den einzelnen Phasen folgende Kreisläufe zu beachten:

Vorprozesse:

| Kreislauf |                                     | Beispielbezug   |
|-----------|-------------------------------------|---|
| Transport | Energetische Prozesse<br>Emissionen | Transportprozesse bei der Auswahl des Lieferanten berücksichtigen |

Herstellung:

| Kreislauf   | Beispielbezug   |
|---|---|
| Ausgangspunkt für eigentlichen Produktkreislauf                       | Ziel: Nebenkreisläufe im Vergleich zum eigentlichen Produktkreislauf gering halten  |
| <u>Wiederverwertung:</u><br>Werkstoffe                                | Metall-Schrott aus Produktionsrücklauf:<br>Blechstreifen (Verschnitt, Ausschuss)<br>Holzabfälle:<br>Sperrholzplatten (Verschnitt, Ausschuss)<br>sonstige Abfälle:<br>Bodenbelag (Verschnitt, Ausschuss) |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe   | nicht zutreffend  |
| <u>Weiterverwertung:</u><br>Werkstoffe<br>Betriebsstoffe, Hilfsstoffe | Baugruppenübergreifende Optimierung des Zuschnittes   |
| <u>Beseitigung:</u><br>Betriebsstoffe, Hilfsstoffe                    | Hausmüllähnlicher Abfall:<br>ausgehärtete Reste an Kleber und deren Verpackungen<br>Sonderabfall:<br>Nicht ausgehärtete Kleber, Primer, Entferner und Haftreiner  |

Betrieb

| Kreislauf                               | Beispielbezug    |
|---|------------------|
| <u>Wiederverwendung:</u><br>Werkstoffe, | nicht relevant   |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe             | Reinigungsmittel |
| <u>Weiterverwendung:</u><br>Werkstoffe, | nicht relevant   |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe             | Reinigungsmittel |
| <u>Wiederverwertung:</u><br>Werkstoffe, | nicht relevant   |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe             | Reinigungsmittel |

| Kreislauf                               | Beispielbezug                       |
|---|-------------------------------------|
| <u>Weiterverwertung:</u><br>Werkstoffe, | nicht relevant                      |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe             | nicht relevant                      |
| <u>Beseitigung</u><br>Werkstoffe,       | nicht relevant                      |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe             | Reinigung: Hausmüllähnliche Abfälle |

### Instandhaltung

| Kreislauf                               | Beispielbezug   |
|---|---|
| <u>Wiederverwertung:</u><br>Werkstoffe, | Zuschnitt Belag (Verschnitt, Ausschuss bei Ausbesserung während der korrektiven Instandhaltung u. Revision) |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe             | nicht zutreffend  |
| <u>Weiterverwertung:</u><br>Werkstoffe  | nicht zutreffend  |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe             | nicht zutreffend  |
| <u>Beseitigung</u><br>Werkstoffe        | Hausmüllähnliche Abfälle:<br>(Ausbesserung des Fußbodens während der korrektiven Instandhaltung)            |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe             | Hausmüllähnliche Abfälle:<br>(Ausbesserung des Fußbodens während der korrektiven Instandhaltung)            |
| <u>Wiederverwendung</u>                 | nicht zutreffend  |

### Modernisierung

| Kreislauf                              | Beispielbezug   |
|--|---|
| <u>Wiederverwertung:</u><br>Werkstoffe | Metall-Schrott aus Produktionsrücklauf:<br>- Blechstreifen (Verschnitt, Ausschuss)<br>Holzabfälle:<br>- Sperrholzplatten (Verschnitt, Ausschuss)<br>sonstige Abfälle:<br>Bodenbelag (Verschnitt, Ausschuss) |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe            | nicht zutreffend  |
| <u>Weiterverwertung:</u><br>Werkstoffe | Baugruppenübergreifende Optimierung des Zuschnittes   |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe            |   |
| <u>Beseitigung</u><br>Werkstoffe       | Hausmüllähnlicher Abfall<br>geschredderter Boden (ohne vorherige Trennung von Sperrholz und Belag)  |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe            | Hausmüllähnlicher Abfall:<br>- ausgehärtete Reste an Kleber und deren Verpackungen<br>Sonderabfall:<br>- Nicht ausgehärtete Kleber, Primer, Entferner und Haf-treiniger                                     |

|                  |                  |
|------------------|------------------|
| Kreislauf        | Beispielbezug    |
| Wiederverwendung | nicht zutreffend |

### Entsorgung

|   |   |
|---|---|
| Kreislauf                                     | Beispielbezug   |
| <u>Wiederverwertung:</u><br>Werkstoffe        | Unter Voraussetzung einer Demontage und sortenreinen Trennung:<br>Metallschrott   |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe                   | gegenwärtig keine Anwendung   |
| <u>Energetische Verwertung:</u><br>Werkstoffe | Unter Voraussetzung einer Demontage und sortenreinen Trennung:<br>- Thermische Verwertung Sperrholzabfälle<br>- Thermische Verwertung Belagabfälle (Zulässigkeit abhängig von Rauchgasreinigung der Müllverbrennungsanlage) |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe                   | gegenwärtig keine Anwendung   |
| <u>Beseitigung</u><br>Werkstoffe              | Hausmüllähnlicher Abfall:<br>- geschredderter Boden (ohne vorherige Trennung von Sperrholz und Belag)   |
| Betriebsstoffe, Hilfsstoffe                   | Hausmüllähnlicher Abfall:<br>- ausgehärtete Reste an Kleber und deren Verpackungen<br>Sonderabfall:<br>- Nicht ausgehärtete Kleber, Primer, Entferner und Haftreiniger  |

### 3.3 Anforderungen an die Baugruppe hinsichtlich Bauweisen, Fügetechniken und Fertigungsverfahren

| Anforderung nach Abschnitt 6.3.2 | Beispielbezug   | Mögliche Konfliktpunkte                                      |
|----------------------------------|---|--|
| 2.1                              | Sinnvolle Anwendbarkeit auf Integration einzelner Funktionen eingeschränkt (z.B. Befestigungselemente in Bodenplatte)   | Verschleißlenkung, Aufwendige Gestaltung, Wirtschaftlichkeit |
| 2.2                              | Ist-Standsbeschreibung  | Aufwendige Demontage   |
| 2.3                              | Erfüllt   |  |
| 2.4                              | Z.Zt. nicht erfüllt<br><i>so viel Demontage wie nötig</i> bedeutet:<br>Demontage mit dem Ziel einer anzustrebenden werkstofflichen Verwertbarkeit der Baugruppe<br>Forderung:<br>- Trennung Belag / Sperrholzplatte durch geeignete Verbindung vereinfachen | Technische Anforderungen an Baugruppe                        |
| 2.5                              | kein unmittelbarer Handlungsbedarf  |  |
| 2.6                              | kein unmittelbarer Handlungsbedarf  |  |
| 2.7                              | Vorschlag:<br>- Module zum vereinfachten Austausch von Bereichen mit erhöhtem Verschleiß<br>- Module mit unterschiedlichen Funktionen (z.B. mit/ohne inte-  | Wirtschaftlichkeit, Design, Demontage aufwand steigt.        |

| Anforderung nach Abschnitt 6.3.2 | Beispielbezug   | Mögliche Konfliktpunkte                                    |
|----------------------------------|---|--|
|                                  | grierten Sitzbefestigungen)   |  |
| 2.8                              | kein unmittelbarer Handlungsbedarf  |  |
| 2.9                              | Trennung Belag/Bodenplatte mit hohem manuellen Aufwand, andere Verbindungstechnik oder lösbarer Kleber  | Technische Anforderungen an Baugruppe, Entwicklungsaufwand |
| 2.10                             | Ist-Stand: Trennung Belag/Bodenplatte mit hohem manuellen Aufwand, alle Trennstellen schwer zugänglich  | Design, Sicherheit   |
| 2.11                             | Nicht zutreffend  |  |
| 2.12                             | Kreislaufgerechte Reinigungsmedien vorschlagen bzw. berücksichtigen   | Wirksamkeit, Wirtschaftlichkeit,                           |
| 2.13                             | Nicht zutreffend  |  |
| 2.14                             | Nicht zutreffend  |  |
| 2.15                             | Betr. Austausch verschlissener Belagteile, Problem: Trennung Belag/Bodenplatte mit hohem manuellen Aufwand, alle Trennstellen schwer zugänglich, Alternative: 2.7 | Siehe 2.7  |
| 2.16                             | betr. Austausch verschlissener Belagteile<br>Siehe 2.7  | Siehe 2.7  |
| 2.17                             | Bei Trennung von Bodenplatte und Belag Beschädigung der Bodenplatte vermeiden (Klebstoffauswahl, Werkzeug)  | Wirtschaftlichkeit   |
| 2.18                             | Gewährleistet   |  |
| 2.19                             | Siehe 2.7 , 2.16  | Siehe 2.7  |
| 2.20                             | Nicht zutreffend  |  |
| 2.21                             | Siehe 2.7   | Siehe2.7   |
| 2.22                             | Designanforderungen überprüfen (Belag)  | Design   |
| 2.23                             | Nicht zutreffend  |  |

### 3.4 Anforderungen an die Baugruppe hinsichtlich Materialauswahl

| Anforderung nach Abschnitt 6.3.3 | Beispielbezug   | Mögliche Konfliktpunkte   |
|----------------------------------|---|---|
| 3.1                              | Anzustrebende Entsorgungswege sind:<br><u>Wiederverwertung</u> von Werkstoffen:<br>Unter Voraussetzung einer Demontage und sortenreinen Trennung<br>- Metallschrott<br><u>Energetische Verwertung</u> von Werkstoffen:<br>Unter Voraussetzung einer Demontage und sortenreinen Trennung:<br>- Thermische Verwertung von Sperrholzabfällen<br>- Thermische Verwertung von Belagabfällen (Zulässigkeit abhängig von Rauchgasreinigung der Müllverbrennungsanlage)<br>Alternativen:<br><u>Beseitigung</u> geschredderter Baugruppe (ohne vorherige Trennung von Sperrholz und Belag) und ausgehärteter Reste an Kleber und deren Verpackungen als hausmüllähnlicher Abfall | Wirtschaftlichkeit der Verwertung gegenüber der Beseitigung.<br>Eventuell erhöhter Herstellungsaufwand. Technische Anforderungen der Kunden . |
| 3.2                              | Sperrholz und Bodenbelag können aktuell thermisch verwertet werden wenn keine schädlichen Zusätze die Verbrennung verhindern.. Ein werkstoffliches Recycling ist nur für die Metallbestandteile möglich. Technische Möglichkeiten gibt es, sie sind jedoch gegenwärtig nicht wirtschaftlich umsetzbar.<br><u>Alternativen:</u> Metallische Werkstoffe und andere wirtschaftlich zu verwertende Werkstoffe bevorzugen.   | Technische Anforderungen der Kunden. Ressourcenschonung. Leichtbau.   |
| 3.3                              | Sperrholz wenn unbehandelt, Einsatz von textilen Belägen oder   | Technische Anforderungen  |

| Anforderung nach Abschnitt 6.3.3 | Beispielbezug  | Mögliche Konfliktpunkte  |
|----------------------------------|--|--|
|                                  | Bodenbelägen aus Naturpolymeren prüfen   | der Kunden (v.a. Brandschutz, Lebensdauer) , . Wirtschaftlichkeit. |
| 3.4                              | Siehe 3.3  | Siehe 3.3  |
| 3.5                              | Ist der Einsatz von rezyklathaltigen Bodenbelägen möglich?   | Technische Anforderungen der Kunden (v.a. Lebensdauer). Design.    |
| 3.6                              | Bodenplatte wenn möglich aus einem einzigen Werkstoff fertigen.  | Leichtbau. Siehe 2.1   |
| 3.7                              | Ist es möglich eine andere Verbindungsmöglichkeit zwischen Bodenplatte und -belag zu verwenden an Stelle des nicht trennbaren PUR Klebers?   | Technische Anforderungen. Wirtschaftlichkeit. Entwicklungsbedarf.  |
| 3.8                              | Wenn der Bodenbelag und die Platte nicht trennbar sind, können Platte und Belag gemeinsam werkstofflich verwertet werden?<br>Lassen die Inhaltsstoffe sowohl der Bodenplatte als auch des Belages eine Verbrennung zu. | Technische Anforderungen. Wirtschaftlichkeit.                      |
| 3.9                              | Ist die Platte einfach vom Wagenkasten trennbar?<br>Ist die Trennung von Sperrholz und Belagsresten möglich und wirtschaftlich sinnvoll?   | Technische Anforderungen.  |
| 3.10                             | Brandhemmende Zusätze im Bodenbelag bzw. in der Imprägnierung der Sperrholzplatte kritisch betrachte   | Brandsicherheit, Anforderungen des Kunden. Wirtschaftlichkeit.     |
| 3.11                             | Nicht zutreffend.  |  |
| 3.12                             | Bodenbelag kennzeichnen unter Berücksichtigung geltender gesetzlicher Grundlagen im Betriebsland.  | Fehlende Standardisierung  |
| 3.13                             | Kriterium anzuwenden. (vgl. Kapitel 2 dieser Baugruppenuntersuchung)   | Datensensibilität bei Zulieferern, Aufwand                         |
| 3.14                             | Ist der Einsatz von Kleber, Verdünner und Reiniger in jedem Fall notwendig?  | Technische Anforderungen. Entwicklungsbedarf.                      |
| 3.15                             | Beachten einer Vermeidungsstoffliste.  | Siehe 3.14   |
| 3.16                             | Siehe auch 3.10  | Wirtschaftlichkeit. Ressourcenschonung.                            |

### 3.5 Anforderungen an die Baugruppe hinsichtlich Medienverbrauch und Emissionen

| Anforderung nach Abschnitt 6.3.4 | Beispielbezug  | Mögliche Konfliktpunkte  |
|----------------------------------|--|--|
| 4.1                              | Nicht relevant für Baugruppe   |  |
| 4.2                              | Nicht relevant für Baugruppe   |  |
| 4.3                              | Sind Schleifprozesse wirklich notwendig? Gibt es Alternativen zum Verspachteln?  | Technische Anforderungen, Oberflächenqualität, Entwicklungsbedarf.   |
| 4.4                              | Sind für Bodenbelag und Bodenplatte leichtere Werkstoffe einsetzbar?   | Technische Anforderungen (Akustik, Festigkeit der Sitzbefestigungen), Forderung: minimale Werkstoffvielfalt. |
| 4.5                              | Enthält der PUR-Klebstoff, der Haftreiniger und die Verdünnung Stoffe der Vermeidungsliste? Sind sie ggf. zu ersetzen?<br>Der PUR Kleber ist ggf. durch Dispersionskleber zu ersetzen. | Technische Anforderungen, Wirtschaftlichkeit   |
| 4.6                              | Siehe 4.4  | Siehe 4.4.   |

| Anforderung<br>nach Abschnitt<br>6.3.4 | Beispielbezug   | Mögliche Konfliktpunkte   |
|--|---|---|
| 4.7                                    | Nicht zutreffend  |   |
| 4.8                                    | Ist der Bodenbelag leicht und mit geringem Wasserverbrauch zu reinigen? Sind Reiniger verwendbar die keine Stoffe der Vermeidungsliste enthalten? | Siehe 2.12  |
| 4.9                                    | Lösbare Klebverbindungen, siehe 2.17, Modulare Bodenbeläge, siehe 2.7   | Siehe 2.7 und 2.17  |
| 4.10                                   | Siehe 4.9   | Siehe 2.7 und 2.17  |
| 4.11                                   | Keine Inhaltsstoffe der Vermeidungsliste verwenden, werkstoffliche Verwertung aller Komponenten anstreben.  | Technische Anforderungen, Wirtschaftlichkeit, Entwicklungsbedarf. |



## **Verbundprojekt BAHNKREIS**

Förderkennzeichen des BMBF:  
02PV21334

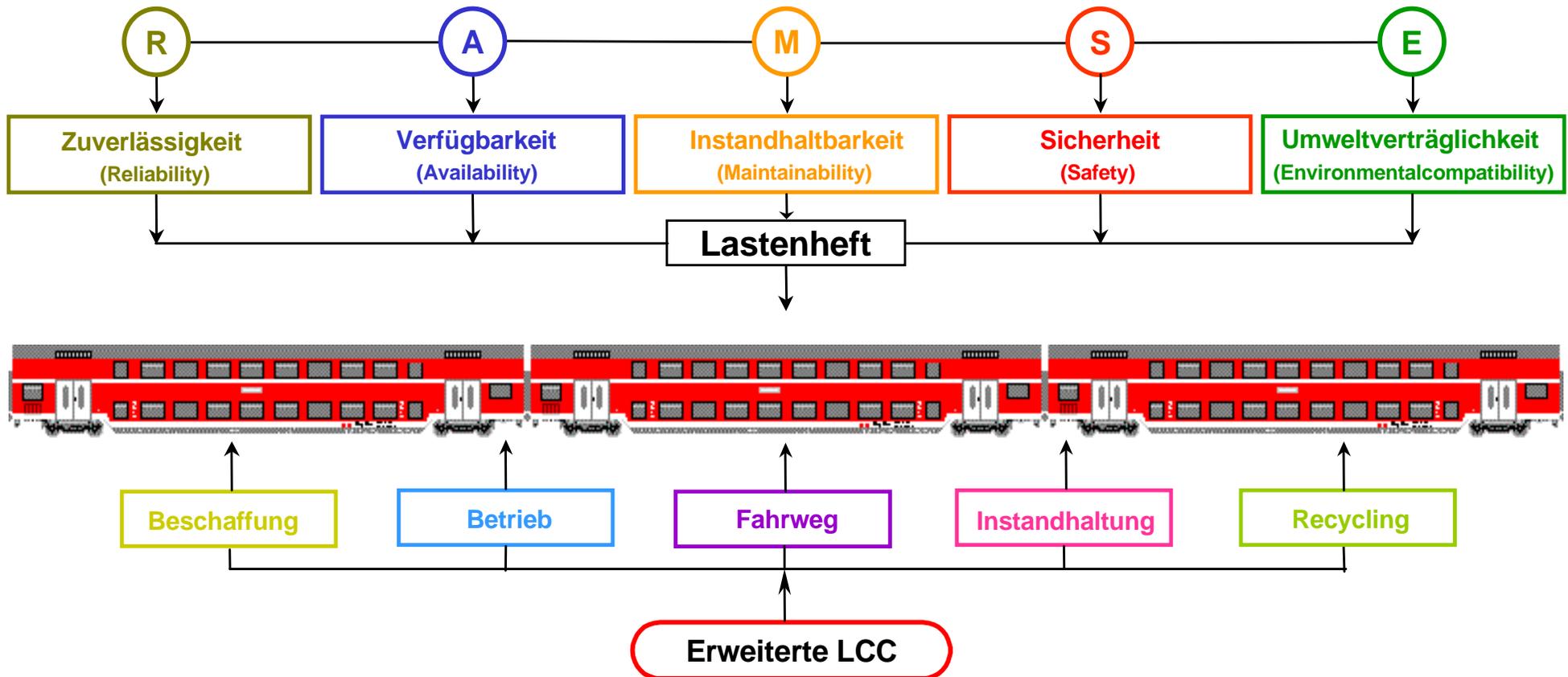
---

### **Anlage VI zum Band 6**

**Anforderungen an Schienenfahrzeuge aus Sicht von  
Besteller, Betreiber und Hersteller unter besonderer  
Berücksichtigung der Kreislauffähigkeit**

## Anforderungen an die Betriebs- und Instandhaltungsqualität

Qualitätsanforderungen mittels RAMS(E)-Kennwerten beschreiben



Anforderungen an die Gesamtkosten und Umweltverbrauch über den Lebenszyklus definieren

Ökonomischer und ökologischer Aufwand gegenüberstellen