

**Lehrstuhl für Luftfahrttechnik der Technischen Universität München**

# Untersuchungen zur Bewertung der Transporteffizienz verschiedener Verkehrsmittel

Dipl.-Ing. Volker Gollnick

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gottfried Sachs

Prüfer der Dissertation:

1. Hon.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Schmitt
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing

Die Dissertation wurde am 26.05.2003 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 20.02.2004  
angenommen.



## **Übersicht**

Auf dem Hintergrund des wachsenden Verkehrsaufkommens und gleichzeitigen Rückgangs der Energieressourcen stellt sich Frage nach dem geeigneten Verkehrssystem für eine gegebene Transportaufgabe. In dieser Arbeit wird ein methodischer Ansatz zur Analyse und Bewertung der Transporteffizienz von Kraftfahrzeugen, Bahn und Flugzeug erarbeitet.

Hierzu werden zunächst die Transportabläufe und Streckennetze für verschiedene Verkehrsmittel anhand eines Phasenmodells beschrieben, um den Zeiteinfluss zu untersuchen.

Der zweite Untersuchungsschwerpunkt der Arbeit liegt auf der vergleichenden Gegenüberstellung der technischen Eigenschaften der verschiedenen Verkehrsmittel.

Anhand des in der Arbeit entwickelten Kriteriums wird die Transporteffizienz verschiedener Verkehrsmittel unter den Aspekten Energie- und Zeitbedarf an ausgewählten Referenzmissionen ermittelt und bewertet.

## **Abstract**

The increasing worldwide traffic and the decreasing energy resources raise the question for the most efficient transportation system for a given mission. In this study a methodology is developed to investigate and assess the efficiency of various transport vehicles.

At first the transportation processes and route nets are analysed according to a phase model to investigate the influences on time.

In the second part of the analysis the technical characteristics and advantages/disadvantages of various transport vehicles are described.

Using an efficiency criterion developed in this study the transport efficiency of various transport vehicles related to energy and time effort is assessed according to given reference missions.

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Luftfahrttechnik der Technischen Universität München. Das ausgezeichnete Umfeld des Lehrstuhls ist eine wesentliche Grundlage für den Erfolg der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Schmitt, dem bisherigen Leiter des Lehrstuhls. Er hat nicht nur diese Arbeit angeregt und wissenschaftlich betreut, sondern stand mir in vielen fruchtbaren Diskussionen mit hilfreichen Anregungen zur Seite.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing, Ordinarius für Fahrzeugtechnik, gilt mein herzlicher Dank für die Mitberichterstattung und sein Interesse an dieser Arbeit.

Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Gottfried Sachs, dem Ordinarius für Flugmechanik und Flugregelung für die spontane Bereitschaft zur Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danken.

Dank sagen möchte ich auch den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Luftfahrttechnik, allen voran Herrn Tilman Richter und Herrn Stefan Eelman sowie Herrn Dr.-Ing. Andreas Strohmeier, die mir als Diskussionspartner jederzeit zur Verfügung standen und mir wertvolle Tipps gegeben haben.

Mein besonders herzlicher Dank gilt meinen Eltern, die mir diesen spannenden und schönen Lebensweg ermöglicht haben.

In gleicher Weise will ich schließlich meiner Frau Bärbel danken, für Ihre stete Motivation und ihre liebevolle Geduld, mit der sie die vielen Abende und Wochenenden meine Arbeit am Schreibtisch und Computer ge- und ertragen hat. Ihr gebührt ein großer Anteil am Erfolg dieser Arbeit.

Kösching, im Mai 2003

Volker Gollnick

---

## Inhaltsverzeichnis

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>EINLEITUNG</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1        | Problemstellung  | 1         |
| 1.2        | Ziel der Arbeit und methodischer Ansatz                      | 8         |
| <b>2</b>   | <b>STAND DER TECHNIK</b>                                     | <b>11</b> |
| 2.1        | Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs und Energiebedarfs       | 11        |
| 2.2        | Untersuchungen zum Zeitaufwand                               | 19        |
| 2.3        | Bewertung der bisherigen Ergebnisse                          | 20        |
| <b>3</b>   | <b>TRANSPORTABLÄUFE UND REFERENZSTRECKEN</b>                 | <b>22</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Transportabläufe</b>                                      | <b>22</b> |
| 3.1.1      | Personentransporte   | 23        |
| 3.1.1.1    | Personentransporte mit dem Pkw                               | 23        |
| 3.1.1.2    | Personentransporte mit der Bahn                              | 24        |
| 3.1.1.3    | Personentransporte mit dem Flugzeug                          | 25        |
| 3.1.2      | Gütertransporte  | 25        |
| 3.1.2.1    | Gütertransporte mit dem Lkw                                  | 26        |
| 3.1.2.2    | Gütertransporte mit der Bahn                                 | 26        |
| 3.1.2.3    | Gütertransporte mit dem Flugzeug                             | 27        |
| <b>3.2</b> | <b>Ein Phasenmodell zu Beschreibung der Transportabläufe</b> | <b>27</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Zugangsphase</b>  | <b>28</b> |
| 3.3.1      | Verkehrsmittelwahl in der Zugangsphase                       | 29        |
| 3.3.1.1    | Verkehrsmittelwahl zum Flughafen                             | 29        |
| 3.3.1.2    | Verkehrsmittelwahl zum Bahnhof                               | 30        |
| 3.3.2      | Zeitbedarf in der Zugangsphase und Wahl der Startorte        | 31        |
| 3.3.2.1    | Einzugsbereich für Flughafen und Bahnhof                     | 31        |
| 3.3.2.2    | Schätzung der Zugangszeiten                                  | 32        |
| 3.3.2.3    | Wahl der Startorte   | 33        |
| <b>3.4</b> | <b>Übergangsphase</b>  | <b>35</b> |
| 3.4.1      | Übergangsphase zwischen Ortsausgang und Fernstraße           | 35        |
| 3.4.2      | Übergangsphase im Flughafen                                  | 36        |
| 3.4.3      | Übergangsphase im Bahnhof                                    | 38        |
| <b>3.5</b> | <b>Hauptlauf</b>   | <b>40</b> |
| 3.5.1      | Transportstreckennetze                                       | 40        |
| 3.5.1.1    | Das Straßenverkehrsstreckennetz                              | 42        |
| 3.5.1.2    | Das Streckennetz der Bahn                                    | 43        |
| 3.5.1.3    | Das Luftverkehrsstraßensystem                                | 43        |
| 3.5.2      | Festlegung der Referenzstrecken                              | 44        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>3.6</b> | <b>Auswertung der Entfernungs- und Zeitmerkmale</b>           | <b>46</b>  |
| <b>3.7</b> | <b>Umsetzung in den Streckenwirkungsgrad</b>                  | <b>49</b>  |
| <b>3.8</b> | <b>Zusammenfassung der Transportabläufe</b>                   | <b>51</b>  |
| <b>4</b>   | <b>FAHRWIDERSTÄNDE VERSCHIEDENER VERKEHRSSYSTEME</b>          | <b>52</b>  |
| <b>4.1</b> | <b>Grundlagen</b>   | <b>52</b>  |
| 4.1.1      | Fahrwiderstand des Kraftfahrzeugs                             | 52         |
| 4.1.2      | Fahrwiderstand der Bahn                                       | 56         |
| 4.1.3      | Fahrwiderstand des Flugzeugs                                  | 59         |
| 4.1.4      | Gegenüberstellung der Fahrwiderstände                         | 61         |
| <b>4.2</b> | <b>Untersuchung der Fahrzeugmasse</b>                         | <b>63</b>  |
| 4.2.1      | Nutzlast-Gesamtgewichtssituation bei Kraftfahrzeugen          | 66         |
| 4.2.1.1    | Pkw   | 66         |
| 4.2.1.2    | Lkw   | 68         |
| 4.2.2      | Massenbetrachtungen bei der Bahn                              | 69         |
| 4.2.2.1    | Gütertransport  | 69         |
| 4.2.2.2    | Personentransport   | 71         |
| 4.2.3      | Das Nutzlast-/Startgewichtsverhältnis des Flugzeugs           | 72         |
| 4.2.4      | Zusammenfassung und Vergleich der Konstruktionswirkungsgrade  | 75         |
| 4.2.4.1    | Personentransporte  | 75         |
| 4.2.4.2    | Gütertransporte   | 77         |
| <b>4.3</b> | <b>Untersuchung der aerodynamischen Widerstände</b>           | <b>78</b>  |
| 4.3.1      | Aerodynamische Eigenschaften von Kraftfahrzeugen              | 79         |
| 4.3.1.1    | Aerodynamischer Widerstand von Pkw                            | 79         |
| 4.3.1.2    | Aerodynamische Qualität der Lastkraftwagen                    | 81         |
| 4.3.2      | Untersuchung der Aerodynamik von Bahnfahrzeugen               | 84         |
| 4.3.3      | Einfluss von Tunneln  | 87         |
| 4.3.4      | Untersuchung der Aerodynamik des Flugzeugs                    | 89         |
| 4.3.5      | Zusammenfassung und Vergleich der aerodynamischen Widerstände | 93         |
| <b>4.4</b> | <b>Untersuchung des Steigungswiderstands</b>                  | <b>95</b>  |
| 4.4.1      | Steigungen der Straßen und Schienen                           | 95         |
| 4.4.2      | Ansatz zur Abschätzung des Steigungswiderstands               | 99         |
| 4.4.3      | Steigungen im Flugprofil des Flugzeugs                        | 101        |
| 4.4.4      | Zusammenfassung und Vergleich der Steigungswiderstände        | 103        |
| <b>4.5</b> | <b>Einfluss des Rollwiderstands</b>                           | <b>103</b> |
| 4.5.1      | Rollwiderstand bei Kraftfahrzeugen                            | 103        |
| 4.5.2      | Rollwiderstand bei der Bahn                                   | 106        |
| 4.5.3      | Rollwiderstand des Flugzeugs                                  | 106        |
| 4.5.4      | Zusammenfassung und Vergleich der Rollwiderstände             | 107        |
| <b>4.6</b> | <b>Untersuchung der Fahrzeugantriebe</b>                      | <b>108</b> |
| 4.6.1      | Kraftfahrzeugantriebe   | 108        |
| 4.6.2      | Bahnantriebe  | 110        |
| 4.6.2.1    | Elektrische Bahnantriebe                                      | 110        |

---

|               |   |            |
|---------------|---|------------|
| 4.6.2.2       | Antriebssystem Metrorapid   | 111        |
| 4.6.3         | Flugzeugantriebe  | 112        |
| 4.6.4         | Zusammenfassung und Vergleich der Fahrzeugantriebe  | 115        |
| 4.6.5         | Nebenaggregate  | 115        |
| 4.6.5.1       | Nebenaggregate bei Pkw  | 115        |
| 4.6.5.2       | Nebenaggregate bei Bahnfahrzeugen   | 116        |
| 4.6.5.3       | Nebenaggregate im Flugzeug  | 117        |
| <b>5</b>      | <b>VON DER PRIMÄR- ZUR NUTZENERGIE</b>  | <b>118</b> |
| <b>6</b>      | <b>ERMITTLUNG DER TRANSPORTEFFIZIENZ</b>  | <b>122</b> |
| <b>6.1</b>    | <b>Notwendige Vereinfachungen</b>   | <b>122</b> |
| <b>6.2</b>    | <b>Definition einer geeigneten Kenngröße</b>  | <b>123</b> |
| <b>6.3</b>    | <b>Berechnungsverfahren</b>   | <b>125</b> |
| 6.3.1         | Ermittlung des spezifischen Primärenergiebedarfs  | 125        |
| 6.3.1.1       | Berechnung des Endenergiebedarfs über den Verbrauch   | 128        |
| 6.3.1.2       | Berechnung des Endenergiebedarfs aus den Fahrwiderständen   | 129        |
| <b>6.4</b>    | <b>Ergebnisse</b>   | <b>130</b> |
| 6.4.1         | Endenergie- und Zeitbedarf für Zugang, Übergang und Abgang  | 130        |
| 6.4.2         | Bewertung der Gesamtmission über den Verbrauch  | 133        |
| 6.4.2.1       | Gegenüberstellung Hauptlauf und Gesamtmission   | 133        |
| 6.4.2.2       | Einfluss des Startortes   | 137        |
| 6.4.2.3       | Einfluss der Hauptläufe   | 139        |
| 6.4.3         | Bewertung der Gesamtmission über die Fahrwiderstände  | 142        |
| <b>7</b>      | <b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>   | <b>144</b> |
| <b>8</b>      | <b>LITERATUR</b>  | <b>149</b> |
| <b>ANHANG</b> |   |            |
| Anhang A:     | Streckennetze Schiene, Straße, Luft   | A-1        |
| Anhang B:     | Aufgezeichnete Flugrouten und Flugprofile   | B-1        |
| Anhang C:     | Auswertung der Reisezeiten  | C-1        |
| Anhang D:     | Höhenverläufe der Referenzstrecken  | D-1        |
| Anhang E:     | Auswertung zur Transporteffizienz   | E-1        |
| Anhang F:     | Beispielrechenblätter zur Bestimmung des spezifischen<br>Primärenergiebedarfs über den Verbrauch      | F-1        |
| Anhang G:     | Beispielrechenblätter zur Bestimmung des spezifischen<br>Primärenergiebedarfs über den Fahrwiderstand | G-1        |

---

## Abkürzungen

|           |   |
|-----------|---|
| A         | Bezugsfläche  |
| $A_F$     | Gesamtflügelfläche ohne Höhenleitwerk   |
| $A_S$     | Stirnfläche des Fahrzeugs   |
| ADV       | Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen                                       |
| ATC       | Air Traffic Control   |
| ATM       | Air Traffic Management  |
| BR        | Baureihe einer Lokomotive   |
| $b_F$     | Spezifischer Kraftstoffverbrauch  |
| $C_A$     | Aerodynamischer Gesamtauftriebsbeiwert  |
| $C_W$     | Aerodynamischer Gesamtwiderstandsbeiwert  |
| DFS       | Deutsche Flugsicherung GmbH   |
| DOC       | Direct Operating Cost (Direkte Betriebskosten)  |
| e         | Zuschlagfaktor für zusätzlichen Beschleunigungswiderstand in Folge rotierender Massen |
| $e_E$     | spezifische Endenergie  |
| $e_{FB}$  | Anteil rotierender Masse an der Beschleunigung der Bahn                               |
| $e_{Fi}$  | Trägheitsfaktor rotierender Massen  |
| $e_P$     | spezifischer Primärenergiebedarf  |
| $e_{PFW}$ | spezifischer Primärenergiebedarf berechnet über den Fahrwiderstand                    |
| $e_{PV}$  | spezifischer Primärenergiebedarf berechnet über den Verbrauch                         |
| E         | aerodynamische Effizienz $E=\epsilon^{-1}$  |
| $E_E$     | Endenergie  |
| $E_N$     | Nutzenergie   |
| $E_{NA}$  | Nutzenergiebedarf der Nebenaggregate  |
| $E_P$     | Primärenergie   |
| $E_S$     | Sekundärenergie   |
| $f_K$     | Kurvenwiderstandsbeiwert  |
| $f_R$     | Rollwiderstandsbeiwert  |
| F         | Schub   |
| F-Bahn    | Fernbahn  |
| $F_A$     | Auftriebskraft  |



---

|                    |  |
|--------------------|--|
| $F_{\max}$         | maximaler Schub  |
| $F_N$              | Nutzkraft  |
| $F_S$              | Stand Schub  |
| $F_W$              | Widerstandskraft   |
| $g$                | Erdbeschleunigung $g=9,80665 \text{ m/s}^2$                |
| $H$                | Flughöhe   |
| $H_u$              | unterer Heizwert   |
| $I$                | Neigung der Bahntrasse                                     |
| IATA               | International Air Traffic Association                      |
| ICAO               | International Civil Aerospace Organisation                 |
| IFEU               | Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg GmbH |
| IFR                | Instrumenten-Flug-Regeln                                   |
| Kfz                | Kraftfahrzeug  |
| Lkw                | Lastkraftwagen   |
| LLT                | Lehrstuhl für Luftfahrttechnik der TU München              |
| $m$                | aktuelle Gesamtmasse des Flugzeugs                         |
| $m_{\text{eff}}$   | effektive Masse einschließlich Trägheitsanteile            |
| $m_{\text{Bug}}$   | aufliegende Masse des Flugzeugs am Bugfahrwerk             |
| $m_{\text{Haupt}}$ | aufliegende Masse des Flugzeugs am Hauptfahrwerk           |
| $m_{N\max}$        | maximale Nutzmassenkapazität                               |
| $m_{N\text{ist}}$  | reale Nutzmasse  |
| $m_{\text{OEW}}$   | operationelles Leergewicht (Operating Empty Weight)        |
| $m_{\text{TOW}}$   | Startgewicht (Take Off Weight)                             |
| $m_{\text{ZFW}}$   | Kraftstoffnullmasse (Zero Fuel Weight)                     |
| MSKE               | Millionen Steinkohleeinheiten = $10^6 \cdot 293083$ Joule  |
| NEFZ               | Neuer Europäischer Fahrzyklus                              |
| NV-Bahn            | Nahverkehrs-Bahn   |
| ÖPNV               | Öffentlicher Personennahverkehr                            |
| PAX                | Passagier  |
| PKT                | Passagierkilometer   |
| Pkw                | Personenkraftwagen   |
| $r$                | Kurvenradius   |

## Abkürzungen

---

|                |   |
|----------------|---|
| s              | Wegstrecke  |
| S              | Flügelfläche  |
| S-/U-Bahn      | Schnell-/Untergrund-Bahn  |
| SKE            | Steinkohleeinheit = 293083 Joule = Energie, die 1 kg Steinkohle liefert |
| TOW            | Take Off Weight (Startgewicht)  |
| TU D           | Technische Universität Dresden  |
| v              | Fluggeschwindigkeit   |
| $v_{TW}$       | Ausströmgeschwindigkeit aus dem Triebwerk                               |
| V              | Umströmungsgeschwindigkeit  |
| $V_G$          | Fahr- oder Fluggeschwindigkeit über Grund                               |
| $V_W$          | Windgeschwindigkeit   |
| VIA            | Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen                     |
| w              | spezifischer Fahrwiderstand   |
| $w_B$          | spezifischer Beschleunigungswiderstand                                  |
| $w_K$          | spezifischer Kurvenwiderstand   |
| $w_L$          | spezifischer Laufwiderstand   |
| $w_S$          | spezifischer Steigungswiderstand  |
| Wh             | Wattstunde 1Wh=3600J  |
| $W_A$          | aerodynamische Widerstandskraft   |
| $W_B$          | Beschleunigungswiderstandskraft   |
| $W_K$          | Kurvenwiderstandskraft  |
| $W_M$          | Motorwiderstand   |
| $W_N$          | Nutzarbeit  |
| $W_R$          | Rollwiderstandskraft  |
| $W_S$          | Steigungswiderstandskraft   |
| $W_T$          | Transportarbeit   |
| ZFW            | Zero Fuel Weight (Kraftstoffnullmasse)                                  |
| $\alpha$       | Anstellwinkel   |
| $\delta$       | Schubhebelstellung  |
| $\varepsilon$  | Gleitzahl   |
| $\eta_A$       | Antriebswirkungsgrad  |
| $\eta_K$       | Konstruktionswirkungsgrad   |
| $\eta_{KmTOW}$ | Konstruktionswirkungsgrad bezogen auf die Startmasse                    |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $\eta_{\text{kmZFW}}$ | Konstruktionswirkungsgrad bezogen auf die Kraftstoffnullmasse     |
| $\eta_o$              | operativer oder Auslastungs-Wirkungsgrad                          |
| $\eta_s$              | Streckenwirkungsgrad  |
| $\eta_u$              | Umwandlungswirkungsgrad   |
| $\eta_v$              | Verteilungswirkungsgrad   |
| $\gamma$              | Bahnwinkel in der Luftfahrt oder Fahrbahnneigung bei Kfz und Bahn |
| $\Lambda$             | Flügelstreckung   |
| $\rho$                | Luftdichte  |



# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

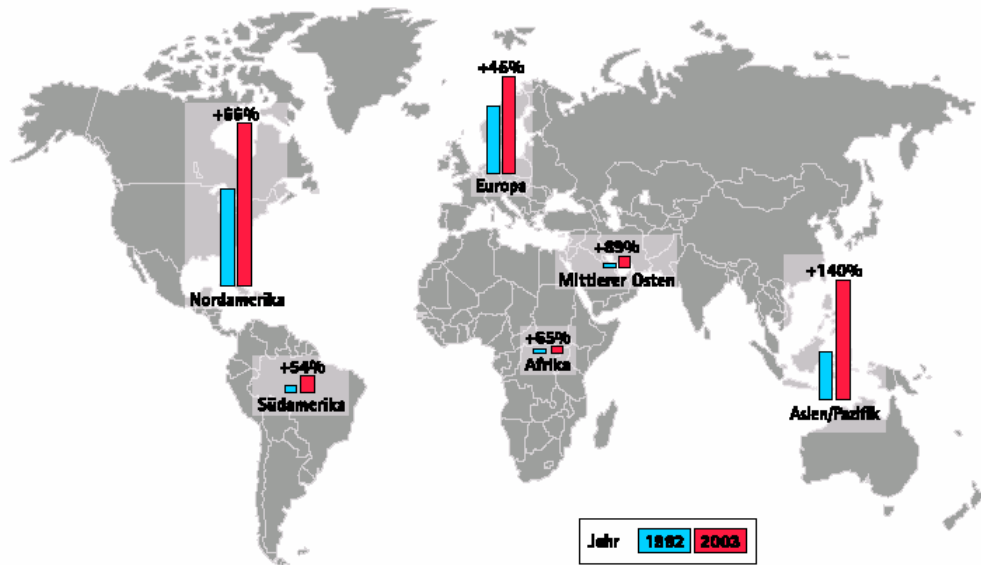
Die zunehmende Verflechtung der weltweiten Geschäfts- und Wirtschaftsbeziehungen, die den Beginn des 21. Jahrhunderts kennzeichnet und unter dem Begriff „Globalisierung“ zusammengefasst wird, basiert nicht nur auf der zunehmenden Nutzung moderner Kommunikations- und Leittechnologien wie Mobiltelefon, Internet und Telematiksystemen.

In gleicher Weise wie die Kommunikation weltweit zunimmt, steigen auch die **Reisetätigkeit und der Austausch von Gütern**. Mobilität oder besser Verkehrsmobilität ist damit ein wesentliches Kennzeichen unserer Zeit und lässt sich nach *Beckmann* durch die Kenngrößen

- Mobilitätsrate (Zahl der Wege je Person und Zeiteinheit)
- Mobilitätsstreckenbudget (Summe der Weglängen je Person und Zeiteinheit)
- Mobilitätszeitbudget (Summe der zeitlichen Aufwände je Person und Zeiteinheit)

beschreiben, [BECK2001]. Mobilität kann damit durch die Größen Weglänge, Wegdauer und Weggeschwindigkeit quantifiziert werden und wird wesentlich getragen durch die Transportsysteme Kraftfahrzeug, Bahn, Schiff und Flugzeug. Andere Verkehrsträger wie Pipelines, Luftschiffe und Hubschrauber bedienen ausschließlich Spezialtransportbereiche. Die **Verteilung der Verkehrsleistung** auf die verschiedenen Transportsysteme wird hierzu als Modalsplit bezeichnet.

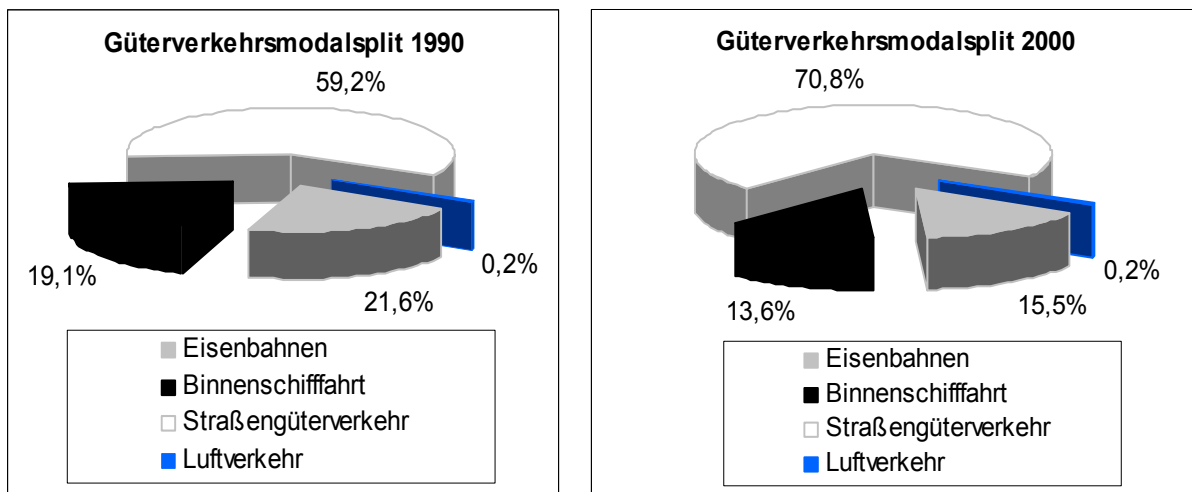
Trotz des Einbruchs aufgrund der Terroranschläge vom 11. September 2001 gestalten sich die Wachstumsprognosen insbesondere der Luftfahrtindustrie wie z.B. bei Airbus, Boeing oder Lufthansa mittelfristig optimistisch, siehe [AIRB2000], [BOEI1999], [GAEB1997].



**Bild 1-1: Prognose der Europäischen Kommission zur Luftverkehrs-entwicklung zwischen 1982 und 2003 [EUKO1999]**

Auch für die übrigen Verkehrsträger werden Steigerungen der Verkehrsleistung vorhergesagt.

Die globale Zunahme der Verkehrsaufkommen schlägt sich daher ebenso im regionalen Bereich wie z.B. in Deutschland nieder, allerdings in abgeschwächter Form.

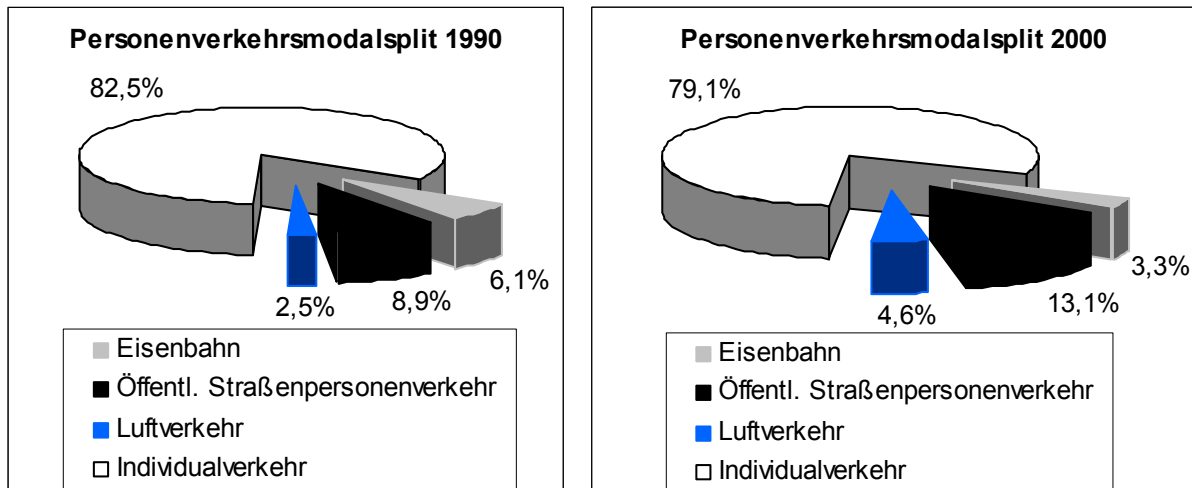


**Bild 1-2: Modalsplit des Güterverkehrs in Deutschland seit 1990, nach [BMVB2001]**

Im Güterverkehr konnte vor allem der Straßenverkehr mit einem Zuwachs von 10% profitieren, während Binnenschifffahrt und Bahnen sich mit Rückgängen von 5-6%

auf einem geringen Niveau stabilisieren. Der Luftverkehr weist einen etwa um den Faktor *100* geringeren, aber stetig wachsenden Anteil am Gütertransport gegenüber Bahn und Schiff auf.

Im Personenverkehr sind in Deutschland über die letzten 10 Jahre nahezu konstante Verhältnisse zu beobachten.



**Bild 1-3: Entwicklung des Modal Split im Personenverkehr in Deutschland, [BMVB2001]**

Hier verliert die Bahn stetig an Marktanteilen, während der Luftverkehr auf niedrigem Niveau kontinuierliche Zuwächse zu verzeichnen hat.

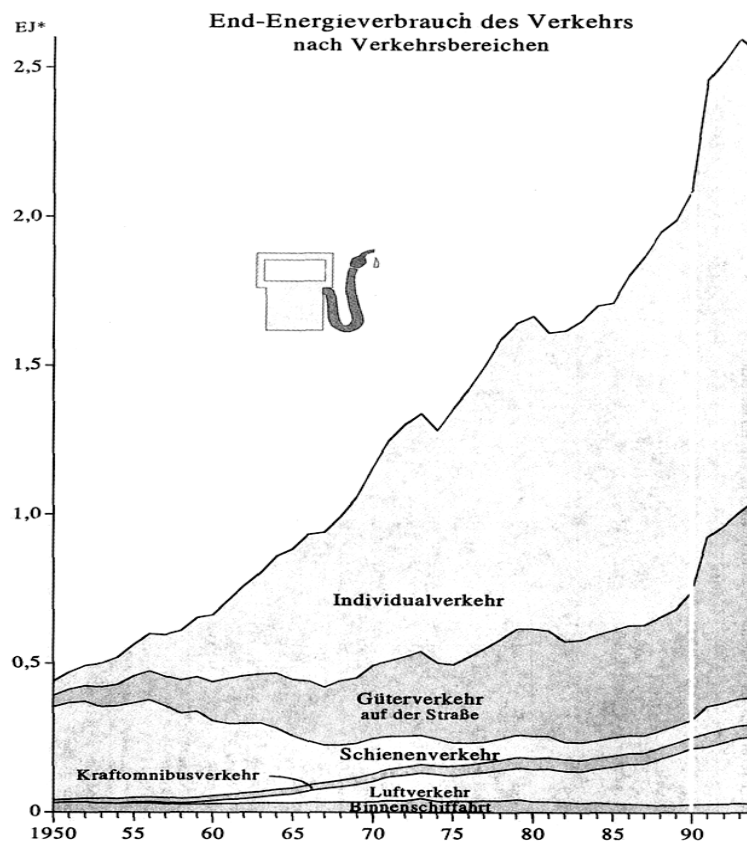
Wie beim Gütertransport so wird auch der Personenverkehr durch die Kraftfahrzeuge dominiert.

Für die nächsten Jahre beschreiben die jüngsten Prognosen für Deutschland einen weiteren Rückgang des Marktanteils der Bahn im Güterverkehr auf rund *14%*, während gleichzeitig der Straßengüterverkehr um *2%* Marktanteil gewinnen wird, siehe [PROG2002]. Der Personenverkehr wird nach diesen Prognosen nur noch leicht mit rund *1%* pro Jahr wachsen, wobei dem Individualverkehr dabei marginale Zuwachsanteile vorausgesagt werden.

Für den Personenluftverkehr werden innerdeutsch mittlere Zuwächse von *2%* erwartet, während international trotz des Einflusses der Terroranschläge vom September 2001 mit Zuwächsen von *4%* gerechnet wird. Der Luftfrachtverkehr wird international wie national voraussichtlich noch stärker wachsen.

In diesen Transportmärkten ist trotz der Wachstumsprognosen eine harte Wettbewerbssituation zu beobachten. Während im interkontinentalen Transportbereich die Transportleistungen durch das Schiff oder das Flugzeug erbracht werden, erweitert sich die Wettbewerbssituation auf den Kontinenten auch auf die Bahn und das Kraftfahrzeug. Geht man bei der Betrachtung auf den nationalen Bereich über, so verschärft sich die **Wettbewerbssituation** weiter.

Auf der anderen Seite ist für das zunehmende Verkehrsaufkommen ein zusätzlicher **Energiebedarf** erforderlich. Wie die nachfolgende Graphik hierzu zeigt, ist zur Bewältigung des zuvor skizzierten Verkehrsaufkommens ein jährlicher Endenergieeinsatz von rund 2,5 Exajoule ( $=10^{18}$  Joule) in den letzten zehn Jahren erforderlich gewesen.

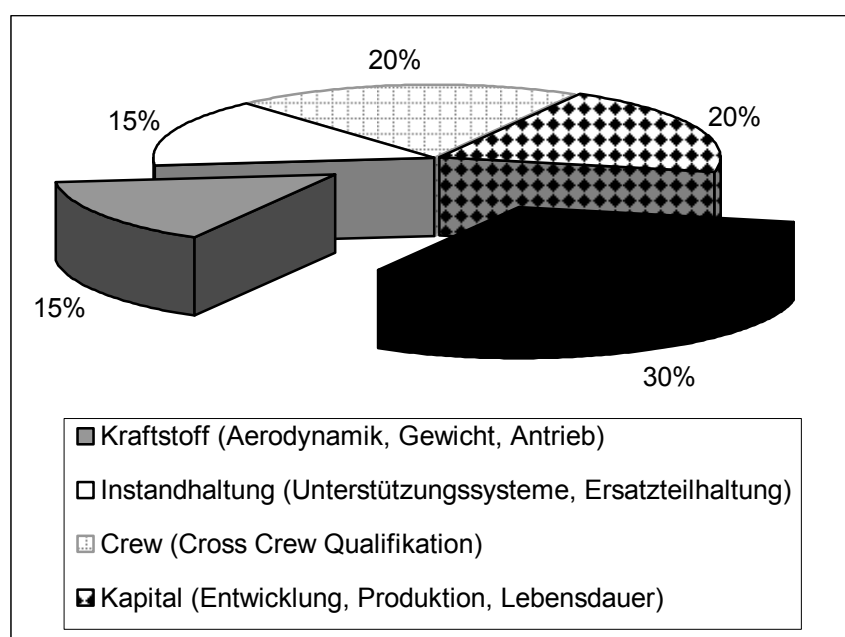


**Bild 1-4: Endenergieeinsatz im Verkehr in Deutschland, aus [BMVB2001]**

Diesem Zusatzbedarf an Energie steht auf der anderen Seite ein steter Schwund der Energiereserven in Kohle, Öl, Gas und Uran entgegen. Die Folge hieraus ist ein zunehmender Anstieg der **Kosten** für den Energieeinsatz, der derzeit vor allem durch die zusätzliche Verteuerung über die Ökosteuer in Deutschland bewirkt wird. Aber



auch aktuelle weltpolitische Ereignisse wie die Irak-Krise des Jahres 2003 führen kurzzeitig zu erheblichen Anstiegen der Energiekosten. Obwohl im Augenblick Kerosin von der Besteuerung im Gegensatz zum Benzin-/Dieselkraftstoff noch nicht betroffen ist, wird die Ökosteuer den Kostendruck weiter forcieren und sich unmittelbar auf die direkten Betriebskosten auswirken. Hinzu kommt, dass auch die Schadstoffemissionen der Verkehrsmittel finanziell sanktioniert werden, indem beispielsweise die Besteuerung abhängig von den Schadstoffemissionen gemacht wird. Dieser erhebliche Anteil der Kraftstoffkosten zeigt sich unter anderem in den direkten Betriebskosten (Direct Operating Cost) des Flugzeugs.

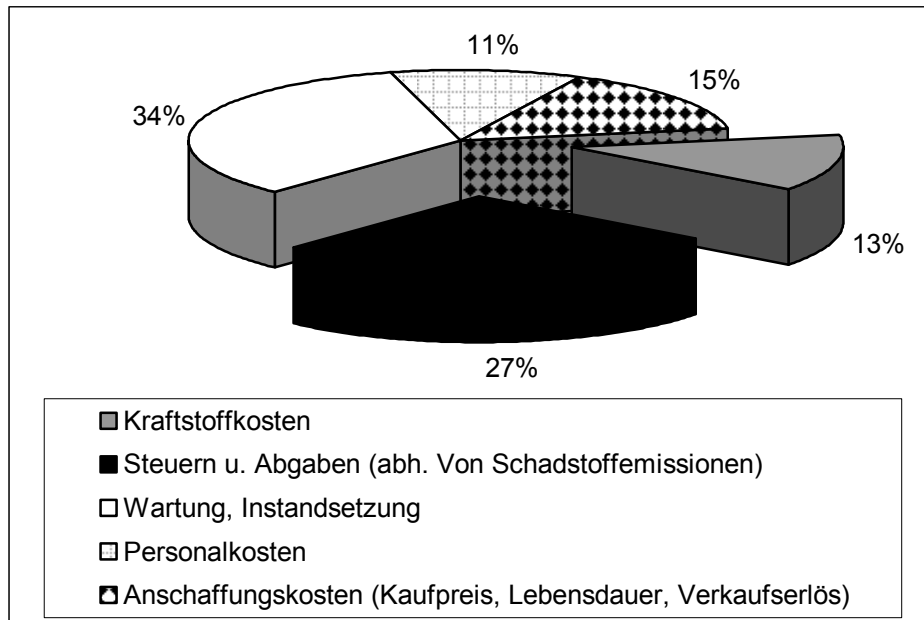


**Bild 1-5: Zusammensetzung der DOC der Lufthansa, nach [GAEB1997]**

Vergleichbare Einschätzungen gelten auch für den Luftfrachtverkehr, [TITZ1998]. Diese Übersicht stellt dar, dass der Kraftstoffverbrauch 15% an den direkten Betriebskosten des Flugzeugs ausmacht. Indirekt wirkt der Kraftstoffverbrauch zudem auf die Gebühren, da proportional zur Verbrennung des Kraftstoffs Schadstoffe emittiert werden, die wiederum über Gebühren sanktioniert werden. Auf der anderen Seite ergeben sich auch Optimierungspotentiale zur Reduktion des Kraftstoffbedarfs.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für den Lkw-Betrieb. Hier geht aus Bild 1-6 hervor, dass die Treibstoffkosten mit 13% zu den variablen Betriebskosten beitragen, was dem Anteil an den Betriebskosten des Flugzeugs von 15% sehr nahe kommt.

Berücksichtigt man zusätzlich, dass 27% der festen Betriebskosten durch Steuern erzeugt werden, die schadstoffabhängig und damit abhängig vom Kraftstoffverbrauch sind, so wird deutlich, welche Bedeutung ein optimierter Kraftstoffverbrauch für den wirtschaftlichen Betrieb von Lkw und Pkw hat.



**Bild 1-6: Kostenstruktur eines Sattelzugs im Fernverkehr mit 150.000km/a, [POVE1997]**

Die kurze Betrachtung der direkten Betriebskosten macht deutlich, dass Lastkraftwagen in gleicher Weise durch Energiekosten betroffen sind.

Es zeigt sich weiter, dass die genannten Verkehrssysteme die geforderte zusätzliche Transportleistung nicht ohne Einschränkungen hinsichtlich der Pünktlichkeit und Transportkapazitäten erbringen können, da die **Streckennetze** die notwendigen Kapazitäten nicht bereitstellen können.

Zudem gibt es immer mehr Einschränkungen im Komfort für den Personenverkehr sowie zunehmende **Gesamtreisezeiten**. So sind die Fernzüge der Deutschen Bahn AG häufig völlig überfüllt und verspätet, so dass Anschlussverbindungen nicht mehr erreicht werden und zusätzliche Wartezeiten auftreten. Auch bei der Deutschen Lufthansa AG führen Überbuchungen dazu, dass gebuchte Passagiere nicht mehr auf den Flug einchecken können, wenn sie nicht sehr frühzeitig am Flughafen sind. Die hohe Dichte auf den europäischen Luftverkehrsstraßen führt ebenfalls zu zusätzlichen Warteschleifen. Damit verlängern sich automatisch auch die

Gesamtreisezeiten, was infolge der sehr hohen Fahrzeugdichte und der geringeren Fahrgeschwindigkeit auch für den Straßenverkehr gilt.

Auf diesem Hintergrund verstärken sich die Bestrebungen, die bestehenden Verkehrssysteme weniger in einem Wettbewerb zu betreiben, sondern vielmehr kooperativ und einander ergänzend einzusetzen. Dahinter steht die Erkenntnis, dass für bestimmte Transportaufgaben einzelne Verkehrsmittel individuelle Vorteile aufweisen.

Unter dem anhaltenden Kostendruck bilden Luftverkehrsgesellschaften in immer stärkerem Maße Allianzen, für die die global agierende „Star Alliance“ der Lufthansa nur ein Beispiel ist. Doch nicht nur die Luftverkehrsgesellschaften untereinander versuchen, durch Integration Marktvorteile zu erlangen. Auch unter den verschiedenen Verkehrssystemen bilden sich Allianzen. So sieht beispielsweise die Lufthansa für sich Vorteile in einer Allianz mit Bahn und Pkw/Lkw und spricht vom Mobilitätsmix, siehe [GAEB1997]. Hierzu hat sie das Bonusprogramm „Miles & More“ auch auf die Bahnkunden ausgedehnt und erwartet, dass Fluggäste auf sehr stark ausgelasteten innerdeutschen Verbindungen auf die Bahn ausweichen. Gleichzeitig bleiben die Kunden über das Bonusprogramm an die Lufthansa gebunden. Ziel ist es, auf diese Weise die Fluggäste mit der Bahn zu den internationalen Flügen zu bringen und so Bahn und Flugzeug im Transport zu kombinieren und die Inlandsflugstrecken zu entlasten.

Ähnliche Konzepte verfolgt die Deutsche Bahn AG, indem sie schon seit langer Zeit Lkw für den Güterverkehr im Nahbereich einsetzt. Über größere Entfernungen transportieren Züge die Güter.

Die Chancen eines Verkehrssystems in diesem Szenario hängen dabei von verschiedenen Faktoren ab. So sind neben der Gesamttransportzeit, dem Energieeinsatz und der transportierten Nutzlast auch Faktoren wie Schadstoffemissionen, Flächenbedarf, Infrastruktur und Streckennetze zu betrachten.

Ausgehend von den genannten Problemstellungen verstärkt sich die Frage nach dem effizientesten Verkehrsmittel hinsichtlich Energiebedarf, Transportkapazität und Schnelligkeit. Diese Frage lässt sich jedoch nur in Verbindung mit den jeweiligen Transportaufgaben und den damit verbundenen Transportstrecken beantworten.

### **1.2 Ziel der Arbeit und methodischer Ansatz**

Für die Entwicklung neuer Transportkonzepte und die damit einhergehende Entwicklung geeigneter Transportmittel ist es nicht nur notwendig, eine aktuelle Analyse des Endenergiebedarfs verschiedener Verkehrsmittel durchzuführen, sondern auch der Zeitaspekt ist bei der Analyse und Bewertung in Betracht zu ziehen.

Um Verkehrskonzepte und die zugehörigen Verkehrssysteme in der Zukunft bedarfsgerecht und möglichst an der Effizienz orientiert zu entwerfen, benötigen Verkehrsplaner wie auch Anbieter von Transportdienstleistungen und Hersteller von Verkehrssystemen eine Methode, die Transportabläufe ebenso betrachtet wie den Energiebedarf.

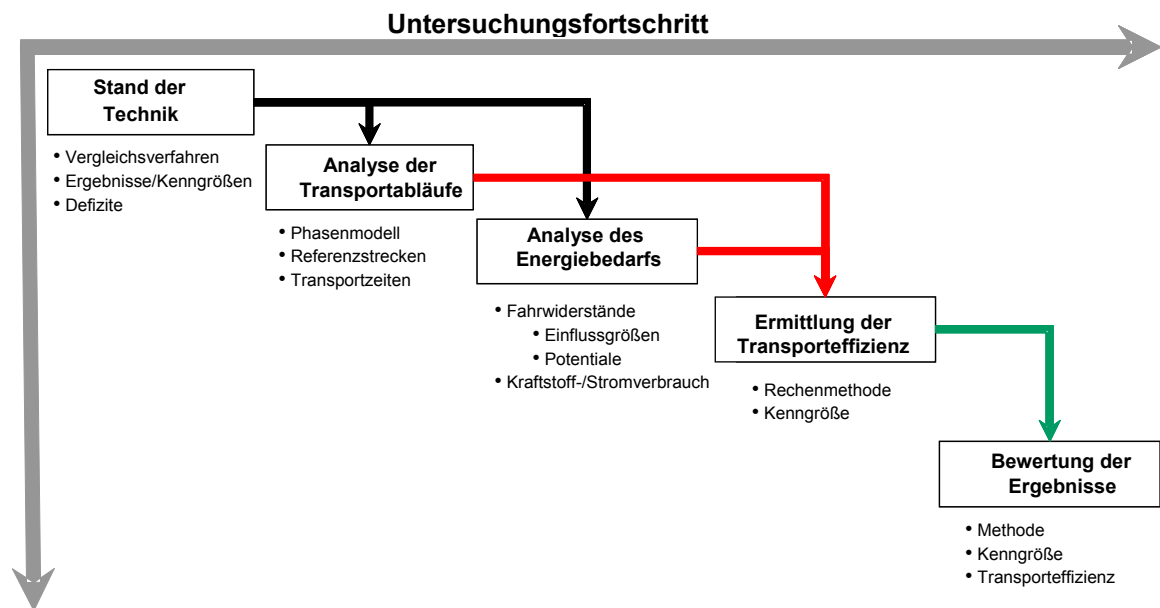
Dabei ist es von großer Bedeutung, die Gewinnung der Ergebnisse transparent und nachvollziehbar zu gestalten, um objektive und glaubwürdige Diskussionen führen zu können.

Hierzu will diese Arbeit einen Beitrag leisten, um auch die Frage zu beantworten, welches Verkehrsmittel eine bestimmte Mission unter definierten Randbedingungen am besten erfüllt.

Daher soll hier eine Methode entwickelt werden, mit deren Hilfe die **Transporteffizienz** verschiedener Verkehrsmittel unter den Gesichtspunkten **Zeitaufwand** und **Energieeinsatz aufgabenbezogen, transparent** und **vergleichbar** ermittelt werden kann. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einer sauberen Beschreibung der Methodik, insbesondere der verwendeten Daten und Berechnungen. Ebenso werden die gewonnenen Ergebnisse kritisch bewertet.

Um das Ziel einer möglichst objektiven Methode zur Bewertung der Transporteffizienz zu erreichen, wird die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise gewählt:

Hierzu wird zunächst der **Stand der Technik** zur Untersuchung des Energiebedarfs beschrieben.



**Bild 1-7: Vorgehensweise**

Anschließend werden typische **Transportaufgaben und –abläufe** verschiedener Verkehrsmittel untersucht und gegenübergestellt. Dabei wird zwischen Transportarten wie Stückgut-/Massenguttransport bzw. Individual-/Massenverkehr unterschieden. Hier werden unterschiedliche Transportstrecken hinsichtlich ihres Verlaufs untersucht. Ein zweiter wesentlicher Untersuchungspunkt sind die verschiedenen Phasen des **Zu- und Abgangs** sowie der **Reisestrecke**. Als dritter Gesichtspunkt wird der Faktor **Zeit** zur Bewältigung einer Transportaufgabe untersucht. Als Ergebnis dieser Analyse sollen unterschiedliche **Referenzaufgaben** definiert werden, die für verschiedene Verkehrssysteme repräsentativ sind und trotz notwendiger Vereinfachungen einen Vergleich nachvollziehbar machen.

Es folgt ein Kapitel, das sich mit den **Fahrwiderständen** der verschiedenen Verkehrsmittel beschäftigt. Hier werden die wesentlichen Einflussgrößen wie **aerodynamische Widerstände** sowie **Roll- und Steigungswiderstände** untersucht. Ebenso wird die verfügbare **Transportkapazität** verschiedener Verkehrsmittel in Relation zum **Eigengewicht** des Transportvehikels eingehend betrachtet. Diese Untersuchungen führen im Ergebnis zu einer Darstellung der heutigen Qualität der Verkehrsmittel sowie zu einer vergleichenden Abschätzung der weiteren Potentiale.

Im anschließenden Kapitel wird der Wandlungsprozess von der **Primär- zur Nutzenergie** dargestellt.

Auf der Basis dieser Analysen wird im nächsten Kapitel ein **Bewertungskriterium** zur Kennzeichnung der **Transporteffizienz** entwickelt, das die verschiedenen Einflussgrößen berücksichtigt. Mit dem Kriterium wird ein Vergleichsverfahren beschrieben, mit dem die Transporteffizienz in möglichst objektiver Form für verschiedene Verkehrsmittel untersucht werden kann. Anhand der zuvor definierten Referenzaufgaben werden **aufgabenbezogene Vergleichsrechnungen** durchgeführt, um die entwickelte Methode zu validieren. Das Resultat dieses Kapitels ist eine kritische Diskussion der Ergebnisse und der entwickelten Methode.

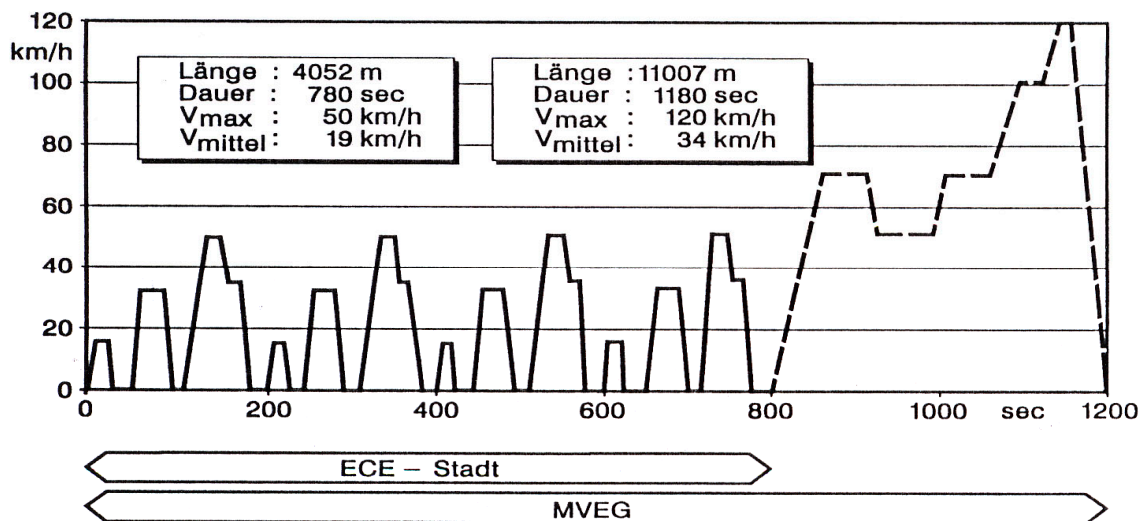
Die Arbeit schließt mit einer **Zusammenfassung** und einem **Ausblick** auf das Potential der entwickelten Methode ab.

## 2 Stand der Technik

Untersuchungen zur Ermittlung und zum Vergleich der Güte von Verkehrssystemen wurden in der Vergangenheit in vielfältiger Form durchgeführt. Verschiedene Kenngrößen haben sich hierzu im täglichen Gebrauch weithin etabliert. In diesem Kapitel werden hierzu die wichtigsten Untersuchungen mit ihren Ergebnissen dargestellt.

### 2.1 Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs und Energiebedarfs

Hinlänglich bekannt ist, dass Kraftfahrzeuge anhand des Kraftstoffverbrauchs je 100 Kilometer Streckenlänge verglichen werden. Der Verbrauch wird dabei nach normierten Fahrzyklen ermittelt, wobei für Pkw eine Zuladung von 100 kg zum Leergewicht angesetzt wird. Die Fahrzyklen decken statistisch repräsentative Betriebszustände ab. Derzeit wird der Neue Europäische Fahrzyklus NEFZ für alle Pkw in Europa angewandt, siehe [BOSC1999].

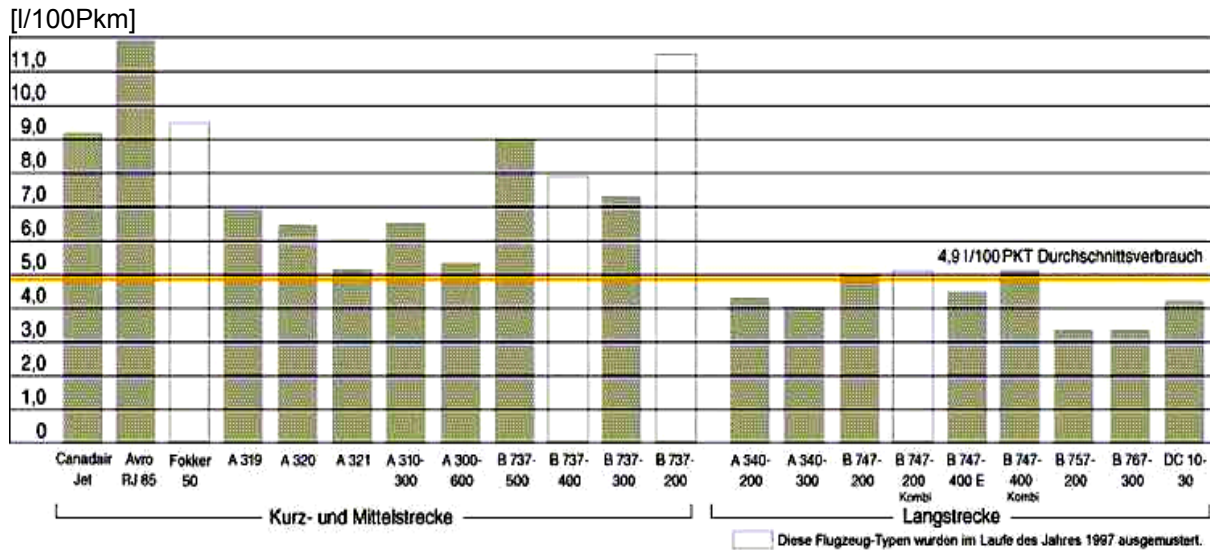


**Bild 2-1: ECE und MVEG-Zyklus zur Verbrauchsbestimmung, [LARS1993]**

In ähnlicher Form werden statistisch repräsentative Fahrzyklen für Lkw definiert, wo wie beim Pkw aus den gemessenen Abgasen der Kraftstoffverbrauch abgeleitet wird.

In der Luftfahrt wird der Kraftstoffverbrauch typischerweise auf zwei Arten angegeben. In der Regel wird der Verbrauch als Kraftstoffdurchfluss je Schub im Reiseflug dargestellt. Die Luftverkehrsgesellschaften beziehen die eingesetzte Kraftstoffmenge auf die transportierte Nutzlast (Personen bzw. Gütergewicht in

Tonnen) und die zurückgelegte Flugstrecke. Diese Definition einer Verbrauchskenngröße zeigt im Vergleich zum Kraftstoffverbrauchskennwert des Straßenverkehrs bereits an, dass nicht nur die zurückgelegte Wegstrecke, sondern auch die dabei transportierte Nutzlastmenge für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Bedeutung ist.



**Bild 2-2: Kraftstoffverbrauch der Lufthansa-Flotte 1997, [LUFT1998]**

Im Eisenbahnwesen wurde in der Vergangenheit die Verbrauchseinheit Steinkohleeinheit [SKE] verwendet, die den Energieeinsatz bezogen auf ein Kilogramm Steinkohle beschreibt (1kg Steinkohle = 293.083 Joule). Die Schifffahrt hingegen gibt den Verbrauch in Tonnen Diesel je Tag an.

Diese kurze Darstellung zeigt bereits eindrucksvoll das Problem auf, die verschiedenen Transportmittel auf einer einheitlichen Basis miteinander zu vergleichen.

| Verkehrsmittel   | Bahn  | Auto      | Flugzeug   | Schiff  |
|------------------|-------|-----------|------------|---------|
| Verbrauchsangabe | [SKE] | [l/100km] | [l/100Pkm] | [t/Tag] |

**Tabelle 2-1: Gegenüberstellung der verschiedenen, aktuellen Verbrauchsangaben**

Auf dieser Basis sind ein Vergleich und eine Bewertung der verschiedenen Verkehrsmittel nicht möglich.



Als Konsequenz aus der ersten großen Ölkrise wurde Anfang der achtziger Jahre am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen (VIA) im Auftrag des damaligen Verkehrsministeriums eine erste umfassende methodische Studie zur Untersuchung des Energiebedarfs im Verkehr durchgeführt, die in der Folge mehrfach aktualisiert und nunmehr in der Ausgabe von 1990 vorliegt, [BIAL1990].

Methodisch bestimmt diese Studie den verkehrsmittelspezifischen Einzelenergiebedarf in typischen Einsatz- und Betriebsszenarien. Dabei wird ein einheitlicher, Verkehrsmittel übergreifender Ansatz gewählt, in dem der Primärenergiebedarf als Vergleichsgröße herangezogen wird. Für jeweilige Verkehrsmittelgruppen kann so der spezifische, d.h. auf Nutzlast und Strecken bezogene Primärenergiebedarf dargestellt werden.

|                    |           | <b>Auslastungsgrad</b> |          |          |          |          |
|--------------------|-----------|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>[Wh/Pkm]</b>    | Kapazität | 20%                    | 40%      | 60%      | 80%      | 100%     |
| <b>Nahverkehr</b>  |           |                        |          |          |          |          |
| Pkw                | 4-5       | 623 -1591              | 394-811  | 270-551  | 208-421  | 168-342  |
| Eisenbahn S-Bahn   | 668-720   | 189 - 248              | 99-128   | 68-89    | 53-69    | 44-58    |
| Eisenbahn E-Zug    | 271-340   | 418 - 549              | 212-278  | 142-188  | 108-143  | 88-112   |
| <b>Fernverkehr</b> |           |                        |          |          |          |          |
| Pkw                | 4-5       | 431 - 1203             | 276-608  | 190-411  | 146-310  | 117-251  |
| Eisenbahn E-Zug    | 271-600   | 290 - 549              | 149-278  | 102-188  | 78-143   | 64-112   |
| Flugzeug           | 108-400   | 816 - 5176             | 413-2598 | 279-1739 | 212-1310 | 171-1050 |

**Tabelle 2-2: Bandbreiten des spez. Primärenergiebedarfs von ausgewählten Personenverkehrsmitteln ermittelt durch das VIA, [BIAL1990]**

Durch die Auswertung von Verkehrsmittelgruppen können mit diesem Ansatz eine Trendanalyse und eine grundsätzliche Bewertung vorgenommen werden. Es ist danach offensichtlich, dass im Personennahverkehr die Nutzung des Pkw unabhängig vom Auslastungsgrad immer den größten Primärenergieeinsatz erfordert, während typische Massenverkehrsmittel wie die S-Bahn in jedem Fall die energetisch günstigste Transportform darstellen. Erkennbar ist weiter, dass reguläre Nahverkehrszüge offensichtlich im Primärenergiebedarf ungünstiger da stehen. Im Fernverkehr lässt sich die zusätzliche Erkenntnis gewinnen, dass das Flugzeug den größten Primärenergiebedarf ausweist.

Als ein zweites Ergebnis hat diese Untersuchung den notwendigen spezifischen Primärenergieeinsatz bezogen auf die transportierte Nutzlast aufgezeigt.

Nicht erkennbar ist anhand dieser Untersuchungen, welche Strecken mit den korrespondierenden Eigenschaften für die Vergleiche zu Grunde gelegt wurden.

Auch die Frage nach dem zeitlichen Aufwand für eine Transportaufgabe wurde nicht näher untersucht.

Mit dieser Studie wurde jedoch erstmals ein umfassender Ansatz entwickelt, den Energiebedarf verschiedener Verkehrsmittel zu ermitteln unter Berücksichtigung ihrer speziellen, systemtechnischen Eigenschaften.

Im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV), der Deutschen Bahn und Lufthansa sowie dem Deutschen Verkehrsforum wurde 1993 und 1994 eine Studie durchgeführt, um die Umweltwirkungen von Schienen- und Luftverkehr zu beleuchten, [ADV 1995]. Im Rahmen dieser Studie wurden Bahn und Flugzeug betrachtet, da diese sich in einem unmittelbaren Wettbewerb befinden.

Aufgrund eines sehr umfassenden Analyseansatzes, der auch Untersuchungen zu Abgasemissionen, Flächenbedarf, Lärmbelastung und Boden-/Wasserbelastungen enthält, kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass „...Luft und Schiene als Träger des öffentlichen Personenfernverkehrs hinsichtlich ihrer verkehrlichen Bedeutung und Umweltwirkungen spezifische Stärken und Schwächen haben. Isolierte Vergleiche von Teilaspekten sind daher irreführend. Es wurde der Nachweis erbracht, dass die beiden Verkehrsträger sowohl bezüglich ihrer systembedingten Eigenschaften und Aufgaben als auch hinsichtlich ihrer Nutzergruppen zu unterschiedlich sind, als dass man sie im Hinblick auf alle relevanten Belange vergleichend bewerten könnte. Eine abschließende Gesamtbewertung ist nicht möglich....“

Gegenüber den zuvor beschriebenen Untersuchungen des VIA werden hier die relevanten Streckennetze in die Untersuchungen mit einbezogen. Die Abläufe während Zu- und Abgang sowie an den Übergangsstellen Bahnhof und Flughafen werden nicht näher betrachtet. Hingegen werden energetisch relevante Einflüsse der Infrastrukturen mit berücksichtigt.

Einige Kernergebnisse sind nachfolgend zusammengestellt:

| <b>Bedeutung und Wirkungsweise</b> | <b>Einheit</b>      | <b>Schiene</b>                          | <b>Luft</b> | <b>Straße</b> |
|------------------------------------|---------------------|---|-------------|---------------|
| <b>Verkehrliche Bedeutung</b>      |                     |   |             |               |
| Verkehrsaufgabe in D               |                     | Hauptaufgabe                            | Teilaufgabe | Hauptaufgabe  |
| Modal-Split-Anteil in D            | [%]                 | 13                                      | 4           | 83            |
| Direktverbindungen                 |                     | 104                                     | 52          | beliebig      |
| Mittlere Reisestrecke              | [km]                | 291                                     | 471         | -             |
| Hauptnutzerguppe                   |                     | Freizeit                                | Geschäft    | Freizeit      |
| Mittlere Reisezeit                 | [%]                 | 174-245                                 | 100         | -             |
| Pünktlichkeit <±5 Min.             | [%]                 | 83                                      | 80          | -             |
| <b>Umweltwirkungen</b>             |                     |   |             |               |
| <b>Primärenegiebedarf</b>          | <b>[kWh/100Pkm]</b> | <b>20</b>                               | <b>63</b>   | <b>52</b>     |
| Infrastrukturzuschlag              | [kWh/100Pkm]        | 0,6                                     | 11,5        | -             |
| Schadstoffemissionen               |                     | Vergleichende Beurteilung problematisch |             |               |
| Flächenbedarf                      |                     | Direkter Vergleich problematisch        |             |               |
| Lärmwirkung                        |                     | nicht ermittelbar im Rahmen der Studie  |             |               |
| Boden-/Gewässerbelastung           |                     | nicht vergleichbar                      |             |               |

**Tabelle 2-3: Die verkehrliche Bedeutung und Umweltwirkungen der Verkehrsträger Schiene, Luft, Straße, [ADV1995]**

Wie aus der Zusammenstellung der Ergebnisse hervorgeht, liegt der Schwerpunkt in einer Gegenüberstellung der Systemmerkmale im Betrieb. Es wird deutlich, dass die Bahn auf einem kürzeren mittleren Reiseabschnitt mit doppelt so vielen Verbindungen am Markt vertreten ist wie das Flugzeug. Die resultierenden Reisezeiten liegen dagegen um den Faktor 1,7 bis 2,4 höher als beim Flugzeug. Der Primärenergiebedarf inkl. des Infrastrukturzuschlags beträgt nach dieser Studie etwa 1/3 des Aufwands beim Flugzeug. Der Straßenverkehr wird im Gegensatz zur Studie des VIA nicht eingehend betrachtet. Ebenso befassen sich die Untersuchungen nicht mit den technischen Aspekten der Verkehrssysteme.

Die Ergebnisse dieser Gemeinschaftsstudie von Bahn- und Flughafenbetreibern dienen als Ausgangspunkt für weitere individuelle Betrachtungen, [ADV1997], [Jäns1995]. Auffällig ist an beiden Nachfolgeuntersuchungen, dass alle Ergebnisse in der Form dargestellt werden, dass sie jeweils die Bahn oder das Flugzeug als das umweltfreundlichere beschreiben. Hierin liegt ein Grundproblem vieler Studien, die ergebnisorientiert aufgebaut sind.

Da in den achtziger und neunziger Jahren die Akzeptanz von Verkehrssystemen wesentlich durch ihre ökologische Wirkung beeinflusst wurde, hat die Deutsche Bahn AG gemeinsam mit dem Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, eine eigene Untersuchungsmethode zur Darstellung der Umweltverträglichkeit der Bahn

im Vergleich zu Pkw und Flugzeug erstellt, [IFEU2000]. Zielsetzung der Studie ist primär der Vergleich der Schadstoffemissionen für Bahn, Bus, Flugzeug und Pkw im innerdeutschen Personen- und Güterverkehr. Daneben wird die Nachvollziehbarkeit der verwendeten Annahmen und Methoden als weiteres Ziel in den Vordergrund gestellt.

Die Untersuchungen werden für einen Entfernungsbereich zwischen 100 km und 1000 km durchgeführt und erfolgen mit dem Emissionsberechnungsprogramm „TREMOD“ (Transport Emission Estimation Model) des Umweltbundesamtes. Dieses Programm wird offiziell u.a. durch die Automobilindustrie und die Deutsche Bahn AG genutzt, so dass von einer breiteren Akzeptanz und einem validierten Datenbestand ausgegangen werden kann.

Die Kernaussage der Studie wird wie folgt zusammengefasst, [IFEU2000]:

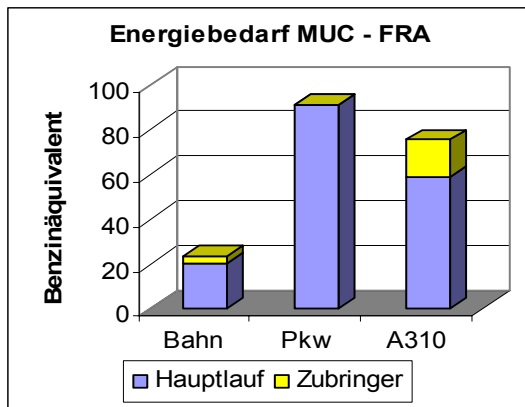
„Jede individuelle Entscheidung, statt mit dem eigenen Pkw mit einem öffentlichen Verkehrsmittel zu fahren, vermeidet die gesamten Umweltbelastungen, die durch die Fahrt mit dem Pkw entstehen würden.“

In diesem Zusammenhang kann mit dem Programm u.a. untersucht werden, inwieweit der Besetzungsgrad des Pkw die Umweltbelastung beeinflusst.

Als Kenngröße wird ein so genanntes „Benzinäquivalent je Person und Reise“, definiert, das den errechneten Primärenergiebedarf umrechnet auf den Energiegehalt von Otto-Kraftstoff:

- Energiegehalt von Otto-Kraftstoff: 43,50 MJ/kg
- Dichte von Otto-Kraftstoff: 0,74 kg/l

Im Folgenden ist das Ergebnis einer Vergleichsrechnung für eine Reise München – Frankfurt dargestellt.



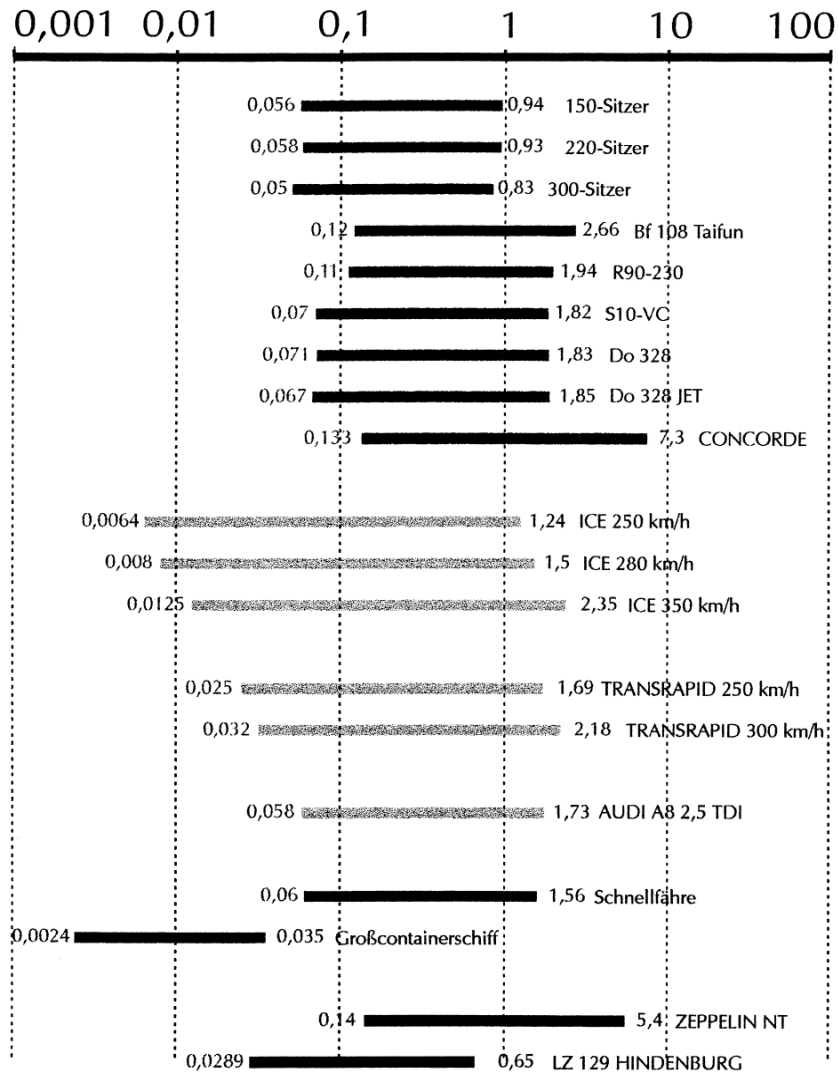
|                            | Bahn        | Pkw         | A310        |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Hauptlauf [BÄ]             | 20,3        | 91,3        | 58,6        |
| Zubringer [BÄ]             | 3,2         | 0           | 16,8        |
| <b>Summe [BÄ]:</b>         | <b>23,5</b> | <b>91,3</b> | <b>75,4</b> |
| Reisestrecke einfach [km]: | 424         | 395         | 299         |
| Zubringerstrecken [km]:    | 10          | 0           | 52          |
| Auslastung:                | 46,1%       | 46,1%       | 60,0%       |

**Bild 2-3: Beispielrechnung für Energievergleich der Bahn, aus [DBAG1999]**

Die Gegenüberstellung weist je Reisenden und Reisekilometer die Bahn als mit Abstand günstigstes Verkehrsmittel aus. Aber auch das Flugzeug benötigt insgesamt rund 18% weniger Energie als ein Pkw, der nur mit 1 Person besetzt ist.

Mit diesem Ansatz wird eine Methode gewählt, die realen Reiseverhältnisse abzubilden. Auf die technischen Eigenschaften der verschiedenen Verkehrssysteme und den Zeitaspekt geht die Untersuchung nicht ein.

Angelehnt an die Untersuchungen des verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen wurde Ende der neunziger Jahre von *Niedzballa* am Lehrstuhl für Luftfahrttechnik der TU München ein neues Vergleichsverfahren zur Bewertung des Energiebedarfs verschiedener Verkehrsmittel entwickelt, [NIED1998]. Der Schwerpunkt der hier entwickelten Methode liegt in der Ableitung einer dimensionslosen Kenngröße zur Beschreibung des Energiebedarfs, die einen systemübergreifenden Vergleich ermöglicht und gleichzeitig die Problematik unterschiedlicher dimensionsbehafteter Kenngrößen löst. Ausgangspunkt für den Vergleich ist die Gleitzahl als Gütemaß im Flugzeugbau, die das Verhältnis von erzeugtem Widerstand zu gewonnenem Auftrieb beschreibt. Im stationären Reiseflug entspricht dies dem Verhältnis von Schub zu Gewicht, [BRÜN1986] und ist äquivalent der spezifischen Fahrenergie. Mit dieser Kenngröße ist es unter Verwendung weiterer dimensionsloser Wirkungsgrade gelungen, einen spezifischen Primärenergieeinsatz bezogen auf die Nutzlast zu definieren. Mit diesem Ansatz wurden verschiedene Verkehrssysteme auf ihrem Hauptlauf miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind hierzu nachfolgend dargestellt.



**Bild 2-4: Primärenergieeinsatz und „Gleitzahl“ für verschiedene Verkehrsmittel nach [NIED1998]**

Die Zahlen am linken Teil der Balken geben die jeweilige „Reisegleitzahl“ an, während die Zahlen am rechten Balkenende den spezifischen Primärenergieeinsatz angeben. Je geringer die Werte ausfallen, desto geringer ist der Energieaufwand. Die Auswertung zeigt für den Hauptlauf, dass das große Verkehrsflugzeug (150-300 Sitzer) energetisch günstig betrieben werden kann im Vergleich zu Bahn und Pkw. Auffällig ist weiter, dass bei Betrachtung der „Reisegleitzahl“ die Bahn günstiger dasteht als das Flugzeug, während unter dem Aspekt des Primärenergieeinsatzes sich die Situation umkehrt.

Die am Lehrstuhl für Luftfahrttechnik der TU München bisher durchgeführten Untersuchungen erfassen jedoch noch nicht Zu- und Abgang im Rahmen einer

Transportaufgabe. Ebenso sind wie bei den übrigen Studien der Faktor Zeit und die systemtechnischen Potentiale der Verkehrssysteme noch nicht berücksichtigt.

## 2.2 Untersuchungen zum Zeitaufwand

Der Aspekt der Reiseschnelligkeit wurde in der Vergangenheit sowohl in der Zeitschrift AERO als auch durch die Stiftung Warentest beleuchtet, [AERO1995], [TEST1997]. In diesen Untersuchungen ging es im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Methoden vor allem um die Untersuchung der Reisezeiten, die bei der Nutzung verschiedener Verkehrssysteme anfallen.

Die Luftfahrtzeitschrift AERO hat zu diesem Zweck am selben Tag drei Reisen von München nach Frankfurt mit dem ICE, dem Pkw und dem Linienverkehrsflugzeug durchführen lassen und die Gesamtreisedauer und die Kosten ermittelt.

|                             | <b>Auto</b> | <b>Bahn</b> | <b>Flugzeug</b> |
|-----------------------------|-------------|-------------|-----------------|
| Geschw. [km/h]              | 130         | 200         | 840             |
| Strecke [km]                | 394         | 428         | 300             |
| Hauptreisezeit [h:min]      | 03:39       | 03:10       | 01:13           |
| Zugangszeit [h:min]         | 00:06       | 00:43       | 01:42           |
| Gesamtzeit [h:min]          | 03:45       | 03:53       | 02:55           |
| Kosten [€]                  | 93,05       | 82,83       | 157,63          |
| Durchschnittsgeschw. [km/h] | 105,07      | 110,21      | 102,86          |

**Tabelle 2-4: Vergleich der Reisezeiten und Kosten für ICE, Pkw, Flugzeug  
München – Frankfurt, [AERO1995]**

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die untersuchte Strecke mit dem Flugzeug am schnellsten zu bewältigen ist, was mit etwa 90% höheren Reisekosten erkauft wird. Die Bahn weist ohne Berücksichtigung von Vergünstigungen die geringsten Kosten aus, erfordert aber auch die längste Reisezeit, die rund 60 Minuten über der des Flugzeugs liegt. Die Fahrt mit dem Pkw ist etwas teurer, dauert aber fast ebenso lange. Bei dieser Momentaufnahme kamen alle real auftretenden Störungen wie Staus, Warteschleifen und Verspätungen zum Tragen. Da es sich jedoch nur um eine einmalige Untersuchung handelt, ist ihre Aussagekraft begrenzt. Unter dem Begriff Zugangszeit werden in dieser Untersuchung sowohl Zugänge als auch Abgänge sowie Übergangszeiten im Bahnhof bzw. Flughafen verstanden.

Technische Aspekte der Verkehrsmittel oder Besonderheiten des Betriebs wie z.B. die Auslastung bleiben bei dieser Betrachtung außer Acht.

Die Untersuchung der Stiftung Warentest stellt für mehrere Verbindungen die Reisedauer und den aufgewendeten Kraftstoffeinsatz gegenüber. Für die Verbindungen München – Frankfurt und München – Köln werden so folgende Ergebnisse ermittelt:

| Angaben je Person    | Frankfurt |       |          | Köln  |       |          |
|----------------------|-----------|-------|----------|-------|-------|----------|
|                      | Pkw       | Bahn  | Flugzeug | Pkw   | Bahn  | Flugzeug |
| Reisedauer [h:min]   | 04:40     | 04:10 | 03:00    | 06:30 | 06:00 | 03:10    |
| Kosten [€]           | 41,41     | 67,49 | 179,46   | 61,35 | 93,05 | 152,36   |
| Kraftstoffbedarf [l] | 32,1      | 8,9   | 33,1     | 46,9  | 11,5  | 40,9     |

**Tabelle 2-5: Reisedauer, -kosten und Kraftstoffeinsatz je Person für Pkw, Bahn, Flugzeug, aus [TEST1995]**

Die Untersuchung zeigt bezüglich der Reisezeiten deutliche Abweichungen zu den Ergebnissen der AERO-Studie. Hinsichtlich des auf den Benzinverbrauch umgerechneten Energieeinsatzes stellt sich die Bahn als günstigstes Verkehrssystem dar.

### **2.3 Bewertung der bisherigen Ergebnisse**

In der Vergangenheit wurden vielfältige Untersuchungen angestellt, um primär die Umweltwirkung von Verkehrsmitteln in Form von Energiebedarf, Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen zu ermitteln.

Allen Ansätzen ist gemeinsam, dass sie den Energiebedarf auf der Basis des Kraftstoffverbrauchs ermitteln. Als Kenngröße für die Güte der Transportsysteme wird überwiegend der spezifische Primärenergieeinsatz bezogen auf die beförderten Personen und die zurückgelegte Strecke dargestellt. Insbesondere die Rückführung auf den Primärenergieeinsatz ist inzwischen weithin akzeptiert, siehe z.B. [DALB2001].

Nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die in den Studien erzielten Ergebnisse:



| [Wh/Pkm]               | VIA      | ADV | TU D | LLT TUM |
|------------------------|----------|-----|------|---------|
| <b>Pkw</b>             | 190-411  | 520 | 270  | 471     |
| <b>Eisenbahn E-Zug</b> | 102-188  | 200 | 265  | 409     |
| <b>Flugzeug</b>        | 279-1739 | 630 | 6750 | 253     |

**Tabelle 2-6: Zusammenstellung bisheriger Ergebnisse zum Energiebedarf**

Ein echter Vergleich der Ergebnisse kann dabei nicht angestellt werden, da die Untersuchungsrandbedingungen zu unterschiedlich sind. So fällt der sehr hohe Energiebedarf für Flugzeuge auf, der von der TU Dresden für Gütertransporte ermittelt wurde, [SCHE1994]. Nicht ohne weiteres nachvollziehbar sind die zu Grunde gelegten Auslastungsgrade.

So betrachten die Studien des VIA und des LLT den Hauptlauf, während Zu- und Abgang in der Energiebilanz noch nicht berücksichtigt sind. In den Untersuchungen des VIA sowie der TU Dresden werden dagegen auch systemtechnische Aspekte wie Antriebsgüte und Gewicht bei den Energiebedarfsuntersuchungen betrachtet. Dagegen beinhaltet die Berechnung des ADV auch Energiezuschläge für die notwendige Infrastruktur.

Des Weiteren werden von den Studien die zeitlichen Aspekte eines Transports kaum untersucht. Dieser Aspekt wird bisher nur von den Publikationen AERO und TEST in den Mittelpunkt gestellt.

Unterschwellig ist bei einzelnen vorliegenden Studien immer wieder die Tendenz erkennbar, ein bestimmtes Verkehrsmittel bevorzugt darzustellen, was einem objektiven Vergleich entgegensteht.

Aufgrund der vorliegenden Bestandsaufnahme soll im Rahmen dieser Arbeit besonderer Wert auf eine nachvollziehbare Systematik und Transparenz gelegt werden. Ein weiteres Anliegen besteht in einer vollständigen Darstellung der Prozesskette.

### **3 Transportabläufe und Referenzstrecken**

In diesem Kapitel werden die Transportabläufe für die Verkehrssysteme Kraftfahrzeug, Bahn und Flugzeug analysiert. Anhand der Beschreibung der Transportabläufe werden verschiedene Phasen abgeleitet. Es folgt eine Untersuchung der Besonderheiten der Zu- und Übergangsphasen.

Im zweiten Teil wird eine Analyse der Streckennetze durchgeführt. Auf der Basis dieser Analysen werden repräsentative, realistische und vergleichbare Transportabläufe für die verschiedenen Verkehrssysteme definiert.

Ergebnis dieser Untersuchungen ist die phasenbezogene Definition und Charakterisierung von Referenzstrecken hinsichtlich der Streckenlängen und Reisezeiten.

Temporäre und zufällige Störungen wie hohes Verkehrsaufkommen, Staus oder Schlechtwetterphasen, die den Verkehrsfluss beeinträchtigen und damit die Reisegeschwindigkeit beschränken, werden aus Gründen der Gleichbehandlung und mangelnden Vorhersagbarkeit nicht betrachtet.

#### **3.1 Transportabläufe**

Die Grundaufgabe besteht darin, Güter und Personen von einem Ort zu einem anderen zu befördern. Der Kunde wählt dabei das Transportmittel nach verschiedenen Gesichtspunkten:

- der erforderlichen Transportzeit
- der erforderlichen Tragkraft
- dem erforderlichen Ladevolumen
- dem gebotenen Komfort und der Sicherheit bei Personentransporten
- den aufzubringenden Kosten

Zusätzlich spielen nach *Voigt* noch die Aspekte Netzbildungsfähigkeit und Frequenz eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der Wertigkeit eines Verkehrssystems, [VOIG1973]. Kurze Transportzeiten ermöglichen dem Anbieter von Transportleistungen den schnellen, erneuten Einsatz seines Transportmittels und fördern so seine Auslastung und den Umsatz. Komfort und Sicherheitsmerkmale führen zu einer hohen Attraktivität und Akzeptanz beim Kunden und unterstützen ebenfalls den Umsatz. Die Wahl des am besten geeigneten Transportsystems führt

somit für alle zur gewünschten Transporteffizienz.

Transportabläufe können für unterschiedliche Transportsysteme sehr verschiedene Formen annehmen. In dieser Arbeit werden verbundene Transporte betrachtet, wo in verschiedenen Abschnitten unterschiedliche Verkehrsmittel zum Einsatz kommen.

### 3.1.1 Personentransporte

#### 3.1.1.1 Personentransporte mit dem Pkw

Die wohl geläufigste Form, Personen von einem Ort zu einem anderen zu bringen, ist die Nutzung des Pkw. Der Pkw als individuelles Verkehrsmittel erlaubt es, eine Reise unmittelbar am Wohnort mit dem Fahrzeug zu beginnen und die Reise ohne Fahrzeugwechsel bis unmittelbar zum Zielpunkt durchzuführen.

Nach Bepacken und Besteigen des Fahrzeugs führt die Reise in einer ersten Phase durch den Ort auf eine Überlandstraße. Kennzeichnend für diese 1. Phase ist eine geringe Reisegeschwindigkeit von rund 40 km/h, die sich aus der verordneten Geschwindigkeitsbegrenzung auf 30/50 km/h und dem häufigeren Halten an Abzweigungen und Ampelkreuzungen in den Ortschaften ergibt. Der Ortsausgang stellt hier eine Systemgrenze dar, an der der Pkw seine Betriebszustände in der Regel verändert.

Außerorts erfolgt die Reise in einer 2. Phase auf Überlandstraßen in Form von einfachen Landstraßen, Kreisstraßen und Bundesstraßen, die der Verbindung zwischen Ortschaften bis zu einem Entfernungsbereich von rund 100 km dienen. Auf ihnen wird die Fahrt mit dem Pkw individuell fortgesetzt. Die Geschwindigkeit liegt bei maximal 100 km/h für Pkw und 60 km/h für Lkw. Letztere Geschwindigkeit kann aber auch für Pkw zum begrenzenden Faktor werden, wenn durch den gemischten Verkehr und fehlende Überholmöglichkeiten das langsamere Verkehrsmittel die Reisegeschwindigkeit vorgibt. Die mittlere Reisegeschwindigkeit für Pkw kann hier mit etwa 70 km/h angenommen werden, [TEST1997]. Neben der Verbindung von Ortschaften übernehmen die Überlandstraßen auch Übergangsaufgaben, um den Verkehr auf das Fernstraßennetz (Autobahnen) zu führen.

Die Fahrt des Pkw auf der Autobahn stellt eine 3. Phase, den Hauptlauf dar. Er ist gekennzeichnet durch die höchste Fahrgeschwindigkeit und die höchste Reisegeschwindigkeit (durchschnittlich 120 km/h), wobei in der Reisegeschwindigkeit

auch Pausen oder Betriebsstörungen enthalten sind. Hierzu wird in dieser Arbeit, den Empfehlungen der Verkehrssicherheitsfachleute folgend, nach jeweils 300 Kilometern Reisedistanz eine Pause von 30 Minuten zur Kraftstoffaufnahme und Erholung berücksichtigt.

In der Nähe des Zielortes verlässt der Pkw die Autobahn und wird über Überlandstraßen zum Zielort geführt. Diese 4. Phase entspricht in ihren Eigenschaften der zweiten Phase zu Beginn der Reise.

Die gesamte Reise endet in der fünften Phase, wenn der Pkw in der Ortschaft zum Zielpunkt fährt. Diese 5. Phase erfordert das gleiche Fahrverhalten wie es für die Phase 1 beschrieben wurde.

Die Darstellung der einzelnen Phasen bringt die Streckenlänge und die Reisegeschwindigkeit als wesentliche Einflussfaktoren für jede Phase hervor.

### 3.1.1.2 Personentransporte mit der Bahn

Die Reise mit der Bahn bietet in der Zu- und Abgangsphase mehrere Verlaufsmöglichkeiten. Bei der Bahn führt die Zugangsphase den Reisenden von der Haustür bis zum Bahnhof. Der Bahnhof kann hier als Ortsrand und damit ähnlich wie beim Pkw ebenfalls als Systemgrenze interpretiert werden, die durch sehr unterschiedliche Reisegeschwindigkeiten in den beiden Phasen gekennzeichnet ist.

Den Weg von der Haustür zum Bahnhof kann der Reisende auf drei Arten bewältigen:

- a) mit dem Taxi oder Pkw; dies entspricht dem Ablauf der Phase 1 beim Pkw.
- b) mit öffentlichen Verkehrsmitteln. In diesem Fall muss der Reisende sein Gepäck per Hand auf dem Fußweg zur Bus-/U-Bahn-/Straßenbahnhaltestelle bewegen. Dieser Abschnitt dauert nach statistischen Angaben etwa 10 Minuten und deckt Weglängen von bis zu einem Kilometer ab, [TEST1997], [BROC1995]. Es folgt eine variable Wartezeit bis zum Eintreffen des öffentlichen Verkehrsmittels, das den Reisenden zum Bahnhof bringt. Eine Varianz ist in diesem Ablauf dadurch gegeben, dass der Reisende samt Gepäck unter Umständen nochmals umsteigen muss.
- c) zu Fuß den Weg zurücklegen. Diese Variante greift in der Regel nur, wenn dieser Weg etwa genauso zeitaufwendig ist wie der Weg zur Bushaltestelle.

Die Ankunft am Bahnhof ist der Übergang zum Hochgeschwindigkeitsabschnitt. Während bei der Pkw-Reise der Reiseverlauf an der Stadtgrenze unmittelbar an Fahrgeschwindigkeit gewinnt, folgt im Bahnhof der Weg zu Fuß. Die Übergangsphase im Bahnhof umfasst mehrere Stationen, wie in der späteren Analyse in Abschnitt 3.4 gezeigt wird. Entscheidend ist, dass bei der Bahn der Reisende in dieser Phase keine Strecke zurücklegt, d.h. hier wird keine Transportleistung erbracht.

Mit dem Verlassen des Bahnhofs beginnt mit der 3. Phase der Hauptlauf, und der Zug nimmt an Fahrt auf, um je nach Zugtyp und Streckenform Geschwindigkeiten zwischen 100 km/h und 300 km/h zu erreichen. Kennzeichnend ist hier, dass die Bahn schnell hohe Geschwindigkeiten aufbaut und diese bis kurz vor dem nächsten Haltepunkt weitgehend konstant hält. Sehr häufig bringt der gewählte Zug den Reisenden nicht unmittelbar zum Zielort und es fallen Umsteigephase einschließlich Wartezeiten auch bei Fernreisen an. Damit ist das Geschwindigkeitsprofil im Hauptlauf der Bahn durch mehrere Brems- und Beschleunigungsphasen an den Haltepunkten gekennzeichnet, siehe z.B. [MNIC1998].

Am Zielort folgt als 4. Phase wieder eine Übergangsphase im Bahnhof, ehe der Reisende in der 5. Phase wieder per Taxi/Mietwagen, zu Fuß oder mit öffentlichen Verkehrsmitteln zum endgültigen Zielpunkt gelangt.

Auch für die Bahnreise gilt, dass die beschriebenen Phasen bei jeder Bahnreise auftreten. Im Gegensatz zum Pkw treten bei der Bahn im Hauptlauf mehrere Etappen auf, jeweils unterbrochen durch Wartephase.

#### 3.1.1.3 Personentransporte mit dem Flugzeug

Personentransporte mit dem Flugzeug folgen demselben Phasenmodell, wie es für die Bahn beschrieben wurde. Dabei wird der Bahnhof durch den Flughafen ersetzt und in der Detailanalyse ergeben sich hier andere Zeitfenster für den Durchlauf durch den Flughafen von der Ankunft am Terminal bis zum Anrollen der Maschine an der Startbahn. Die Mehrzahl der Flugreisen wird des Weiteren so geplant, dass kein Umsteigen erforderlich ist.

#### 3.1.2 Gütertransporte

Gütertransporte werden üblicherweise getrennt von den Personentransporten behandelt, weil hier andere Mechanismen gelten. Betrachtet man den Gütertransport

ebenfalls auf dem Hintergrund des zuvor beschriebenen Phasenmodells, so fällt auf, dass ein Gütertransport dennoch ein hohes Maß an Ähnlichkeiten zum Personentransport hinsichtlich des Ablaufs aufweist.

### 3.1.2.1 Gütertransporte mit dem Lkw

Werden Güter mit dem Lkw transportiert, beginnt der Transport am Fabrik- oder Lagerplatz. Der Lkw bewegt sich zunächst in Phase 1 innerhalb der Ortschaft wie der Pkw. Da in der Regel Industrie- und Gewerbebetriebe mit verkehrsgünstiger Anbindung am Ortsrand liegen, fallen die Ortsdurchfahrten der Lkw etwas kürzer aus als beim Pkw, so dass der Ortsrand schneller erreicht wird. In der Phase 2 führt der Transportweg im Übergang über Überlandstraßen zur Fernstraße. Der Hauptlauf in Phase 3 erfolgt wiederum auf Autobahnen. Die 4. Phase verläuft als Übergangsphase von der Fernstraße zum Ortsrand, ehe in der 5. Phase der Zielpunkt im Ort erreicht wird.

### 3.1.2.2 Gütertransporte mit der Bahn

Werden Güter mit der Bahn transportiert, kann die Phase 1 auf 2 Arten bewältigt werden. Im ersten Fall werden Güter mit dem Lkw vom Ausgangsort zum Bahnhof gebracht. Alternativ verfügen viele Industriebetriebe über eigene Gleisanschlüsse auf dem Fabrikgelände, so dass der Transport zum Bahnhof entfällt. An dessen Stelle tritt dann der Rangiertransport der beladenen Waggons zum Güterbahnhof, wo diese in die Züge eingestellt werden.

Es folgt die Phase 2 als Übergangsphase im Bahnhofsbereich. Dort werden die Güter abgeladen, ggf. gelagert und auf die Bahnwaggons geladen. Anschließend werden die Güterwaggons im Rangierbahnhof zu Zügen zusammengestellt, die dann den Bahnhof in Richtung Zielort verlassen.

Damit beginnt die Phase 3, die Haupttransportphase zur Überwindung der großen Entfernungen. Ähnlich wie bei der Personenbeförderung werden die Güterwagen gegebenenfalls an Zwischenbahnhöfen umgehängt, wodurch Warte- und Rangierzeiten anfallen. Diese Aktivitäten erfordern jedoch deutlich längere Zeitabschnitte als beim Personenverkehr. An ihren Zielbahnhöfen werden die Wagen abgehängt und entladen. Die Güter werden zwischengelagert, um dann auf Lkw verladen zum Zielpunkt gebracht zu werden.

Dieser Abschnitt am Bahnhof entspricht der Phase 4, die wiederum eine

Übergangsphase darstellt. Am Ende bringen Lkw die Güter in der 5. Phase vom Bahnhof zum Zielpunkt.

### 3.1.2.3 Gütertransporte mit dem Flugzeug

Gütertransporte mit dem Flugzeug verlaufen in gleicher Weise wie bei der Bahn. Von wesentlicher Bedeutung ist auch hier, dass in den Phasen 2 und 4 durch den Wechsel der Transportmedien am Flughafen Umschlagzeiten anfallen, die sich auf die Gesamtreisezeit auswirken. Im Gegensatz zum Transport mit der Bahn bildet jedoch ein Umladen von einem Flugzeug auf ein anderes eher die Ausnahme, die primär bei Interkontinentaltransporten auftritt.

## 3.2 Ein Phasenmodell zu Beschreibung der Transportabläufe

Für die untersuchten Verkehrsmittel Pkw/Lkw, Bahn und Flugzeug lassen sich gleiche Phasen feststellen, die bei der Durchführung eines Transportes durchlaufen werden.

| Phase 1<br>(Zugang) | Phase 2<br>(Übergang) | Phase 3<br>(Hauptlauf) |         |         | Phase 4<br>(Übergang) | Phase 5<br>(Abgang) |
|---------------------|-----------------------|------------------------|---------|---------|-----------------------|---------------------|
| Pkw/Lkw             | Pkw/Lkw               | Pkw/Lkw                | Pause   | Pkw/Lkw | Pkw/Lkw               | Pkw/Lkw             |
| zu Fuß              | Bahnhof               |                        |         |         | Bahnhof               | zu Fuß              |
| ÖPNV                |                       | Zug                    | Bahnhof | Zug     |                       | ÖPNV                |
| Pkw/Taxi            |                       |                        |         |         |                       | Pkw/Taxi            |
| zu Fuß              | Flughafen             |                        |         |         | Flughafen             | zu Fuß              |
| ÖPNV                |                       | Flugzeug               |         |         |                       | ÖPNV                |
| Pkw/Taxi            |                       |                        |         |         |                       | Pkw/Taxi            |

**Bild 3-1: Fünf-Phasenmodell der Transportabläufe**

Die Phase 1 beschreibt als Zugangsphase den Weg vom Startpunkt der Reise bis zum Erreichen des Übergangsbereichs zum Hauptlauf. Kennzeichnend für die Phase 1 sind geringe Geschwindigkeiten von durchschnittlich 40 km/h und kurze Wegstrecken bis ca. 20 Kilometer.

Die Phase 2 umfasst den Übergangsbereich vom Zugang zum Hauptlauf. Sie fällt für Kraftfahrzeuge auf der einen und Bahn und Flugzeug auf der anderen Seite unterschiedlich aus. Das entscheidende Merkmal ist, dass Kraftfahrzeuge in der Übergangsphase eine Transportarbeit erbringen, was für Bahn und Flugzeug nicht der Fall ist. Dieser wesentliche Unterschied lässt sich an den zurückgelegten

Wegstrecken und den dabei erreichten Geschwindigkeiten deutlich machen, die bei Bahn und Flugzeug nahezu Null sind, während Kraftfahrzeuge hier mit Geschwindigkeiten bis durchschnittlich 70 km/h Strecken von bis zu 100 Kilometern zurücklegen.

Der Hauptlauf als Phase 3 ist für alle Verkehrssysteme gekennzeichnet durch die höchste Reisegeschwindigkeit und den längsten Streckenabschnitt.

Die Phase 4 als zweite Übergangsphase und Phase 5 als Abgangsphase weisen dieselben Eigenschaften auf wie Phase 2 und 1.

Die Betrachtung der Transportabläufe für Personen und Güter mit verschiedenen Verkehrsmitteln hat gezeigt, dass ein hohes Maß an Übereinstimmung in den Abläufen gegeben ist. Damit lassen sich Personen- und Gütertransporte nach den gleichen Methoden untersuchen. Da die Abläufe für Güter und Personenverkehre demnach in gleicher Weise beschrieben werden können, wird in dieser Arbeit nur noch der Personenverkehr betrachtet, um die Methodik zu demonstrieren.

Der hier gewählte Ansatz, den Abschnitt der Reise des Pkw zwischen Ortsausgang und Erreichen der Autobahn als eine Übergangsphase zu deklarieren, ist begründet durch das Merkmal, dass in der Übergangsphase die eigentliche Reisedstrecke erreicht werden soll, wo man mit maximaler Geschwindigkeit große Entfernungen überwinden kann. Zum anderen macht der Vergleich der Abläufe in den Übergangsphasen von Bahn und Flugzeug im Bahnhof bzw. Flughafen unmittelbar deutlich, dass der Individualverkehr in dieser Phase durch Überwindung von Strecken eine reale Transportleistung erbringt, während dies bei Bahn und Flugzeug in dieser Phase nicht gegeben ist. Jedoch erhöhen bei Bahn und Flugzeug die Übergangszeiten das Gesamtzeitkonto.

### **3.3 Zugangsphase**

In der Regel beschränkt sich der Vergleich von Transportsystemen auf eine Analyse der Hauptreisestrecke in der Phase 3, siehe z.B. [BIAL1990], [NIED1998]. Bei näherer Betrachtung der Abläufe wird jedoch deutlich, dass die Phasen des Zu- und Abgangs sowie insbesondere die Phasen des Übergangs eine wesentliche Bedeutung für die Effizienz der Transportsysteme haben.



### 3.3.1 Verkehrsmittelwahl in der Zugangsphase

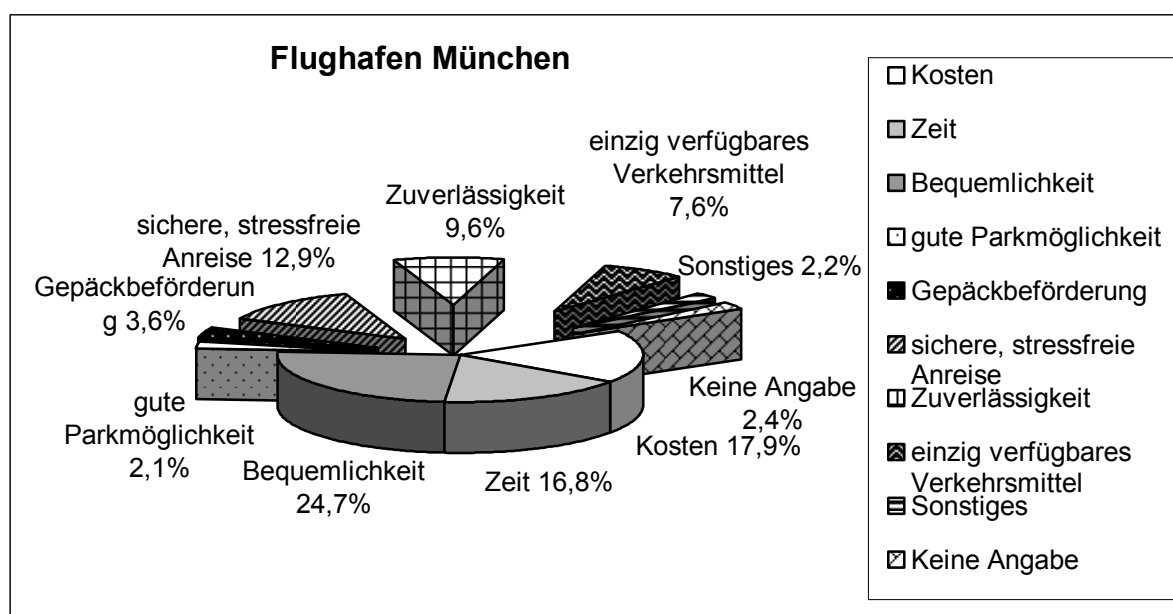
Für die Wahl des Verkehrsmittels zum Flughafen oder Bahnhof spielen unter anderem

- die Zugangszeit,
- die Zugangskosten,
- die Entfernung zwischen Ausgangsort der Reise und Ausgangsflughafen/-bahnhof
- Dauer der Gesamtreise
- Erreichbarkeit des Flughafens/Bahnhofs mit öffentlichen Verkehrsmitteln

eine ganz wesentliche Rolle, siehe [BOND2000].

#### 3.3.1.1 Verkehrsmittelwahl zum Flughafen

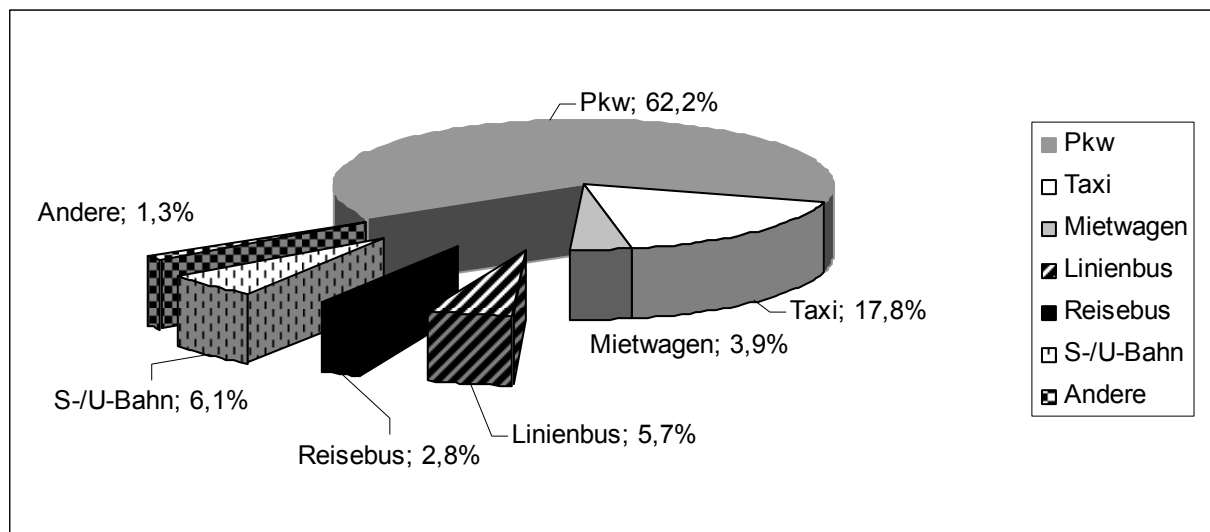
Bei einer Untersuchung des Anreiseverhaltens am Flughafen München stellte sich heraus, dass die Bequemlichkeit das überwiegende Kriterium für die Verkehrsmittelwahl darstellt, siehe [BEHR1995].



**Bild 3-2: Kriterien für die Verkehrsmittelwahl am Flughafen München, [BEHR1995]**

Erst danach rangieren Kosten, Zeit und Pünktlichkeit (sichere, stressfreie Anreise) als weitere bedeutsame Faktoren. Dabei wird der Pkw vor allem wegen der Bequemlichkeit gewählt, während der ÖPNV aus Kostengründen bevorzugt wird. Bei

der Wahl der Verkehrsmittel für den Zugang zum Flughafen München wird die S-Bahn von Reisenden aus dem Stadtgebiet mit 50% klar bevorzugt gegenüber Pkw, Mietwagen und Taxi. Die Anreisenden aus der Region Oberbayern bevorzugen dagegen mit rund 71% den Pkw als Anreisemittel. Diese Ergebnisse decken sich mit Modal-Split-Analysen, die die Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen für die großen internationalen Flughäfen in Deutschland durchgeführt hat, [ADV 1997].



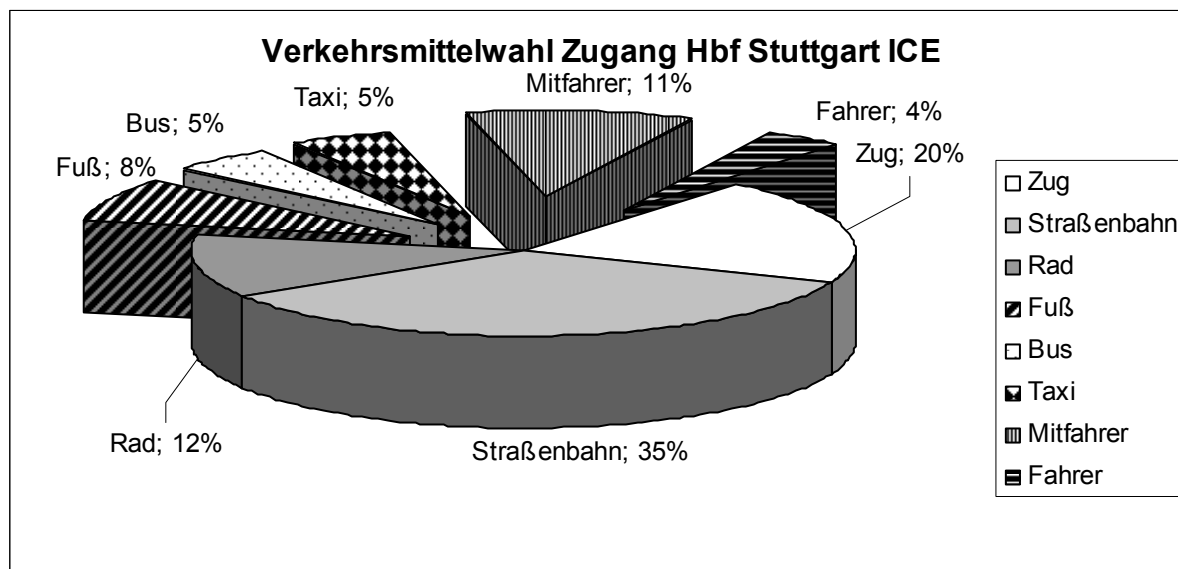
**Bild 3-3: Model Split für die Verkehrsmittelwahl zum Flughafen,  
[ADV 1997]**

Danach ist der Pkw mit rund 62% das klar bevorzugte Anreisemittel zum Flughafen. Von den öffentlichen Verkehrsmitteln spielen lediglich S-/U-Bahn und Linienbusse mit jeweils rund 6% eine Rolle. Im Vergleich zu anderen Flughäfen weisen München und Frankfurt aufgrund der Lage der Flughäfen und deren Anbindung mit 28% und 21% einen sehr hohen Nutzungsanteil der S-/U-Bahn auf.

### 3.3.1.2 Verkehrsmittelwahl zum Bahnhof

Ähnliche Untersuchungen weisen für Bahnhöfe aus, dass das Kriterium des bequemen Zugangs zum Bahnhof ebenso entscheidend ist für die Nutzung der Bahn, [RADL1981]. Der Faktor Zeit und der einfache Zugang ohne Umsteigen scheinen den Pkw normalerweise zu begünstigen. Jedoch haben Analysen des Zugangsverhaltens von Bahnreisenden am Beispiel der Bahnhöfe Stuttgart und Karlsruhe gezeigt, dass der überwiegende Teil der Fahrgäste, das sind in Stuttgart etwa 67%, mit dem Zug oder der S-/U-Bahn zum Bahnhof gelangen. Die nähere

Betrachtung des Bahnhofs Stuttgart erscheint in dieser Arbeit als Äquivalent zum Bahnhof München gut geeignet, da er ebenfalls direkt in der Innenstadt liegt. Auch seine Anbindung an S-/U-Bahn und Straßennetz ist strukturell vergleichbar.



**Bild 3-4: Modal Split für den Zugang zum Bahnhof am Beispiel Stuttgart, [BROC1995]**

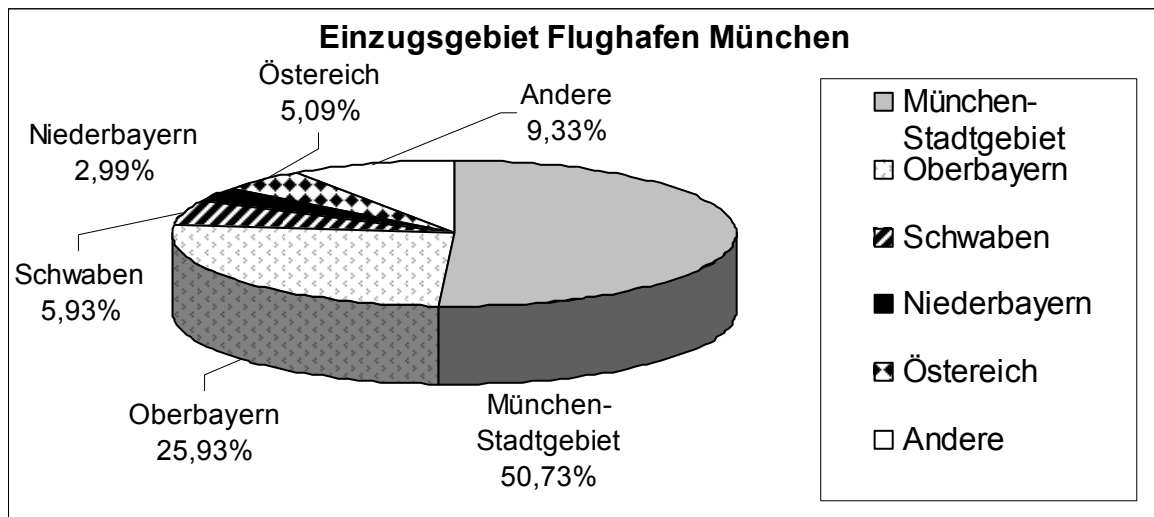
Rund 18% der Reisenden kommen mit dem Auto, sei es als Fahrer, oder sie werden mit dem Taxi oder anderen Privat-Kfz gebracht. Aufgrund der vorangegangenen Recherchen werden Pkw und Bahntransportmittel für den Zugang zum Bahnhof und Flughafen, mit einem Anteil von jeweils 70% und mehr, als die bevorzugten Zugangsmittel angesehen und in dieser Arbeit für die Untersuchung des Zu- und Abgangs berücksichtigt.

### 3.3.2 Zeitbedarf in der Zugangsphase und Wahl der Startorte

Sowohl für den Reisenden als auch für die Bewertung der Transporteffizienz spielen die Reisezeit und darin der Anteil der Zugangszeit eine wesentliche Rolle. Daher werden hier Schätzungen über Zugangszeiten analysiert und aus den Einzugsbereichen von Flughäfen und Bahnhöfen repräsentative Startorte abgeleitet.

#### 3.3.2.1 Einzugsbereich für Flughafen und Bahnhof

Untersuchungen zum Einzugsgebiet des Flughafens München haben gezeigt, dass etwa 50% der Reisenden aus dem Stadtgebiet München kommen, [BEHR1995]. Weitere 26% kommen aus dem Regierungsbezirk Oberbayern.



**Bild 3-5: Einzugsgebiet des Flughafen München, [BEHR1995]**

Damit erstreckt sich der primäre Einzugsbereich des Flughafens München auf eine Entfernung von rund 100 km. Die verbleibenden rund 24% verteilen sich auf Österreich und die übrigen Regionen in Bayern sowie Baden Württemberg.

Für Bahnhöfe liegen die Einzugsbereiche für Fernreisen aufgrund neuerer Untersuchungen in ähnlichen Entfernungen von etwas über 100 km im Fall des Bahnhofs Karlsruhe und erreichen sogar Werte von knapp 200 km bezogen auf den Bahnhof Stuttgart, siehe [BROC1995].

### 3.3.2.2 Schätzung der Zugangszeiten

Die Analyse des Gesamtzeitbedarfs zum Erreichen des Bahnhofs Stuttgart zeigt, dass der überwiegende Teil der Reisenden den Bahnhof binnen 30 Minuten erreicht. Diese stichprobenartigen Ergebnisse der Zugangszeit zum Bahnhof decken sich mit anderen Untersuchungen, die Streubereiche zwischen 10 und 60 Minuten angeben, siehe [BROC1995].

Die Auswertung weiterer Literaturquellen führt zu geschätzten Zugangszeiten zum Flughafen zwischen 30 und 51 Minuten, [ADV 1995], [AERO1995], [TEST1997].

Aufgrund dieser sehr uneinheitlichen Angaben wird in dieser Arbeit ein anderer Ansatz mit dem Ziel gewählt, die Zugangsverläufe möglichst realistisch und nachvollziehbar zu beschreiben. Unter Nutzung des Shell-Routenplaners und der Fahrplanauskunft der Bahn werden ausgehend von Startpunkten in der jeweiligen Ortsmitte die Zufahrtswege und Zeiten für die Zugänge zum Bahnhof und Flughafen München per Bahn und Pkw bestimmt, [SHEL2000], [DBAG2002].

### 3.3.2.3 Wahl der Startorte

Für diese Studie werden drei Einzelstartpunkte im Umfeld von München gewählt, von denen aus die Zugänge zum Flughafen und zum Bahnhof sowohl mit dem Pkw als auch mit Nahverkehrsbahnen (NV-Bahn) wie S- und U-Bahn beschrieben werden.

Um für die Hauptreisestrecken ähnliche Start- und Endpunkte und damit vergleichbare Streckenlängen zu erhalten, wird gemäß dem 5-Phasenmodell als Systemgrenze zwischen Zugang und Hauptstrecke die Autobahnanschlussstelle Garching/Nord für den Straßenverkehr gewählt.

Da der individuelle Zugangsverlauf immer vom einzelnen Startort abhängt, ist hier eine sehr breite Streuung gegeben. Für die Beschreibung der Zugangsphase ist zu unterscheiden zwischen Startpunkten in größeren Städten mit eigenem Bahnhof oder Flughafen sowie eher ländlichen Ortschaften, die eine längere Anreise erfordern.

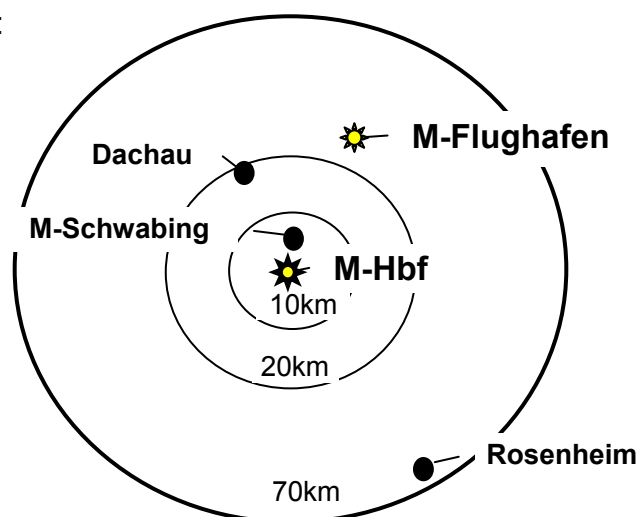
Für die Wahl der Startpunkte werden daher folgende Kriterien zu Grunde gelegt, die einen hohen Repräsentativitätsgrad gewährleisten sollen:

- Relativ gleiche Entfernung zu Bahnhof bzw. Flughafen
- Repräsentative Entfernung und Lage zu München
- Lage innerhalb der Einzugsgebiete von Bahnhof bzw. Flughafen
- Direkte Anbindung an Bahn und Straße

Anhand dieser Kriterien werden die Orte:

- Rosenheim
- Dachau
- München-Schwabing

als Startorte gewählt.



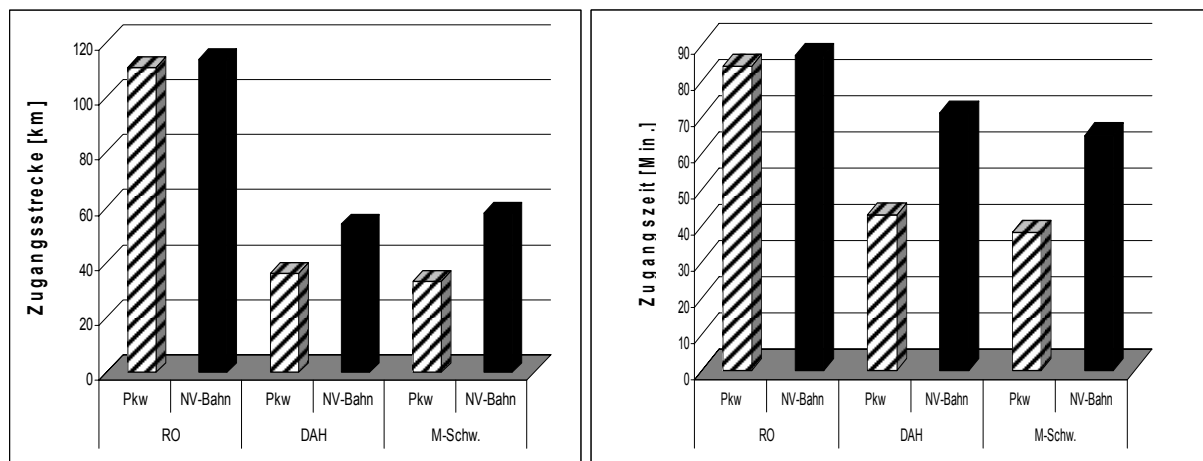
**Bild 3-6: Relative Lage der Startorte zu Flughafen und Bahnhof**

Rosenheim liegt etwa 70 km südöstlich von München und ist am weitesten von Bahnhof und Flughafen entfernt. Die Stadt verfügt aber über einen eigenen Bahn- und Autobahnanschluss. Dachau liegt etwa 20 km nordwestlich von München und verfügt ebenfalls über eigene Bahn- und Autobahnanschlüsse.

Schwabing ist ein zentraler Stadtteil von München. Er liegt nicht in unmittelbarer Nähe zum Bahnhof, so dass die Nutzung eines Verkehrsmittels als Zubringer erforderlich ist. Die relative Nähe zum Bahnhof wird für die Anfahrt zum Flughafen dadurch etwas kompensiert, dass der Innenstadtbereich nicht zusätzlich durchfahren werden muss.

Die Anreiseentfernung von Rosenheim zum Flughafen entspricht in etwa dem typischen Einzugsgebiet von München. Dachau und Schwabing liegen eher im näheren Einzugsbereich. Für den Zugang zum Bahnhof entsprechen die Startpunkte Dachau und Schwabing den typischen Werten, insbesondere mit Blick auf die Zugangszeiten.

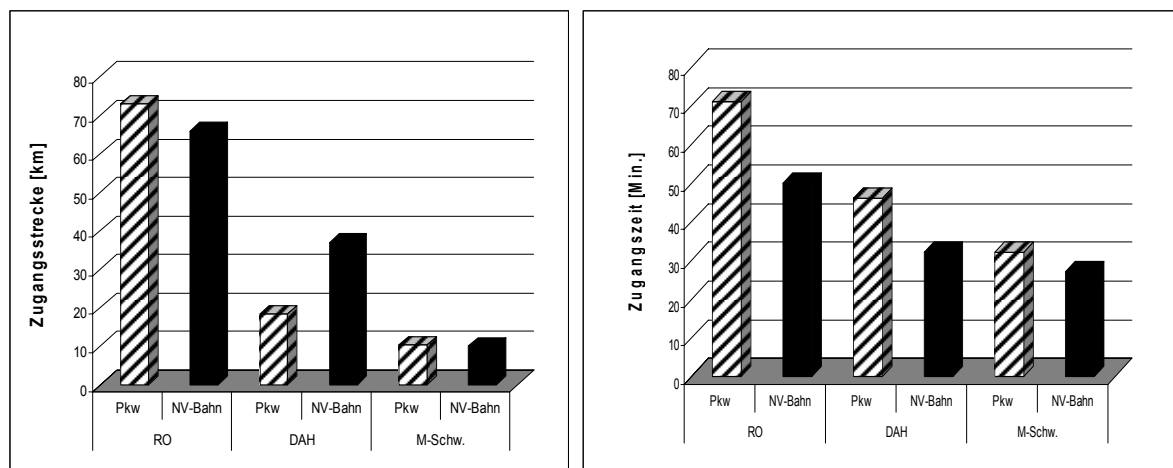
Für die Ermittlung der Bahnstrecken konnten leider keine Planungswerkzeuge ermittelt werden, da der Reiseplaner der Bahn nur Reisezeiten, aber keine Streckenlängen ausgibt. Aus diesem Grunde wurde anhand der Streckennetzkarte der Bahn im Shell-Atlas mit Hilfe eines Messrades die Streckenlänge ausgemessen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Messmethode einen höheren Fehler aufweist als die Computer gestützten Messverfahren. Die korrespondierenden Anreisezeiten wurden mit dem Internetreiseplaner der Bahn ermittelt.



**Bild 3-7: Zugangsstrecken und -zeiten zum Flughafen München**

Die Ergebnisse zeigen, dass für die Anreise zum Flughafen mit zunehmender Entfernung Streckenlänge und Zugangszeit von Pkw und Nahverkehrsbahn (NV-Bahn) einander annähern. Hinsichtlich der Effizienz lässt sich bei Anreisen aus größerer Entfernung somit kein unmittelbarer zeitlicher Vorteil für eines der untersuchten Zugangsverkehrsmittel ableiten. Umgekehrt zeigen die Auswertungen

für Anreisen auf kurzen Distanzen wie Dachau und Schwabing, dass die Bahn aufgrund der Netzstruktur deutlich größere Strecken und wegen der enthaltenen Haltepunkte auch wesentlich größere Transportzeiten aufwenden muss, was sich auf die Effizienz nachteilig auswirkt.



**Bild 3-8: Zugangsstrecken und -zeiten zum Hauptbahnhof München**

Für die Anfahrt zum Münchener Hauptbahnhof zeigen sich bei den Entfernungen die gleichen Verhältnisse wie beim Zugang zum Flughafen. Lediglich für den Startort Dachau ist die Zugangsstrecke bei der Bahn etwa doppelt so lang. Die Zugangszeiten fallen für die NV-Bahn in allen Fällen günstiger aus. Hier bringt die Netzstruktur für das System Nahverkehrsbahn mit Blick auf die Effizienz klare Vorteile.

### 3.4 Übergangsphase

Die Übergangsphase, als Systemgrenze zwischen dem Zu- bzw. Abgang und dem Hauptlauf, beschreibt Transportabläufe auf einem höheren Energie- d.h. Geschwindigkeitsniveau. Wie bereits erläutert zeigt die Übergangsphase für Kraftfahrzeuge andere Eigenarten als die für Bahn und Flugzeug. Hier werden anhand der gewählten Startorte die Eigenschaften der jeweiligen Übergangsphasen beschrieben.

#### 3.4.1 Übergangsphase zwischen Ortsausgang und Fernstraße

Die Übergangsphase Ortsausgang-Fernstraße tritt bei Transporten mit Kraftfahrzeugen auf. In dieser Arbeit wird die Übergangsphase für Kraftfahrzeuge

beschrieben durch die Strecken vom Startort zur Autobahnanschlussstelle Garching/Nord an der BAB A9, da dieser Punkt ein gemeinsamer Startpunkt für den Hauptlauf von allen Startorten aus ist:

- Rosenheim – Garching/Nord
- Dachau – Garching/Nord
- Schwabing – Garching/Nord

Hierbei ist die Besonderheit zu betrachten, dass für die Reise ab Rosenheim die Übergangsphase auch einen Autobahnabschnitt mit Etappen auf der A8 und A99 enthält. Um jedoch diese System-/Phasengrenze für alle Startpunkte bezogen auf den Startort München einheitlich zu definieren, wird auch für die Reise ab Rosenheim die Anschlussstelle Garching/Nord als Phasengrenze zum Hauptlauf gewählt.

|                       | <b>Rosenheim</b> | <b>Dachau</b> | <b>M.-Schwabing</b> |
|-----------------------|------------------|---------------|---------------------|
| Übergangsstrecke [km] | 84,5             | 15,7          | 0                   |
| Übergangszeit [Min]   | 50               | 12            | 0                   |

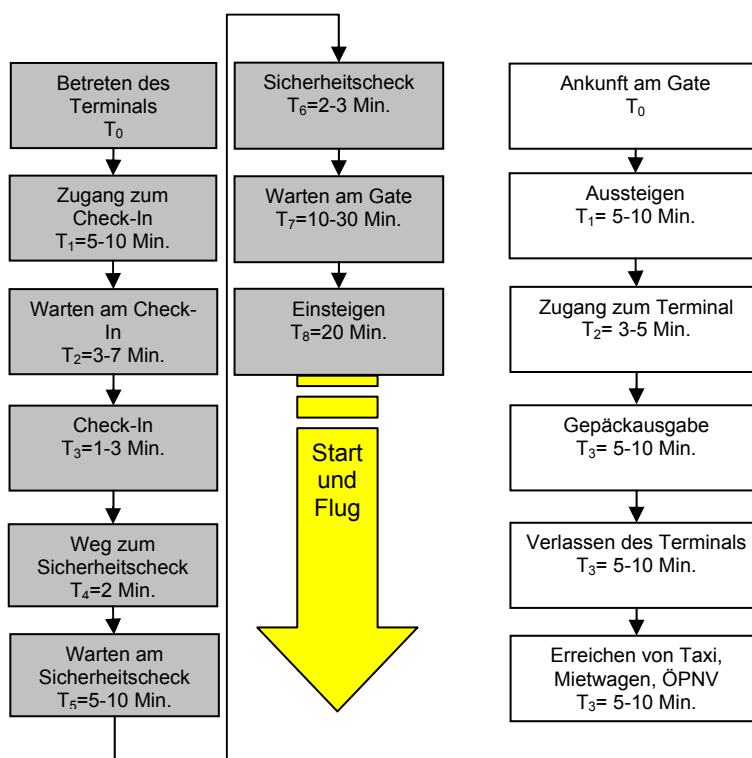
**Tabelle 3-1: Zugangsstrecken und –zeiten abhängig vom Startort**

Es ist weiter auffällig, dass für den Startort München-Schwabing die Übergangsphase entfällt, da die Autobahn A9 direkt im Stadtgebiet München beginnt.

### 3.4.2 Übergangsphase im Flughafen

Die Übergangsphase am Flughafen beginnt mit dem Betreten des Terminals. Der Aufenthalt im Terminal umfasst gerade beim Abflug mehrere Abschnitte:





**Bild 3-9: Abflug- und Ankunftsprozesse an Flughäfen, angelehnt an [DREW2000]**

Fasst man die einzelnen Etappen während des Abflugs zusammen, ergibt sich eine günstigste Aufenthaltsdauer von 44 Minuten (im ungünstigen Fall: 82 Minuten). Im Mittel hält sich der Reisende 63 Minuten im Flughafen auf. Diese Werte werden durch die Luftverkehrsgesellschaften bestätigt. Sie empfehlen, für Inlandsflüge 60 Minuten vor Abflug und für Auslandsflüge mindestens 90 Minuten vor Abflug am Flughafen zu sein. Dabei entfallen auf reine Wegabschnitte, in denen sich der Passagier im Flughafen bewegt, zwischen 7 und 12 Minuten, reine Wartezeiten streuen zwischen 18 und 47 Minuten, was einem Anteil von 41%(günstiger Fall) - 57%(ungünstiger Fall) an der Gesamtaufenthaltsdauer im Flughafen entspricht. Die unmittelbar notwendigen Aktivitäten Check-In, Sicherheitskontrolle und Einsteigen umfassen rund 23-26 Minuten.

Hieraus lässt sich ableiten, dass im Bereich der Abfertigungsabläufe im Flughafen beim Abflug insbesondere die Wartezeit am Gate verkürzt werden sollte, um die Aufenthaltsdauer im Terminal zu reduzieren. Ein weiteres Potential der Zeitverkürzung ist gegeben, wenn durch mehr parallele Check-In-Schalter und Sicherheitskontrollen hier die Warte- und Aktionszeiten verkürzt werden. In den reinen Wegzeiten im Terminal ist wenig Kürzungspotential vorhanden, wenn man die

Wegzeiten mit denen auf Regionalflughäfen, [DREW2000] bzw. mit den von der IATA empfohlenen Weglängen auf Großflughäfen von 1000 – 1500 Metern vergleicht, siehe [ASHF1984].

Für die Phase zwischen der Ankunft des Flugzeugs am Flughafen und dem Verlassen des Terminals ergeben sich Verweilzeiten von 23-45 Minuten (Mittelwert 34 Minuten), wovon die Hälfte auf reine Wegzeiten entfällt. Hier lässt sich die Aufenthaltsdauer dadurch verkürzen, dass das Aussteigen und die Gepäckausgabe weiter beschleunigt werden.

In diesen Szenarien wurde nicht berücksichtigt, dass viele Reisende mit dem Mietwagen am Zielort an- und abreisen. Durch die damit verbundenen Aktivitäten wie Fahrzeug mieten und abholen bzw. zurückgeben ergeben sich weitere Zeitaufwände am Flugplatz.

|                         | Flughafen |
|-------------------------|-----------|
| Übergangsstrecke [km]   | 0         |
| Übergangszeit Zu [Min]  | 63        |
| Übergangszeit Ab [Min.] | 34        |

**Tabelle 3-2: Mittlere Übergangsstrecke und –zeit im Flughafen**

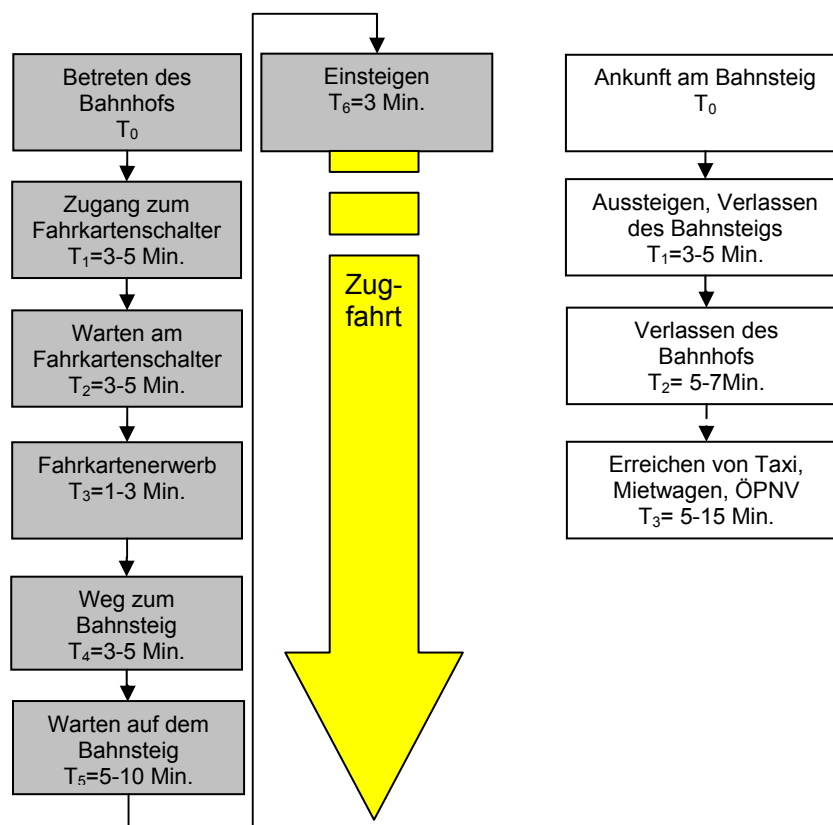
### 3.4.3 Übergangsphase im Bahnhof

Hat der Reisende den Bahnhof zum Antritt der Fernreise zu Fuß, mit dem Taxi oder Pkw oder mit dem ÖPNV erreicht, beginnt die Übergangsphase bei der Bahnreise. Der Reisende transportiert sein Gepäck, erwirbt den Fahrschein und begibt sich in den Wartebereich bzw. auf den Bahnsteig.

Die Aufenthaltsdauer im Bahnhof zwischen dem Verlassen des Anreisefahrzeugs (Pkw, Taxi, Bus, U-Bahn) und dem Betreten der Bahnhofshalle und dem Anfahren des Zuges hängt vor allem von der Größe des Bahnhofs, dem herrschenden Publikumsverkehr sowie der Pünktlichkeit des Zuges ab. Die Übergangsphase beginnt mit dem Betreten des Bahnhofs und setzt sich mit dem Aufsuchen des Fahrkartenschalters in der Regel fort.

Hieran schließt sich am Schalter eine Wartephase von einigen Minuten an, ehe der Fahrschein erworben oder das Gepäck aufgegeben wird. Anschließend bewegt sich der Reisende über einige Minuten zum Bahnsteig, wo wiederum eine Wartezeit bis

zum Eintreffen des Zuges vergeht. Nach dem Eintreffen des Zuges steigt der Reisende in den Zug ein und der Zug verlässt nach 2 – 3 Minuten des Haltens den Bahnhof, [MNIC1998].



**Bild 3-10: Abfahr- und Ankunftsabläufe im Bahnhof**

Insgesamt ergibt sich so eine Verweildauer im Bahnhof während des Übergangs von 18 – 31 Minuten (Mittelwert: 24,5 Minuten). Bezogen auf die Gesamtverweildauer im Bahnhof während des Übergangs entfallen 33% der Zeit auf Wegzeiten. Fahrscheinerwerb und Einsteigen erfordern rund 20% der Zeit, während 44% - 50% als reine Wartezeiten anfallen. Aufgrund der relativ geringen Gesamtverweildauer erscheint das Potential zur Zeitreduktion begrenzt. Die notwendigen Aktivitäten Fahrscheinerwerb und Einsteigen lassen sich kaum noch reduzieren, ebenso sind die Wegstrecken im Bahnhof aufgrund dessen notwendiger Ausdehnung nicht weiter reduzierbar. Der Anteil der Wartezeiten zwischen 10 und 15 Minuten ergibt sich zwangsläufig aus notwendigem Zeitpuffer für den Zugang zum Bahnhof sowie Zeitreserven für den Fahrscheinerwerb. Auch erscheinen weitere wesentliche Zeiteinsparungen wenig realistisch, will man nicht das Risiko erhöhen, den

gewünschten Zug zu verpassen. Am Ende der Reise vergehen nach der Ankunft des Zuges im Bahnhof zwischen 8 und 12 Minuten (Mittelwert 10 Minuten), ehe der Reisende den Bahnhof verlassen hat. Daran schließt sich ein Abschnitt an, in dem der Reisende sich ein Taxi, ÖPNV oder Mietwagen sucht, um vom Bahnhof zum Zielort zu gelangen. Dieser Abschnitt zählt definitionsgemäß nicht mehr zur Übergangsphase.

|                         | <b>Bahnhof</b> |
|-------------------------|----------------|
| Übergangsstrecke [km]   | 0              |
| Übergangszeit Zu [Min]  | 24,5           |
| Übergangszeit Ab [Min.] | 10             |

**Tabelle 3-3; Mittlere Übergangsstrecke und –zeit im Bahnhof**

### **3.5 Hauptlauf**

Ausgehend von der vorangegangenen Untersuchung der Transportabläufe sind für den Hauptlauf in Phase 3 reale Referenzstrecken festzulegen, die in ihren Streckenverläufen für die verschiedenen Verkehrsmittel sehr ähnlich sind. Sie sollen hinsichtlich der Streckenlänge nur geringe Abweichungen aufweisen, um die Vergleichbarkeit der Strecken und des Energieaufwands zu gewährleisten.

#### 3.5.1 Transportstreckennetze

Grundsätzlich lassen sich die Transportstrecken in fünf Kategorien einteilen, die durch die jeweilige Streckenlänge bestimmt sind:

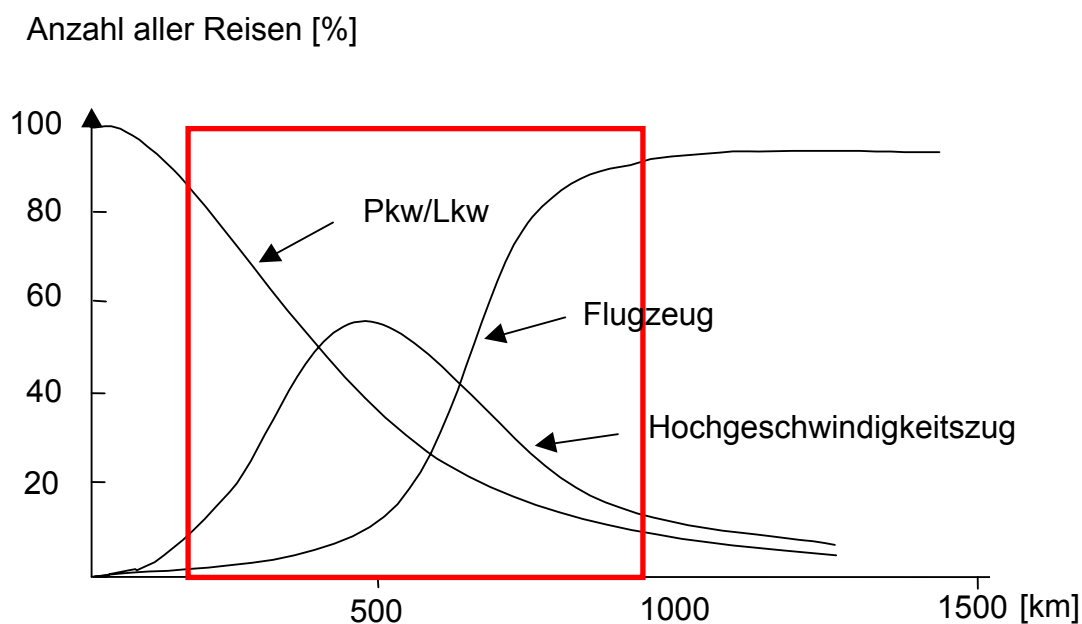
- Ortsbereich: 0-30 km
- Nahbereich: 30-100 km
- Kurzstreckenbereich: 100-300 km
- Mittelstreckenbereich: 300-1500 km
- Langstreckenbereich: >1500 km

Orts- und Nahbereich decken aufgrund ihrer Ausdehnung die Phasen 1 u. 2 sowie 4 u. 5 ab, während der Kurz-, Mittel- und Langstreckenbereich die Phase 3 widerspiegelt.

Bei dieser Klassifikation ist zu beachten, dass für ein einzelnes Verkehrsmittel die Entfernungen relativ sind. So ist eine Streckenlänge von 300 km im

Kurzstreckenbereich des Flugzeugs für Pkw und Lkw eher als Mittelstrecke oder Langstrecke aufzufassen. Hingegen wird der Nahbereich beispielsweise von Flugzeugen fast gar nicht bedient. Mittelstrecken von *1500 km* erscheinen für Lkw als Langstrecke. Die Bahn ist in ihrem Einsatzradius auf kontinentale Strecken beschränkt, so dass auch hier eine Streckenlänge von *1500 km* im Bereich der Langstrecke anzusiedeln ist.

Diese Einteilung erfolgt nicht willkürlich, sondern orientiert sich einerseits an geographischen Grenzen wie Ozeanen oder Gebirgszügen sowie andererseits an den typischen Entfernungsreichweiten der verschiedenen Transportmittel, siehe [JENK2000]. Die deutsche, gesetzliche Definition für Bahnfahrzeuge legt den Stadtverkehr bis *20 km*, den Regionalverkehr bis *50 km* und den Regionalschnellverkehr bis *150 km* fest und beschreibt damit ähnliche Grenzen. Alle Strecken über *150 km* gelten als Fernverkehr [SCHU2002b].



**Bild 3-11: Bevorzugte Reiseentfernungen ausgewählter Verkehrsmittel, [JENK1999].**

Bei näherer Analyse des Modal-Splits der Verkehrsmittel über der Entfernung ist zu beobachten, dass der Anteil der Bahn im Vergleich zu Kraftfahrzeug und Flugzeug geringer ausfällt und der dominierende Bereich sich auf einen Entfernungsbereich von etwa *250 – 700 km* erstreckt, wo auch Kraftfahrzeug und Flugzeug hohe Marktanteile aufweisen. Dagegen sind die Modal-Splits für Kraftfahrzeug und

Flugzeug im unteren und oberen Geschwindigkeitsbereich dadurch gekennzeichnet, dass sie hier nahezu konkurrenzlos agieren, was ihnen feste Marktanteile sichert und die Bahn vor eine besondere Wettbewerbssituation stellt. Aufgrund der vorstehenden Analyse werden für die Referenzstrecken innerdeutsche Strecken gewählt, die den primär konkurrierenden Entfernungsbereich gut abbilden.

Alle zu untersuchenden Verkehrsmittel erbringen ihre Transportleistungen auf festgelegten Streckennetzen. Für die individuelle Transportaufgabe kann daher nur innerhalb dieser Netze der Transportweg festgelegt werden. Wie bereits von *Voigt* in den 70er Jahren dargelegt wurde, ist die Netzfähigkeit ein wesentliches Wertmerkmal eines Verkehrssystems, siehe [VOIG1973]. Je stärker das Streckennetz eines Verkehrsmittels ausgebaut ist und je stärker sich dieses Netz an den Haupttransportrichtungen orientiert, desto höher ist die Wertigkeit eines Verkehrsmittels.

Diese Kriterien gelten sowohl für die Netzausprägung des Fernverkehrsnetzes als auch für das Streckennetz der Zubringertransporte. Gerade letzteres ist für den bewertenden Vergleich relevant, da hier regionale Ausprägungen zum Tragen kommen und zu starken Unterschieden in den Ergebnissen führen können, abhängig von dem gewählten Start- und Zielort.

### 3.5.1.1 Das Straßenverkehrsstreckennetz

Für Kraftfahrzeuge setzt sich das Streckennetz aus Kreis- bzw. Landstraßen im Nahbereich sowie Bundesstraßen im mittleren Entfernungsbereich und Autobahnen im Langstreckenbereich zusammen. Das Bundesfernstraßennetz weist eine etwas stärkere Betonung der Nord-Süd-Ausrichtung auf, die noch aus der Zeit vor der Wiedervereinigung und dem Transit für Transporte zwischen Skandinavien und Südeuropa herrührt, siehe Anhang A. Weiterhin sind eine intensive Anbindung der Bundeshauptstadt Berlin erkennbar sowie ein sehr dichtes regionales Autobahnnetz im Ruhrgebiet und Rheinland. Eine ähnliche Dichte ist nur noch im Rhein-Main-Gebiet um Frankfurt herum erkennbar. Diese Ausprägung des Autobahnnetzes ist begründet durch die wirtschaftlichen Ballungszentren und den damit verbundenen intensiven Austausch von Wirtschaftsgütern und Reiseverkehr.

### 3.5.1.2 Das Streckennetz der Bahn

Das Streckennetz der Bahn lässt sich in ähnlicher Weise in ein Regional- und ein Fernstreckennetz differenzieren. Das Fernstreckennetz der Deutschen Bahn beschreibt in noch deutlicherer Form als das Fernstraßennetz eine Nord-Süd-Ausrichtung, siehe Anhang A. Ebenso wie bei dem Autobahnnetz stellen bei der Bahn auf der Nord-Süd-Achse München, Nürnberg, Würzburg, Fulda, Kassel, Hannover und Hamburg wichtige Wegpunkte dar. Parallel dazu ist die Strecke Stuttgart-Frankfurt-Fulda stark ausgeprägt. Als dritter starker Strang zeigt sich die Route Frankfurt-Rheinland (Köln)-Ruhrgebiet (Dortmund) – Hannover. Wie bei den Bundesautobahnen ist die Bundeshauptstadt Berlin über die Knotenpunkte Hamburg, Nürnberg und Hannover angebunden.

### 3.5.1.3 Das Luftverkehrsstraßensystem

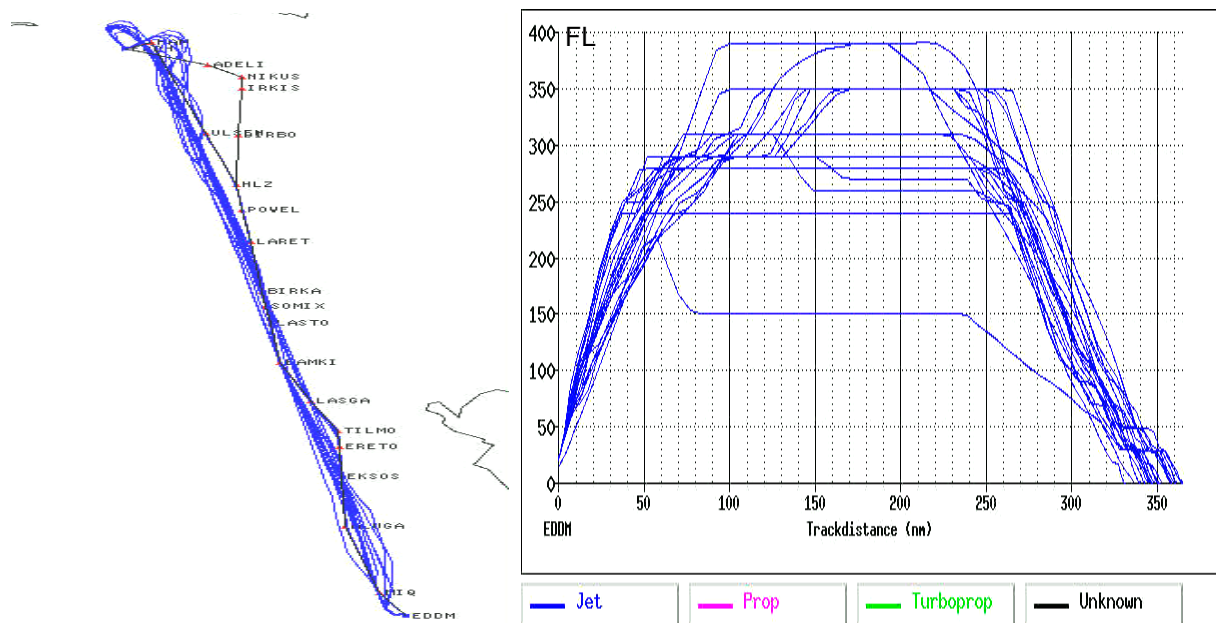
Das Luftverkehrsstraßennetz baut sich aus verschiedenen, höhenabhängigen Lufträumen auf. Grundsätzlich wird zwischen dem unkontrollierten und dem kontrollierten Luftraum unterschieden, [MENS1993]. Für diese Arbeit ist der kontrollierte Luftraum von Bedeutung, in dem sich unter IFR-Bedingungen die Verkehrsflugzeuge unter ständiger Überwachung auf den Luftstraßen bewegen. Hier wird mit dem unteren Luftraum aufgrund geringerer Flughöhen der mittlere Entfernungsbereich abgedeckt und dem oberen Luftraum die größeren, insbesondere die internationalen Streckenlängen zuordnet.

Eine nähere Betrachtung des Streckennetzes zeigt ebenfalls eine stärkere Ausrichtung auf die Nord-Süd-Route als auf die Ost-West-Strecken, siehe Anhang A. Ähnlich wie bei den Autobahnen und dem Fernstreckennetz der Bahn weist das Luftstraßen-Streckennetz mit den Flughäfen München, Frankfurt, Düsseldorf, Köln/Bonn, Hannover, Hamburg und Berlin einige Knotenpunkte auf, die in den regionalen Wirtschaftszentren liegen.

Auch die Routenverläufe der Lufthansa zeigen große Parallelen zu den Hauptstreckenverläufen von Autobahn und Schienennetz, siehe [LUFT2002].

So verläuft die Flugroute von München nach Berlin über Nürnberg und Leipzig/Halle in vergleichbarer Form wie die Bahnstrecke oder die Autobahn.

Die Strecke zwischen München und Hamburg läuft ebenfalls über Nürnberg, zieht sich dann aber nahezu direkt nach Norden über Erfurt und Wolfsburg, ehe sie östlich von Lüneburg dann nach Westen auf Hamburg zu schwenkt, siehe Bild 3-12.



**Bild 3-12: Flugbahnaufzeichnung München – Hamburg am 10. Juli 2001, [DFS 2001]**

Für die Strecke nach Frankfurt ergeben sich zum einen eine direkte Route und zum anderen eine Luftverkehrsstraße, die sich wie bei Autobahn und Bahn über Nürnberg und Würzburg erstreckt. Diese und weitere Auswertungen für die Referenzstrecken finden sich im Anhang B.

### 3.5.2 Festlegung der Referenzstrecken

Aufgrund der vorangegangenen Analysen werden die Strecken

- München – Hamburg
- München – Frankfurt
- München – Köln
- Köln – Berlin

für die weiteren Untersuchungen als Hauptlaufstrecken gewählt. Sie sind vor allem dadurch gekennzeichnet, dass sie für alle zu untersuchenden Verkehrsmittel sehr ähnliche Verläufe aufweisen, was sich an gleichen Wegpunkten zeigt. Damit unterliegen alle Verkehrsmittel auf diesen Strecken den gleichen topographischen Einflüssen und führen zu ähnlichen Streckenlängen. Für die Ermittlung der Streckenlängen wurden verschiedene Primär- und Sekundärliteraturquellen ausgewertet, um eine möglichst verlässliche Datenbasis zu gewinnen. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt [AERO1995], [DBAG2000] [SHEL2001a],



[SHEL2001b], [JELI1998], [WOLF1997].

|                            | <b>München-Hamburg</b>   |             |                 |
|----------------------------|--------------------------|-------------|-----------------|
|                            | <b>Pkw/Lkw</b>           | <b>Bahn</b> | <b>Flugzeug</b> |
| Mittelwert [km]:           | 773                      | 820         | 659             |
| Standardabweichung [km]    | 4                        | 18          | 64              |
| Prozentuale Abweichung [%] | 1%                       | 2%          | 10%             |
|                            | <b>München-Frankfurt</b> |             |                 |
|                            | <b>Pkw/Lkw</b>           | <b>Bahn</b> | <b>Flugzeug</b> |
| Mittelwert [km]:           | 395                      | 440         | 318             |
| Standardabweichung [km]    | 6                        | 20          | 44              |
| Prozentuale Abweichung [%] | 1%                       | 4%          | 14%             |
|                            | <b>München-Köln/Bonn</b> |             |                 |
|                            | <b>Pkw/Lkw</b>           | <b>Bahn</b> | <b>Flugzeug</b> |
| Mittelwert [km]:           | 579                      | 636         | 478             |
| Standardabweichung [km]    | 11                       | 42          | 48              |
| Prozentuale Abweichung [%] | 2%                       | 7%          | 10%             |
|                            | <b>Köln/Bonn-Berlin</b>  |             |                 |
|                            | <b>Pkw/Lkw</b>           | <b>Bahn</b> | <b>Flugzeug</b> |
| Mittelwert [km]:           | 579                      | 559         | 510             |
| Standardabweichung [km]    | 11                       | 18          | 33              |
| Prozentuale Abweichung [%] | 2%                       | 3%          | 6%              |

**Tabelle 3-4: Streuung der Streckenlängen für verschiedene Verkehrsmittel**

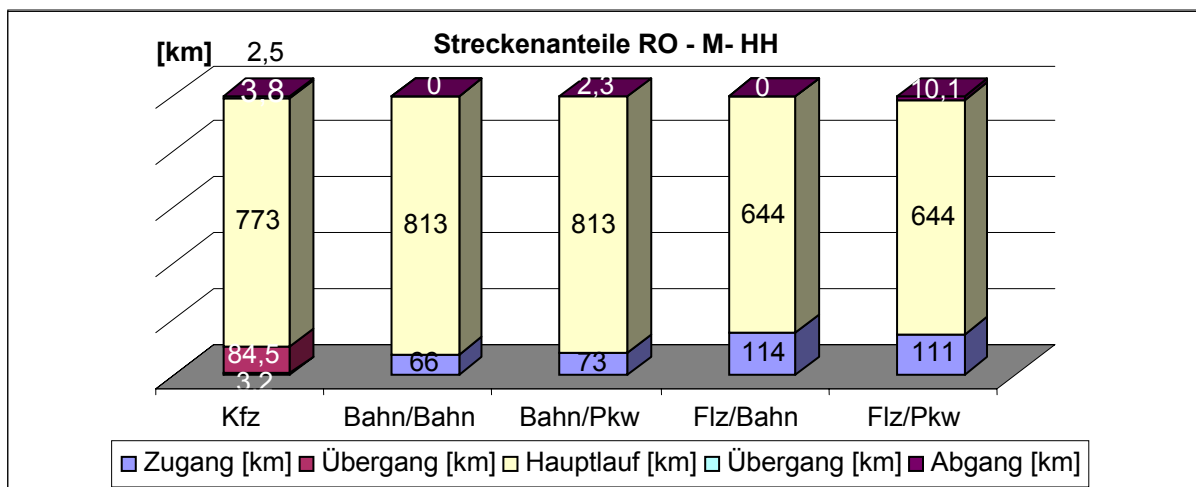
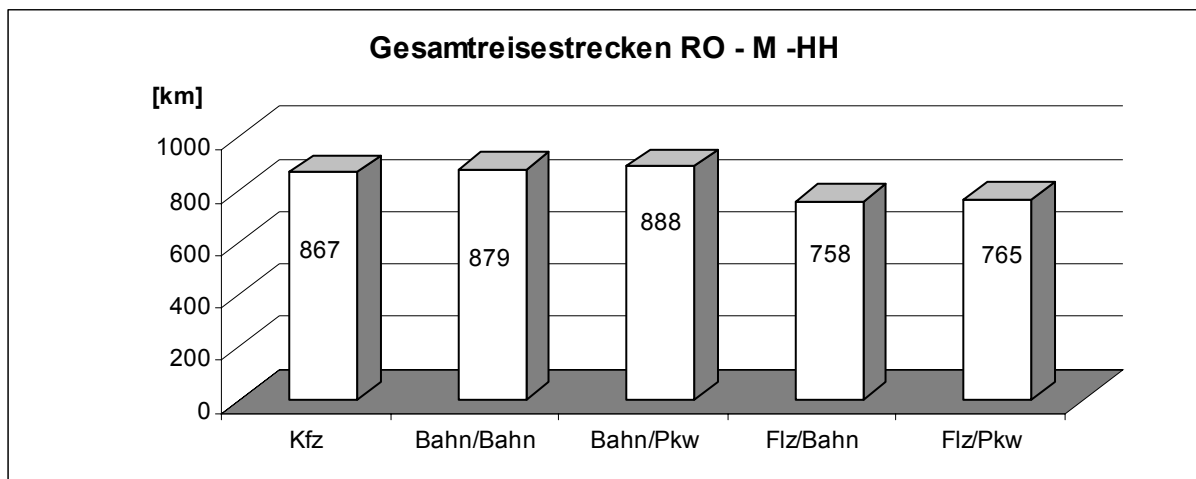
Hierbei ist festzustellen, dass für die Straßenlängen die Standardabweichung einen Wert von 2% nicht überschreitet. Für die Bahn konnte mit einer Streuung von maximal 7% ein gutes Ergebnis erzielt werden. Die Stichprobendaten wurden aus einem Bahnsimulationsprogramm gewonnen und zum anderen durch Messungen mit einem Messrad im Atlas ermittelt. Größere Streuungen von bis zu 14% ergeben sich für das Flugzeug. Diese Streuung wird vor allem durch die Verwendung von realen Flugprofilaufzeichnungen der DFS getrieben, die bei eingehender Analyse starke Schwankungen in Folge notwendiger Warteschleifen über den Flughäfen Frankfurt und Köln aufweisen. Die Start- und Zielpunkte beziehen sich dabei jeweils auf die Flughäfen und Bahnhöfe.

Vergleicht man die Streuung der Streckenlängen für die verschiedenen Relationen unter allen Verkehrsmitteln, so vergrößern sich die Schwankungen auf den Nord-Süd-Strecken auf 13% bis 18%. Hingegen auf der Ost-West-Route weichen die Streckenlängen nur um 6% vom Mittelwert ab. Dabei weisen die Flugrouten in allen Fällen die kürzeste Streckenlänge auf, während für die Bahn die größten Entfernungen ermittelt wurden. Lediglich auf der Strecke Köln – Berlin ist mit dem Kraftfahrzeug ein längerer Weg zu bewältigen als mit der Bahn.

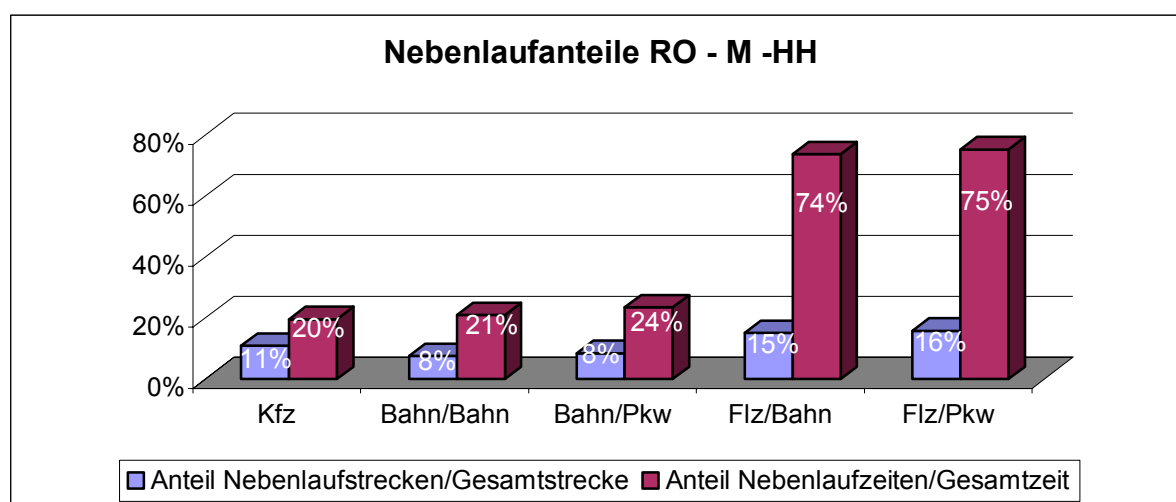
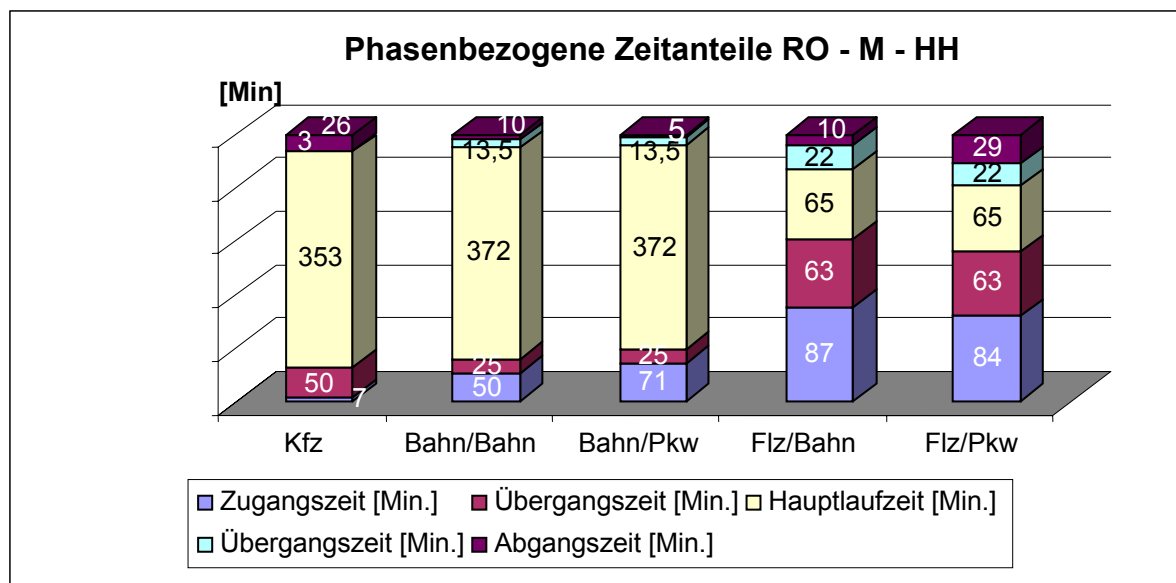
### 3.6 Auswertung der Entfernungs- und Zeitmerkmale

Für die angestrebte Untersuchung der Transporteffizienz sind aus den Transportabläufen die Faktoren Streckenlänge und Transportzeit von besonderem Interesse.

Beispielhaft für die gewählte Methode werden hier die Ergebnisse für den Lauf Rosenheim – München – Hamburg diskutiert. Die entsprechenden Ergebnisse für die Läufe München – Frankfurt, München – Köln und Köln - Berlin finden sich im Anhang C. Am Zielort wurde jeweils eine vereinfachte Abgangsstrecke vom Übergangspunkt in die Innenstadt gewählt. Dabei wurden für Reisen mit der Bahn und dem Flugzeug die Nebenläufe (Zu- und Abgang) sowohl mit dem Pkw als auch mit Bahnfahrzeugen betrachtet.



**Bild 3-13a: Auswertung der Streckenanteile und Neben-/Hauptlaufzeiten für die Strecke RO – M – HH**



**Bild 3-13b: Auswertung der Streckenanteile und Neben-/Hauptlaufzeiten für die Strecke RO – M – HH**

Für die Reise mit dem Flugzeug zeigt die obere Auswertung im Vergleich zu den anderen Verkehrsmittelkombinationen die kürzeste Gesamtreisestrecke. Die Bahn weist die längsten Reisesrecken auf.

Die zweite Auswertung stellt die Aufteilung der Streckenanteile auf die einzelnen Phasen dar. Hier wird deutlich, dass beim Kraftfahrzeug eine Übergangsstrecke anfällt, die bei der Bahn und dem Flugzeug entfällt. Auf der anderen Seite trägt bei der Bahn und beim Flugzeug nur die Zu- und Abgangsphase zur Gesamtreisestrecke bei.

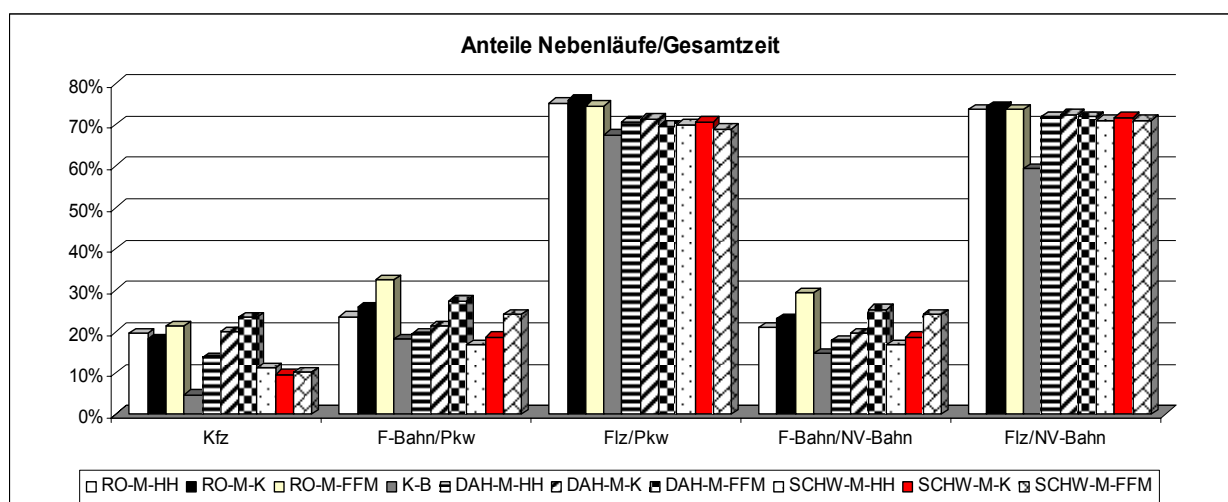
In der dritten Auswertung sind die zugehörigen Zeitanteile je Phase dargestellt. Hier wird deutlich, dass bei Kraftfahrzeug und Bahn die größten Zeitaufwände mit dem

Hauptlauf einhergehen. Dagegen fallen bei einer Flugreise die größten Zeitaufwände in den Übergangsphasen, aber auch in den Zu- und Abgangsphasen an.

Diese Relationen werden in der vierten Auswertung besonders deutlich, wo die Zeit- und Streckenanteile der Nebenläufe am Gesamtlauf dargestellt sind. Während bei allen untersuchten Verkehrsmitteln der Nebenlaufstreckenanteil deutlich unter 20% liegt, zeigt sich beim Zeitaufwand, dass für Flugreisen rund 70% der Reisezeit auf die Nebenläufe entfallen.

Trotz der langen Übergangszeiten weist das Flugzeug mit einer Gesamtreisezeit von 247-263 Minuten die kürzeste Gesamtreisezeit auf. Sie liegt damit etwa um den Faktor 2 unter den Gesamtreisezeiten der Bahn, und auch gegenüber dem Pkw liegt die Gesamtzeit um 40% niedriger.

Diese Ergebnisse behalten auch ihre Gültigkeit für die anderen untersuchten Strecken und Startorte, wie die nachfolgende Zusammenstellung der Nebenlaufzeitanteile an der Gesamtreisezeit zeigt.



**Bild 3-14: Anteile der Nebenläufe an der Gesamtreisezeit für verschiedene Strecken und Verkehrsmittel**

Signifikant sind hier die übereinstimmenden Ergebnisse für Flugreisen, die unabhängig von der Wahl des Zugangsverkehrsmittels und des Startortes einen Anteil der Nebenläufe von durchschnittlich 70% anzeigen. Damit wird der Großteil der Reisezeit bei Flugreisen auf Strecken bis etwa 800 km in der Zu- und Übergangsphase aufgebracht und zeigt an, dass hier das größte Potential für Effizienzsteigerungen im Luftverkehr liegt. Weitere Steigerungen der Fluggeschwindigkeit führen zu keiner nachhaltigen Effizienzsteigerung. Bei

Bahnreisen liegt der Nebenlaufanteil bei rund 20% und damit in ähnlichem Umfang wie die Nebenläufe beim Pkw. Die Detailanalyse der Reisezeitanteile für verschiedene Verkehrssysteme bestätigt, dass mit dem Flugzeug in einem Zeitfenster von 65 Minuten über 80% der Gesamtstrecke bewältigt werden. Bei der Bahn werden in 372 Minuten (6:12 h) 80% der Gesamtstrecke zurückgelegt. Damit benötigt die Bahn etwas weniger als die sechsfache Zeit.

Fasst man die Ergebnisse für die Gesamtstrecke und Gesamtreisezeit zusammen, so ergeben sich folgende mittlere Reisegeschwindigkeiten:

| Fahrzeugkombination              | Kfz   | Bahn/Bahn | Bahn/Pkw | Flz/Bahn | Flz/Pkw |
|----------------------------------|-------|-----------|----------|----------|---------|
| Durchschnittsreisegeschw. [km/h] | 118,5 | 112       | 109,5    | 184      | 175     |

**Tabelle 3-5: Durchschnittsreisegeschwindigkeit auf der Strecke Ro – M – HH**

Die Auswertung der Reisegeschwindigkeit zeigt, dass das Flugzeug trotz der hohen Nebenlaufzeiten die mit Abstand höchsten Durchschnittsgeschwindigkeiten aufweist. Die Tabelle weist für die Bahn die niedrigsten Durchschnittsgeschwindigkeiten aus. Der Pkw liegt in seiner Reisegeschwindigkeit nur etwas über den Werten der Bahn. Hinsichtlich der Transporteffizienz ist aus diesen Ergebnissen abzuleiten, dass im Flugverkehr vor allem die Abläufe im Flughafen noch Potential zur Verbesserung aufweisen. Für Kraftfahrzeuge und insbesondere die Bahn führen vor allem deutliche Geschwindigkeitssteigerungen im Hauptlauf zu einer verbesserten Wettbewerbsfähigkeit.

### 3.7 Umsetzung in den Streckenwirkungsgrad

Um die gewonnenen Streckendaten für die Energiebetrachtungen nutzen zu können, werden diese in dimensionsloser Form benötigt. Hierzu wird der so genannte Umwegfaktor eingesetzt, siehe z.B. [NIED2001].

$$U = \frac{x_{real}}{x_o} \qquad \text{Gl. 3-1}$$

Der Umwegfaktor ist ein Maß für das Abweichen einer realen Strecke von der theoretisch kürzesten Strecke, die durch den Großkreis oder Orthodrome beschrieben wird. Der Bezug auf den Großkreis stellt jedoch nur eine theoretische Referenz dar. Auf der anderen Seite ist die orthodrome Entfernung für alle Verkehrssysteme gleich und damit als Referenzgröße geeignet.

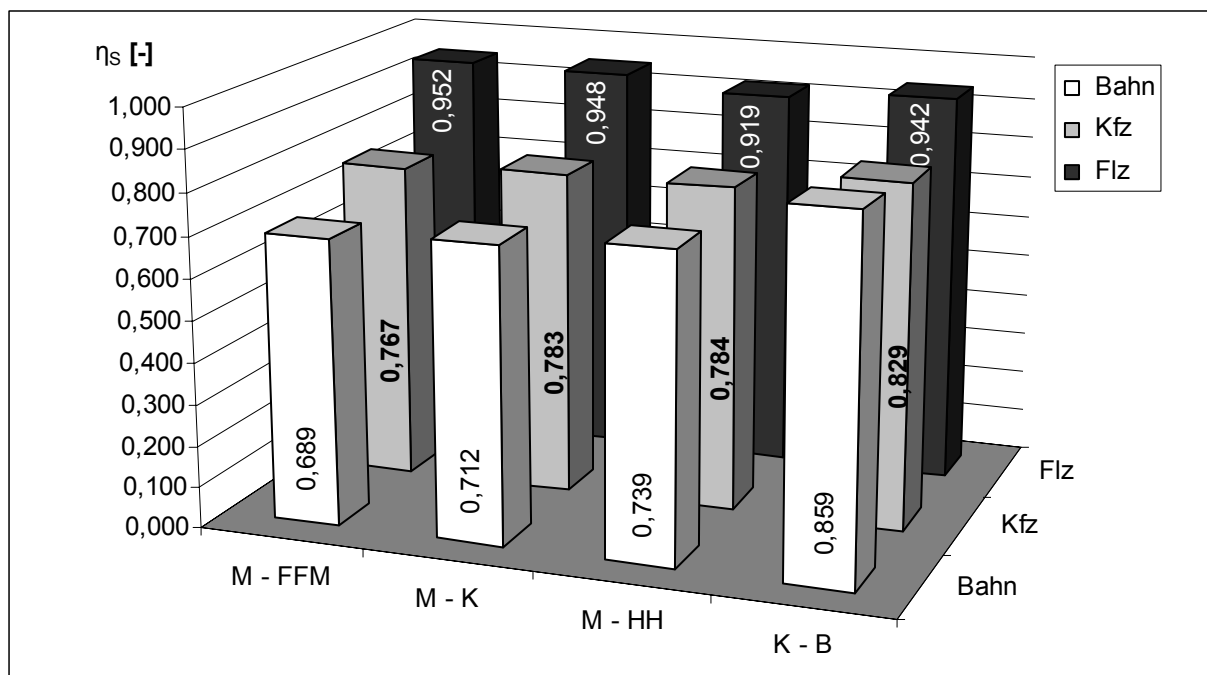
Unter Nutzung der zuvor abgeleiteten realen Streckenlängen für die verschiedenen Referenzstrecken wird der Streckenwirkungsgrad  $\eta_s$  definiert als Reziprokwert des Umwegfaktors, und kann somit wie andere Wirkungsgrade auch nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen.

Die korrespondierenden Großkreisentfernungen, die die Referenzbasis für die Ermittlung der Umwegfaktoren bilden, sind für die jeweiligen Start und Zielorte in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

| [km]           | Großkreisentfernungen |     |             |        |
|----------------|-----------------------|-----|-------------|--------|
|                | DAH                   | RO  | M-Schwabing | Berlin |
| Frankfurt/Main | 290                   | 358 | 303         |        |
| Köln           | 438                   | 508 | 453         | 480    |
| Hamburg        | 591                   | 645 | 606         |        |

**Tabelle 3-6: Großkreisentfernungen für die Referenzstrecken**

Die resultierenden Streckenwirkungsgrade sind in der nachfolgenden Graphik dargestellt:



**Bild 3-15: Streckenwirkungsgrade für die Referenzstrecken**

Die Streckenwirkungsgrade für Flugreisen liegen gegenüber dem in der Literatur häufig verwendeten statistischen Mittelwert von 0,909 für die Referenzstrecken höher, siehe z.B. [BIAL1990]. Für die Bahnstrecken sind im Vergleich zu dem

statistischen Mittelwert von 0,833 überwiegend deutlich geringere Werte festzustellen. Lediglich für den Straßenverkehr liegen die individuellen Wirkungsgrade in der Nähe des statistischen Mittelwerts von 0,769. Die Wahl des Startortes hat keinen signifikanten Einfluss auf den Streckenwirkungsgrad und führt lediglich zu Streuungen von rund 5%.

### **3.8 Zusammenfassung der Transportabläufe**

Es lässt sich ein 5-Phasen-Modell für den Ablauf von Personen- und Gütertransporten ableiten, das für alle Verkehrssysteme anwendbar ist. Die Definition einer Übergangsphase macht dabei deutlich, dass im Gegensatz zu den Kraftfahrzeugen Bahnhof und Flughafen zwei Prozessabschnitte darstellen, in denen keine Transportarbeit erbracht wird, wohl aber erhebliche Transportzeit anfällt.

Die Untersuchung der Streckennetze für Bahn, Flugzeug und Kraftfahrzeug zeigt keine auffällige Begünstigung eines Verkehrssystems hinsichtlich Ausrichtung und Netzdichte.

Für die Vergleichsrechnungen werden die Referenzstrecken München – Hamburg, München – Köln, München – Frankfurt sowie Köln – Berlin gewählt, die die interessierenden Entfernungsbereiche 300, 500 und 800 km sowie die Nord – Süd und Ost – West-Ausrichtung abdecken.

Der Vergleich der realen Streckenlängen zeigt zwischen den verschiedenen Verkehrssystemen Streuungen von bis zu 10% abhängig vom Startort, die keine nachhaltige Beeinflussung der Vergleichsrechnungen nach sich ziehen.

Die Untersuchung des Zeitverhaltens der Referenzstrecken macht deutlich, dass der Luftverkehr 70% seiner Gesamtreisezeit in den Zu- und Übergangsphasen entwickelt, während dies bei Bahn und Pkw nur rund 20% sind. Im Vergleich der Hauptläufe ist ersichtlich, dass Bahn und Pkw etwa die sechsfache Zeit für vergleichbare Streckenabschnitte benötigen wie Flugzeuge.

## 4 Fahrwiderstände verschiedener Verkehrssysteme

In diesem Kapitel werden die Fahrwiderstände und deren wesentliche Einflussgrößen für die verschiedenen Verkehrssysteme untersucht. Hierzu werden zunächst die grundlegenden Zusammenhänge der Fahrwiderstände beschrieben, aus denen sich die bestimmenden Einflussgrößen ableiten lassen. Anschließend werden diese Einflussfaktoren für die verschiedenen Verkehrssysteme analysiert, der heutige Stand dargestellt und die Potentiale vergleichend gegenübergestellt. Damit sollen die spezifischen Fähigkeiten und Grenzen der Verkehrssysteme als Grundlage für die spätere Bewertung aufgezeigt werden.

### 4.1 Grundlagen

Der Energiebedarf, der zur Bewältigung einer Transportaufgabe erforderlich ist, wird durch die Fahrwiderstände bestimmt, die es zu überwinden gilt.

Hierzu besteht der Zusammenhang:

$$E_E = \int_{s_A}^{s_B} F_W \cdot ds \quad \text{Gl. 4-1}$$

Folgende Komponenten liefern Beiträge zum Fahrwiderstand:

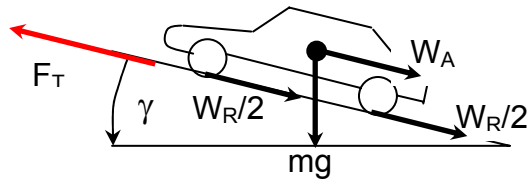
- Aerodynamischer Widerstand  $W_A$
- Rollwiderstand einschließlich Kurvenwiderstand  $W_R$
- Beschleunigungs-/Bremswiderstand  $W_B$
- Steigungswiderstand  $W_S$
- Motor- und Getriebewiderstand  $W_M$

#### 4.1.1 Fahrwiderstand des Kraftfahrzeugs

Bewegt sich ein angetriebenes Kraftfahrzeug auf einer beliebigen gekrümmten und geneigten Fahrbahn, dann ergibt sich die erforderliche Antriebskraft zur Überwindung der Widerstände zu:

$$F_T = W_A + W_R + W_K + W_B + W_S \quad \text{Gl. 4-2}$$





**Bild 4-1: Fahrwiderstand des Kraftfahrzeugs**

Hierin beschreiben  $W_A$  den aerodynamischen Widerstand und  $W_R$  den Rollwiderstand des Kraftfahrzeugs. In dieser Definition ist in der erforderlichen Antriebskraft  $F_T$  auch der Antriebswiderstand  $W_M$  enthalten. Der aerodynamische Widerstand des Kraftfahrzeugs wird wesentlich bestimmt durch die Umströmungsgeschwindigkeit sowie durch die Fahrzeuggröße und die Form- und Oberflächengüte.

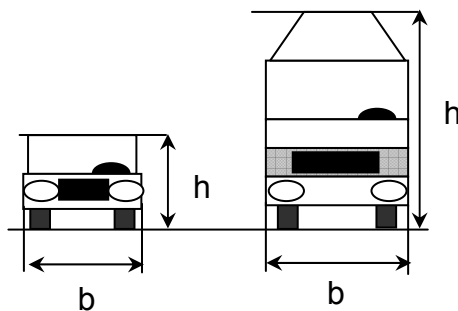
$$W_A = \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot C_w \cdot A_S \quad \text{Gl. 4-3}$$

Die Umströmungsgeschwindigkeit des Fahrzeugs setzt sich aus der Fahrgeschwindigkeit über Grund  $V_G$  und der Windgeschwindigkeit  $V_W$  zusammen:

$$V = V_G + V_W \quad \text{Gl. 4-4}$$

In dieser Arbeit wird für alle zu untersuchenden Transportmittel die Windgeschwindigkeit zu Null gesetzt, um möglichst einheitliche Randbedingungen für den Vergleich zu erlangen.

Als Maß für die Fahrzeuggröße wird die Stirnfläche  $A_S$  des Kraftfahrzeugs herangezogen. Diese liegt für Pkw in der Größenordnung von  $2 \text{ m}^2$ , Lkw erreichen eine Stirnfläche von  $7\text{-}10 \text{ m}^2$ , siehe [STAS1984] und [BOSC1997].



**Bild 4-2: Stirnflächenbestimmung bei Kraftfahrzeugen**

Mit dem Widerstandsbeiwert  $C_W$  wird die aerodynamische Güte des Fahrzeugs beschrieben.

Der Rollwiderstand  $W_R$  resultiert aus der Formänderungsarbeit an Rad und Fahrbahn.

$$W_R = f_R \cdot m \cdot g \quad \text{Gl. 4-5}$$

Bei Kurvenfahrten vergrößert sich der Rollwiderstand durch den Beitrag des Kurvenwiderstands, siehe [BOSC1997].

$$W_K = f_K \cdot m \cdot g \quad \text{Gl. 4-6}$$

Der Beschleunigungswiderstand wird durch

$$W_B = m \cdot \dot{V} \quad \text{Gl. 4-7}$$

beschrieben. Dabei trägt nicht nur die reine Fahrzeugmasse zum Beschleunigungswiderstand bei, sondern auch die rotierenden Massen der Antriebskette (Motor, Getriebe, Räder) liefern einen merklichen Beitrag.

$$W_B = m_{eff} \cdot \dot{V} = m \cdot (1 + e_{Fi}) \cdot \dot{V} \quad \text{Gl. 4-8}$$

Dieser zusätzliche Beschleunigungswiderstand hängt wesentlich vom Übersetzungsverhältnis und damit vom gewählten Gang ab. In [WOLF1997] werden hierzu für  $e_{Fi}$  folgende Werte angegeben:

| Gang    | $e_{Fi}$ |         |           |       |
|---------|----------|---------|-----------|-------|
|         | Pkw      | Lastzug | Sattelzug | Lkw   |
| 1. Gang | 0,250    | 0,17    | 0,145     | 0,4   |
| 2. Gang | 0,150    | 0,06    | 0,055     | 0,15  |
| 3. Gang | 0,100    | 0,04    | 0,03      | 0,085 |
| 4. Gang | 0,075    | 0,03    | 0,025     | 0,06  |
| 5. Gang | 0,060    | 0,017   | 0,008     | 0,045 |

**Tabelle 4-1: Trägheit rotierender Massen für Pkw und Lkw, [WOLF1997]**

Der Steigungswiderstand  $W_S$  ergibt sich aus der Fahrbahneigung und der resultierenden Hangabtriebskraft.

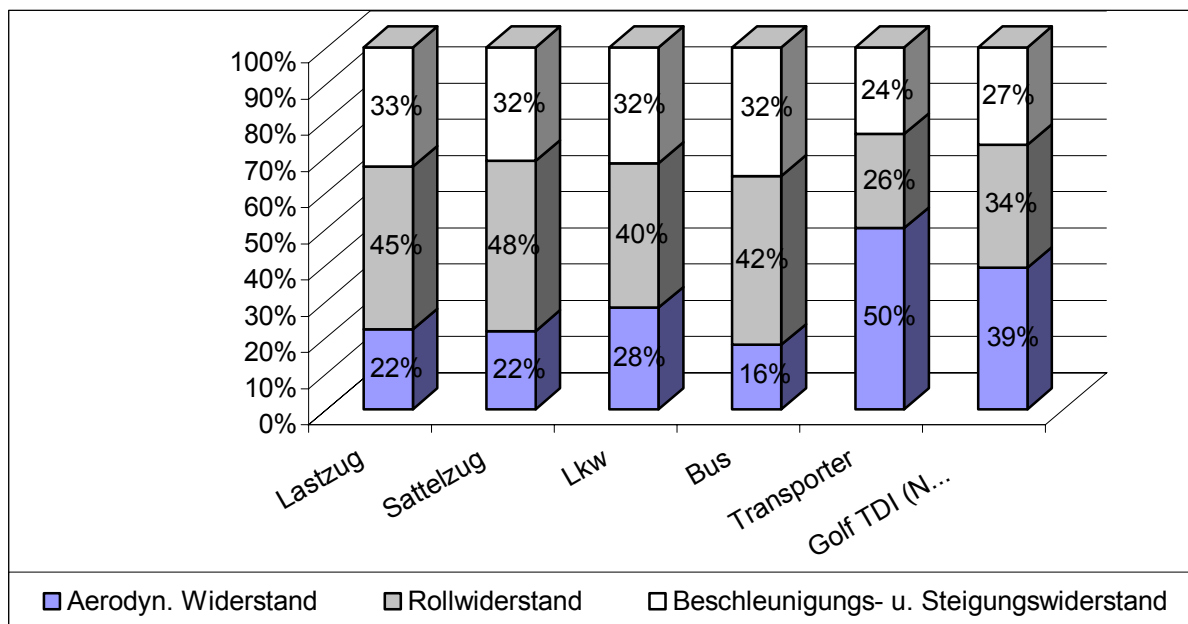
$$W_S = m \cdot g \cdot \sin \gamma \quad \text{Gl. 4-9}$$

Für Berechnungen kann in der Regel bis zu einem Winkel von  $10^\circ$  der Wert des Arguments direkt eingesetzt werden. Damit können alle realen Fahrbahnneigungen bis zu 17% abgedeckt werden.

$$-0,17 \leq \gamma \leq +0,17$$

Der Steigungswiderstand wirkt sich in der Fahrwiderstandsbilanz in der Form aus, dass er zu einer prozentualen Zunahme des Widerstands in der Größe des Fahrzeuggewichts führt.

Betrachtet man die Wirkung der einzelnen Widerstandsanteile, so ist festzustellen, dass mit zunehmender Fahrzeuggröße der aerodynamische Widerstand in Folge geringerer Fahrgeschwindigkeit an Bedeutung verliert. Umgekehrt gewinnen der Rollwiderstand und der Steigungs- bzw. Beschleunigungswiderstand an Einfluss. Auf der Basis des in Kapitel 2.1, Bild 2-1 dargestellten NEFZ-Fahrzyklus (Stadtfahranteile bei  $50 \text{ km/h}$  und auch Fahrzyklen mit  $120 \text{ km/h}$ ) sind nachfolgend die Fahrwiderstandsanteile am Kraftstoffverbrauch eines VW Golf TDI gegenübergestellt den Daten für Nutzfahrzeuge, die für stationäre Fahrten bei einer Geschwindigkeit von rund  $60 \text{ km/h}$  für Lkw und  $100 \text{ km/h}$  für Kleintransporter in der Ebene bestimmt wurden.



**Bild 4-3: Anteile der Fahrwiderstände am Gesamtkraftstoffverbrauch**

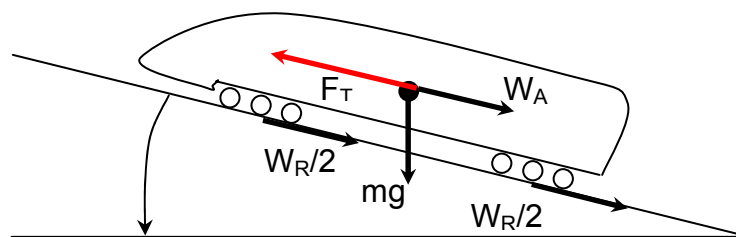
Hinsichtlich der Bedeutung der Widerstandanteile zeigt die Darstellung, dass für Pkw alle drei Komponenten in etwa gleichen Anteilen den Kraftstoffbedarf beeinflussen. Bei Kleintransportern ist die Bedeutung des aerodynamischen Widerstands aufgrund

der Kombination aus hoher Fahrgeschwindigkeit und großer Stirnfläche noch größer. Der Rollwiderstand dominiert bei Lkw mit einem Anteil von rund 45%, während der Steigungs- und Beschleunigungswiderstand rund 30% zum Kraftstoffverbrauch beiträgt.

### 4.1.2 Fahrwiderstand der Bahn

Der Fahrwiderstand der Bahnfahrzeuge setzt sich in ähnlicher Weise zusammen wie der der Kraftfahrzeuge. Durch die Spurführung reduziert sich die Bewegung des Zuges auf einen eindimensionalen translatorischen Vorgang. Gleichzeitig führt die Spurführung der Bahn jedoch zu einer besonderen Bedeutung der Lagerreibung an den Rädern und insbesondere des Kurvenwiderstands.

In dieser Arbeit werden die Fahrwiderstände in Absolutwerten ermittelt, um eine bessere Vergleichbarkeit mit den anderen Verkehrsmitteln zu gewährleisten, [KAPI2002].



**Bild 4-4: Fahrwiderstände an Schienenfahrzeugen**

Entsprechend ergibt sich die erforderliche Antriebskraft zur Überwindung der Fahrwiderstände für Bahnfahrzeuge zu:

$$F_T = W_A + W_R + W_S + W_B + W_K$$

**Gl. 4-10**

Die Fahrwiderstandsanteile aerodynamischer Widerstand  $W_A$  und Rollwiderstand  $W_R$  werden in der Schienenfahrzeugtechnik zum Laufwiderstand zusammengefasst. Dabei enthält der Laufwiderstand zusätzlich den Anteil der Lagerreibung als weitere Komponente des Rollwiderstands. Nach Gleichung 4-11 bestimmt sich der aerodynamische Widerstandsanteil, wobei auch bei der Bahn die Stirnfläche des Zuges als Bezugsfläche herangezogen wird.

Der Rollwiderstand muss über den Laufwiderstand abgeleitet werden, der nach *Strahl* für Lokomotiven wie folgt bestimmt wird, siehe [WEGE2002]:

$$F_L = m \cdot g \cdot (c_0 + c_1 \cdot v + c_2 \cdot v^2) \quad \text{Gl. 4-11}$$

In dieser Gleichung beschreibt der Koeffizient  $c_0$  die geschwindigkeitsunabhängigen Widerstandsanteile Rollreibung Rad-Schiene, Lager- und Federreibung. Mit dem Koeffizienten  $c_1$  werden Luftimpulswiderstandsanteile aus Kühlluft, Klimatisierung und Verbrennungsprozessen berücksichtigt, während über den Koeffizienten  $c_2$  der aerodynamische Widerstand erfasst wird, [MNIC1998]. Eine getrennte Bestimmung der Widerstandsanteile des Laufwiderstands erfolgt in der Praxis nicht, so dass immer der gesamte Laufwiderstand durch Messungen ermittelt wird. Aus derartigen Messergebnissen lässt sich für  $v=0$  zumindest der Koeffizient  $c_0$  für die geschwindigkeitsunabhängige Rollreibung berechnen.

$$W_R = c_0 \cdot m \cdot g \quad \text{Gl. 4-12}$$

Bei Schienenfahrzeugen spielt der Bogen- oder Kurvenwiderstand eine wesentliche Rolle, so dass diese Komponente nach der *Röcklschen* Formel gesondert zu betrachten ist, [KAPI2002]:

$$W_K = \frac{500}{r-30} \cdot \frac{1}{1000} \cdot m \cdot g \quad [\text{N}] \text{ für } r < 300 \text{ m} \quad \text{Gl. 4-13}$$

$$W_K = \frac{650}{r-55} \cdot \frac{1}{1000} \cdot m \cdot g \quad [\text{N}] \text{ für } r > 300 \text{ m} \quad \text{Gl. 4-14}$$

Der Kurvenradius  $r$  ist streckenspezifisch. Im Flachland werden sehr große Kurvenradien von  $r = 1200 \text{ m}$  bevorzugt, um hohe Fahrgeschwindigkeiten auch in den Kurven zu erhalten. Dort, wo die Topographie durch Gebirge, Täler, Flussläufe oder ähnliches den Streckenverlauf einschränkt, werden enge Kurvenradien von  $r = 300 \text{ m}$  realisiert, was gleichzeitig die Fahrgeschwindigkeit deutlich reduziert.

$$300\text{m} \leq r \leq 1200\text{m}$$

Wendet man diese Grenzwerte auf die Gleichungen 4-13 und 4-14 an, so ergeben sich Zusatzwiderstände von  $0,002407 \cdot m \cdot g \quad [\text{N}]$  für  $r=300 \text{ Meter}$  und  $0,0005677 \cdot m \cdot g \quad [\text{N}]$  für  $r=1200 \text{ Meter}$ . Dies bedeutet, dass der Kurvenwiderstand einen zusätzlichen Beitrag von  $0,2-0,05\%$  leistet und damit vernachlässigbar ist.

Für die Berechnung des Steigungswiderstands wird in der Schienenfahrzeugtechnik ebenfalls eine Näherungsformel, nach *Filipovic* herangezogen, [FILI1995].

$$W_S = I \cdot m \cdot g \quad [\text{N}] \quad \text{Gl. 4-15}$$

Diese Gleichung lässt sich mit hinreichender Genauigkeit für Neigungen bis  $10 \%$

anwenden. Da bei der Bahn die maximale Neigung auf 4,0 % ( $I=0,04$ ) begrenzt ist, kann dieser Ansatz für die angestrebten Vergleichsbetrachtungen uneingeschränkt angewendet werden.

$$-0,04 \leq I \leq +0,04$$

Der spezifische Beschleunigungswiderstand errechnet sich zu

$$W_B = (1 + e_{FB}) \cdot a \cdot m \text{ [N]}$$

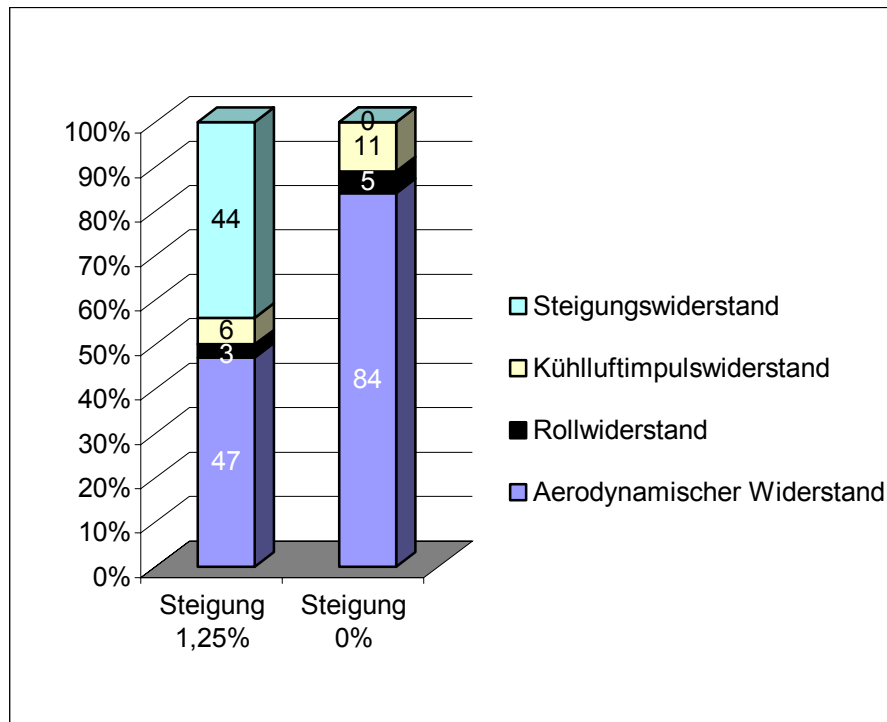
**Gl. 4-16**

Hierin beschreibt  $e_{FB} > 1$  den Anteil rotierender Massen an der Beschleunigung, während mit  $a$  die reale Beschleunigungskraft beschrieben wird. Typische Anfahrbeschleunigungswerte  $a$  zeigt die folgende Tabelle:

| Fahrzeugart       | a          | Gewählter Mittelwert |
|-------------------|------------|----------------------|
| Schwere Güterzüge | 0,02 – 0,1 | 0,06                 |
| Normale Güterzüge | 0,1 – 0,2  | 0,15                 |
| Reisezüge         | 0,3 – 0,4  | 0,35                 |
| Schnelltriebzüge  | 0,4 – 0,7  | 0,55                 |
| ICE 3             | 0,6        | 0,6                  |
| Metrorapid        | 1,3        | 1,3                  |

**Tabelle 4-2: Zusatzbeschleunigungen, nach [WOLF1997]**

Um die Bedeutung der einzelnen Widerstandsanteile der Bahn zu schätzen, ist deren Verteilung in realen Betriebszuständen zu analysieren. Hierzu zeigt die nachfolgende Graphik die Verteilung der Fahrwiderstände beim ICE 3 bei einer Fahrgeschwindigkeit von 300 km/h.



**Bild 4-5: Fahrwiderstandsanteile des ICE 3 bei 300 km/h, aus [MNIC1998]**

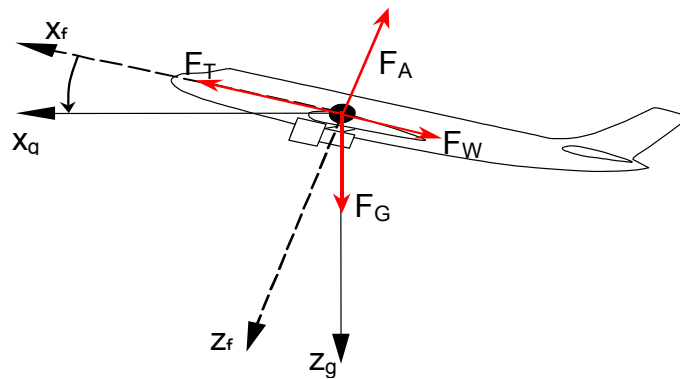
Die Darstellung zeigt die große Bedeutung des aerodynamischen Widerstands am Gesamtfahrwiderstand. Der Rollwiderstand trägt nur mit 3-5% zum Fahrwiderstand bei. Ebenso offensichtlich ist der starke Einfluss des Steigungswiderstands, der etwa zu gleichen Teilen zum Gesamtwiderstand beiträgt wie der aerodynamische Widerstand. Daher sind diese beiden Anteile im weiteren Verlauf eingehender zu betrachten.

#### 4.1.3 Fahrwiderstand des Flugzeugs

Für das Flugzeug lassen sich die Fahrwiderstände entlang einer gekrümmten Bahn in der vertikalen x-z-Ebene über die Summe aller Kräfte in x und z-Richtung bestimmen:

$$m \cdot \dot{V} = -m \cdot g \cdot \sin \gamma - \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot V^2 \cdot C_W + F \cdot \cos(\alpha_0 + \sigma) \quad \text{Gl. 4-17}$$

$$-m \cdot V \dot{\gamma} = m \cdot g \cdot \cos \gamma - \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot V^2 \cdot C_A - F \cdot \sin(\alpha_0 + \sigma) \quad \text{Gl. 4-18}$$



**Bild 4-6: Fahrwiderstände des Flugzeugs im Flug**

Umgestellt ergibt sich zur Überwindung des Fahrwiderstands und unter Vernachlässigung des Schubeinstellwinkels ( $\alpha_0 + \sigma$ ) die erforderliche Antriebskraft:

$$F_T = F = m \cdot g \cdot \sin \gamma + \frac{\rho}{2} \cdot A_F \cdot V^2 \cdot C_W + m \cdot \dot{V} \quad \text{Gl. 4-17}$$

Auch in dieser Gleichung setzt sich der gesamte Fahrwiderstand aus den Anteilen

- Steigungswiderstand,
- Luftwiderstand,
- Beschleunigungswiderstand,

zusammen.

Der aerodynamische Widerstand wird durch

$$W_A = \frac{\rho}{2} \cdot A_F \cdot V^2 \cdot C_W \quad \text{Gl. 4-19}$$

beschrieben. Im Gegensatz zur Aerodynamik von Kraft- und Schienenfahrzeug wird die aerodynamische Widerstandskraft auf die Flügelfläche und nicht auf die Stirnfläche bezogen. Ein wesentlicher Grund für die Wahl dieser Bezugsgröße liegt in der großen Bedeutung der Flügelfläche für den Auftrieb, während bei den Landfahrzeugen die Stirnfläche als wesentliche Einflussgröße für den Widerstand zum Tragen kommt.

Der Steigungswiderstand wird hier durch den Anteil

$$W_S = m \cdot g \cdot \sin \gamma \quad \text{Gl. 4-20}$$

repräsentiert. Mit

$$\dot{H} = -z = -V \cdot \sin \gamma \quad \text{Gl. 4-21}$$

lässt sich der Steigungswiderstand auch in der Form



$$W_s = m \cdot g \cdot \frac{\dot{H}}{V} \quad \text{Gl. 4-22}$$

darstellen, so dass der Steigungswiderstand durch die Steiggeschwindigkeit wesentlich bestimmt wird.

Der Beschleunigungswiderstand wird mit

$$W_B = m \cdot \dot{V} \quad \text{Gl. 4-23}$$

beschrieben.

Diese Beschreibung gilt ausschließlich für den Flugfall und ist für Überschlagsrechnungen ausreichend, da in der Regel die Rollphasen am Boden während Start und Landung beim Flugzeug vernachlässigbar sind gegenüber der Reiseflugphase. Nur im Kurzstreckenverkehr gewinnen die Rollphasen am Boden einen größeren Einfluss und der Rollwiderstand des Fahrwerks gegenüber dem Flugfeld und der Startbahn ist zu berücksichtigen.

$$F_{TFB} = W_{RB} + \mu_R \cdot g \cdot (m_{Bug} + m_{Haupt}) + m \cdot \dot{V} \quad \text{Gl. 4-24}$$

Wie aus Gleichung 4-24 erkennbar, wird am Boden der Steigungswiderstand beim Flugzeug durch den Rollwiderstand, unter der Annahme, dass Flugfeld und Startbahn eine ebene Fläche darstellen, ersetzt.

Die Bedeutung der Widerstandsanteile für die Gesamtbilanz hängt wesentlich vom Flugprofil ab. Im Reiseflug trägt nur der aerodynamische Widerstand zum Fahrwiderstand bei. Der Steigungswiderstand tritt ausschließlich in der Steig- und Sinkphase auf sowie bei einem Wechsel der Flugebene. Der Rollwiderstand kommt naturgemäß am Boden zum Tragen. Entsprechend ist im weiteren Verlauf der aerodynamische Widerstand eingehend zu untersuchen.

#### 4.1.4 Gegenüberstellung der Fahrwiderstände

Stellt man die Fahrwiderstände der untersuchten Transportmittel gegenüber, so zeigt sich ein hohes Maß an Ähnlichkeiten. Beim Flugzeug fehlt in der Widerstandsgleichung für den Flugfall der Rollwiderstand des Fahrwerks, der nur während der Rollphase am Boden zum Tragen kommt.

| Widerstandsart            | Kraftfahrzeug                                  | Bahn  | Flugzeug                                       |
|---------------------------|--|---|--|
| Aero. Widerstand          | $\frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot C_W \cdot A_S$ | $\frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot C_W \cdot A_S$          | $\frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot C_W \cdot A_F$ |
| Rollwiderstand*           | $f_R \cdot m \cdot g$                          | $c_0 \cdot m \cdot g$                                   | $\mu_R \cdot g \cdot (m_{Bug} + m_{Haupt})$    |
| Kurvenwiderstand          | $f_K \cdot m \cdot g$                          | $\frac{650}{r-55} \cdot \frac{1}{1000} \cdot m \cdot g$ | —  |
| Beschleunigungswiderstand | $m \cdot (1 + e_{Fi}) \cdot \dot{V}$           | $(1 + e_{FB}) \cdot a \cdot m$                          | $m \cdot \dot{V}$                              |
| Steigungswiderstand*      | $m \cdot g \cdot \sin \gamma$                  | $I \cdot m \cdot g$                                     | $m \cdot g \cdot \frac{\dot{H}}{V}$            |

\*Flugzeug alternierend: Rollwiderstand am Boden, Steigungswiderstand im Flug

**Tabelle 4-3: Gegenüberstellung der Fahrwiderstände**

Bei der Gegenüberstellung der aerodynamischen Widerstände ist zu beachten, dass sich die Bezugsflächen zwischen Kraft- und Schienenfahrzeug auf der einen und Flugzeug auf der anderen Seite unterscheiden. Die Umströmungsgeschwindigkeit, insbesondere der Anteil der Fahr-/Fluggeschwindigkeit stellt die wesentliche Variable beim aerodynamischen Widerstand dar und hängt vom Verlauf des Transports bzw. der Transportgeschwindigkeit ab.

Der Rollwiderstand ist in allen Fällen geschwindigkeitsunabhängig und wird durch die Masse des Transportmittels bestimmt. Die Masse wiederum hängt von der Transportaufgabe sowie einer möglichen Massenabnahme durch den Kraftstoffverbrauch während des Transports ab.

Der Beschleunigungswiderstand unterscheidet sich bei Kraft- und Schienenfahrzeugen sowie beim Flugzeug. Während bei Kraft- und Schienenfahrzeugen die Beschleunigung zusätzlich durch Anteile aus den rotierenden Massen der Antriebe unterstützt wird, trägt beim Flugzeug lediglich die reine Geschwindigkeitsänderung zur Beschleunigung bei.

Der Steigungswiderstand ist bei allen untersuchten Fahrzeugen auf die gleichen Beschreibungsgrößen und Variablen zurückzuführen. Zu beachten ist lediglich, dass der Steigungswiderstand beim Flugzeug nur während der Flugphase zum Tragen kommt und dann den Rollwiderstand ersetzt.

Aufgrund dieser Gegenüberstellung ergeben sich

- die Fahrzeugmasse
- die Fahr-/Fluggeschwindigkeit
- die Beschleunigung
- der Kurvenradius der Schiene
- die Bahnneigung

als missionsabhängige Variablen. Durch eine geeignete Auslegung der Fahrzeuge lassen sich

- die Eigenmassen der Fahrzeuge
- die aerodynamischen Beiwerte sowie deren Bezugsflächen
- die Rollreibungs- und Kurvenwiderstandsbeiwerte
- die Antriebe

beeinflussen. Daher werden der technische Stand und die Potentiale der Transportsysteme für diese Größen eingehender untersucht.

#### **4.2 Untersuchung der Fahrzeugmasse**

Die Fahrzeugmasse ist die wesentliche Einflussgröße auf die einzelnen Fahrwiderstände. Für den Vergleich der Transporteffizienz ist eine einheitliche und nachvollziehbare Behandlung aller Transportmittel eine wesentliche Voraussetzung. In Anlehnung an die Massennomenklatur der Luftfahrt werden folgende Definitionen verwendet, aus [KOSS1984]:

| <b>Massenbeschreibung</b>                                  | <b>Abkürzung</b> |
|--|------------------|
| Betriebsleermasse (Masse ohne Nutzlast und Kraftstoff)     | $m_{\text{OEM}}$ |
| Kraftstoffnullmasse (Betriebsleermasse + Nutzlast)         | $m_{\text{ZFW}}$ |
| Start- oder Abflugmasse (Kraftstoffnullmasse + Kraftstoff) | $m_{\text{TOW}}$ |
| Nutzmasse  | $m_{\text{N}}$   |
| Kraftstoffmasse  | $m_{\text{Kr}}$  |

**Tabelle 4-4: Massendefinitionen**

Die **Betriebsleermasse** umfasst das gesamte Flugzeuggewicht bestehend aus dem Eigengewicht und der Ausrüstung ohne Nutzmasse und Kraftstoff.

Aus der Betriebsleermasse und der zu transportierenden Nutzmasse ergibt sich die **Kraftstoffnullmasse**.

Wird zu der Kraftstoffnullmasse noch die für den Flug erforderliche Kraftstoffmasse hinzugerechnet so ergibt sich die **Startmasse**.

Beim Flugzeug richtet sich die mitgenommene Kraftstoffmenge nach der Flugstrecke. Heute erfolgt die Auslegung der Flugzeuge hinsichtlich Nutzlast und Tankkapazität nach den Reichweitenkategorien Kurz-, Mittel-, Langstrecke, so dass die Flugzeuge normalerweise nicht nachtanken müssen. Eine Ausnahme bilden Flüge in den pazifischen Raum. Daher wird beim Flugzeug das Verhältnis von Kraftstoff und Nutzlast von Flug zu Flug individuell festgelegt. Kraftfahrzeuge werden dagegen in der Regel vor Beginn einer längeren Reise vollgetankt, so dass hier die maximale Kraftstoffkapazität ausgenutzt wird

Bei Bahnfahrzeugen stellt sich diese Problematik nicht, da bei den elektrisch betriebenen Hochgeschwindigkeitszügen im Fernverkehr kein Kraftstoff während der Fahrt mitgenommen wird.

Die konstruktive Güte eines Transportsystems lässt sich mit dem Verhältnis des Nutzlastanteils am Fahrzeuggesamtgewicht bewerten, da im Idealfall das Fahrzeug masselos sein sollte, so dass ausschließlich die Nutzlast befördert wird. Als Gütekriterium wird hierzu ein **Konstruktionswirkungsgrad** definiert.

Dazu wird die maximale Nutzlast auf das maximale Startgewicht eines Transportmittels bezogen. Dabei setzt sich das Startgewicht zusammen aus dem Betriebsleergewicht, der Nutzlastmasse und der Kraftstoffmasse.

$$\eta_{K_{m_{TOW}}} = \frac{m_{N \max}}{m_{OEW} + m_{N \max} + m_{Kr}} \quad \text{Gl. 4-25}$$

Um den Einfluss der fehlenden Kraftstoffmasse näher zu untersuchen, wird parallel die Nutzlast auch auf die Kraftstoffnullmasse bezogen, die sich aus der Betriebsleermasse und der Nutzlastmasse zusammensetzt.

$$\eta_{K_{m_{ZFV}}} = \frac{m_{N \max}}{m_{OEW} + m_{N \max}} \quad \text{Gl. 4-26}$$

Um auch bei Passagiertransporten eine Nutzlastmasse zu beschreiben, wird ein „Normpassagier“ definiert, der bei allen Betrachtungen zur Ermittlung der maximalen Nutzlast bei Personentransporten angesetzt wird. Dieser Normpassagier weist ein

Gewicht von 90 kg auf, das sich aus 75 kg Körpergewicht und 15 kg Reisegepäck zusammensetzt.

Mit Hilfe dieses „Normpassagiers“ lässt sich bei Passagiertransporten das Verhältnis von Nutzlast zu Gesamtmasse ebenfalls angeben.

Da die Transportmittel nicht immer ihre maximale Transportkapazität im Rahmen einer Mission ausnutzen, ist auch dieser Effekt zu berücksichtigen. Hierzu wird ein **Auslastungswirkungsgrad** oder operativer Wirkungsgrad  $\eta_o$  definiert, der das Verhältnis von tatsächlich transportierter Nutzmasse zur maximal möglichen Nutzmasse beschreibt:

$$\eta_o = \frac{m_{N_{ist}}}{m_{N_{max}}} \quad \text{Gl. 4-27}$$

Entsprechend kann der Auslastungswirkungsgrad Werte zwischen 0 (Leerfahrt) und 1 (maximale Nutzmasse) annehmen. In der Praxis ergeben sich für die verschiedenen Verkehrsmittel zum Teil sehr unterschiedliche Durchschnittswerte, die auch in anderen Untersuchungen mit einer breiten Streuung angesetzt werden, siehe z.B: [TEST1997], [LARS1994] oder [ADV 1995]. Um im Rahmen dieser Studie gleiche Bewertungsbedingungen für alle Transportmittel zu schaffen, werden angelehnt an die streuenden Angaben der Literatur folgende Auslastungen für die Berechnungen aller Verkehrssysteme angesetzt:

| Gering | Mittel | Hoch |
|--------|--------|------|
| 0,2    | 0,55   | 0,90 |

**Tabelle 4-5: Definierte Auslastungsgrade und Passagierzahlen**

Hinter diesen mittleren Auslastungsgraden verbergen sich je nach Verkehrsmittel zum Teil sehr unterschiedliche Passagierzahlen, die zumindest bei der Bewertung des Energiebedarfs in der Zugangsphase von Bedeutung sind.

| Typ          | max Pass. | Auslastungsgrad |      |     |
|--------------|-----------|-----------------|------|-----|
|              |           | 0,2             | 0,55 | 0,9 |
| ICE 1        | 669       | 134             | 368  | 602 |
| ICE 2        | 394       | 79              | 217  | 355 |
| ICE 3        | 415       | 83              | 228  | 374 |
| Metrorapid   | 480       | 96              | 264  | 432 |
| A300-600     | 375       | 75              | 206  | 338 |
| A310         | 280       | 56              | 154  | 252 |
| A319         | 153       | 31              | 84   | 138 |
| A320-200     | 180       | 36              | 99   | 162 |
| A321         | 220       | 44              | 121  | 198 |
| A330         | 440       | 88              | 242  | 396 |
| A340         | 404       | 81              | 222  | 364 |
| Mittelwert:  |           | 73              | 201  | 328 |
| Maximalwert: |           | 134             | 368  | 602 |
| Minimalwert: |           | 31              | 84   | 138 |

**Tabelle 4-6: Reale Passagierzahlen abhängig vom Auslastungsgrad**

Das Auto ist in dieser Tabelle nicht aufgeführt, da sich hier prozentuale Auslastungsgrade nicht so signifikant auswirken wie bei Massentransportmitteln.

#### 4.2.1 Nutzlast-Gesamtgewichtssituation bei Kraftfahrzeugen

##### 4.2.1.1 Pkw

Pkw sind primär für den Personentransport bestimmt. Dementsprechend ist die Auslegung vor allem auf einen hohen Reisekomfort ausgerichtet. In der Regel werden Pkw für die Beförderung von 4-5 Personen ausgelegt. Lediglich die seit einigen Jahren angebotenen Vans und Kleintransporter können bis zu 9 Personen befördern. Der Transport von Gütern stellt bei Pkws eine untergeordnete Aufgabe dar.

In dieser Arbeit sind verschiedene Pkw unterschiedlicher Fabrikate und Klassen hinsichtlich des Nutzlast-/Gesamtgewichtverhältnisses ausgewertet worden. Die Klasseneinteilung erfolgte dabei nach dem zulässigen Gesamtgewicht. Es wird nach Kleinwagen <1500 kg, Mittelklasse <2000kg und Oberklasse >2000kg unterschieden. Die resultierenden Konstruktionswirkungsgrade basieren auf der maximalen Nutzmasse, welche aus der maximalen Passagierzahl abgeleitet ist.

|                | Kleinwagen | Mittelklasse | Oberklasse | Vans   |
|----------------|------------|--------------|------------|--------|
| $\eta_{mN/mG}$ | 0,3323     | 0,2734       | 0,2462     | 0,3206 |
| $\eta_{mP/mG}$ | 0,2825     | 0,2382       | 0,2133     | 0,2919 |
| Differenz:     | 0,0498     | 0,0352       | 0,0349     | 0,0287 |
| Abw. [%]       | 15%        | 13%          | 14%        | 9%     |

**Tabelle 4-7: Mittlere Nutzlast/Gesamtgewichtsverhältnisse verschiedener Pkw-Klassen**

Für Kleinwagen bis 1500kg Gesamtgewicht wurde ein mittleres Nutzlast-/Gesamtgewichtsverhältnis von 0,3323 ermittelt. Damit kann ein Drittel der bewegten Masse als wirtschaftliche Transportmasse angesehen werden. Zwei Drittel entfallen auf das Transportvehikel. Dieser Wert reduziert sich auf 28%, wenn als maximale Nutzlast lediglich der „Normpassagier“ berücksichtigt wird. Für diese Berechnung wurde die maximal zulässige Insassenzahl für jeden Typ zu Grunde gelegt.

Die Differenz an verfügbarer Nutzlast wird bei den Pkw für Komfortausstattungen und Materialtransport zur Verfügung gestellt. Ein ähnliches Bild stellt sich für die Mittelklassefahrzeuge dar. Hier stehen 27% der Gesamtmasse als Nutzlast zur Verfügung. Bei der Betrachtung des „Normpassagiers“ reduziert sich der Wert auf knapp 24%. Die Oberklasse, die Fahrzeuge über 2000 kg Gesamtgewicht beinhaltet, liegt bei 24,6% bzw. 21%. Diese Werte zeigen bereits, dass bei Pkw dieser Klasse der Komfort und die Ausstattungsmerkmale eine wesentliche Rolle bei der Auslegung spielen. Diese Elemente tragen sichtbar zum Gesamtgewicht bei. Bei den Vans liegen die Anteile der Nutzmassen bei 32% bzw. 29% und damit in ähnlicher Größenordnung wie bei den Kleinwagen. Auch die Vans werden wesentlich auf einen hohen wirtschaftlichen Nutzen, d.h. die Beförderung von großen Massen oder vielen Personen ausgelegt. Bezieht man die Nutzlast auf die Kraftstoffnullmasse, dann erhöhen sich die Konstruktionswirkungsgrade durchgängig um rund 1%.

|                          | Kleinwagen | Mittelklasse | Oberklasse | Vans   |
|--------------------------|------------|--------------|------------|--------|
| $\eta_{\text{KmZFW}}$    | 0,3410     | 0,2811       | 0,2531     | 0,3282 |
| $\eta_{\text{KmZFWPAX}}$ | 0,2904     | 0,2453       | 0,2175     | 0,2992 |
| Differenz:               | 0,0505     | 0,0358       | 0,0356     | 0,0291 |
| Abw. [%]                 | 15%        | 13%          | 14%        | 9%     |

**Tabelle 4-8: Mittlere Nutzlast/Kraftstoffnullmassenverhältnisse verschiedener Pkw-Klassen**

Im Vergleich mit dem auf die Startmasse bezogenen Konstruktionswirkungsgrad wird an dieser Auswertung deutlich, dass bei Pkw die Wahl der Bezugsgröße und die Kraftstoffmasse keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse haben, da die Abweichung kleiner als 1% ist.

#### 4.2.1.2 Lkw

Lastkraftwagen werden ausschließlich für den Transport von Gütern eingesetzt. Abgesehen von den Sonderfahrzeugen wie Baufahrzeuge oder Schwerlasttransporte kommen im Speditionswesen überwiegend Sattel- und Gliederzüge sowie Einzelfahrzeuge mit verschiedenen Aufbauten zum Einsatz. Diese Fahrzeuge werden in der Regel kundenspezifisch mit den entsprechenden Aufbauten bestückt, wobei die gesetzlich vorgegebenen Grenzen hinsichtlich Abmaßen und Gesamtgewicht fast immer vollständig ausgenutzt werden. Die Ermittlung der möglichen maximalen Nutzlast basiert auf dem maximal zulässigen Gesamtgewicht, das nicht überschritten werden darf und bei 38t bzw. 40t liegt. Von dieser Obergrenze sind das Eigengewicht des Fahrzeugs inkl. des Aufbaus sowie der Tankvorrat abzuziehen.

In der folgenden Tabelle sind typische Nutzlast-/Gesamtgewichtsverhältnisse für verschiedene Lkw-Varianten zusammengestellt:

|                       | Sattelzug b. 300 kW | Sattelzug >300 kW | Gliederzug 38t | Gliederzug 40t |
|-----------------------|---------------------|-------------------|----------------|----------------|
| $\eta_{\text{KmTOW}}$ | 0,6915              | 0,5800            | 0,5947         | 0,6221         |
| $\eta_{\text{KmZFW}}$ | 0,6957              | 0,5873            | 0,5995         | 0,6275         |

**Tabelle 4-9: Nutzlast-/Gesamtgewichtsverhältnisse verschiedener Lkw Konfigurationen**



Die Tabelle zeigt einen sehr hohen Konstruktionswirkungsgrad  $0,6915$  für Sattelzüge mit einer installierten Motorleistung von bis zu  $300\text{ kW}$ . Für Fahrzeuge mit einer installierten Leistung über  $300\text{ kW}$  reduziert sich der Wirkungsgrad auf  $0,5800$ , d.h. das Nutzlast-/Gesamtgewichtsverhältnis nimmt um rund  $16\%$  ab. Hieran wird unmittelbar der Preis für mehr installierte Leistung deutlich, die zu einem höheren Motorengewicht und einem größeren Tankvolumen infolge eines höheren Verbrauchs führen. Bei Gliederzügen lassen sich Werte von  $0,5947$  bzw.  $0,6221$  für den Konstruktionswirkungsgrad ermitteln, die ebenfalls deutlich unter dem Wert für den Sattelzug mit einer Motorleistung bis  $300\text{ kW}$  liegen. Auch hier tragen erhöhte Motorleistung und ein größeres Tankvolumen zu einer Reduktion der Nutzlastkapazität bei.

Das Verhältnis der Nutzlast zum Kraftstoffnullgewicht der verschiedenen Lkw-Konfigurationen liegt nur geringfügig besser als das Verhältnis Nutzlast zu Gesamtgewicht. Dieses Ergebnis macht deutlich, dass der Anteil der beförderten Kraftstoffmasse am Gesamtgewicht mit  $1 - 1,25\%$  sehr gering ist.

#### 4.2.2 Massenbetrachtungen bei der Bahn

##### 4.2.2.1 Gütertransport

Im Gegensatz zum Flugzeug und zum Kraftfahrzeug ist das maximal zulässige Gesamtgewicht der Bahn abhängig von der gewählten Strecke. Hierzu sind im Lastgrenzenraster Streckenklassen festgelegt, für die die maximal zulässige Achsfahrmasse und die maximale Meterlast definiert sind. Dabei resultiert die Achsfahrmasse aus dem realen Gesamtgewicht des Waggons geteilt durch die Anzahl seiner Achsen. In den Streckenklassen werden die Qualität der Strecke und die daraus resultierende maximale Fahrgeschwindigkeit festgelegt.

| Streckenklasse        | A               | B               | C              |
|-----------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Zul. Höchstgeschw.    | <b>120 km/h</b> | <b>100 km/h</b> | <b>80 km/h</b> |
| Eigengewicht          | 11500 kg        | 11500 kg        | 11500 kg       |
| Zul. Gesamtgewicht    | 20500 kg        | 24500 kg        | 28500 kg       |
| $\eta_{\text{KmZFW}}$ | 0,9896          | 0,9913          | 0,9930         |

**Tabelle 4-10: Festlegung des zul. Gesamtgewichts am Beispiel des Containertragwagens Lgjs 573, aus [OBER1994a]**

Nach dieser Klassifikation werden je nach Fahrgeschwindigkeit für alle Güterwagen die zulässigen Gesamtgewichte festgelegt. Neben der Zuordnung zu den Streckenklassen kennt die Deutsche Bahn auch eine Einteilung nach der maximalen Höchstgeschwindigkeit. Hier gibt es die Kategorien *80 km/h*, *100 km/h*, *120 km/h*, die inzwischen im internationalen Lastgrenzenraster aufgegangen ist.

In der untersten Zeile dieser Tabelle ist das Verhältnis von Nutzlast zu Gesamtgewicht für diesen Wagentyp dargestellt. Das Gesamtgewicht entspricht hier dem Kraftstoffleergewicht.

Mit diesem Wagentyp wird zwischen *44%* und knapp *60%* wirtschaftliche Transportleistung erbracht. Das Eigengewicht des Wagens trägt dagegen nicht zur Transportleistung bei, da es keine Nutzlast darstellt.

Ein reales Bild über die Transportleistung, die mit einem Containerzug erbracht werden kann, erhält man aus der Untersuchung eines kompletten Zuges. Für diese Untersuchung wird ein Ganzzug bestehend aus 40 Wagen zu Grunde gelegt mit einer BR 151 als Zugmaschine. In der Regel besteht ein solcher Ganzzug aus verschiedenen Containertragwagen. In [OBER1994a] werden allein 14 verschiedene Tragwagen und 5 Drehgestellwagentypen angegeben, die bei der Deutschen Bahn AG eingestellt sind. Zur Vereinfachung wird nur der in Tabelle 4-10 beschriebene Wagen angesetzt. Die Varianz des Eigengewichts zwischen den verschiedenen Wagentypen liegt bei *2,8%* zwischen den verschiedenen Tragwagen, während das Gesamtgewicht mit rund *1,2%* bezogen auf ein Durchschnittsgewicht von *28750 kg* streut. Somit kann der gewählte Beispielwagen als repräsentativ angesehen werden. Verkürzt man den Zug auf 20 Wagen, reduziert sich der Konstruktionswirkungsgrad auf *0,4600*, während eine Erhöhung der Zuglänge zu einem etwas besseren Wirkungsgrad von *0,7100* führt.

Die theoretische Verlängerung der Zuglänge auf bis zu 100 Wagen führt nicht zu einer proportionalen Erhöhung des Nutzmassen-Kraftstoffnullmassenverhältnisses. Vielmehr zeigt eine Zuglänge von 40 Wagen mit einem Nutzmassen-Kraftstoffnullmassenverhältnis von *0,6290* den Bereich des stärksten Anstiegs abhängig von der Zuglänge an, so dass hier von einem Optimalbereich hinsichtlich des Wirkungsgrades gesprochen werden kann.

#### 4.2.2.2 Personentransport

Bei den Reisezugwagen werden in der Regel nur das Eigengewicht und die Anzahl der Sitzplätze angegeben.

|                       |          |
|-----------------------|----------|
| Eigengewicht [kg]     | 39000    |
| Anzahl d. Sitzplätze  | 80       |
| $m_{Nmax}$ [kg]       | 7200     |
| $m_{ZFW}$ [kg]        | 46200    |
| $\eta_{kmZFW}$        | 0,1558   |
| Höchstgeschwindigkeit | 200 km/h |

**Tabelle 4-11: Gewichtsangaben am Beispiel des IC-Wagens Bpmz 291/292, [OBER1994b]**

Unter Anwendung des „Normpassagiers“ ergibt sich für den Reisezugwagen ein Wert von  $0,1558$  für den Konstruktionswirkungsgrad bezogen auf das Kraftstoffleergewicht. Ein IC-Zugverband besteht aus mehreren, bis zu 12 verschiedenen Wagen. Um auf eine realistische Darstellung zu kommen, muss ein realer Zugverband ausgewertet werden. Hierzu ist auch die Lokomotive zu berücksichtigen, die allerdings nur ihr Eigengewicht einbringt. Eine solche Auswertung ergibt ein Nutzlast zu Gesamtgewichtsverhältnis von  $0,1139$  für einen IC-Zug bestehend aus einer Lokomotive der BR 120.1 und 12 Reisezugwagen 1. und 2. Klasse sowie einem Speisewagen.

Dies bedeutet, dass nur 11,4% der gesamten bewegten Masse tatsächlich in die wirtschaftliche Transportleistung eingehen. Hingegen werden 88,6% der bewegten Gesamtmasse ohne eine wirtschaftliche Leistung transportiert.

Entsprechende Auswertungen für die ICE-Züge der deutschen Bahn AG sowie für den TGV zeigen noch geringere Werte, wie in Tabelle 4-12 zusammengetragen.

| Güterzug | IC-Zug | ICE 1  | ICE 2  | ICE 3  | TGV-PSE | Metrorapid |
|----------|--------|--------|--------|--------|---------|------------|
| 0,6290   | 0,1139 | 0,0742 | 0,0791 | 0,0837 | 0,0792  | 0,1641     |

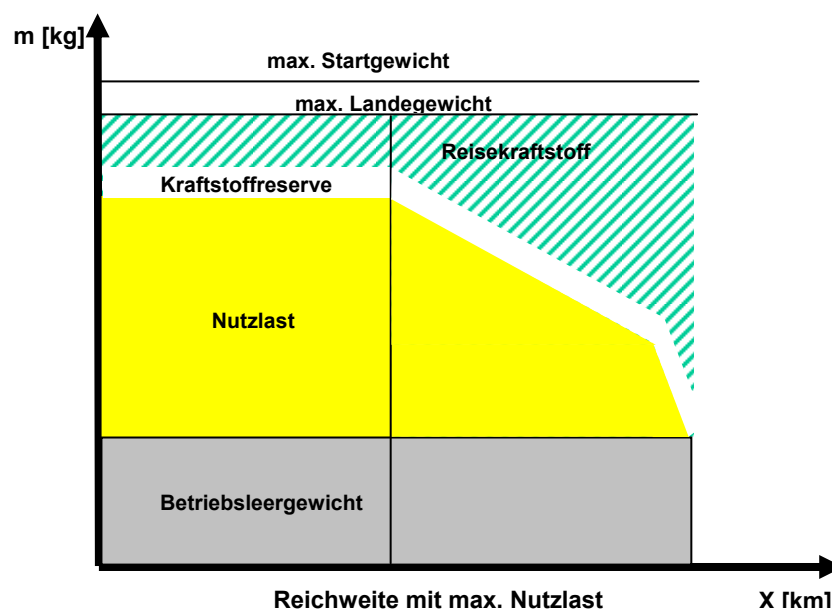
**Tabelle 4-12: Nutzlast/Gesamtgewichtverhältnisse verschiedener Zugverbände**

Bei den ICE-Zügen und dem TGV beträgt der Anteil der Nutzlast am Gesamtgewicht 7,4 – 8,4%. Dabei ist eine kontinuierliche Verbesserung des Nutzlastanteils mit jeder neuen Generation von Triebzügen (z.B. ICE, Metrorapid) zu beobachten. Insbesondere der Metrorapid zeigt hier mit einem Konstruktionswirkungsgrad von 16,4% eine deutliche Verbesserung.

Auffallend ist, dass der Zugverband des IC mit 11,4% ein besseres Nutzlast/Gesamtgewichtsverhältnis aufweist als die Triebwagenzüge. Hier wirkt sich die höhere Anzahl der verfügbaren Sitzplätze in den Reisezugwagen aus. So bietet der 2.Klasse-Reisezugwagen des IC 80 Sitzplätze, während im entsprechenden ICE-Wagen nur 60 Plätze in der 2.Klasse angeboten werden. Dieses reduzierte Sitzplatzangebot resultiert aus dem Bestreben, den höheren Komfortansprüchen der Reisenden zu entsprechen.

### 4.2.3 Das Nutzlast-/Startgewichtsverhältnis des Flugzeugs

Eine gleichgeartete Untersuchung des Konstruktionswirkungsgrades des Flugzeugs legt das maximale Abfluggewicht eines Flugzeugs zu Grunde. Das maximale Abfluggewicht ist vor allem abhängig von der Reichweite, die erzielt werden muss, um den Zielflughafen zu erreichen. Aus der Reichweite leiten sich die mitzuführen Kraftstoffmenge sowie die damit verbleibende maximale Nutzlast ab.



**Bild 4-7: Nutzlast – Reichweitendiagramm für Flugzeuge**

Um einen Vergleich mit Bahn und Kraftfahrzeug zu ermöglichen, wird im Rahmen dieser Studie die maximal mögliche Nutzlast angesetzt, so dass die Reichweite entsprechend angepasst ist. Im Gegensatz zu allen übrigen hier betrachteten Transportmitteln erfolgt mit dem Flugzeug immer ein kombinierter Transport von Passagieren und Gütern. Um auch hier eine Vergleichbarkeit zu erreichen, werden verschiedene Flugzeugtypen sowohl anhand der maximalen Nutzlast, die als reine Fracht angesehen wird, als auch unter alleiniger Betrachtung der maximalen Passagierzahlen untersucht.

Entsprechend wird für die weiteren Betrachtungen die erzielbare Reichweite bei maximaler Nutzlast berücksichtigt. Auf dieser Basis wurden verschiedene Flugzeugtypen hinsichtlich des Verhältnisses von Nutzlast zu Startmasse ausgewertet und in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

| Flugzeug                        | A300-600R | A310-300 | A319-100 | A320-200 | A321-200 | A330-300 | A340-200 |
|---------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $m_N/m_{TOW}$                   | 0,2411    | 0,2220   | 0,2717   | 0,2611   | 0,2560   | 0,2230   | 0,1922   |
| $m_{Pax}/m_{TOW}$               | 0,2007    | 0,1776   | 0,1932   | 0,2298   | 0,2009   | 0,1902   | 0,1490   |
| Mittelwert<br>$m_{Pax}/m_{TOW}$ | 0,1891    |          | 0,2080   |          |          | 0,1696   |          |

**Tabelle 4-13: Nutzlast/Startgewichtsverhältnisse verschiedener Verkehrsflugzeuge**

Die Tabelle zeigt als Konstruktionswirkungsgrade den maximalen Nutzlastanteil am Startgewicht sowie den maximalen Nutzlastanteil abgeleitet aus der maximalen Passagierzahl. Für die Betrachtung der maximalen Nutzlast sind zwei Wertebereiche für den Konstruktionswirkungsgrad feststellbar. Mittel- und Langstreckenflugzeuge erreichen hier Wirkungsgrade bis etwa 0,22 (lediglich der A300 liegt mit 0,24 hier besser), während Kurzstreckenflugzeuge Werte um 0,26 und mehr erzielen. Dabei macht sich die Auslegung auf eine beschränkte Reichweite und hohe Kapazitäten bemerkbar, während Mittel- und Langstreckenflugzeuge auf sehr variable größere Reichweiten ausgelegt werden, mit entsprechend notwendigen Tankkapazitäten, die die Nutzlastkapazitäten begrenzen. Betrachtet man die maximale Passagier Nutzlast als Vergleichsgröße, fallen der A320 mit einem hohen Konstruktionswirkungsgrad und der A340 mit einem sehr geringen Wert auf. Diese Ergebnisse untermauern die

konsequente Auslegung auf kurze Entfernung und hohe Passagierzahl beim A320 sowie große Entfernung und angepasste Passagierzahl beim A340. Alle übrigen Flugzeuge liegen bei Konstruktionswirkungsgraden um 0,2, was auch andeutet, dass hier kein bevorzugtes Auslegungsziel erkennbar ist, bzw. diese Flugzeugmuster als Derivate der vorgenannten Muster entstanden sind.

Ähnlich wie bei der Bahn sind bei Flugzeugen für den reinen Frachttransport höhere Nutzlast/Gesamtgewichtsverhältnisse möglich als beim Personentransport.

Für den Vergleich mit der Bahn wird für die Flugzeuge auch die Kraftstoffnullmasse als Bezugsgröße herangezogen. Die resultierenden Konstruktionswirkungsgrade sind nachfolgend dargestellt:

| Flugzeug                        | A300-600R | A310-300 | A319-100 | A320-200 | A321-200 | A330-300 | A340-200 |
|---------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $m_N/m_{ZFW}$                   | 0,3600    | 0,3318   | 0,3410   | 0,3454   | 0,3469   | 0,3310   | 0,3404   |
| $m_{NPax}/m_{ZFW}$              | 0,3078    | 0,2731   | 0,2493   | 0,3082   | 0,2796   | 0,2882   | 0,2753   |
| Mittelwert<br>$m_{Pax}/m_{ZFW}$ | 0,2904    |          | 0,2790   |          |          | 0,2817   |          |

**Tabelle 4-14: Konstruktionswirkungsgrade von Flugzeugen bezogen auf die Kraftstoffnullmasse**

Hier zeigt sich, dass sich durch die fehlende Kraftstoffmasse deutlich günstigere Konstruktionswirkungsgrade einstellen, was auf den erheblichen Einfluss des Kraftstoffs auf die wirtschaftliche Transportleistung des Flugzeugs hinweist. Ebenfalls ist zu beobachten, dass die Unterschiede zwischen den Reichweitenklassen nahezu verschwinden. Für die Langstreckentypen A330/340 wird fast eine Verdopplung des Verhältnisses von Nutzlast zu Kraftstoffnullmasse erreicht. Bei den Kurz- und Mittelstreckentypen erhöht sich das Verhältnis um rund 50%.

Für die Betrachtung der maximalen Passagiermasse bezogen auf die Kraftstoffnullmasse ergibt sich ein sehr ähnliches Bild. Verglichen mit den Verhältnissen bei Bezug auf die maximale Abflugmasse, führt die Kraftstoffnullmasse als Bezugsgröße zu einer Erhöhung des Konstruktionswirkungsgrads um 50-60%.

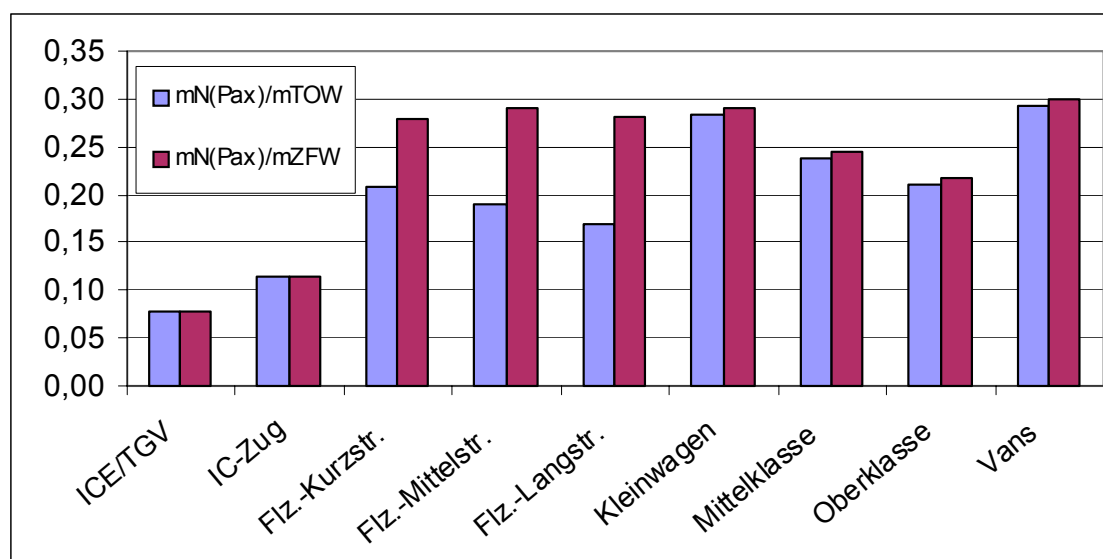
Im realen Betrieb ist weiter zu beachten, dass durch die merkliche Kraftstoffmassenabnahme im Flug der Konstruktionswirkungsgrad des Flugzeugs stetig ansteigt.

#### 4.2.4 Zusammenfassung und Vergleich der Konstruktionswirkungsgrade

Die Untersuchung der Konstruktionswirkungsgrade der verschiedenen Verkehrssysteme hat gezeigt, dass für Gütertransportsysteme der Wirkungsgrad deutlich über dem der Personentransportmittel liegt.

##### 4.2.4.1 Personentransporte

Die folgende Tabelle zeigt die Konstruktionswirkungsgrade für verschiedene Personentransportsysteme verdichtet für einzelne Fahrzeugklassen.



**Bild 4-8: Gegenüberstellung der Konstruktionswirkungsgrade für Personentransportsysteme**

In der Gegenüberstellung lassen sich drei Wertebereiche erkennen. Für die Bahnkonfigurationen ergibt sich ein Nutzlastanteil zwischen 8% und 11% an der Startmasse, die bei der Bahn auch der Kraftstoffnullmasse entspricht. Beim Flugzeug liegt der Nutzlastanteil bei rund 18% bis 21% der Startmasse. Ohne Berücksichtigung der Oberklasse liegt bei den Pkw der Nutzlastanteil bei 24-29% der Startmasse. Die Oberklasse weist einen Nutzlastanteil von rund 21% auf.

Hieraus lässt sich ableiten, dass der Nutzlastanteil von der Bahn über das Flugzeug zum Pkw im Verhältnis 1 : 1,9 : 2,6 ansteigt. Die Bahn transportiert im Personenverkehr nur rund 10% wirtschaftliche Masse. Die übrigen 90% der bewegten Masse repräsentieren das Eigengewicht des Zuges.

Hier liegt ein wesentliches Verbesserungspotential, um die Transporteffizienz und Wirtschaftlichkeit der Bahn zu erhöhen.

Beim Flugzeug ist eine günstigere Situation festzustellen, da knapp 20% der transportierten Masse Nutzlast darstellen und zu einer wirtschaftlichen Transportleistung führen. Hier machen sich die jahrzehntelangen Bemühungen im Leichtbau bezahlt.

Bei den Pkw zeigt sich nochmals eine Verbesserung des Nutzlastanteils auf rund 26%, die derzeit den günstigsten Fall darstellen. Die strukturellen Gewichtersparnisse, die bei den Pkw durch Einsatz des konstruktiven Leichtbaus erreicht wurden, sind sehr häufig durch Sicherheitselemente wie Airbags oder durch Komfortausstattungen wie Klimaanlage aufgezehrt worden.

Betrachtet man im zweiten Schritt die Nutzlast bezogen auf die Kraftstoffnullmasse in Bild 4-8, so zeigt sich ein verändertes Bild. Im Gegensatz zur vorherigen Darstellung wird hier die Nutzlast auf das Gesamtgewicht ohne die Kraftstoffmasse bezogen, wie es für die Bahn typisch ist.

Bei dieser Auswertung bleibt die Bahn bei einem Nutzlastanteil von rund 10% an der bewegten Masse, während Flugzeug und Pkw bei 25-30% im Mittel liegen. Hieraus lässt sich erkennen, dass der mitgeführte Kraftstoff mit rund 2-4% bei den Pkw keinen wesentlichen Einfluss auf den Konstruktionswirkungsgrad hat.

Im Gegensatz dazu verbessert sich das Flugzeug deutlich und erreicht vergleichbare Werte wie der Pkw. Beim Flugzeug hat daher die mitgeführte Kraftstoffmasse einen deutlichen Einfluss auf die wirtschaftliche Transportleistung und die stetige Abnahme der Kraftstoffmenge verbessert den Konstruktionswirkungsgrad zum Ende der Mission.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei Personentransportsystemen ein Konstruktionswirkungsgrad von maximal 26% erreicht wird. Damit werden im Rahmen einer Transportmission rund 75% unwirtschaftliche Eigenmasse des Transportmittels bewegt. Hier ist die Bahn besonders benachteiligt, da sie zur Umsetzung ihres Antriebsmoments auf ein hohes Eigengewicht angewiesen ist. Der Trend zum Einsatz von Einzelachsantrieben und der verstärkte Einsatz von Leichtbaustrukturen bieten der Bahn das Potential, ihre Position deutlich zu verbessern.

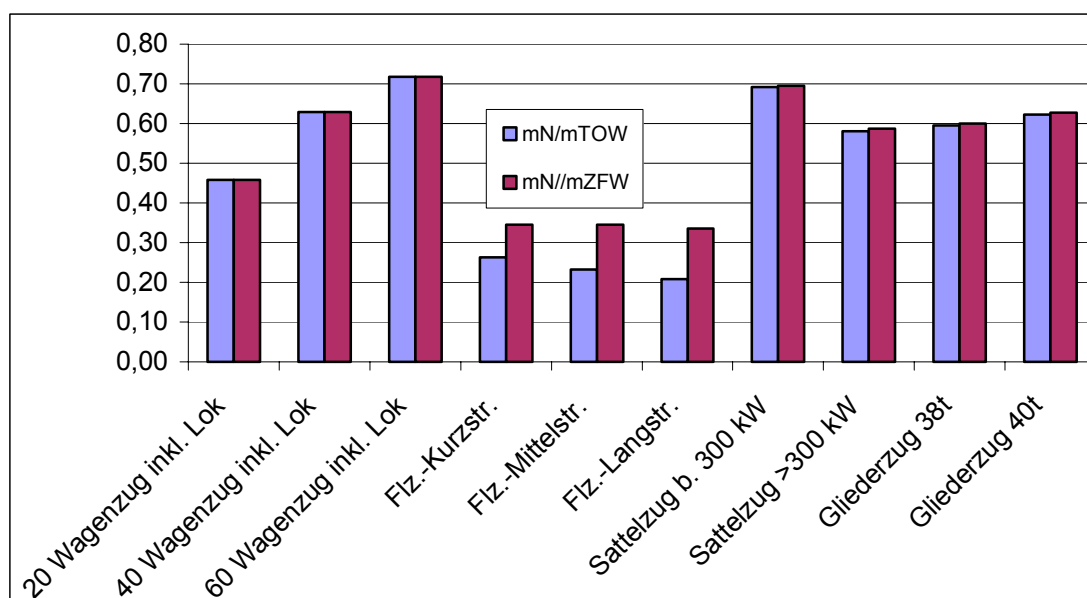
Für alle Verkehrsmittel gilt bei Personentransporten, dass Sicherheits- und Komfortforderungen eine deutliche Verbesserung des Konstruktionswirkungsgrads einschränken.



Zuletzt wird durch die Verwendung der zwei unterschiedlichen Kenngrößen deutlich, dass allein die Wahl der Bezugsgröße ( $m_{TOW}$  oder  $m_{ZFW}$ ) das Ergebnis nachhaltig beeinflusst und so einzelne Transportsysteme besonders positiv oder negativ dargestellt werden können.

#### 4.2.4.2 Gütertransporte

Bei Gütertransporten gelten andere Randbedingungen für die einzelnen Transportsysteme als bei Personentransporten. Vor allem Komfort- und Sicherheitssysteme wie Airbags- oder Klimaanlage können bei Gütertransporten entfallen. Das nachfolgende Diagramm zeigt die typischen Konstruktionswirkungsgrade für Gütertransporte mit Bahn, Flugzeug und Lkw.



**Bild 4-9: Gegenüberstellung der Konstruktionswirkungsgrade für Gütertransporte**

Die Gegenüberstellung zeigt einen mittleren Konstruktionswirkungsgrad von knapp 63% für die Bahn. Mit Kurzstreckenflugzeugen lassen sich 24-27% erreichen. Bei den Lkw bringen Sattelzüge mit einer Antriebsleistung bis 300 kW einen Wirkungsgrad von 69%, während die Übrigen im Bereich von 58-62% liegen.

Ähnlich wie bei den Personentransporten führt die Verwendung der Kraftstoffnullmasse zu günstigeren Wirkungsgraden beim Flugzeug. Allerdings fällt die Verbesserung nur gering aus, so dass das Flugzeug in diesem Punkt nicht zu einem Konkurrenten für Bahn und Lkw aufsteigen kann.

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass im Gütertransport die Bahn deutliche Vorteile gegenüber dem Flugzeug aufweist, was das Nutzlast-/Gesamtgewichtsverhältnis angeht. Auch die Lkw haben hier einen deutlichen Vorsprung.

Die Überlegenheit von Bahn und Lkw gegenüber dem Flugzeug beim Verhältnis von Nutzlast zu Gesamtgewicht resultiert vor allem daraus, dass die untersuchten Flugzeugtypen primär für den Passagier- bzw. kombinierten Passagier- und Frachtverkehr ausgerüstet sind. Daher weisen sie alle notwendigen Komfort- und Sicherheitseinrichtungen wie Klimaanlage, Druckkabine und Polsterungen sowie Küchen auf. Diese Ausrüstungsgegenstände werden während des Flugs als unwirtschaftliche Massen befördert. Bahn und Lkw hingegen sind auf den Gütertransport hin optimiert und nur mit den unbedingt notwendigen Ausrüstungsgegenständen bestückt. Während beim Lkw das maximale Nutzlast-/Gesamtgewichtsverhältnis beschränkt ist durch die maximale Anzahl der Achsen und das maximale Gesamtgewicht, besteht bei der Bahn die Möglichkeit, die Länge von Güterzügen weiter zu erhöhen. Für die hier durchgeführte Gegenüberstellung wurden 40 Containerwagen eingesetzt. Erhöht man die Anzahl der Wagen auf 60, so erhöht sich das Verhältnis von Nutzlast zu Gesamtgewicht auf 73%. Eine weitere Verlängerung der Züge führt nicht zu einer proportionalen Verbesserung des Konstruktionswirkungsgrads.

### **4.3 Untersuchung der aerodynamischen Widerstände**

Da sich der aerodynamische Widerstand bei allen Verkehrsmitteln quadratisch mit der Anströmgeschwindigkeit ändert, liefert er vor allem bei höheren Geschwindigkeiten einen wesentlichen Beitrag zum gesamten Fahrwiderstand. Beim Flugzeug reduziert sich der Fahrwiderstand nahezu vollständig auf den aerodynamischen Anteil.

Die aerodynamische Verbesserung der Verkehrsmittel ist daher ein wichtiges Auslegungsziel, um den Energiebedarf zu reduzieren.

Neben diesen Auslegungsaspekten spielen aber auch Eigenschaften der Strecken wie z.B. der Anteil von Tunneldurchfahrten oder Begegnungen von Zügen oder Fahrzeugen eine Rolle.



ist es nicht möglich, repräsentative Absolutwerte anzugeben. Real können diese Werte um bis zu 10% je nach Ausstattungsumfang des Fahrzeugs schwanken. Repräsentative Daten gängiger Pkw-Klassen zeigt die folgende Tabelle:

| Fahrzeugklasse                 | Leergewicht [kg] | Antriebsleistung [kW] | Querschnittsfläche [m <sup>2</sup> ] | Widerstandsbeiwert $C_w$ | $C_w A$ |
|--------------------------------|------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------|
| Polo, Fiesta, Corsa            | 800              | 40                    | 1,76                                 | 0,36                     | 0,634   |
| Golf, Astra, Focus             | 850              | 44                    | 1,87                                 | 0,33                     | 0,617   |
| Passat, Vectra, Audi80         | 1050             | 55                    | 1,98                                 | 0,29                     | 0,574   |
| Merc.E200, BMW520, Omega       | 1300             | 90                    | 2,09                                 | 0,29                     | 0,606   |
| Merc.E300, BMW750i, Senator3.0 | 1550             | 135                   | 2,15                                 | 0,33                     | 0,710   |

**Tabelle 4-15: Aktuelle Widerstandsbeiwerte verschiedener Pkw**

Eine systematische Optimierung des aerodynamischen Widerstands gestaltet sich bei Pkw äußerst schwierig, da hier der Fahrzeuggrundkörper eine vorbestimmende Rolle einnimmt, siehe [BOSC1997]. Andererseits geben Erfahrungswerte einen Hinweis auf die Wirkung von Einzelmaßnahmen auf den aerodynamischen Widerstand. Dabei lässt sich feststellen, dass sich durch Beeinflussung der Strömung im Bodenbereich mittels Radkappen, Reduktion der Bodenfreiheit und Anbringen von Bodenverkleidungen bis zu etwa 15% des aerodynamischen Widerstands reduzieren lassen. Andererseits schränkt gerade die Reduktion der Bodenfreiheit die Alltagstauglichkeit ein, und somit ist dieses Potential nur begrenzt nutzbar. Störungen der äußeren Umströmung, die an jedem Fahrzeug auftreten, wie z.B. Dachaufbauten und Klappscheinwerfer ebenso wie geöffnete Fenster oder die Motorraumdurchströmung erhöhen ebenfalls den Widerstand erheblich.

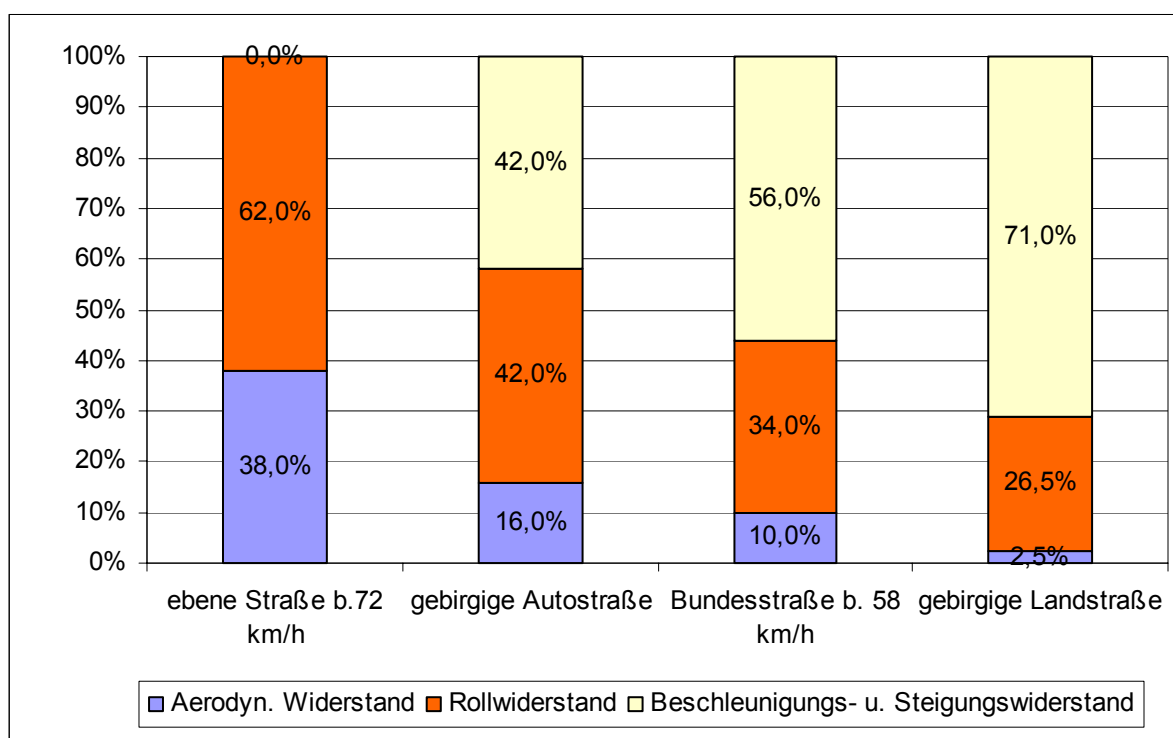
Ein anderer Trend zeigt sich, wenn man die Länge der Pkw mit betrachtet. Je größer die Fahrzeuglänge im Verhältnis zu seiner Stirnfläche ist, desto geringer stellt sich der aerodynamische Widerstand ein, siehe [HUCH1997], [DAUE2002]. Der Grund hierfür liegt in dem glatteren und verwirbelungssärmeren Strömungsverlauf entlang der Fahrzeugkontur. Kleine, kompakte Fahrzeuge mit hohen Aufbauten hingegen stören den Strömungsverlauf wesentlich stärker.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden die aufgeführten Veränderungspotentiale als Grundlage für die Variationsrechnungen herangezogen. Hierzu wird mit einem mittleren  $C_w$ -Wert von 0,31 als Ausgangsgröße gearbeitet. Als

Verbesserungspotential wird angelehnt an die Potentiale nach [BOSC1997] ein Wert von 5% oder  $\Delta C_W=0,0155$  angesetzt.

#### 4.3.1.2 Aerodynamische Qualität der Lastkraftwagen

Auch bei den Lkw trägt der aerodynamische Widerstand signifikant zum Fahrwiderstand bei. Ein Blick auf den Einfluss der Widerstandsanteile auf den Kraftstoffverbrauch von Lkw auf verschiedenen Straßen in Bild 4-11 zeigt, dass gerade bei einer hohen Durchschnittsgeschwindigkeit von 72 km/h auf einem Autobahnabschnitt im Flachland der aerodynamische Widerstand einen Anteil von rund 38% aufweist, so dass weitere Reduktionen des aerodynamischen Widerstands lohnen.



**Bild 4-11: Widerstandsanteile bei Lkw abhängig von der Straßenart, nach [HUCH1997]**

Es zeigt sich in der Darstellung aber auch, dass für Lkw der Rollwiderstand auf allen Straßen einen wesentlichen Einfluss auf den Kraftstoffbedarf hat. Auf der Landstraße bei niedrigen Geschwindigkeiten dominieren Beschleunigungs- und Steigungswiderstand, während der aerodynamische Widerstand nahezu bedeutungslos ist. Dennoch kann für Standardsattelzüge mit einer Antriebsleistung

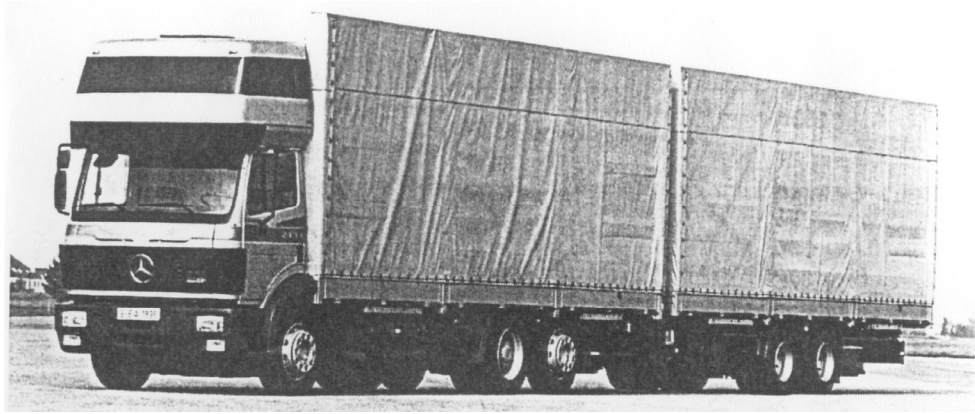
bis 300 kW gezeigt werden, dass durch eine Verbesserung des aerodynamischen Widerstands um 28% der Kraftstoffverbrauch auf ebener Strecke um 10% reduziert werden kann. Je schwieriger der Straßenverlauf wird, desto geringer wirken sich hingegen aerodynamische Verbesserungen aus, so dass auf Gebirgsstrecken die gleiche Widerstandsreduktion nur noch zu einer Kraftstoffeinsparung von knapp 1% führt.

Deutliche Verbesserungen des aerodynamischen Widerstands lassen sich für alle Lkw-Typen durch eine Minimierung der bestehenden Spalte zwischen Fahrerhaus und Aufbau sowie zwischen Zugmaschine und Anhänger bzw. Auflieger erreichen. Durch derartige Maßnahmen ist eine Verbesserung des Widerstands um rund 10% erreichbar. Noch wirkungsvoller sind die Installation von Dachspoilern und die Abrundung der Fahrerhauskanten, die zusammen Reduktionen zwischen 17% und 30% ermöglichen. Ein weiterer Bereich zur Reduktion des Strömungswiderstands liegt in der Fahrzeugunterströmung und -umströmung. Dieser Strömungsbereich liefert einen erheblichen Anteil an dem Gesamtströmungswiderstand.

| Maßnahme                     | C <sub>w</sub> -Reduktion [%] |
|------------------------------|-------------------------------|
| Unterflurverkleidung         | - 6 - 8                       |
| Min. Abstand Lkw – Hänger    | -12                           |
| Dachspoiler                  | - 30                          |
| Runde Vorderkanten am Hänger | -10                           |

**Tabelle 4-16: Übersicht über Verbesserungspotentiale des aerodynamischen Widerstands, Stand 1980, [GILH1979]**

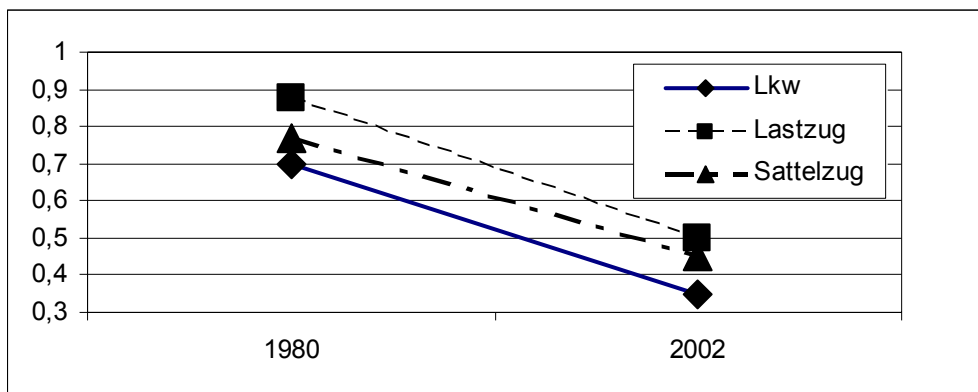
Untersuchungen haben hierzu gezeigt, dass durch ein Bündel der genannten Maßnahmen eine Reduktion des Luftwiderstands um rund 50% gegenüber gleichartigen Serienfahrzeugen ohne Nachrüstung erreicht werden kann, siehe [GILH1979].



**Bild 4-12: Gardinenlastzug mit optimierter Aerodynamik, [HUCH1997]**

Die genannten Maßnahmen sind heute bei sehr vielen Lkw wie z.B. in dem oben gezeigten Gardinenlastzug einzeln oder auch gebündelt realisiert. Trotz der damit verbundenen Zunahme des Leergewichtes um ungefähr 150-200 kg lässt sich damit der Kraftstoffverbrauch um rund 3l/100km reduzieren.

In Ermangelung zugänglicher aktueller Daten wird für die weiteren Betrachtungen der Widerstand für Lastkraftwagen im Jahr 2003 mit 50% des Werts von 1980 angesetzt.



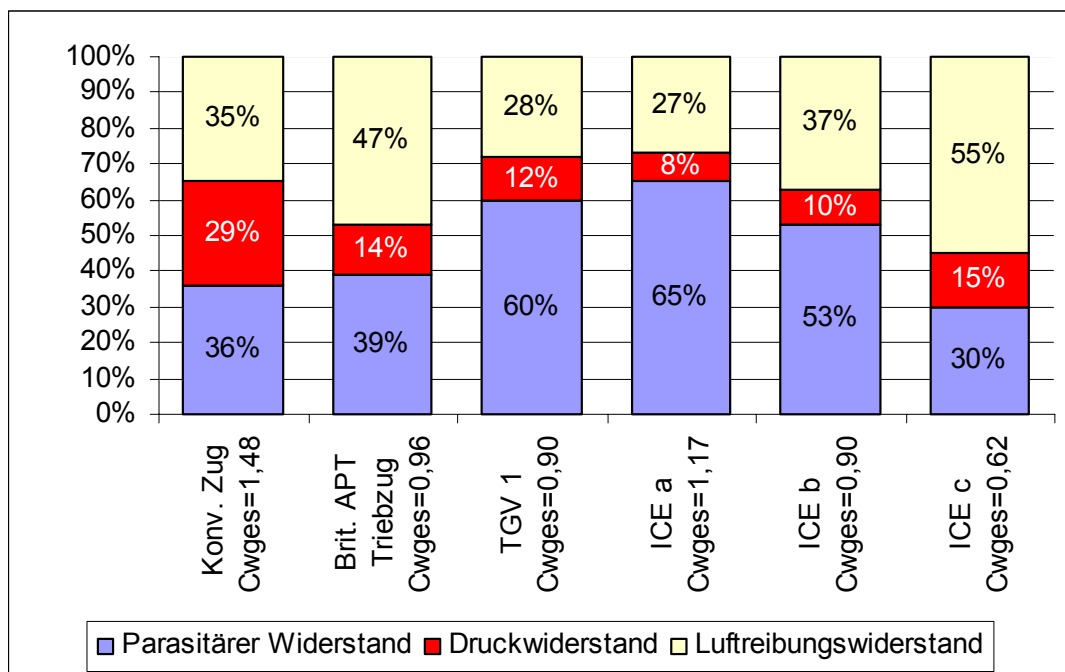
**Bild 4-13: Trendanalyse des aerodyn. Widerstands für Lkw 1980 bis heute**

Für die Berechnungen in dieser Studie wird deshalb von einem aktuellen mittleren Luftwiderstandsbeiwert von  $C_W=0,6125$  für Lastzüge und  $C_W=0,5425$  für Sattelzüge ausgegangen, dem eine Verbesserung von 30% verglichen mit 1980 zu Grunde liegt. Für Variationsrechnungen wird ein weiteres Verbesserungspotential von 20% angenommen, was Werten von  $\Delta C_W = 0,1225$  bzw.  $\Delta C_W = 0,195$  entspricht. Da dieses im günstigsten Fall etwa einer Kraftstoffersparnis von 3l/100km entspricht, wird für die Verbrauchsrechnungen ein Gradient von  $-1l/100km$  je 10% Widerstandsreduktion zu Grunde gelegt.

#### 4.3.2 Untersuchung der Aerodynamik von Bahnfahrzeugen

Mit dem Aufkommen der Hochgeschwindigkeitszüge wie TGV oder ICE in den achtziger Jahren gewannen auch bei der Bahn die Aerodynamik und deren Einfluss auf den Fahrwiderstand erheblich an Bedeutung. Bei rund 175 km/h beträgt der aerodynamische Widerstand bereits 75% des gesamten Fahrwiderstands, [MACK1987]. Entsprechend hat bei der Bahn die Entwicklung des ICE dazu geführt, dass gegenüber einer Lok bespannten Konfiguration der Energiebedarf unter anderem durch eine stark optimierte Aerodynamik um 42% gesenkt werden konnte. In der Regel wird der aerodynamische Widerstand von Bahnfahrzeugen in folgende Anteile aufgeteilt:

- Druckwiderstand, resultierend aus Druckdifferenzen an Zugkopf und -ende
- Reibungswiderstand, verursacht durch Scherkräfte an der Zugs oberfläche sowie durch Fenstersenkungen und Wagenübergänge
- Parasitärer Widerstand erzeugt durch Aufbauten, Drehgestelle, Unterflurausrüstung, usw.



**Bild 4-14: Entwicklung der aerodyn. Widerstandsverteilung bei Zügen, [MACK1987]**

Die Übersicht der Widerstandsanalyse zeigt die große Bedeutung des parasitären Widerstands, der vor allem durch Spaltwirkungen an Wagenübergängen und im



Unterflurbereich erzeugt wird. Dabei hat die Entwicklung des ICE gezeigt, dass durch Vollverkleidungen hier erhebliche Reduktionen zu erzielen sind, wie der Vergleich der vollverkleideten Experimentalkonfiguration ICEc mit der Konfiguration ICEa zeigt. Die Umsetzung dieser Erkenntnisse führen zu einem Gesamtwiderstandsbeiwert von  $C_w=0,69$  für den InterCityExperimental, siehe [SOCK1994]. Verlässliche und vergleichbare Daten über den aerodynamischen Widerstand von Bahnfahrzeugen zu gewinnen, gestaltet sich äußerst schwierig, da in der Regel nur der gesamte Fahrwiderstand bei der Bahn betrachtet wird. Dieser wird einheitlich beschrieben als:

$$F_{W_{Bahn}} = A + B \cdot v + C \cdot v^2 \text{ [kN]} \quad \text{Gl. 4-11}$$

Der Koeffizient  $C$  in der Einheit  $[kN/(km/h)^2]$  beschreibt hierin den aerodynamischen Widerstandsanteil. Aufgrund individueller Messungen werden in der Literatur folgende Bestimmungsgleichungen für die Fahrwiderstände der ICE1-3 angegeben, die sich jeweils auf die Regelkonfigurationen beziehen:

$$F_{W_{ICE1}} = 6,12 + 36,2 \cdot 10^{-3} \cdot v + 0,893 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 \text{ [kN]} \quad \text{Gl. 4-28}$$

$$F_{W_{ICE2}} = 3,13 + 19,6 \cdot 10^{-3} \cdot v + 0,581 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 \text{ [kN]} \quad \text{Gl. 4-29}$$

$$F_{W_{ICE3}} = 3,30 + 24,22 \cdot 10^{-3} \cdot v + 0,552 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 \text{ [kN]} \quad \text{Gl. 4-30}$$

Für eine gegebene Fahrgeschwindigkeit lässt sich hieraus der Widerstandsbeiwert  $C_w$  ableiten, mit

$$F_{W_{Aero}} = C \cdot V^2 \text{ [kN]} \quad \text{Gl. 4-31}$$

In [MNIC1998] werden für  $C$  folgende Werte für Regelkonfigurationen der ICE und des Metrorapid angegeben:

|  | ICE 1 | ICE2  | ICE 3 | Metrorapid |
|--|-------|-------|-------|------------|
| Stirnfläche [m <sup>2</sup> ]  | 10,7  | 10,7  | 10,7* | 10,65      |
| Spez. Aerodyn. Fahrwiderstand<br>10 <sup>-3</sup> *[kN/(km/h) <sup>2</sup> ] | 0,893 | 0,581 | 0,552 | 0,351      |

\*=angenommener Wert

**Tabelle 4-17: Aerodynamischer Fahrwiderstand verschiedener Bahnfahrzeuge, [MNIC1998]**

Mit einer angesetzten Fahrgeschwindigkeit von 250 km/h für ICE1 und ICE2 sowie 300 km/h für ICE3 und Metrorapid lässt sich die aerodynamische Widerstandskraft  $F_{WAero}$  ermitteln. Bei einer Luftdichte von  $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$  können mit

$$F_{W_{Aero}} = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot V^2 \cdot C_W \text{ bzw.}$$

$$C_W = \frac{2 \cdot F_{W_{Aero}}}{\rho \cdot S \cdot V^2} [-]$$

Gl. 4-32

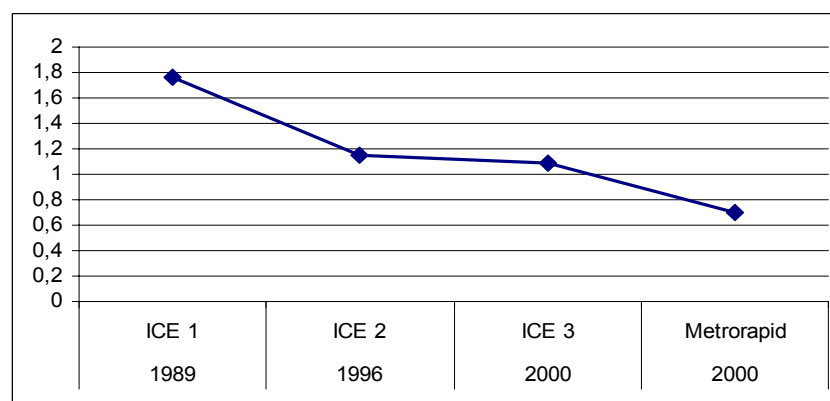
die Widerstandsbeiwerte  $C_W$  als Vergleichsgröße zu den Kraftfahrzeugen bestimmt werden:

|                  | ICE 1 | ICE 2 | ICE 3 | Metrorapid |
|------------------|-------|-------|-------|------------|
| $F_{WAero}$ [kN] | 55,81 | 36,31 | 49,68 | 31,59      |
| $C_W$ [-]        | 1,766 | 1,145 | 1,092 | 0,697      |

**Tabelle 4-18: Aerodynamische Widerstandsbeiwerte  $C_W$  [-] verschiedener Bahnfahrzeuge**

Für reale Fahrgeschwindigkeiten zeigt diese Tabelle sehr hohe Widerstandsbeiwerte für den gesamten Zug. Der hohe Widerstandsbeiwert des ICE 1 resultiert vor allem aus der Gesamtzuglänge, die in der Regelkonfiguration mit 358 m gegenüber dem ICE 2 und ICE 3 mit jeweils 205 m bzw. 200 m deutlich größer ausfällt, siehe [SCHU2002c].

Die Luftwiderstandsbeiwerte der Bahnfahrzeuge zeigen ähnlich wie bei den Pkw eine erhebliche Verbesserung dieser Widerstandskomponenten in den letzten 20 Jahren.



**Bild 4-15: Entwicklung der Widerstandsbeiwerte der Bahn**

Auffällig erscheint der günstige aerodynamische Widerstand des Metrorapid, der gegenüber den ICE-Systemen in Folge der weitgehend glatten Kontur und des geringen Unterflurwiderstands um ~30% niedriger liegt.

Der aerodynamische Widerstand der Züge hängt neben der Fahrgeschwindigkeit auch wesentlich von der Zuglänge und der damit verbundenen Beschaffenheit der Oberflächenkontur ab. In [SOCK1994] wird hierzu erläutert, dass besonders bei Güterzügen durch Anpassung der Wagenform der Widerstand um rund 30% reduziert werden kann. Verminderungen um 50% lassen sich durch weitere aerodynamisch optimierte Auslegungen erreichen. Die Umsetzung dieser Erkenntnisse wird heute an vielen Neubaugüterwagen der Deutschen Bahn AG sichtbar.

Mit der Entwicklung der Hochgeschwindigkeitszüge TGV und ICE konnte der Gesamtwiderstand im Vergleich zu konventionellen, Lok bespannten Zügen, um über 50% gesenkt werden, siehe Bild 4-14. Dies wurde vor allem durch eine Verminderung des Druckwiderstands und eine Reduktion des Reibungswiderstands erreicht.

Aufgrund dieser deutlichen Verbesserungen der aerodynamischen Qualität haben sich Auslegungsrichtlinien etabliert, die vor allem auch bei der Entwicklung des ICE 3 und der neuen Lokomotivbaureihen BR101, BR152, BR182 umgesetzt wurden:

- glatte Oberflächen mit bündigen Fenstern und spaltarmen Fahrzeugübergängen
- widerstandsminimierte Stirn- und Heckformen
- vollverkleidete Fahrzeugunterbauten
- teilverkleidete Fahrgestelle
- reduzierte Fahrzeugaufbauten (insbesondere Stromabnehmer)

Bezogen auf den Widerstand des ICE 3 kann von einer weiteren Reduktion des Widerstandsbeiwertes in der Zukunft um 20% oder  $\Delta C_W = 0,2$  ausgegangen werden.

Neben diesen, unmittelbar auf den Zug bezogenen, aerodynamischen Widerständen sind bei der Bahn auch betriebsspezifische Widerstandsanteile zu betrachten, [GLÜC1985], [SOCK1994]. Hier sind neben Seitenwindeinflüssen insbesondere kurzzeitige Widerstandserhöhungen während der Begegnung mit stehenden oder fahrenden Zügen sowie Tunneldurchfahrten zu nennen.

### 4.3.3 Einfluss von Tunneln

Der Einfluss von Tunneln schlägt sich in der Widerstandsbilanz in einer kurzfristigen Erhöhung des aerodynamischen Widerstands nieder und betrifft in der Praxis vor

allem die Bahnfahrzeuge. Durchfährt ein Fahrzeug einen Tunnel, so erhöhen sich der Stirnflächendruck und der Reibungswiderstand, da die Luft im Tunnel durch den Widerstandskörper komprimiert wird. Dieser Effekt wird noch verstärkt, wenn sich zwei Fahrzeuge im Tunnel begegnen. Bei Kraftfahrzeugen führt dies zu einer kurzfristigen Widerstandserhöhung um rund 10-12%, siehe [STAS1984].

Die für diese Studie zu Grunde gelegten Streckenverläufe weisen für den Straßenverkehr keinen Tunnelanteil auf. Daher muss der Einfluss von Tunneln bei Kraftfahrzeugen hier nicht weiter berücksichtigt werden.

Aerodynamisch gelten bei der Bahn die gleichen Effekte bei Tunnelfahrten wie für Kraftfahrzeuge. Die wesentliche Einflussgröße hierbei ist das Verhältnis von Tunnelquerschnittsfläche und Fahrzeugstirnfläche.

$$\frac{A_F}{A_T} = \Delta C_{WT} \quad [-] \qquad \text{Gl. 4-33}$$

Diese Kenngröße wird auch Verblockungsfaktor genannt und variiert bei Bahnsystemen zwischen 0,1 und 0,2, siehe [GLÜC1985]. Der daraus abzuleitende Tunnelfaktor beschreibt das Verhältnis von Luftwiderstand im Tunnel zum Luftwiderstand auf freier Strecke und nimmt mit zunehmender Tunnellänge ab, [SOCK1994].

In wie weit diese Widerstandserhöhung bedeutsam ist für die Energiebilanz einer Transportmission, hängt von dem Anteil der Tunnellänge an der Gesamtstrecke ab. So weist die Strecke Hannover-Würzburg, die für die Nord – Süd – Verbindungen den relevanten Tunnelabschnitt enthält, bei einer Länge von 327 km einen Tunnelanteil von 118 km oder 36%, siehe [JÄNS1991]. Zusammen mit der durch Tunnel bedingten Widerstandserhöhung von 10% bewirken Tunnel hier einen erhöhten Energiebedarf von 3,6% auf dem genannten Streckenabschnitt.

| Streckenabschnitt | Abschnittslänge [m] | Tunnellänge [m] | Tunnelanteil [%] | Referenzstrecke |
|-------------------|---------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| FFM – Köln        | 177000              | 47000           | 26,5             | M – K           |
| H – Wü            | 327000              | 118000          | 36,0             | M – HH          |

**Tabelle 4-19: Tunnelanteile ausgewählter Neubauabschnitte der Bahn, aus [JÄNS1991], [VDI 2002]**

Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkt den Streckenabschnitt Frankfurt – Köln, der ebenfalls einen relevanten Tunnelabschnitt darstellt, so spielt für die Bahn hier die Widerstandserhöhung durchaus eine Rolle. Auf dem 177 km langen Streckenabschnitt verlaufen 47 km in 30 Tunneln, was etwa 26,5% der Gesamtstrecke entspricht. Hier führt die Tunneldurchfahrt über die Gesamtstrecke zu einer aerodynamischen Widerstandserhöhung von rund 2,6% auf dem Streckenabschnitt.

Bezieht man die Tunnelanteile auf die Gesamtstreckenlänge von 813 km für M – HH bzw. 606 km für M – K, so reduziert sich Zusatzwiderstandsanteil auf 1,45% bzw. 0,7% und hat keinen nachhaltigen Einfluss auf den Gesamtfahrwiderstand.

#### 4.3.4 Untersuchung der Aerodynamik des Flugzeugs

Für das Flugzeug beschränken sich im praktischen Betrieb die Fahrwiderstände auf den aerodynamischen Widerstand, den Steigungswiderstand sowie die Beschleunigung. Der aerodynamische Widerstand des Flugzeugs wird durch mehrere Einflussgrößen bestimmt. Primär wird er jedoch durch den aerodynamischen Auftrieb, der Grundvoraussetzung für das Fliegen ist, verursacht.

Der Auftrieb eines Flugzeugs im Reiseflug mit  $A=m \cdot g$  errechnet sich zu:

$$C_A = \frac{2}{\rho \cdot V^2 \cdot S} \cdot m \cdot g \quad \text{Gl. 4-34}$$

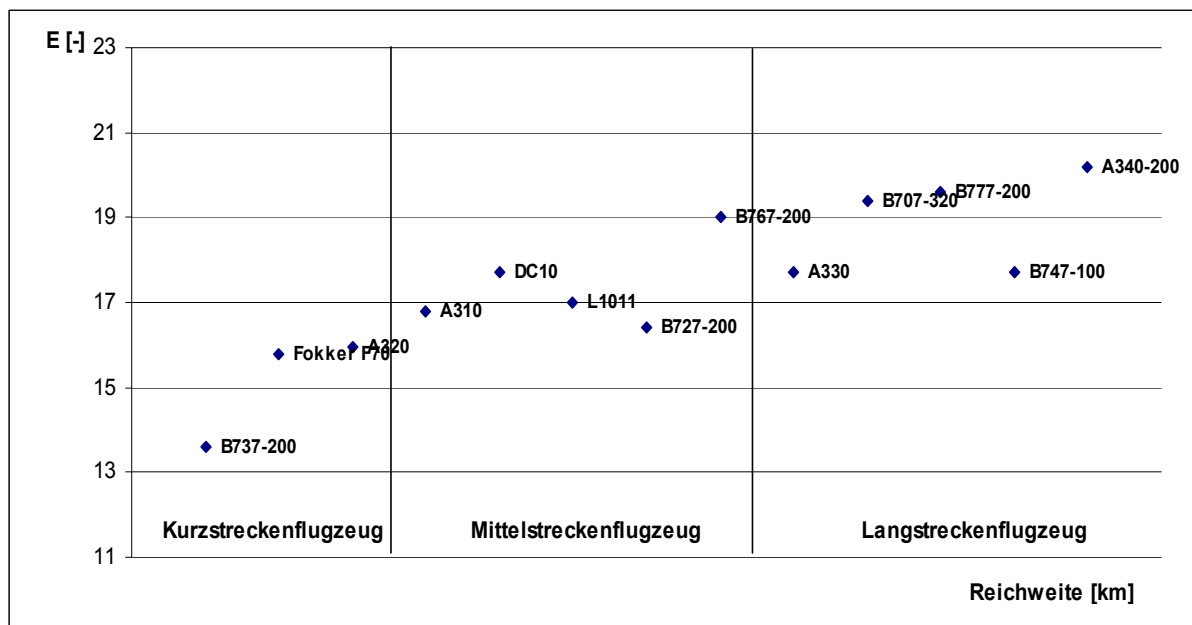
Der aerodynamische Widerstand wird im Reiseflug häufig durch eine quadratische Abhängigkeit vom Auftrieb beschrieben:

$$C_W = C_{W0} + k \cdot C_A^2 \quad \text{mit } k = \frac{1}{\pi \cdot \Lambda \cdot e} \quad \text{und } e = \text{Oswald-Faktor (ca. 0,8-1,3)} \quad \text{Gl. 4-35}$$

Hierin berücksichtigt der Nullwiderstand  $C_{W0}$  Widerstandsanteile, die aus der Reibung der Strömung an der Flugzeugoberfläche sowie aus Druckanstiegen, Machzahleffekten und Interferenzen herrühren. Die Gleichung zeigt weiter, dass der aerodynamische Widerstand wesentlich durch die Flügelstreckung  $\Lambda$  bestimmt wird. Je größer die Flügelstreckung gewählt wird, desto geringer fällt der auftriebsabhängige Widerstand aus. Die aktuellen Verkehrsflugzeugentwicklungen weisen Streckungen zwischen 7-10 auf. Der Nullwiderstandsbeiwert liegt etwa bei  $C_{W0}=0,003$  für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge.

Zusätzlich werden Auftrieb und Widerstand des Flugzeugs in Abhängigkeit von der Fluggeschwindigkeit und der Flughöhe beeinflusst durch den Anstellwinkel des Flugzeugs gegenüber der Luft sowie die Einstellung der Flügelklappen.

Das Widerstands-/Auftriebsverhältnis, auch als Gleitzahl  $\epsilon$  bezeichnet, beschreibt die aerodynamische Güte des Flugzeugs, [BRÜN1986]. Der Reziprokwert der Gleitzahl wird aerodynamische Effizienz  $E = \epsilon^{-1}$  genannt und setzt den Auftriebsgewinn zu dem damit einhergehenden Widerstand in Beziehung. Je größer das Verhältnis, desto höher ist die aerodynamische Güte. Der Auslegungsfall für das Flugzeug ist hier der stationäre Streckenreiseflug, für den bei gegebener Machzahl und Flughöhe eine möglichst hohe Gleitzahl erreicht werden soll. In der nachfolgenden Abbildung sind die Gleitzahlen verschiedener Flugzeugmuster für den Reiseflug zusammengestellt worden.



**Bild 4-16: Gleitzahlen für verschiedene Flugzeuge**

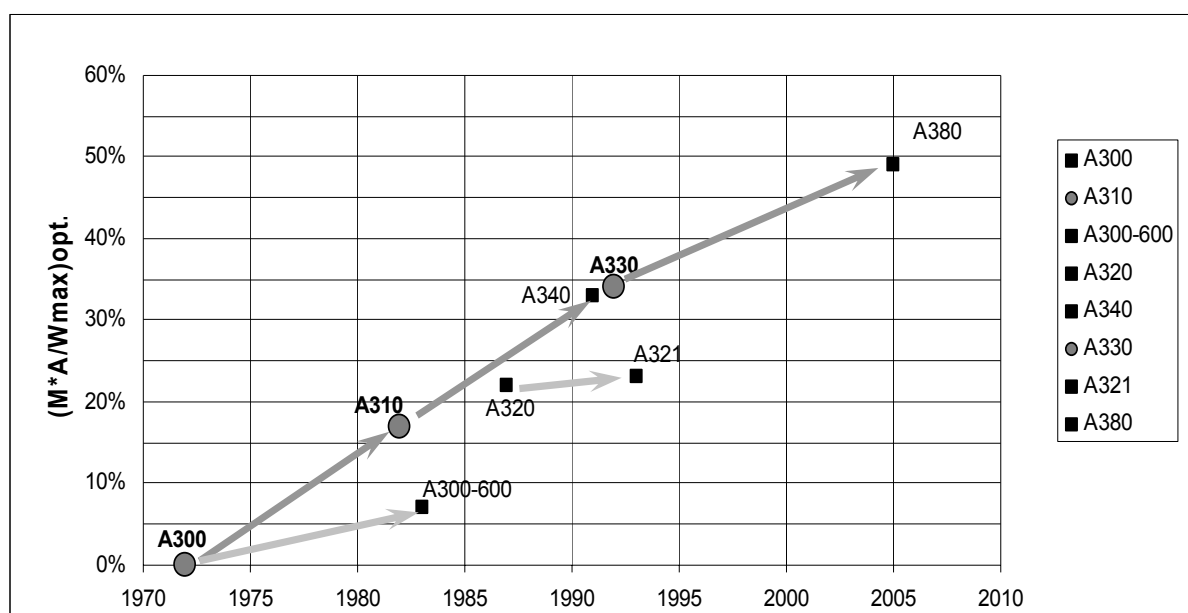
Hierbei lassen sich 3 Bereiche beobachten. Kurzstreckenflugzeuge weisen  $C_A/C_W$ -Werte von etwa 13-15 auf. Mittelstreckenflugzeuge erreichen Werte im Bereich 15-17, während Langstreckenflugzeuge  $C_A/C_W$ -Werte bis zu 20 aufweisen, wie z.B. der A380. Bezüglich der aerodynamischen Güte schneiden daher Mittel- und Langstreckenflugzeuge immer besser ab als Kurzstreckenmaschinen.

Im Rahmen heutiger Flugzeugentwicklungen werden reine Mittelstreckenflugzeuge kaum noch ausgelegt. Vielmehr wird der Mittelstreckenbereich durch leistungsfähigere Muster aus dem Kurzstreckenbereich sowie leistungsschwächere

Versionen der Langstreckenflugzeuge abgedeckt. Daher darf die dargestellte Dreiteilung nicht als streng angenommen werden und wird sich langfristig auf 2 Bereiche reduzieren. Wie die Darstellung in Bild 4-16 zeigt, finden sich im Kurz- und Mittelstreckenbereich vor allem die Muster A320, A321, B737 und DC10. Diese Muster sind für die hier beschriebene Untersuchung von Strecken innerhalb Deutschlands von besonderer Bedeutung und weisen eine aerodynamische Effizienz von  $E=16$  für den A320 bzw.  $E=13,6$  für die B737-200 auf.

Für den Startfall zeigt sich naturgemäß ein anderes Bild, da hier durch Nutzung der Hochauftriebshilfen der auftriebsinduzierte Widerstandsanteil mit ca. 90% klar überwiegt, siehe z.B. [HÜNE2000].

Welche Entwicklung die Bemühungen zur Verbesserung der aerodynamischen Effizienz und damit zur Reduktion des Widerstands und zur Erhöhung des Auftriebs genommen haben, zeigt das nachfolgende Bild am Beispiel der Airbus-Familie.

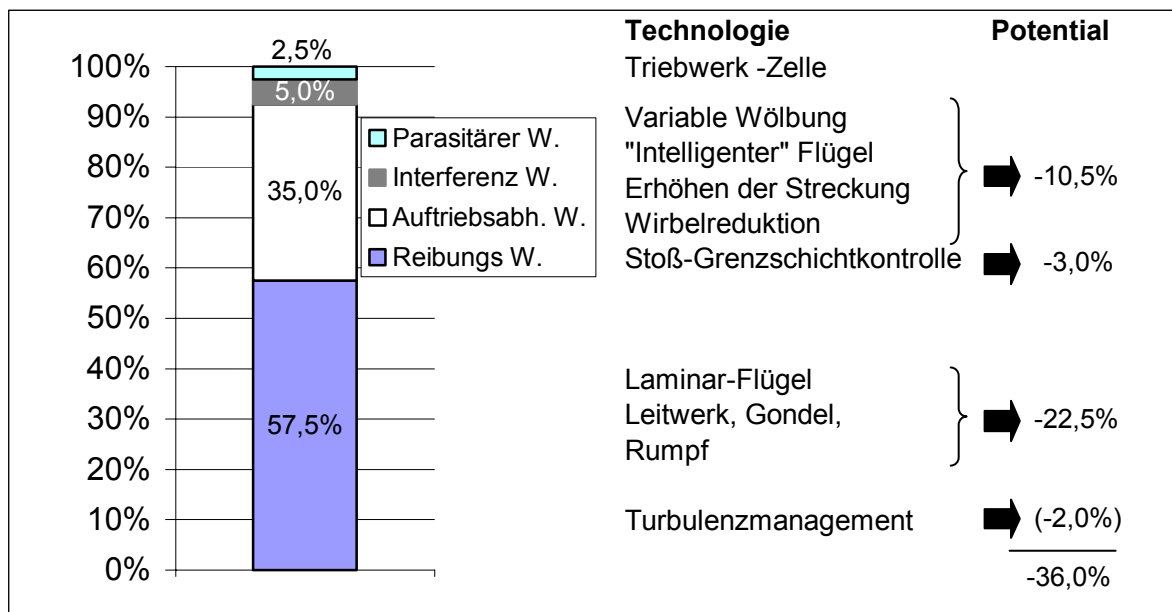


**Bild 4-17: Entwicklung der aerodynamischen Güte am Beispiel der Airbusflugzeugfamilie, [HIRS2001]**

Ausgehend von der aerodynamischen Güte des Basismodells A300, konnte die aerodynamische Güte (Produkt aus Fluggeschwindigkeit und Gleitzahl) des A310 bereits um gut 15% gesteigert werden. In gleichem Maße gelang eine Verbesserung vom A310 zum A340. Diese Verbesserung der mittleren Flugeffektivität (Verhältnis von Kraftstoffverbrauch zu Flugstrecke) wurde wesentlich durch die Entwicklung überkritischer Flügelprofile erzielt. Die hellgrauen Pfeile zeigen die Verbesserungen

zwischen 5% (A300 zu A300-600) und 2% (A320 zu A321), die an bestehenden Flügelprofilen durch Teilmodifikationen erreicht wurden.

Eine Analyse der Widerstandsquellen beim Flugzeug weist auf die überragende Bedeutung des Luftreibungswiderstands mit einem Anteil von über 55% im Reiseflug hin. Der auftriebsabhängige Widerstand trägt mit rund 30% zum Gesamtwiderstand bei. Interferenzwiderstände an den Anschlusspunkten von Triebwerk und Leitwerken sowie der parasitäre Widerstand stellen einen geringen Teil von weniger als 10%.



**Bild 4-18: Potentiale zur Widerstandsreduktion bei Flugzeugen, [HIRS2001]**

Heute liegt das größte Potential zur Widerstandsreduktion in der Entwicklung des Laminarflügels, siehe Bild 4-18. Hierbei wird eine Auslegung angestrebt, die die Strömung entlang des Flügelprofils möglichst lange angelegt lässt und lokale Verdichtungsstöße sowie Grenzschichtablösungen vermeidet, da gerade diese Effekte zu einem deutlichen Widerstandsanstieg führen. Betrachtet man die Entwicklungstendenzen in der Verbesserung des aerodynamischen Widerstands, so versprechen die Ansätze zur variablen Wölbung mit rund 10% und zur laminaren Strömung mit ca. 20% die größten Potentiale. Gelingt dies, so ist auch in der Zukunft eine Verbesserung der aerodynamischen Effizienz um weitere 15% realistisch.

Typische Beispielwerte für den Auftrieb und den Widerstand moderner Verkehrsflugzeuge zeigt die folgende Tabelle, [HÜNE1989], [HÜNE2000], [LISS1990], [FRIC2001].



|                       | <b>A300B4</b> | <b>A310</b> | <b>A320</b> | <b>A330</b> |
|-----------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| $C_A$ [-]             | 0,38          | 0,504       | 0,45        | 0,632       |
| $C_W$ [-]             | 0,024         | 0,03        | 0,02817     | 0,0357      |
| $E=\epsilon^{-1}$ [-] | 15,8          | 16,8        | 15,97       | 17,7        |
| $A$ [m <sup>2</sup> ] | 260           | 219         | 123,44      | 363,1       |
| Mittelwert $C_W$ [-]  | 0,02947       |             |             |             |
| Mittelwert $C_A$ [-]  | 0,4915        |             |             |             |

**Tabelle 4-20: Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte verschiedener Verkehrsflugzeuge im Reiseflug**

Die Tabelle zeigt, dass die Absolutwerte für die Widerstandsbeiwerte vom A300 zum A330 deutlich zugenommen haben. Da diese Entwicklung jedoch mit einem noch stärkeren Anstieg des Auftriebsbeiwertes einhergegangen ist, kann die Gesamtentwicklung hinsichtlich der Effizienz als sehr günstig angesehen werden. Als Mittelwert dieser Angaben ergeben sich ein  $C_W$ -Wert von  $0,02947$  sowie ein mittlerer Auftriebsbeiwert von  $C_A=0,4915$ . Sie werden für die weiteren Rechnungen im Rahmen dieser Arbeit herangezogen werden.

#### 4.3.5 Zusammenfassung und Vergleich der aerodynamischen Widerstände

Die Analyse der Entwicklung der aerodynamischen Widerstände für Bahn, Kraftfahrzeug und Flugzeug hat gezeigt, dass für alle betrachteten Verkehrssysteme deutliche Reduktionen der aerodynamischen Widerstandsanteile seit etwa 1980 erreicht wurden.

|                         | <b>Pkw</b> | <b>Lastzüge</b> | <b>Sattelzüge</b> | <b>Bahn</b> | <b>Flugzeug</b> |
|-------------------------|------------|-----------------|-------------------|-------------|-----------------|
| $C_W$ 1980              | 0,50       | 0,90            | 0,75              | 1,76        | 0,024           |
| $\epsilon$ [-]          |            |                 |                   |             | 15,8            |
| $C_W$ -Verbesserung [%] | -40%       | -32%            | -28%              | -38%        | +12,0%          |
| $C_W$ (heute)           | 0,30       | 0,61            | 0,54              | 1,09        | 0,035           |
| $E=\epsilon^{-1}$ [-]   | -          | -               | -                 | -           | 17,7            |
| E -Verbesserung         | -          | -               | -                 | -           | +12%            |
| $\Delta C_W$ Potential  | 0,0155     | 0,1225          | 0,195             | 0,2         |                 |

**Tabelle 4-21: Zusammenstellung der mittleren Widerstandsbeiwerte und Potentiale für die Vergleichsrechnungen**

Die Gegenüberstellung zeigt deutliche Verbesserungen des aerodynamischen Widerstands bei Kraftfahrzeugen. Auch die Bahn hat im Zuge der Hochgeschwindigkeitsentwicklung die aerodynamische Güte ihrer Fahrzeuge erheblich verbessert. Die Entwicklung beim Flugzeug erscheint dagegen zunächst unklar, da die Widerstandsbeiwerte ebenso wie die aerodynamische Effizienz zunehmen. Aufgrund der engen Kopplung von Auftrieb und Widerstand ist eine Bewertung des Flugzeugs anhand der aerodynamischen Effizienz aussagekräftiger. Hierzu werden die Daten des A300 mit denen des A330 verglichen und zeigen eine Steigerung der Effizienz von 12%. Beide Flugzeugtypen sind aufgrund ihrer Größe und Missionsaufgaben gut miteinander vergleichbar und zeigen die technologische Entwicklung auf. Im Vergleich zu Kraftfahrzeug und Bahn, die Widerstandsreduktionen um 40% aufweisen, fällt die Verbesserung der aerodynamischen Güte des Flugzeugs deutlich geringer aus.

Ein Vergleich der absoluten Widerstandsbeiwerte der verschiedenen Verkehrssysteme ist nicht zulässig, da sich sowohl die angesetzten Reisegeschwindigkeiten als auch die Bezugsflächen und die jeweiligen Fahrzeuglängen stark unterscheiden.

Die Analyse der Reduktionspotentiale für die verschiedenen Verkehrsmittel zeigt, dass signifikante Verbesserungen nicht mehr zu erwarten sind. Für zukünftige Entwicklungen kann daher von den bestehenden Verhältnissen mit einem Verbesserungspotential von 5-10% ausgegangen werden.

Hinsichtlich des Einflusses von Tunneln hat die Analyse gezeigt, dass lediglich die Bahnstrecken Tunneldurchfahrten aufzuweisen haben. Auf den betroffenen

Streckenabschnitten liegt die Widerstandserhöhung zwischen 2 – 4%, so dass für die Gesamtstrecken ein Anteil deutlich unter 2% zu erwarten ist. Damit wird dieser Anteil für die folgenden Berechnungen vernachlässigt.

#### **4.4 Untersuchung des Steigungswiderstands**

In Kapitel 4.1 wurde gezeigt, dass der Steigungswiderstand bei Straßen- und Bahnfahrzeugen einen Anteil zwischen 30% und 40% am Gesamtfahrwiderstand erreichen kann. Er führt aufgrund der Fahrbahneigung zu einer Zusatzkraft, die durch die Fahrzeugmasse hervorgerufen wird. Daher werden in diesem Abschnitt Möglichkeiten zur realistischen Abschätzung des Steigungswiderstands für Land- und Luftfahrzeuge untersucht.

Der Steigungswiderstand wird durch die lokalen topographischen Gegebenheiten entlang der Fahrstrecke bestimmt. Entsprechend ihren technischen Eigenschaften werden Kraft- und Schienenfahrzeuge getrennt hinsichtlich der zulässigen Steigungen der Trassen behandelt. Dabei spielt die Haftungsfähigkeit der Antriebsräder ebenso eine wichtige Rolle wie der erforderliche Leistungsbedarf zur Überwindung der Steigung.

Auch beim Flugzeug tritt ein Steigungswiderstand auf, der aus der Vergrößerung des Anstellwinkels und der Klappenstellung resultiert.

##### 4.4.1 Steigungen der Straßen und Schienen

Die Straßen- und Schienenverläufe orientieren sich an der gegebenen Topographie des Geländes und weisen daher natürliche Steigungen und Gefälle auf.

Wie Bild 4-19 zeigt, werden bei Schiene und Straße bezüglich der Trassenführung sehr unterschiedliche Ansätze verfolgt. Während die Bahnstrecke durch Tunnelbauten und Brücken möglichst weitgehend eben verläuft, um die zulässige Maximalsteigung einzuhalten, zeigt die Autobahntrasse starke Steigungen und Gefälleabschnitte mit Neigungen bis zu 10%. Diese gegenüber der Bahn um einen Faktor 2,5 größere, zulässige Neigung wirkt sich unmittelbar auf den Energiebedarf aus.



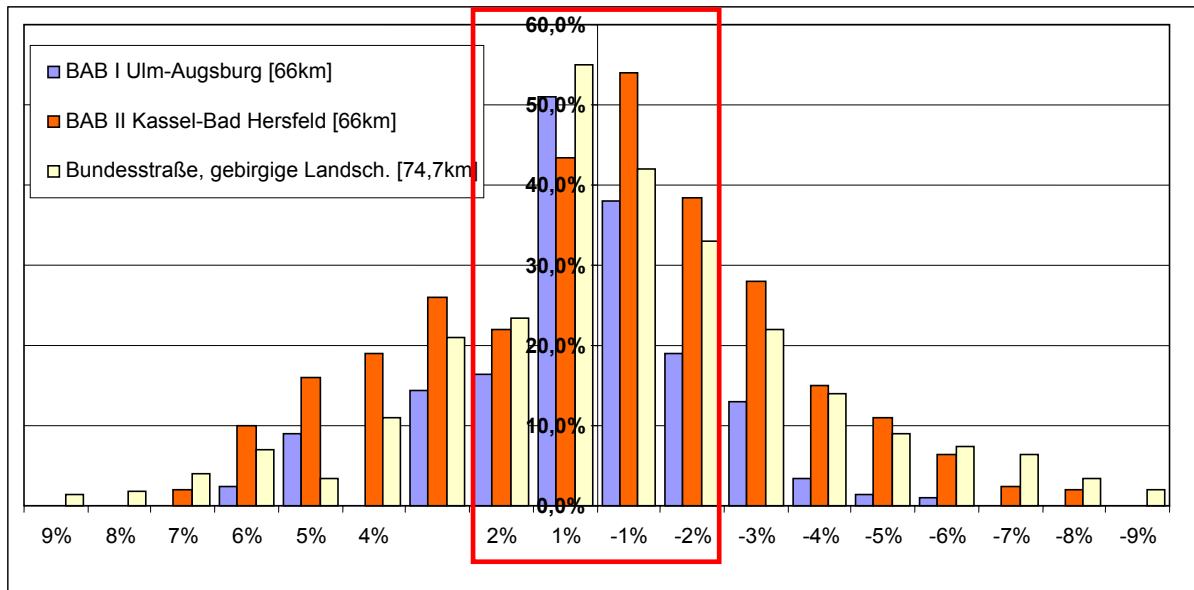
**Bild 4-19: Trassenführung Schiene (Neubau) und Straße BAB 7 bei Kirchheim**

Gleichzeitig werden Kraftfahrzeuge und Bahnen in der Regel nicht mit einem sehr großen Leistungsüberschuss zur Überwindung sehr großer Steigungen ausgelegt. Aus diesem Grunde geben die einschlägigen Bauvorschriften für das Straßenbauwesen die folgenden zulässigen Maximalsteigungswerte für den Straßenbau vor.

| Entwurfsgeschwindigkeit [km/h] | Zulässige Steigung [%] | Anzuwenden auf |
|--------------------------------|------------------------|----------------|
| 40                             | 10                     | Kreisstraßen   |
| 60                             | 6,5                    |                |
| 80                             | 5                      | Landstraßen    |
| 100                            | 4,5                    |                |
| 120                            | 4,0                    | Bundesstraßen  |
| 140                            | 4,0                    |                |
|                                |                        | Autobahnen     |

**Tabelle 4-22: Zulässige Steigungen für Straßen, [MITS1995]**

Neben diesen Maximalwerten ist die Häufigkeit real auftretender Steigungen ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor. In [HUCH1997] wird für Kraftfahrzeuge der Versuch dargestellt, Steigungen und Gefälle auf typischen Autobahn- und Bundesstraßenabschnitten zu klassifizieren. Anhand der dort erstellten Häufigkeitsverteilung lässt sich für diese speziellen Abschnitte ein mittlerer Steigungswiderstand ermitteln.



**Bild 4-20: Häufigkeitsverteilung der Steigung von Autobahnabschnitten, [HUCH1997]**

Für den Streckenabschnitt Kassel – Bad Hersfeld auf der BAB 7 zeigt die obige Darstellung, dass zwischen 64% und 92% der Steigungen/Gefälle Werte von bis zu 2% nicht überschreiten. Weiter ist zu erkennen, dass vor allem bis 1% Steigungen und Gefälle etwa gleich häufig vertreten sind, während bis 2% die Gefälle überwiegen. Diese Angaben können jedoch nur einen Hinweis auf die realen mittleren Steigungen geben. Da derartige Erhebungen für weitere Straßenverläufe nicht verfügbar sind, lässt sich mit dem beschriebenen Vorgehen der Steigungswiderstand nicht hinreichend in den Berechnungen erfassen.

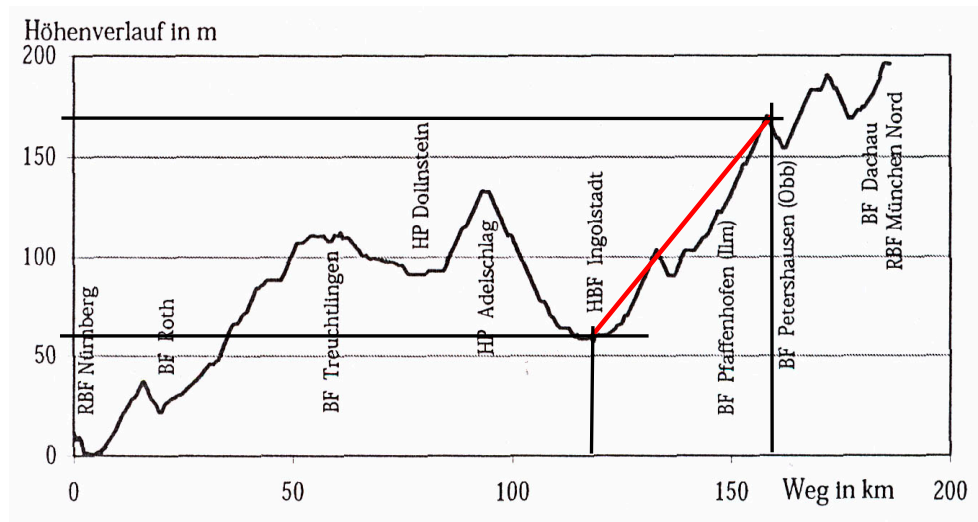
Auch im Schienenverkehr müssen die maximalen Steigungen aufgrund der beschränkten Haftung der Rad – Schiene – Verbindung beschränkt werden. Da die Haftung hier gegenüber den Kraftfahrzeugen weitaus geringer ausfällt, sind die zulässigen Maximalsteigungen geringer. Für Schienenstränge hat die Deutsche Bahn ebenfalls maximale Steigungen festgelegt:

| Entwurfsgeschwindigkeit [km/h] | Zulässige Steigung [%] |
|--------------------------------|------------------------|
| 250                            | 4,00                   |
| 250                            | 2,00                   |
| 200                            | 1,25                   |

**Tabelle 4-23: Steigungsgrenzwerte für das Deutsche Schienennetz, [DBAG1985], [VDI 2002], [FILI1995].**

Eine möglichst ebene Trassenführung erfordert oftmals sehr kostenintensive Kunstbauten wie Tunnel und Brücken, wie sie bei den Neubaustrecken der Bahn, aber auch bei Autobahnneubauten oft erstellt werden müssen. Diese Investitionen rentieren sich jedoch nur, wenn durch die ebene Streckenführung die Betriebskosten entsprechend reduziert oder die Fahrzeit deutlich verkürzt werden können.

Nachfolgend ist der reale Höhenverlauf des Streckenabschnitts München – Nürnberg dargestellt, [KAPI2002].



**Bild 4-21: Gemessener Steigungsverlauf auf dem Streckenabschnitt München – Nürnberg, [KAPI2002]**

Wie bei der Beschreibung der Straßenverläufe stellt auch diese Darstellung nur einen speziellen Einzelfall dar, der nicht allgemein anwendbar ist. Es lässt sich jedoch eine maximale Steigung von 0,275% abschätzen.

Die für Straße und Schiene ermittelten realen Steigungen scheinen auf den ersten Blick nur eine sehr geringe punktuelle Widerstandserhöhung zu bewirken. Betrachtet man sie jedoch als konstante Größe über eine lange Strecke, so erfordert sie eine Zusatzkraft, die das Vielfache des Eigengewichts erreicht. So bewirkt eine Steigung von 1% (1m/100m) auf einer Strecke von 10 km einen Zusatzwiderstand von 100% des Eigengewichts. Andererseits führt der mit der Steigung verbundene Höhengewinn zu einer Zunahme des potentiellen Energiegehalts des Fahrzeugs, der auf einem folgenden Gefälleabschnitt wieder in kinetische Energie umgesetzt werden kann. Allerdings gehen hier viele Anteile durch Getriebe- und Radwiderstände verloren. Um diese Effekte zu erfassen, sind sehr genaue Modellrechnungen

durchzuführen, die für den praktischen Einsatz kaum anwendbar sind. Andere Untersuchungen haben in diesem Zusammenhang auf statistischen, kumulierten Streckenwiderständen aufgesetzt, die bei 0,5% für die Straße und 0,1% für die Schiene liegen, siehe [BIAL1990].

#### 4.4.2 Ansatz zur Abschätzung des Steigungswiderstands

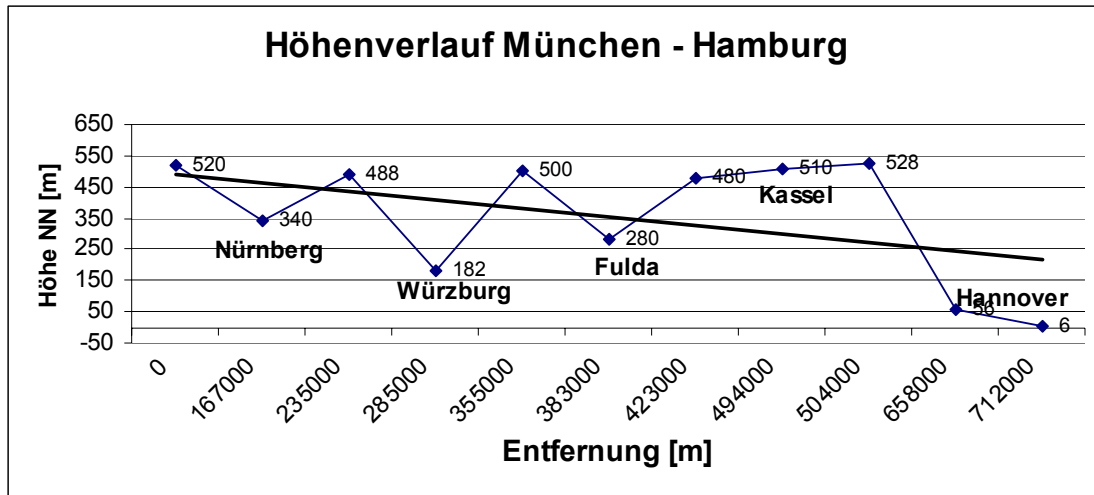
Aufgrund der sehr individuellen Steigungen und Gefälleabschnitte auf den möglichen Transportstrecken muss ein vereinfachender Ansatz gewählt werden, der einen Kompromiss bietet zwischen den individuellen Eigenschaften der Strecke und der praktischen Gewinnung der notwendigen Daten über den Steigungswiderstand. Grundlage hierzu ist die Überlegung, aus den Streckennetzen für Bahn, Kraftfahrzeug und Flugzeug möglichst deckungsgleiche Streckenverläufe zu wählen, so dass die Landfahrzeuge den gleichen topographischen Randbedingungen ausgesetzt sind.

Für die untersuchten Streckenverläufe in Kapitel 3.5 wird aus den Höhenangaben der Start- und Zielorte sowie der dazwischen liegenden Entfernung eine mittlere Steigung bestimmt.

| Startort | Höhe NN<br>[m] | Zielort   | Höhe NN<br>[m] | Höhendifferenz<br>[m] | Entfernung<br>[m] | Neigung<br>[%] |
|----------|----------------|-----------|----------------|-----------------------|-------------------|----------------|
| München  | 520            | Hamburg   | 6              | 514                   | 773000            | 0,0665%        |
| München  | 520            | Frankfurt | 100            | 420                   | 375600            | 0,1118%        |
| München  | 520            | Köln      | 55             | 465                   | 578500            | 0,0804%        |
| Köln     | 55             | Berlin    | 33             | 22                    | 564100            | 0,0039%        |

**Tabelle 4-24: Mittlere Steigungen der Referenzstrecken**

Aufgrund der großen Entfernungen ergibt sich bei den Referenzstrecken eine sehr geringe mittlere Steigung zwischen 0,067% und 0,112% in Nord-Süd-Richtung sowie von 0,0039% auf der Strecke Köln – Berlin. Dieser vereinfachte Ansatz berücksichtigt keine besonderen Steigungsabschnitte, die zwischen Start- und Zielort liegen, die aber zu einem deutlichen temporären Widerstandsanstieg führen können, wie die nachfolgende vereinfachte Graphik zeigt:



**Bild 4-22: Vereinfachter Höhenverlauf der Strecke München – Hamburg**

Auf Streckenabschnitten von 70 – 100 km Länge zwischen München und Hamburg bestehen immer wieder deutliche Steigungs- und Gefälleabschnitte. Ermittelt man die Steigungen und Gefälle für diese Teilabschnitte der Strecke und bestimmt hierzu den Mittelwert, so ergibt sich ein geringfügig niedrigerer mittlerer Steigungs-/Gefällewert von 0,0615%.

| Ort         | Höhe [m] | Entfernung [m] | Steigung [%]   |
|-------------|----------|----------------|----------------|
| München     | 520      | 0              |                |
| Nürnberg    | 340      | 167000         | 0,11%          |
| Steigerwald | 488      | 235000         | 0,06%          |
| Würzburg    | 182      | 285000         | 0,11%          |
| Rhön        | 500      | 355000         | 0,09%          |
| Fulda       | 280      | 383000         | 0,06%          |
| Knüll       | 480      | 423000         | 0,05%          |
| Kassel      | 510      | 494000         | 0,01%          |
| Solling     | 528      | 504000         | 0,00%          |
| Hannover    | 56       | 658000         | 0,07%          |
| Hamburg     | 6        | 712000         | 0,01%          |
|             |          | Mittelwert:    | <b>0,0615%</b> |

**Tabelle 4-25: Mittlere(s) Steigung/Gefälle der Teilstrecken M - HH**

Ähnlich liegen die Verhältnisse für die anderen Referenzstrecken, deren Auswertung im Anhang D aufgeführt ist. Als Ergebnis dieser Analyse ist festzuhalten, dass mit der sehr vereinfachten Annahme einer/s konstanten Steigung/Gefälles über die gesamte Strecke eine erste Abschätzung des Steigungswiderstands möglich ist. Der dabei auftretende Fehler im Vergleich zur Berücksichtigung von lokalen Steigungsabschnitten liegt unter 8%.

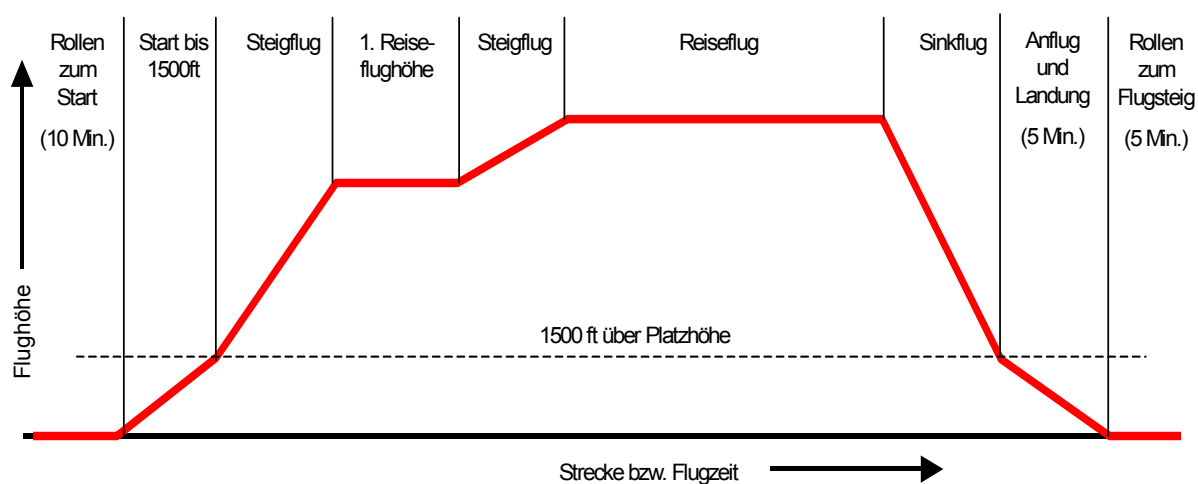


Aufgrund dieser Auswertung werden für die Referenzstrecken die mittleren Steigungswerte nach Tabelle 4-24 bei der Widerstandsberechnung für Kraftfahrzeug und Bahn berücksichtigt.

#### 4.4.3 Steigungen im Flugprofil des Flugzeugs

Beim Flugzeug fließt der Steigungswiderstand unmittelbar in die Erhöhung des Widerstands ein, der sich durch eine veränderte Klappenstellung und die Auftriebserhöhung während der Start- und Landephasen ergibt.

Die Steigflugphase eines Flugzeugs umfasst den Abschnitt zwischen einer Starthöhe von 450 m (1500ft) und dem Erreichen der Reiseflughöhe, die im Durchschnitt bei 10000 m angesetzt werden kann. In dieser Phase fliegt das Flugzeug in der aerodynamisch günstigen Reiseflugkonfiguration, so dass der aerodynamische Widerstand gering ist. Der Höhengewinn wird vor allem durch den Schubüberschuss erreicht. Die Sinkflugphase ist vor dem Landeanflug angesiedelt und umfasst in umgekehrter Weise die Höhendifferenz zwischen Reiseflughöhe und der Landeanflughöhe von 450 m.



**Bild 4-23: Standardflugprofil eines Verkehrsflugzeugs**

Im Gegensatz zu Bahn und Kraftfahrzeug fallen Steig- und Sinkabschnitte als feste Phasen im Verlauf eines Fluges an. Höhenänderungen treten während des Fluges in der Regel nicht auf. Damit kann der Einfluss des Steigungswiderstands für das Flugzeug recht genau ermittelt werden. Flugzeuge steigen und sinken mit einem Bahnwinkel zwischen  $3^\circ$  und  $5^\circ$ , wobei Steigflüge mit den größeren Winkeln geflogen werden. Im Gegensatz zu Bahn und Kraftfahrzeug nimmt der Steigungswiderstand

des Flugzeugs mit zunehmender Höhe in Folge der sinkenden Luftdichte und der stetigen Kraftstoffmassenverminderung ab.

Für einen Airbus A320 ergeben sich unter Annahme einer quadratischen Polaren nachfolgende Widerstandsbeiwerte während der Start- und Landephase.

|                       | Start   | Landung |
|-----------------------|---------|---------|
| Geschwindigkeit [m/s] | 75,6    | 70,48   |
| $C_{AmaxS,L}$         | 2,68    | 3,60    |
| k (vgl. Gl. 4-35)     | 0,04    | 0,04    |
| $C_{W0}$              | 0,01945 | 0,01945 |
| $C_{WS,L}$            | 0,306   | 0,536   |
| $E_{S,L}$             | 8,76    | 6,72    |
| Reiseflugwerte        |         |         |
| $C_W$                 | 0,02817 | 0,02817 |
| $E_R$                 | 15,97   | 15,97   |

**Tabelle 4-26: Vergleich Widerstandsbeiwert und Gleitzahl Start und Landung gegenüber Reiseflug**

Verglichen mit den Werten im Reiseflug liegen die Widerstandsbeiwerte während der Start- und Landephase um den Faktor 10 bzw. 20 höher. Bei aerodynamischen Effizienz fällt der Unterschied mit dem 1,8- bzw. 2,38-fachen nicht so drastisch aus.

In Verbindung mit einem Start- und Landeanfluganteil von 4,7% an der Strecke M – HH wird deutlich, dass die aerodynamische Güte in diesen Phasen nicht wesentlich auf den Fahrwiderstand entlang der Gesamtstrecke wirkt. Auf der Strecke M – FFM beträgt der Anteil der Start- und Landephase 6,5%. Da beim Flugzeug jedoch der Schubüberschuß wesentlich das Steigen bestimmt, wird dieser Aspekt bei einer reinen Fahrwiderstandsbetrachtung nicht berücksichtigt. Anhand der Schubleistungsgleichung lässt sich der notwendige Schubüberschuß für den Steigflug ableiten, [BRÜN1986].

$$\frac{F}{mg} = \frac{W}{m \cdot g} - \frac{w}{V}$$

**Gl. 4-36**

In dieser Arbeit wird der Steigungswiderstand bzw. Energiebedarf für Steigen und Sinken sowohl indirekt über den Kraftstoffverbrauch als auch mittels des phasenabhängigen aerodynamischen Fahrwiderstands und des Schubbedarfs ermittelt.

#### 4.4.4 Zusammenfassung und Vergleich der Steigungswiderstände

Die Berücksichtigung der Steigungen der Strecken ist für die Ermittlung der Fahrwiderstände bedeutsam, gestaltet sich jedoch sehr schwierig. In dieser Arbeit wird daher für Kraftfahrzeuge und Bahn ein vereinfachter Ansatz gewählt, mit dem die mittlere Steigung für jede Strecke ermittelt wird.

Den Einfluss der Steigung in Form eines Wirkungsgrades zu beschreiben, führt letztendlich wieder zur Angabe des Steigungswinkels, da hier als Referenzwert die steigungsfreie Bewegung zu Grunde gelegt wird. Dem Vorgehen anderer Untersuchungen folgend wird für Bahn- und Straßenfahrzeuge ein einheitlicher Steigungswert festgelegt. Dabei hat die Analyse der Steigungswerte bezogen auf die Gesamtstrecke sehr kleine Steigungen hervorgebracht. Für das Flugzeug ist der Steigungswiderstand bezogen auf die Gesamtflugstrecke weniger bedeutend, während der Kraftstoffverbrauch in Folge des notwendigen Schubüberschusses im Steigflug einen wesentlichen Beitrag zum Gesamtenergiebedarf darstellt.

#### **4.5 Einfluss des Rollwiderstands**

Roll- und Kurvenwiderstand beeinflussen die Fahrwiderstände der zu untersuchenden Transportsysteme. Beide Widerstandsanteile werden in Tabelle 4-3 dargestellt. Sie sind direkt proportional der Fahrzeugmasse. In diesem Abschnitt werden die heutigen Rollwiderstandsbeiwerte und deren zukünftiges Verbesserungspotential beleuchtet.

Der Kurvenwiderstand wird zum Zwecke der Vereinfachung für alle Transportsysteme einheitlich nicht betrachtet, da dies eine sehr detaillierte Beschreibung der Streckenverläufe voraussetzt, für die kein Datenmaterial verfügbar ist.

##### 4.5.1 Rollwiderstand bei Kraftfahrzeugen

Der Rollwiderstand liefert insbesondere bei Lkw einen erheblichen Beitrag zum Gesamtfahrwiderstand. Im für Lkw hohen Geschwindigkeitsbereich von über 70 km/h stellt er den dominierenden Faktor etwa im Verhältnis 2:1 zum aerodynamischen Widerstand, vgl. Bild 4-11 .

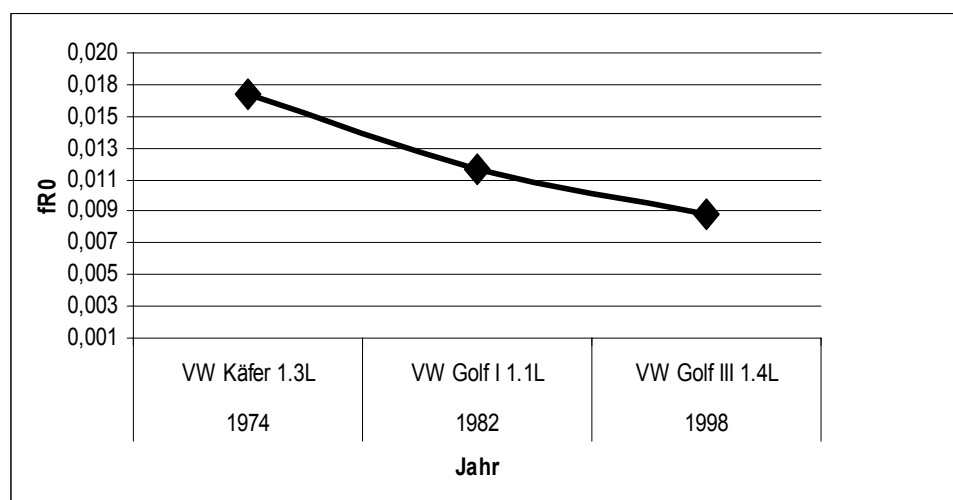
Aber auch bei Pkw trägt der Rollwiderstand bei einer Geschwindigkeit von etwa 80 km/h mit rund 50% zum Fahrwiderstand bei, [HUCH1997]. Daher sind sein Einfluss sowie Möglichkeiten zur Reduktion im Rahmen dieser Arbeit zu betrachten.

Der Rollwiderstand ergibt sich bei Kraftfahrzeugen durch die elastische Verformung des Reifens beim Abrollen (Walkarbeit). Auf befestigten Fahrwegen, wie sie in dieser Arbeit zu Grunde gelegt werden, steigt der Rollwiderstand deutlich mit der Fahrgeschwindigkeit an. Zusätzlich bestimmt der Reifendruck den Rollwiderstand, der mit abnehmendem Druck ansteigt. Für Pkw lässt sich diese Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwerts von der Fahrgeschwindigkeit durch folgende Formel darstellen:

$$f_R = f_{R0} + f_{R1} \frac{v}{100 \text{ km/h}} + f_{R4} \left( \frac{v}{100 \text{ km/h}} \right)^4 \quad \text{Gl. 4-37}$$

Im Geschwindigkeitsbereich bis etwa 100 km/h liegt der Rollwiderstandsbeiwert nahezu konstant bei  $f_{R0} \approx 0,007$  und damit deutlich unter 1% der Radlast. Im Geschwindigkeitsbereich von 100 – 160 km/h steigt der Rollwiderstandsbeiwert abhängig von der Fahrgeschwindigkeit mit  $f_{R1}$  auf 0,01 an, siehe [MITS1995]. Bei Geschwindigkeiten über 160 km/h ist der Widerstandsanstieg überproportional. Gleichzeitig ist zu beobachten, dass der Rollwiderstand an der Hinterachse schneller ansteigt als an der Vorderachse, was auf die unterschiedliche Wirkung des Auftriebs am Fahrzeug zurückzuführen ist. Der Auftrieb sorgt hier für eine geringe Reduzierung des Rollwiderstands, siehe [STAS1984]. Dieser Effekt wird für diese Arbeit jedoch nicht berücksichtigt.

Der statische Rollwiderstandsbeiwert  $f_{R0}$  konnte in den letzten 30 Jahren von rund 0,002 auf 0,001 ungefähr halbiert werden.



**Bild 4-24: Entwicklung des Rollwiderstandsbeiwerts**

Bei Lastkraftwagen wirkt die Radlast wesentlich stärker als bei Pkw, während der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit in dem relevanten Geschwindigkeitsbereich zwischen 60 und 90 km/h geringer ist. Daher wird der Rollgeschwindigkeitsbeiwert für einen Einzelreifen entsprechend abgewandelt bestimmt:

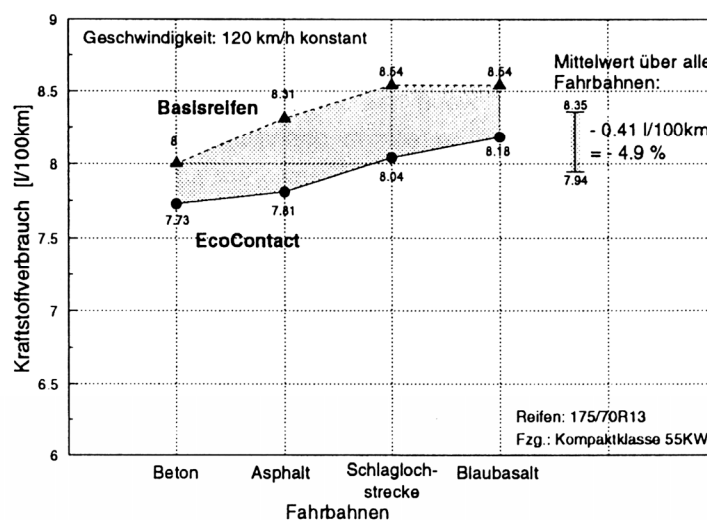
$$f_R = f_{Rv} + \Delta f_R \quad \text{Gl. 4-38}$$

$$f_R = 0,0175 + 0,000035 \cdot v + 0,000006 \cdot F_z^2 - 0,00058 \cdot F_z \quad \text{Gl. 4-39}$$

Die Auswertung der oben stehenden Bestimmungsgleichung für den Rollwiderstandsbeiwert zeigt, dass für einen geringen Rollwiderstand eine geringe Radlast und damit eine hohe Achszahl anzustreben sind.

Durch geschickte Auswahl formstabiler Materialien (insbesondere Polymere) und Auslegung der Reifen konnten die Verluste durch die Walkarbeit reduziert werden. Die Rollwiderstandsbeiwerte  $f_{R0}$  liegen heute für Nutzfahrzeuge bei rund 0,005 und damit sogar besser als für Pkw. Dies ist dadurch begründet, dass für Pkw aufgrund des deutlich höheren Geschwindigkeitsbereichs eine höhere Haftung erforderlich ist. Hinsichtlich des weiteren Verbesserungspotentials scheint bei einem Wert von rund 0,005 eine technologische Grenze erreicht zu sein, die keine wesentlichen Verbesserungen mehr erwarten lässt, [DAUE2002].

Die nachstehende Graphik zeigt hierzu am Beispiel von Pkw-Reifen, dass durch verbesserte Reifen Reduktionen im Kraftstoffverbrauch von rund 0,4 l/100km oder ca. 5% möglich sind.



**Bild 4-25: Potential zur Verbrauchsreduktion durch verbesserte Reifen, [SCHU1993]**

Dabei wurde der Rollwiderstandsbeiwert um 20% vermindert. Um eine weitere Verminderung des Rollwiderstands zu erreichen, ist der Laufflächenbereich des Reifens zu modifizieren. Aufgrund der vorstehenden Analyse werden in dieser Arbeit für Pkw die folgenden Rollwiderstandsbeiwerte verwendet:

| Rollwiderstandsbeiwert | Pkw    |
|------------------------|--------|
| $f_{R0}$               | 0,009  |
| $f_{R1}$               | 0,002  |
| $f_{R4}$               | 0,0008 |

**Tabelle 4-27: Rollwiderstandsbeiwerte für Pkw**

#### 4.5.2 Rollwiderstand bei der Bahn

Der Rollwiderstand wird in der Bahntechnik im Laufwiderstand erfasst. Ähnlich wie beim Pkw hängt er von den Materialeigenschaften des Rad/Schienekontakts ab. Für den Fall  $v=0$  entspricht der Laufwiderstand dem reinen Rollwiderstand. Nach [FIL1995] liegt der Rollwiderstandsbeiwert aus Gl. 4-11 für Schienenfahrzeuge der Normalspur bei rund  $c_0=0,0025$ . Moderne Schienenfahrzeuge wie der ICE weisen nur noch Rollwiderstandsbeiwerte von  $c_0=0,002 - 0,0015$  auf. Im Labor lassen sich Spitzenwerte von bis zu 0,001 erreichen.

Bei Magnetbahnen existiert der Rollwiderstand in der klassischen Form nicht, [MNIC1998]. Der Wirbelstrom in der Führungsschiene führt jedoch zu einem Widerstand, der die Magnetbahn an einem reibungsfreien Fortkommen hindert und daher dem Rollwiderstand der Schienenfahrzeuge äquivalent ist.

$$F_{W_w} = n_s \cdot \left[ 0,1 \cdot \sqrt{v} + 0,002 \cdot (\sqrt{v})^{0,7} \right] \text{ mit } v \text{ in [m/s]; [kN]} \quad \text{Gl. 4-40}$$

Wie aus der empirischen Gleichung ersichtlich ist, wird der Wirbelstromwiderstand direkt bestimmt durch die Zuglänge  $n_s$ . Der Einfluss der Geschwindigkeit ist im Gegensatz zum klassischen Rollwiderstand gedämpft.

#### 4.5.3 Rollwiderstand des Flugzeugs

Der Rollwiderstand des Flugzeugs tritt nur während der Taxi-Phasen vor dem Start und nach der Landung auf. Der auftretende Rollwiderstand wird durch das Flugzeuggewicht und die Qualität des Rollfeldes bestimmt. Typischerweise wird hier von einem Rollwiderstandsbeiwert von  $\mu=0,02$  ausgegangen, [JENK1999]. Dieser

Wert liegt doppelt so hoch wie bei Pkw im Hochgeschwindigkeitsbereich. Die Ursache liegt hier vor allem in der notwendigen hohen Bodenhaftung für den Lande- und Bremsabschnitt. Aber auch für den Start ist eine gute Bodenhaftung als Stützkraft günstig.

Berücksichtigt man, dass die Rollphasen beim Flugzeug mit je 5 Minuten bei Start und Landung oder je rund *2000 Metern* sehr kurz sind, so fällt der Rollwiderstand bei einer Gesamtstrecke von mehreren hundert bis tausend Kilometern nicht signifikant ins Gewicht.

#### 4.5.4 Zusammenfassung und Vergleich der Rollwiderstände

Der Rollwiderstand liefert aufgrund seiner starken Geschwindigkeitsabhängigkeit bei Pkw einen erheblichen Beitrag zum Fahrwiderstand, bei Lkw hingegen dominiert die Achslast als bestimmende Größe. In den letzten 30 Jahren konnte der statische Anteil des Rollwiderstandsbeiwerts ungefähr halbiert werden. Verglichen mit dem statischen Rollwiderstandsbeiwert der Bahn erreichen Kraftfahrzeuge hier etwa den vierfach höheren Wert.

Für Bahnfahrzeuge werden aufgrund des Eisenkontaktes sehr niedrige Werte erzielt, die sich aber eher nachteilig auswirken. Ein zu geringer Rollwiderstandsbeiwert führt zu einer verminderten Haftung, so dass insbesondere bei der Bahn eher eine Erhöhung des Widerstandsbeiwertes, z.B. durch Gummihafreifen anzustreben ist.

Für Flugzeuge ergeben sich deutlich größere Rollwiderstandsbeiwerte, da das Flugzeug sowohl für den Start als auch für die Landung und das anschließende Bremsen eine sehr starke Bodenhaftung benötigt, um die Schubkräfte abzustützen. Hier ist betriebsbedingt keine Reduktion anzustreben. Andererseits trägt die Rollstrecke bei einer Blockstrecke von *300 km* nur zu *1,3%* zur Gesamtstrecke bei, so dass der Einfluss des Rollwiderstands bei Flugzeugen vernachlässigbar ist.

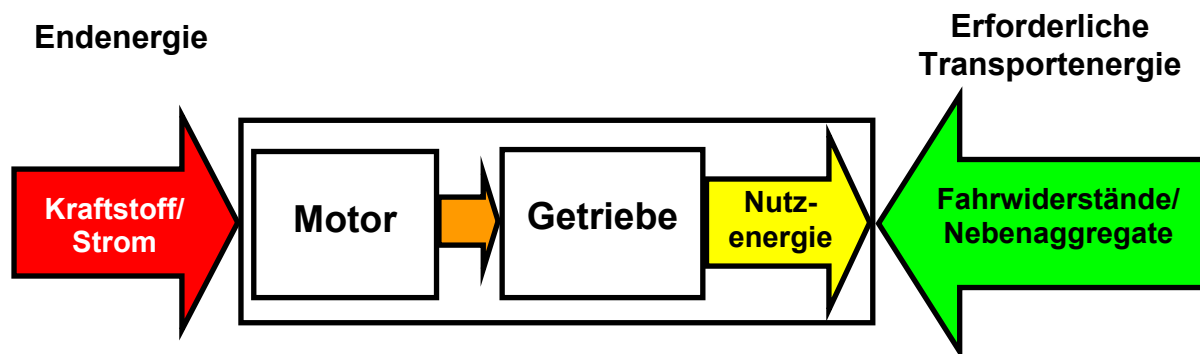
| Rollwiderstandsbeiwert | Pkw  | Lkw   | Bahn   | Flugzeug |
|------------------------|------|-------|--------|----------|
| $\mu$                  | 0,01 | 0,005 | 0,0025 | 0,02     |

**Tabelle 4-28: Rollwiderstandsbeiwerte im Vergleich**

Aus dem Vergleich geht hervor, dass die Bahn zwar die günstigsten Rollwiderstandsbeiwerte aufweist, aber zur Umsetzung ihres Antriebsmomentes erhebliche Gewichtskräfte aufbringen muss. Der Rollwiderstandsbeiwert der Pkw weist das größte Verbesserungspotential auf.

#### 4.6 Untersuchung der Fahrzeugantriebe

Die Fahrzeugantriebe bestehend aus Motor und Getriebe nehmen in der Bewertung der Transporteffizienz eine Schlüsselstellung ein. Ihre Aufgabe liegt darin, die im Kraftstoff/Strom enthaltene Endenergie möglichst verlustarm in mechanische Nutzenergie umzuwandeln. Die Nutzenergie dient sowohl der Überwindung der Fahrwiderstände als auch dem Betrieb weiterer Aggregate wie z.B. Hydrauliksysteme, Klimaanlage und anderer, die zum Betrieb der Verkehrssysteme und zur Gewährleistung eines gewissen Komforts benötigt werden.



**Bild 4-26: Energieumsetzung in Motor und Getriebe**

In dieser Arbeit werden elektrische Antriebe der Bahnen, Verbrennungsmotoren der Kraftfahrzeuge und Flugtriebwerke betrachtet. Um hier die Qualität der Antriebe vergleichend gegenüberstellen zu können, wird jeweils der gesamte Antriebsstrang bestehend aus Motor und Getriebe betrachtet. Das Auslegungsziel liegt in der Verminderung des Kraftstoffverbrauchs bei gleichzeitiger Bereitstellung von mehr Antriebskraft.

Die Güte der Antriebe wird als Wirkungsgrad  $\eta_A$  angegeben.

##### 4.6.1 Kraftfahrzeugantriebe

Bei der Untersuchung von Kraftfahrzeugantrieben ist zu unterscheiden zwischen Otto- und Dieselmotoren sowie zwischen Handschalt- und Automatikgetrieben, [LARS1994].

Der Antriebswirkungsgrad für Kraftfahrzeuge setzt sich aus dem Motorwirkungsgrad und dem Getriebewirkungsgrad zusammen:

$$\eta_A = \eta_M \cdot \eta_G$$

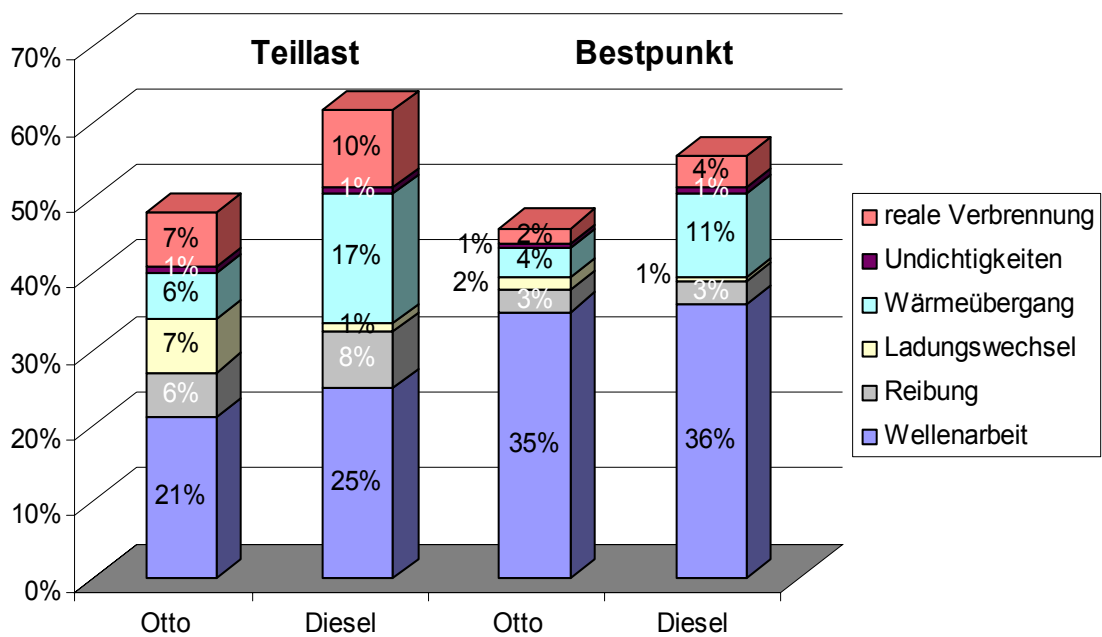
**Gl. 4-41**



Ottomotoren weisen dabei einen relativ geringen Wirkungsgrad von rund  $\eta_M=0,35$  im Auslegungspunkt (Volllast) auf, so dass nur rund ein Drittel der eingesetzten Endenergie tatsächlich für die Erzeugung des Antriebsmoments genutzt wird. Im Teillastbereich fällt der Wirkungsgrad deutlich auf rund  $\eta_M=0,20$  ab.

Hier ist der Dieselmotor dem Ottomotor durch eine bessere Ausnutzung der Endenergie überlegen und erreicht einen Wirkungsgrad von etwa  $\eta_M=0,43$  im Auslegungspunkt. Des weiteren weist der Dieselmotor auch im Teillastbereich gegenüber dem Ottomotor bessere Wirkungsgrade auf, so dass er als das effizientere Antriebsaggregat angesehen werden kann. Diese Verhältnisse gelten auch für Lkw, die ausschließlich mit Dieselmotoren betrieben werden, [WOLF1997].

Um hier Verbesserungspotentiale zu ermitteln, ist ein Blick auf die Verlustquellen erforderlich.



**Bild 4-27: Verlustanteile bei Otto- und Dieselmotor, [LARS1994]**

Die größten Verluste treten beim Otto- wie beim Dieselmotor bei der Wellenarbeit sowie durch Reibung auf. Der Dieselmotor gewinnt seinen besseren Wirkungsgrad durch das höhere Verdichtungsverhältnis, das beim Ottomotor durch die Klopfgrenze begrenzt ist. Zusätzlich profitiert der Dieselmotor durch den höheren Luftüberschuss. Der Ottomotor verliert gegenüber dem Dieselmotor an Effizienz durch die hohen

Ladungswechselperluste im Teillastbereich, die durch die Drosselsteuerung hervorgerufen werden.

Aufgrund dieser Situation liegen die Schlüssel zur Verbesserung des Motorwirkungsgrads bei Ottomotoren in der Mehrventiltechnik und Anhebung des Verdichtungsverhältnisses. Variable Verdichtungsverhältnisse können vor allem im Teillastbereich zu einer Wirkungsgradverbesserung führen, [DAUE2002].

Im Bereich der Getriebe liegt die Effizienz deutlich höher. So weisen Handschaltgetriebe einen mittleren Wirkungsgrad von  $\eta_G=0,96$  im Volllastpunkt aus. Lkw-Getriebe erreichen vergleichbare Werte. Im Teillastbereich fällt der Getriebewirkungsgrad geringfügig auf etwa  $\eta_G=0,90$  ab, siehe [LARS1994].

Andere Untersuchungen zeigen in diesem Zusammenhang auch, dass eine Erhöhung der Gangzahl nicht automatisch zu verbesserten Getriebewirkungsgraden führt, [ADAM1998]. Vielmehr deutet vieles darauf hin, dass das 5-Ganggetriebe für Pkw eine optimale Auslegung darstellt.

Ein Vergleich mit älteren Angaben zeigt, dass bei Getrieben in den letzten Jahren deutliche Verbesserungen des Wirkungsgrads von rund 10% erzielt wurden, [BIAL1990].

Im Hinblick auf die Transporteffizienz ist neben hohen Wirkungsgraden auch der Bereich des minimalen Kraftstoffverbrauchs von Bedeutung. Dieser liegt bei Pkw etwa bei 100 km/h, da hier Drehzahl abhängig der Auslegungspunkt des Antriebs und gleichzeitig der Punkt liegt, ab dem die Fahrgeschwindigkeit einen dominierenden Einfluss auf den Fahrwiderstand gewinnt.

### 4.6.2 Bahnantriebe

In der Bahntechnik kommen Dampf-, Diesel- und Elektroantriebe zum Einsatz. Heute sind fast ausschließlich Elektroantriebe für Schienenfahrzeuge im Fernreiseverkehr anzutreffen. Zusätzlich gewinnen Magnetantriebe zunehmend an Bedeutung und sind daher als Antriebsform mit zu betrachten.

#### 4.6.2.1 Elektrische Bahnantriebe

Die Systemgrenze für die Untersuchung der Elektroantriebe einschließlich der zugehörigen Getriebe zur Erzeugung des Antriebsmoments am Rad stellt die verfügbare Fahrspannung von  $1\sim 15\text{ kV}-16\text{ 2/3 Hz}$  am Fahrdraht dar. Leitungs- und

Umspannverluste werden nicht den Antrieben zugeordnet, sondern sind in den Verteilwirkungsgraden enthalten.

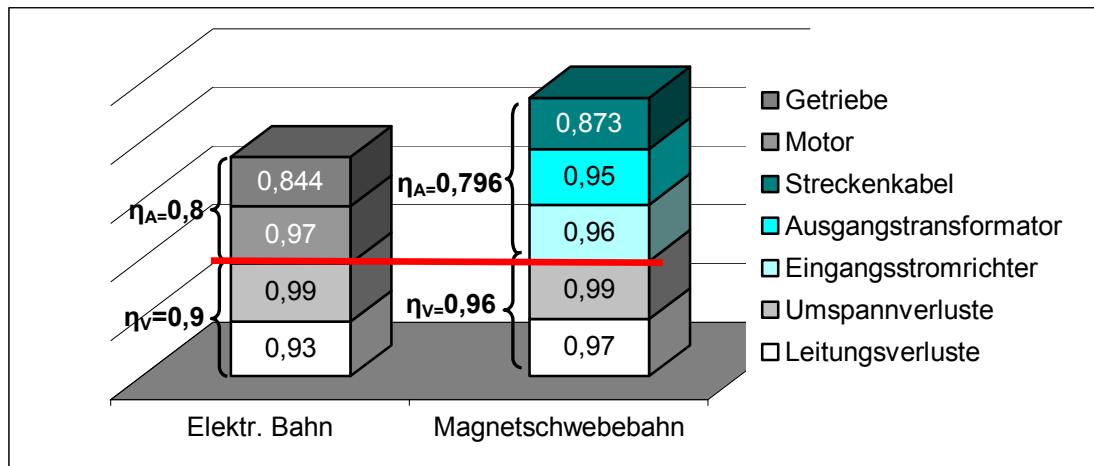
Alle neuen Elektrolokomotiven und Hochgeschwindigkeitszüge der Deutschen Bahn AG wie EuroSprinter, BR 120.1, BR 101 und BR 152 sowie die ICE1-3 verfügen über Asynchronmotoren, siehe [FISC1993], [STIL1996], [KIEß1996], [KURZ1995]. Der Wirkungsgrad eines solchen Asynchronantriebs liegt bei etwa  $\eta_M=0,9$ , siehe [SCHU2002].

Für Getriebe gibt *Filipovic* Werte zwischen  $\eta_G=0,97-0,98$  an, siehe [FIL1995]. Andere Angaben für den ICE liegen bei  $\eta_M=0,97$  für den Motor und  $\eta_G=0,844$  für den Getriebeteil, [SCHU2002b].

Diese Werte werden gestützt durch Messungen der Schweizer Bahnen an deren neuer Hochgeschwindigkeitslokomotive Re4/4, bei der am Fahrmotor Verluste von 10% ermittelt wurden.

#### 4.6.2.2 Antriebssystem Metrorapid

Das Antriebssystem des Metrorapid basiert auf einem anderen Konzept als die übrigen betrachteten Verkehrssysteme. Der Antrieb von Magnetfahrssystemen liegt im Fahrweg. Die in Deutschland realisierten Antriebe basieren auf Langstator-Linearmotoren, bei denen Drehstrom durch die Wicklungen entlang des Fahrwegs fließt. Dieses Antriebskonzept zeichnet sich durch eine berührungslose Schubkraftherzeugung aus, so dass mechanische Getriebeelemente nicht erforderlich sind. Auf der anderen Seite benötigen derartige Linearmotoren Eingangsstromrichter, Bremswiderstände und Streckenkabel, die ebenfalls nur mit Verlusten betrieben werden können.



**Bild 4-28: Antriebs- und Getriebewirkungsgrade der Magnet- und el. Eisenbahn, [SCHU2002c]**

Diese drei Komponenten führen zu einem Gesamtantriebswirkungsgrad von rund  $\eta_A = 0,796$  für den Metrorapid, der im Vergleich zum Antriebswirkungsgrad der elektrischen Bahn rund 3% geringer ausfällt.

#### 4.6.3 Flugzeugantriebe

Im Gegensatz zu den Antrieben der Kraft- und Bahnfahrzeuge erfolgt bei den zu untersuchenden Flugzeugen die Vortriebserzeugung unmittelbar durch Erzeugen der Schubkraft mit Hilfe von Propeller- oder Turboluftstrahlantrieben. Die Schubkraft resultiert dabei aus dem Luftmassenstrom und der Geschwindigkeitsdifferenz aus Fluggeschwindigkeit und Ausströmgeschwindigkeit des Triebwerks.

$$F_{TW} = \dot{m}_L \cdot (v_{TW} - v) \quad \text{Gl. 4-42}$$

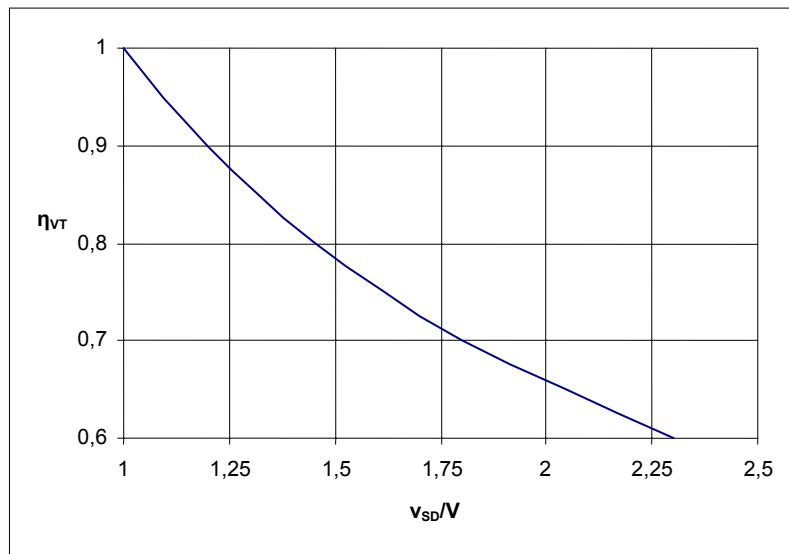
Heutige Unterschallverkehrsflugzeuge werden mit so genannten Nebenstrom- oder Fan-Triebwerken ausgerüstet, um einen hohen Luftmassendurchsatz zu erzeugen. Die Nebenstromverhältnisse liegen in der Regel zwischen 5:1 und 6:1.

Der Antriebswirkungsgrad bei Flugzeugen basiert auf dem Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{TW_{ges}}$  des Triebwerks, siehe [HAGE1982]:

$$\eta_{TW_{ges}} = \frac{F \cdot v_0}{\dot{m}_B \cdot H_u} = \eta_{th} \cdot \eta_{VT} \quad \text{Gl. 4-43}$$

Der Gesamtwirkungsgrad eines Triebwerks setzt sich aus dem Vortriebswirkungsgrad  $\eta_{VT}$  und dem thermischen Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  zusammen. Während der Vortriebsgrad durch das Verhältnis von Ausström- zur

Fluggeschwindigkeit geprägt ist, beschreibt der thermische Wirkungsgrad vor allem die Güte der Arbeitsprozesse in Verdichter, Brennkammer und Turbine.



**Bild 4-29: Abhängigkeit des Vortriebswirkungsgrades von der Ausströmgeschwindigkeit, [HAGE1982]**

Moderne Triebwerke wie das PW-800 erzielen durch höhere Vortriebsgrade Kraftstoffersparnisse von bis zu 10%, [LANG2002]

Die Güte des Verdichters wird durch das Verdichterdruckverhältnis und den Verdichterwirkungsgrad charakterisiert. Der Verdichterwirkungsgrad beschreibt dabei, wie viel der vorhandenen Energie aus dem Drehmoment der Antriebswelle umgesetzt wird in Verdichtungsarbeit. Die Wirkungsgrade heutiger Verdichter liegen etwa bei  $\eta_V=0,9$ . Die Verluste, die hier auftreten in Form von Druckverlusten, entstehen vor allem durch Verwirbelungen und Spaltverluste an den stehenden und rotierenden Verdichterschaufeln.

Neben der Verbesserung des Verdichterwirkungsgrades liegt ein weiteres wesentliches Potential zur Erhöhung der Triebwerkseffizienz in der Vergrößerung der By-Pass-Verhältnisse, um einen höheren Massendurchsatz zu erzeugen. Hier wird auch in der Zukunft ein deutliches Potential zur Kraftstoffverbrauchsreduktion von bis zu 20% gesehen, [LANG2002].

Der Wirkungsgrad der Brennkammer ergibt sich aus dem Verhältnis der real zugeführten Wärme zum Heizwert des Kraftstoffs. Damit hängt der Wirkungsgrad entscheidend von der Qualität der Verbrennung ab. Die Kernaufgabe besteht hier in der verlustarmen Reduktion der Durchströmgeschwindigkeit und der erforderlichen

gleichförmigen Zerstäubung und Verteilung des Kraftstoffs. Für eine optimale Verbrennung liegt das Kraftstoff/Luft-Gemisch bei 15%, so dass je nach Flugzustand der Brennkammerwirkungsgrad variiert. Typischerweise liegt der Brennkammerwirkungsgrad bei modernen Triebwerken im Bereich  $0,90 \leq \eta_{Bk} \leq 0,98$  siehe [HÜNE1983]. Weitere Erhöhungen der Brennkammertemperaturen in Verbindung mit entsprechend hitzebeständigen Turbinen lassen hier weitere Verbesserungen erwarten.

In der Turbine wird das verdichtete und erhitzte Gas entspannt, wodurch der Verdichter und der Bläser angetrieben werden. Hierbei geht ebenfalls ein Teil der im Gas enthaltenen Energie durch Umlenkverluste und Spaltströmungen verloren, so dass zwischen  $0,72 \leq \eta_T \leq 0,92$  der nutzbaren Energie tatsächlich in Drehmoment umgesetzt werden. Die Schubdüse spielt bei zivilen Flugtriebwerken nur eine untergeordnete Rolle, um die verbleibende Restenergie der Strömung zu nutzen.

In Analogie zu den Antriebswirkungsgraden für Kraftfahrzeug und Bahn zeigt die folgende Tabelle die Gesamtwirkungsgrade für verschiedene Flugantriebe der Airbusfamilie im Reiseflug ( $H_U = 43000 \text{ kJ/kg}$ ).

| Flugzeug  | A300-600     | A310         |              | A320-200     |              | A321         | A330-300     |              |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Triebwerk   | CF6-80C2 A1  | CF6-80A1     | JT9D-7R4-E1  | CFM56-5A3    | V2500 A1     | V2500 A5     | PW-4164      | CF6-80E1-A3  |
| Flughöhe [m]  | 7500         | 11000        | 11000        | 8500         | 8500         | 8500         | 12000        | 12000        |
| Fluggeschwindigkeit Ma [-]                              | 0,76         | 0,80         | 0,80         | 0,82         | 0,82         | 0,82         | 0,81         | 0,81         |
| Fluggeschwindigkeit [m/s]                               | 239          | 236          | 236          | 251          | 251          | 251          | 239          | 239          |
| Reiseflugschub [N]                                      | 52000        | 37500        | 50000        | 22000        | 22600        | 25500        | 57500        | 60500        |
| Kraftstoffverbrauch i. Reiseflug [kg/s]                 | 0,852        | 0,852        | 0,867        | 0,373        | 0,361        | 0,421        | 0,902        | 1,008        |
| <b>Gesamtwirkungsgrad <math>\eta_{TWges}</math> [-]</b> | <b>0,339</b> | <b>0,241</b> | <b>0,316</b> | <b>0,344</b> | <b>0,365</b> | <b>0,354</b> | <b>0,354</b> | <b>0,333</b> |

**Tabelle 4-29: Gesamttriebwerkswirkungsgrade verschiedener Airbusantriebe**

Bildet man den Mittelwert für den Triebwerkswirkungsgrad für die in dieser Arbeit untersuchten Muster A320, A321, A310, A300, so ergibt sich ein Wert von

$\eta_{TW_{ges}}=0,3265$ . Damit wird rund ein Drittel der zugeführten Endenergie bei Flugzeugen in Nutzenergie umgesetzt.

#### 4.6.4 Zusammenfassung und Vergleich der Fahrzeugantriebe

Stellt man die untersuchten Antriebswirkungsgrade für die verschiedenen Verkehrssysteme gegenüber, lassen sich zwei Wertebereiche beobachten.

| Wirkungsgrad | Pkw<br>Ottomotor | Pkw<br>Dieselmotor | Bahn ICE | Metrorapid | Flugzeug |
|--------------|------------------|--------------------|----------|------------|----------|
| $\eta_M$     | 0,35             | 0,44               | 0,97     | 0,796      | 0,3265   |
| $\eta_G$     | 0,96             | 0,96               | 0,844    | -          | -        |
| $\eta_A$     | 0,336            | 0,422              | 0,816    | 0,796      | 0,3265   |

**Tabelle 4-30: Gegenüberstellung aktueller Antriebswirkungsgrade verschiedener Verkehrssysteme**

Während Pkw und Verkehrsflugzeuge im Reisebetrieb Antriebswirkungsgrade zwischen 0,33 und 0,42 aufweisen, liegt der Wirkungsgrad bei Elektromotoren mit 0,81 deutlich höher. Hieraus ist abzulesen, dass insbesondere die Elektroantriebe von Bahn und Metrорapid mit Verlusten von rund 20% einen guten Auslegungsstand erreicht haben. Dagegen zeigen alle Verbrennungsmotoren deutlich ungünstigere Werte. Zur Verbesserung der Effizienz ist daher vor allem eine Verbesserung der Motoren und Getriebe anzustreben, wobei auch bei den Getrieben mit Wirkungsgraden über 90% eine hohe Ausnutzung erreicht ist.

#### 4.6.5 Nebenaggregate

Nebenaggregate wie Klimaanlage, Generatoren und andere Energiesenken spielen bei der Bewertung der Transporteffizienz ebenfalls eine Rolle. Obwohl sie keinen Fahrwiderstand im eigentlichen Sinne darstellen, liefern sie einen Beitrag zum Energiebedarf. Daher wird hier ihre Bedeutung für den Energiebedarf der verschiedenen Verkehrssysteme diskutiert.

##### 4.6.5.1 Nebenaggregate bei Pkw

Die Entwicklung der Pkw hat in den letzten Jahren eine stetige Zunahme des Leergewichts trotz Ausnutzung der Leichtbaupotentiale gezeigt. Eine wesentliche

Ursache hierfür liegt in den stetig gewachsenen Komfortausstattungen und den zusätzlich eingeführten Sicherheitssystemen wie Airbags und Stabilitätssystemen. So verfügt ein Oberklassemodell über 100 Elektromotoren zum Antrieb von Klimaanlageklappen oder Sitzverstellungen und anderes mehr, [WOLT2002]. Detaillierte Untersuchungen haben gezeigt, dass von rund 30% verbleibender Nutzenergie rund 1/6 wiederum zum Betrieb von Wasser- und Ölpumpe sowie des elektrischen Systems eingesetzt wird, [BAEK1999]. Weitere 2/5 entfallen auf den Betrieb der Heizungs- und Klimaanlage. Diese Nebenverbraucher führen bei Pkw zu mittleren Energieflüssen abhängig von der Motorleistung zwischen 1,7 – 4,5 kW/s für Ottomotoren und 1,3 – 3,8 kW/s bei Dieselmotoren, [WOLF1997]. Bei Lkw liegt der Energiebedarf der Nebenaggregate mit Werten zwischen 2,0 – 4,6 kW/s etwa auf gleichem Niveau.

### 4.6.5.2 Nebenaggregate bei Bahnfahrzeugen

Moderne Hochgeschwindigkeitszüge wie der ICE bieten neben der Klimaanlage als Standardkomfortausstattung weitere verbrauchsintensive Ausstattungsmerkmale wie Unterhaltungsmedien und Bordrestaurants. Diese schlagen sich mit einem mittleren Bordenergiebedarf von rund 17,5 kW je Wagen nieder und gelten auch für den Metrorapid, [MNIC1998]. Je nach Konfiguration ergibt sich nachfolgender Energiebedarf für Nebenaggregate:

| Zugtyp  | ICE 1 | ICE 2 | ICE 3 | Metrorapid |
|---|-------|-------|-------|------------|
| Wagenzahl                                     | 12    | 7     | 8     | 5          |
| Energiebedarf Nebenaggregate/Zug<br>[kWh/Zug] | 210   | 122,5 | 140   | 87,5       |

**Tabelle 4-31: Bordenergiebedarf Deutscher Hochgeschwindigkeitszüge**

Bezogen auf den Energiebedarf zur Überwindung der Fahrwiderstände umfasst der Bordenergiebedarf einen Anteil zwischen 1,6% (Metrorapid) und 2,2% (ICE 3). Diese sehr geringen Werte resultieren aus dem hohen Fahrenergieeinsatz, der durch das hohe Eigengewicht der Bahnfahrzeuge erforderlich ist.

Neben der Reduktion des Energiebedarfs gewinnt die Umsetzung der im Verkehrsmittel gespeicherten kinetischen bzw. potentiellen Energie in Endenergie eine zunehmende Bedeutung. So hat die Bahn bereits in den achtziger Jahren eine so genannte Nutzbremse für die BR 120 entwickelt, mit deren Hilfe beim Abbremsen



die kinetische Energie des Zuges in elektrische Energie umgeformt und in das Stromnetz zurückgeführt wurde, siehe [DBAG1985]. Auf diese Weise konnten bis zu 12% der Energie, die für eine bestimmte Fahrleistung erforderlich sind, zurück ins Stromnetz geführt werden. Heute werden mit dem Metrorapid Energieeinsparungen von 17% erreicht, [SCHU2002c].

Damit kann die Rückspeisung den bordseitigen Energiebedarf kompensieren und darüber hinaus auch Verluste aus dem Antrieb ausgleichen. Die Bahn nutzt hier die systemspezifischen Vorteile, um die Effizienz der Antriebe zu erhöhen. Nachdem theoretische Rechnungen Rückspeisungsgewinne von bis zu 30% ausgewiesen haben, ist hier weiteres Verbesserungspotential zu sehen.

#### 4.6.5.3 Nebenaggregate im Flugzeug

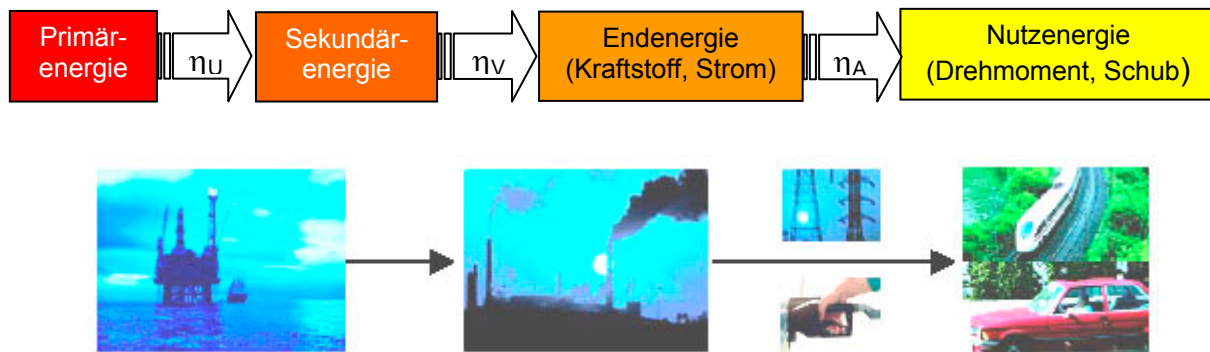
Etwa 10% der verfügbaren Nutzenergie von Flugtriebwerken dient dem Betrieb von Sekundärsystemen wie Hydraulik, Klimaanlage oder Bordstromversorgung. Insbesondere die zunehmenden Komfortforderungen führen hier zu einem stetig wachsenden Bedarf. Dies führt beispielsweise dazu, dass das Bordsystem des A340 auf eine Leistung von 300 kW ausgelegt ist, [ZAPP2002].

Hier werden derzeit EU weit Anstrengungen unternommen, den Energiebedarf durch zunehmenden Einsatz elektrischer und elektronischer Systeme nachhaltig auf etwa 7,5% Nutzenergiebedarf zu senken. Dabei soll der Einsatz von elektrischen Klimasystemen einen wesentlichen Beitrag leisten, da unter anderem auf die Entnahme von Triebwerksluft und deren aufwendige, verlustreiche Abkühlung verzichtet werden kann.

Insgesamt wird durch die Ausrichtung auf eine Energieform im Flugzeug und die abgestimmte Auslegung der Sekundärsysteme eine Energieersparnis von bis zu 25% erwartet, [SCHR2002]. Damit kann nicht nur der Gesamtenergieeinsatz im Flugzeug um 2,5%, sondern auch das Flugzeuggewicht um rund eine Tonne gesenkt werden.

## 5 Von der Primär- zur Nutzenergie

Die in Kapitel 4.6 beschriebenen Antriebsaggregate benötigen sehr unterschiedliche Endenergieträger. Für die Untersuchung der Transporteffizienz ist unter dem Aspekt des Energiebedarfs daher neben der Bewertung der Antriebe auch eine Analyse der Endenergieträgererzeugung erforderlich. Die Endenergieträger Kraftstoff oder Strom werden auf unterschiedliche Arten aus Primärenergieträgern gewonnen.

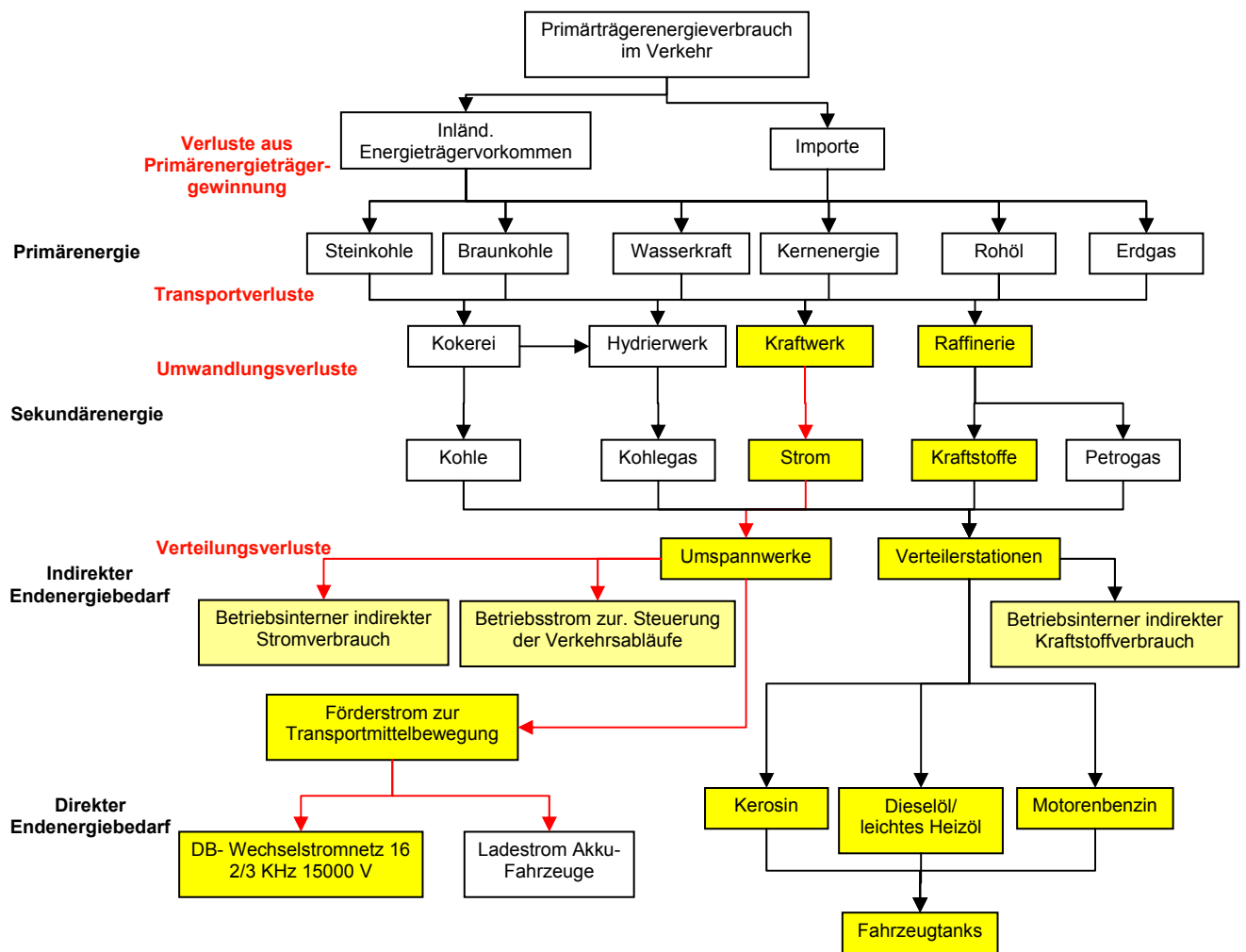


**Bild 5-1: Energiefluss von der Primär- zur Nutzenergie**

**Primärenergieträger** wie Kohle, Öl, Gas, Uran oder aber auch Wasser und Wind sind die ursprünglichen Energiespeicher. Beim Übergang vom Primär- zum Sekundärenergieträger wird Energie eingesetzt, um den Primärenergieträger zu gewinnen und zur Weiterverarbeitung zu transportieren. Anschließend findet die eigentliche Umwandlung in Raffinerien, Kraftwerken oder Kokereien statt. Bei dieser Umwandlung erfolgt eine Energieverdichtung in den Raffinerien und Kokereien. In den Kraftwerken wird dagegen mit dem Strom ein anderer Energieträger erzeugt. All diese Prozesse sind verlustbehaftet, d.h. nur ein Teil der Primärenergie wird in die **Sekundärenergieträger** überführt, die z.B. als Benzin, Kerosin oder Strom die Ursprungsenergie in verdichteter, veredelter und nutzbarer Form bereitstellen, [SCHÄ1995].

Gewinnung, Transport und Umwandlung werden in der Regel auf der Basis statistischer Erhebungen mit dem **Umwandlungswirkungsgrad**  $\eta_U$  erfasst, siehe z.B. [BIAL1990]. Für den Umwandlungswirkungsgrad kann der Wert  $\eta_U=0,936$  für Flüssigkraftstoffe wie Benzin, Kerosin und Diesel und  $\eta_U=0,359$  für Strom angesetzt werden.

Die nachfolgende Graphik gibt eine Übersicht über die verschiedenen Energieträger und deren Wandlungsstufen bis zur nutzbaren Endenergie.



**Bild 5-2: Energieträgerwandlung von der Primär- zur Endenergie, [BIAL1990]**

Anschließend erfolgt die Weiterverteilung der Sekundärenergieträger zu den Abnehmern über Stromleitungen sowie mittels anderer Transportmittel zu den Tankstellen. Gerade diese Weiterverteilung führt zu unterschiedlichen weiteren Verlusten, die mit dem **Verteilungswirkungsgrad**  $\eta_V$  beschrieben werden. Der Verteilungswirkungsgrad beträgt für Flüssigkraftstoffe etwa  $\eta_V=0,99$ . Für das Stromnetz der Bahn umfasst der Verteilungswirkungsgrad sowohl die Leitungsverluste ( $\eta_{VL}= 0,93-0,97$ ) als auch die Umspannverluste der Unterwerkstransformatoren ( $\eta_{VU}=0,99$ ), so dass sich insgesamt ein Wirkungsgrad von  $\eta_V=0,95$  ergibt.

Am Transportsystem liegt dann die so genannte **Endenergie** vor, die gegenüber der Sekundärenergie um Leitungs- und Umspannverluste sowie Transportverluste vermindert ist. Damit ergibt sich ein so genannter „Gesamtwirkungsgrad“  $\eta_{ges}$  aus dem Produkt von Umwandlungs- und Verteilungswirkungsgrad:

$$\eta_{ges} = \eta_U \cdot \eta_V$$

**Gl. 5-1**

Die Bezeichnung „Gesamtwirkungsgrad“, die in der Energietechnik weit verbreitet ist, ist an dieser Stelle etwas irreführend, da dieser Wirkungsgrad nur die Güte des Übergangs von der Primär- zur Endenergie beschreibt. Die weiteren Übergänge bis zur tatsächlichen Nutzenergie werden darin nicht erfasst.

| Gesamtwirkungsgrad | Benzin/Kerosin | Strom  |
|--------------------|----------------|--------|
| $\eta_{ges}$       | 0,9266         | 0,3421 |

**Tabelle 5-1: Gesamtwirkungsgrade für Kraftstoffe und Strom, [BIAL1990]**

Die Endenergieträger Strom und Benzin/Kerosin enthalten somit 34,21% bzw. 92,66% der Primärenergie, wenn sie im Transportmittel zum Einsatz kommen.

Hinsichtlich der Bewertung der Effizienz der Verkehrssysteme ist hieraus ersichtlich, dass Flüssigkraftstoffe den 2,7-fachen Primärenergiegehalt von Strom aufweisen.

Zusammen mit den Antriebswirkungsgraden ergibt sich hinsichtlich der Bewertung der Effizienz der Nutzenergiegewinnung ein anderes Bild.

| Wirkungsgrad  | Pkw<br>Ottomotor | Pkw<br>Dieselmotor | Bahn ICE     | Metrorapid   | Flugzeug     |
|---------------|------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| $\eta_A$      | 0,336            | 0,422              | 0,816        | 0,796        | 0,326        |
| $\eta_{Eges}$ | 0,927            | 0,927              | 0,342        | 0,342        | 0,927        |
| $\eta_{PN}$   | <b>0,311</b>     | <b>0,411</b>       | <b>0,279</b> | <b>0,272</b> | <b>0,302</b> |

**Tabelle 5-2: Effizienz der Primär-/Nutzenergieumwandlung**

Bei Betrachtung der gesamten Wankungskette von der Primär- zur Nutzenergie erweist sich der Dieselantrieb mit einem Wirkungsgrad von 0,411 als die effizienteste Antriebsform. Ottomotor und Fluggasturbinen bewegen sich mit Werten um 0,3 auf einem deutlich niedrigeren Niveau. Die Elektroantriebe setzen den geringsten

Primärenergieanteil in Nutzenergie um. Daneben fällt weiter auf, dass die Verbrennungs- und Elektroantriebe bei Betrachtung der Gesamtkette etwa die gleiche Effizienz zeigen, obwohl die Antriebswirkungsgrade der Elektromotoren über denen der Verbrennungsmotoren liegen. Auf der anderen Seite ist die Stromerzeugung und –verteilung wesentlich verlustbehafteter als die Gewinnung von Flüssigkraftstoffen.

Hieraus folgt, dass bei der Bewertung von Antrieben immer auch die Wandlungsketten zur Erzeugung der Endenergieträger zu betrachten sind. Gleichzeitig wird damit die Aussagekraft des Primärenergiegehalts als Referenzgröße unterstrichen.

## **6 Ermittlung der Transporteffizienz**

Die Transporteffizienz eines Verkehrssystems lässt sich am Aufwand ablesen, der für eine gegebene Transportaufgabe einzubringen ist. Dabei ist die Transportaufgabe durch die Transportstrecke und das zu befördernde Transportgut vorgegeben. Der hierfür notwendige Aufwand wird durch die Faktoren Zeit, Energie und Kosten beschrieben.

Bisherige Untersuchungen haben die Güte eines Verkehrssystems an den Faktoren Energieeinsatz, Transportmasse und Strecke gemessen. Dabei schnitt in der Regel das Flugzeug mit zunehmender Reisedistanz günstiger ab, während Bahn und Pkw schon auf kürzeren Entfernungen einen niedrigen spezifischen Energiebedarf auswiesen, siehe [MEHL2001].

Insbesondere im Geschäftsleben ist der Faktor Zeit von hoher Bedeutung, so dass in dieser Arbeit auch dieses Kriterium zur Bewertung herangezogen wird.

### **6.1 Notwendige Vereinfachungen**

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, hängen die Fahrwiderstände und die realen Transportabläufe von einer Vielzahl unterschiedlicher, nicht vorhersagbarer Faktoren ab. Um für alle Transportsysteme vergleichbare Randbedingungen zu schaffen und eine praktische Berechenbarkeit zu gewährleisten, sind eine Reihe von Vereinfachungen vorzunehmen:

- a) Keine Verkehrsstörungen  
z.B. durch Staus, Schlechtwetter, Warteschleifen oder Zwischenhalte auf freier Strecke
- b) Kein Wind  
Wind, insbesondere Seitenwind beeinflusst alle hier zu untersuchenden Transportsysteme durch zusätzliche Seitenkräfte. Auf die Berechnungsmethode hat dieser Faktor jedoch keine Auswirkungen. Durch die Vernachlässigung wird keines der Transportsysteme bevorzugt.
- c) Keine Kurven  
Die detaillierte Modellierung des Kurvenverlaufs einer Strecke erfordert eine sehr genaue Kenntnis der Strecke und führt zu großem Aufwand. Die Vernachlässigung des Kurveneinflusses reduziert jedoch nicht die

Streckenlänge. Zusatzwiderstandskomponenten insbesondere bei der Bahn entfallen ebenso wie beim Kraftfahrzeug und Flugzeug.

- d) Betriebszustände der Verkehrsmittel werden als abschnittsweise konstant angesehen. Diese Vereinfachung erlaubt einen analytischen Ansatz unter der Voraussetzung, dass die Summe der abschnittswisen Zustandsänderungen als eine Gesamtzustandsänderung betrachtet wird. Dies trifft insbesondere für Beschleunigungs- und Bremsvorgänge zu.
- e) Energieaufwendungen für den Betrieb von Infrastrukturen wie Flughäfen und Bahnhöfen werden nicht betrachtet.
- f) Energieaufwände für Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten bleiben außer Acht.
- g) Kosten werden nicht betrachtet

## **6.2 Definition einer geeigneten Kenngröße**

Um die Frage nach der Transporteffizienz zu beantworten, ist der notwendige Primärenergieeinsatz bezogen auf die geforderte Transportarbeit und die erforderliche Transportzeit für alle Missionsphasen zu bestimmen.

Über den Primärenergiebedarf als Bezugsgröße wird die gesamte Energieflussskette für die verschiedenen Verkehrsmittel erfasst. Dieser Ansatz ist notwendig, da verschiedene Endenergieträger bei den Verkehrsmitteln für den Antrieb zum Einsatz kommen. Die Gewinnung der Endenergieträger ist unterschiedlich aufwändig und damit selbst energieintensiv.

Mit der Betrachtung der Transportarbeit und der Transportzeit werden zwei weitere Kenngrößen eines Transportes erfasst. Die Transportarbeit beschreibt die beförderte Nutzlastmasse und den zurückgelegten Transportweg. Je nach eingesetztem Verkehrsmittel kann der Transportweg zwischen zwei Orten nicht unerheblich variieren, siehe Kapitel 3.7. Zusätzlich wird der Primärenergieeinsatz in Relation zur Transportzeit gesetzt, so dass auch die zeitliche Effizienz eines Verkehrsmittels berücksichtigt wird.

Für die Definition eines Gütemaßes bzw. einer Kenngröße stehen deren Aussagekraft und Vergleichbarkeit im Vordergrund. Hierzu eignet sich der von *Niedzballa* vorgeschlagene Ansatz einer dimensionslosen Kenngröße, [NIED2001].

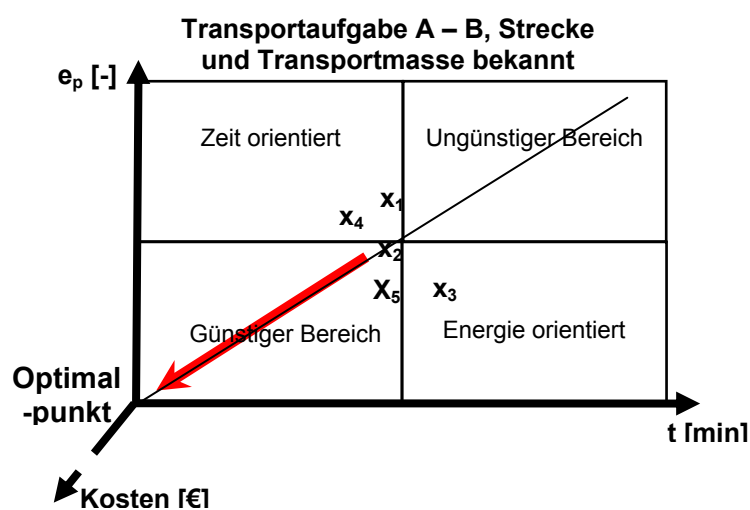
Der spezifische Primärenergiebedarf beschreibt hier das Verhältnis des Primärenergieeinsatzes bezogen auf die erbrachte Transportarbeit.

$$e_p = \frac{\text{Primärenergieeinsatz}}{\text{Transportarbeit}} [-] \quad \text{Gl. 6-1}$$

Diese Kenngröße ist dimensionslos, da Energie und Arbeit physikalisch die gleichen Einheiten aufweisen. Im Primärenergieeinsatz sind alle Energieaufwände erfasst, die mit einem Verkehrssystem für eine bestimmte Transportarbeit zu erbringen sind. Die Transportarbeit definiert sich aus der reinen Nutzlast und der bewältigten Transportstrecke.

Um den Faktor Zeit als Gütemerkmal in diese Kenngröße zu integrieren, ist der Primärenergieeinsatz auf die Transportleistung zu beziehen. Dieses Vorgehen ist physikalisch plausibel und führt zu einer Kenngröße mit der Dimension Zeit. Ein aufwandsorientierter Vergleich, der auf einer Zeitgröße basiert, ist jedoch schwer interpretierbar. Aus diesem Grunde wird hier ein graphisches Kriterium vorgeschlagen:

Für eine gegebene Transportaufgabe, bestimmt durch die Transportstrecke und die Transportmasse wird der spezifische Primärenergiebedarf für verschiedene Verkehrssysteme ermittelt. Im zweiten Schritt wird hierzu die benötigte Transportzeit bestimmt. Anschließend wird der spezifische Primärenergiebedarf über der Transportzeit aufgetragen.



**Bild 6-1: Kriterium zur Bewertung der Transporteffizienz**



In der vorstehenden Graphik ist die methodische Bewertung der Transporteffizienz dargestellt. Die maximale Effizienz wird im Koordinatenursprung erreicht, wenn für eine Transportaufgabe weder Zeit noch Energie noch Kosten aufgewendet werden müssten. Für eine Beispielmission beschreiben  $x_1 - x_5$  mögliche Energie- und Zeitaufwände für verschiedene Transportsysteme, die jeweils die gleiche Transportaufgabe zu bewältigen haben. Das effizienteste System wird in diesem Beispiel durch  $x_5$  dargestellt, da es gegenüber System  $x_2$  bei gleicher Transportzeit weniger Energieeinsatz erfordert und im Vergleich zu  $x_3$  bei gleichem Energieeinsatz die Aufgabe schneller durchführt. Das System  $x_4$  schneidet gegenüber dem System  $x_5$  ungünstiger ab, da es den Zeitvorteil mit einem höheren Energieeinsatz erreicht. Aus diesen Überlegungen folgt, dass Systeme auf der Hauptdiagonalen hinsichtlich der Effizienz zwischen Energieeinsatz und Zeit das Optimum darstellen.

Damit ist eine klare Aussage über die Güte eines Transportsystems bei einer gegebenen Aufgabe möglich. Gleichzeitig kann eine Zeit oder Energie orientierte Auslegung bewertet werden.

Diese Arbeit beschränkt sich auf die Bewertung der Transporteffizienz anhand der Kriterien Energiebedarf und Zeitaufwand. Die Erweiterung auf den Betriebskostenfaktor wird als Ausblick auf eine Erweiterung der Methode vorgeschlagen.

### 6.3 Berechnungsverfahren

#### 6.3.1 Ermittlung des spezifischen Primärenergiebedarfs

Ausgangspunkt für die Vergleichsbetrachtungen ist eine vorgegebene Transportaufgabe, die z.B. durch eine Anzahl von zu befördernden Passagieren und verschiedene Start- und Zielpunkte definiert ist.

Der **spezifische Primärenergiebedarf** beschreibt das Verhältnis der aufgewendeten **Primärenergie** zur gewonnenen **Nutzarbeit**.

$$e_p = \frac{E_p}{W_N} [-] \quad \text{Gl. 6-2}$$

Der erforderliche Primärenergiebedarf lässt sich, wie in Kapitel 5 beschrieben, über den **Umwandlungswirkungsgrad** aus dem Sekundärenergiebedarf ermitteln:

$$E_p = \frac{E_s}{\eta_U} [\text{J}] \quad \text{Gl. 6-3}$$

Über den **Verteilungswirkungsgrad** ist der Zusammenhang zwischen dem Sekundärenergieeinsatz und der am Fahrzeug verfügbaren Endenergie hergestellt.

$$E_S = \frac{E_E}{\eta_V} \text{ [J]} \quad \text{Gl. 6-4}$$

Somit kann über die genannte Wirkungsgradkette aus dem Endenergiebedarf auf die korrespondierende Primärenergie geschlossen werden.

Der **Antriebswirkungsgrad**, der in Kapitel 4.6 untersucht wurde, beschreibt den Übergang von der Endenergie zur Nutzenergie zum Betrieb des Fahrzeugs.

$$E_E = \frac{E_N}{\eta_A} \text{ [J]} \quad \text{Gl. 6-5}$$

Er wird im Rahmen der Rechnungen für abschnittsweise konstante Betriebspunkte berechnet und für diese Phase jeweils als konstant angesehen.

$$E_P = E_N \cdot \frac{1}{\eta_U \cdot \eta_V} \cdot \frac{1}{\eta_A} \text{ [J]} \quad \text{Gl. 6-6}$$

Die Berechnung des erforderlichen Nutzenergiebedarfs kann auf zwei Arten erfolgen. Zum einen kann der erforderliche Nutzenergiebedarf aus dem ermittelten Kraftstoffverbrauch bzw. Strombedarf entlang der Strecke ermittelt werden.

Der zweite Lösungsansatz basiert auf der realen Abschätzung der einzelnen Fahrwiderstände, die zum erforderlichen Nutzenergiebedarf führen. Diese beiden Berechnungsmethoden werden in den Kapiteln 6.3.1.1 und 6.3.1.2 dargestellt

Da als Kenngröße der spezifische, d.h. auf die Nutzarbeit bezogene Primärenergiebedarf  $e_P$  gesucht wird, ist der Nutzenergiebedarf  $E_N$  auf die geleistete Transportarbeit zu beziehen. Dieses Verhältnis wird in der Luftfahrt durch die Gleitzahl  $\varepsilon$  beschrieben, die im allgemeinen Fall die aerodynamische Güte durch das Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand beschreibt, das wiederum im Gleichgewichtszustand dem Verhältnis (Fahr-)Widerstand (Schub) zu Flugzeuggewicht entspricht.

$$\varepsilon = \frac{E_N}{W_T} = \frac{F_W \cdot x_{ist}}{m_{ges} \cdot g \cdot x_{ist}} \text{ [-]} \quad \text{Gl. 6-7}$$

Von der in  $\varepsilon$  enthaltenen gesamten geleisteten Transportarbeit interessiert lediglich die Arbeit, die zur Beförderung der Nutzlast aufgewendet wird. Der Zusammenhang

zwischen der Transportarbeit und der Nutzarbeit wird durch die in Kapitel 4.2 beschriebenen Konstruktions- und Auslastungswirkungsgrade beschrieben, die den maximalen Anteil der Nutzmasse an der Gesamtfahrzeugmasse und den real genutzten Anteil beschreiben.

Mit  $W_T = m_{ges} \cdot g \cdot x_{ist}$  sowie  $\eta_K = \frac{m_{N_{max}}}{m_{ges}}$  und  $\eta_O = \frac{m_{N_{est}}}{m_{N_{max}}}$  folgt

$$W_N = W_T \cdot \eta_K \cdot \eta_O \quad [-] \quad \text{Gl. 6-8}$$

Um aus dem bekannten Nutzenergieaufwand und dem bekannten Fahrzeuggewicht auf den nutzlastbezogenen, spezifischen Primärenergieaufwand zu kommen, folgt mit den Gleichungen 6-6, 6-7, und 6-8:

$$e_P = \frac{E_N}{m_{ges} \cdot g \cdot x_{ist}} \cdot \frac{1}{\eta_U \cdot \eta_V} \cdot \frac{1}{\eta_A} \cdot \frac{1}{\eta_K \cdot \eta_O} = \varepsilon \cdot \frac{1}{\eta_U \cdot \eta_V} \cdot \frac{1}{\eta_A} \cdot \frac{1}{\eta_K \cdot \eta_O} \quad [-] \quad \text{Gl. 6-9}$$

Wie in Kapitel 3.7 dargestellt wurde, bestimmt die reale Streckenlänge die Transporteffizienz über den erforderlichen Zeitaufwand und den Energiebedarf. Das als Streckenwirkungsgrad  $\eta_S$  definierte Verhältnis von kürzester zur realen Streckenlänge beschreibt daher die Güte der gewählten Strecke.

$$\eta_S = \frac{x_{Großkreis}}{x_{ist}} \quad [-] \quad \text{Gl. 6-10}$$

Damit lassen sich alle operationellen Einflüsse auf den Primärenergiebedarf als Wirkungsgradkette darstellen:

$$e_P = \frac{E_N}{m_{ges} \cdot g \cdot x_{ist}} \cdot \frac{1}{\eta_U \cdot \eta_V} \cdot \frac{1}{\eta_A} \cdot \frac{1}{\eta_K \cdot \eta_O} \cdot \frac{1}{\eta_S} \quad [-] \quad \text{Gl. 6-11}$$

Über die missionsabhängigen Wirkungsgrade  $\eta_K$ ,  $\eta_O$  und  $\eta_S$  wird die eingesetzte Primärenergie bezogen auf die tatsächlich beförderte Nutzlast und die kürzeste Transportstrecke. Während das Fahrzeuggesamtgewicht und die Transportstrecke in einfacher Form ermittelt werden können, lassen sich die missionsabhängigen Wirkungsgrade berechnen.

Die erforderliche Nutzenergie  $E_N$  ergibt sich aus den Fahrwiderständen entlang der Strecke sowie dem Energiebedarf der Nebenaggregate.

Für den praktischen Gebrauch können aber auch aus der Kenntnis des verbrauchten Kraftstoffs/Stroms sowie der Fahrzeugmasse und der Streckenlänge

Vergleichsbetrachtungen für die Auswahl des geeigneten Transportsystems angestellt werden.

Darüber hinaus lässt sich durch Variation der Wirkungsgrade die Effizienz in verschiedenen Szenarien vergleichend untersuchen, wobei die Berechnungsmethode für alle Transportsysteme gleich ist.

Diese Form der Berechnung des spezifischen Primärenergiebedarfs erlaubt es, verschiedene Verkehrsmittel nach einem einheitlichen Verfahren hinsichtlich ihrer Effizienz zu bewerten. Dabei ist es besonders gut möglich, die verschiedenen Einflussgrößen einander gegenüberzustellen, wie dies in den Kapiteln 3.7, 4.2, 4.6 und 5 geschehen ist. Weitere Vergleiche sind möglich, wenn der Endenergieeinsatz über die Fahrwiderstände ermittelt wird.

### 6.3.1.1 Berechnung des Endenergiebedarfs über den Verbrauch

Der Kraftstoffbedarf bzw. der erforderliche Fahrstrom lässt sich für verschiedene Verkehrsmittel sowohl anhand realer Verbrauchsmessungen als auch auf der Basis statistischer Angaben bestimmen.

In dieser Arbeit werden für die verschiedenen Transportsysteme mittlere Verbrauchswerte in [l/100km], [kWh/km] und [kg/Ns] als Ausgangswerte herangezogen.

Für die Zugangs- und Übergangsphasen, in denen Pkw und Bahnfahrzeuge zum Einsatz kommen, werden die notwendigen Angaben für Pkw aus den Berechnungen des Shell-Routenplaners entnommen, wobei die Auswertungen zu 80% auf Zeit optimiert sind, [SHEL2001].

Die Angaben für die Bahn basieren auf Auswertungen der einschlägigen Literatur, [MNIC1998], [SCHU2002].

In diesem Fall bestimmt sich der spezifische Primärenergiebedarf aus dem Endenergieeinsatz über den Verbrauch:

$$e_p = \frac{E_E}{m_{ges} \cdot g \cdot x_{ist}} \cdot \frac{1}{\eta_U \cdot \eta_V} \cdot \frac{1}{\eta_K \cdot \eta_O} \cdot \frac{1}{\eta_S} \quad [-] \quad \text{Gl. 6-12}$$

Aus dem spezifischen Kraftstoffverbrauch sowie der Wegstrecke und dem Heizwert bzw. beim Flugzeug zusätzlich dem Schub lässt sich der erforderliche

Endenergieeinsatz berechnen. Es ergeben sich so die folgenden Bestimmungsgleichungen für den Endenergieeinsatz:

$$E_{E_{Pkw}} = \dot{m}_B \cdot H_u \cdot x_{ist} \quad [\text{J}] \quad \text{für Kraftfahrzeuge.} \quad \text{Gl. 6-13}$$

$$E_{E_{Bahn}} = \dot{E} \cdot x_{ist} \quad [\text{J}] \quad \text{für Bahnfahrzeuge} \quad \text{Gl. 6-14}$$

$$E_{E_{Flz}} = \dot{m}_B \cdot H_u \cdot \frac{x_{ist}}{v} \cdot F_{\max} \cdot \delta \quad [\text{J}] \quad \text{für Flugzeuge} \quad \text{Gl. 6-15}$$

Dieser Ansatz wird sowohl für die Bestimmung des Endenergiebedarfs in der Zu- und Übergangsphase als auch zur Ermittlung des Endenergiebedarfs im Hauptlaufs verwendet.

### 6.3.1.2 Berechnung des Endenergiebedarfs aus den Fahrwiderständen

Eine zweite Methode, den erforderlichen Energiebedarf zu ermitteln, basiert auf der Abschätzung der einzelnen Fahrwiderstandsanteile, die entlang der Transportstrecke zu überwinden sind.

Hierzu werden für jede Missionsphase stationär der aerodynamische Widerstand, der Rollwiderstand, der Steigungswiderstand sowie Beschleunigungs- und Bremsphasen zusammengefasst berechnet. Der Nutzenergiebedarf der Nebenaggregate  $E_{NA}$  wird pauschal hinzugezählt:

$$E_N = \sum F_{W_i} \cdot x = (F_{W_{Aero}} + F_{W_{Roll}} + F_{W_{Steig}} + F_{W_{Beschl.}}) \cdot x + E_{NA} \quad [\text{J}] \quad \text{Gl. 6-16}$$

Hierin bestimmt sich der aerodynamische Widerstand nach Kapitel 4.3 für Kraftfahrzeug, Bahn und Flugzeug zu

$$F_W = \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot A \cdot c_w \quad [\text{N}] \quad \text{Gl. 6-17}$$

Der Rollwiderstand wird gemäß Kapitel 4.5 jeweils bestimmt zu:

$$F_{W_{Roll\_Pkw}} = (f_0 + f_1 \cdot v + f_2 \cdot v^4) \cdot m_{ges} \cdot g \quad [\text{N}] \quad \text{Gl. 6-18}$$

$$F_{W_{Roll\_Bahn}} = (c_0 + c_1 \cdot v + c_2 \cdot v^2) \cdot m_{ges} \cdot g \quad [\text{N}] \quad \text{Gl. 6-19}$$

$$F_{W_{Roll\_Flz}} = f_0 \cdot m_{ges} \cdot g \quad [\text{N}] \quad \text{Gl. 6-20}$$

Aus Kapitel 4.4 folgt für den Steigungswiderstand

$$F_{W_{Steig\_Kfz\_Bahn}} = m_{ges} \cdot g \cdot \gamma \quad [\text{N}] \quad \text{Gl. 6-21}$$

$$F_{W_{\text{Steig\_Flz}}} = m_{\text{ges}} \cdot g \cdot \frac{\dot{z}}{V} \text{ [N]} \quad \text{Gl. 6-22}$$

Für die Beschleunigungen und Bremsanteile gilt:

$$F_{B_{\text{Pkw}}} = \dot{v} \cdot m \cdot (1 + e) \text{ [N]} \quad \text{Gl. 6-23}$$

$$F_{B_{\text{Bahn}}} = \frac{m \cdot e \cdot a \cdot 10^3}{m \cdot g} \text{ [N]} \quad \text{Gl. 6-24}$$

$$F_{B_{\text{Flz}}} = \dot{v} \cdot m \text{ [N]} \quad \text{Gl. 6-25}$$

Zusätzlich ist der Energieaufwand infolge der Verluste des Antriebsstrangs über den Antriebswirkungsgrad zu berücksichtigen.

Damit ergibt sich folgende Bestimmungsgleichung für den spezifischen Nutzenergiebedarf je Missionsphase bezogen auf die Nutzlast:

$$e_p = \frac{E_N}{m_{\text{ges}} \cdot g \cdot x_{\text{ist}}} \cdot \frac{1}{\eta_U \cdot \eta_V} \cdot \frac{1}{\eta_A} \cdot \frac{1}{\eta_K \cdot \eta_O} \cdot \frac{1}{\eta_S} \text{ [-]} \quad \text{Gl. 6-26}$$

Aufgrund einer sehr eingeschränkten verfügbaren Datenbasis wird dieser Rechenweg nur exemplarisch für einzelne Fahrzeugtypen dargestellt.

## 6.4 Ergebnisse

### 6.4.1 Endenergie- und Zeitbedarf für Zugang, Übergang und Abgang

Die Berechnung des Endenergie- und Zeitbedarfs der Zugangs-, Abgangs- und Übergangsphasen erfolgt anhand der Untersuchungen nach Kapitel 3.6.

Dort werden auf der Basis des Shell-Routenplaners die Reisezeiten und der Kraftstoffverbrauch für Pkw ermittelt, [SHEL2001]. Der Vorteil dieses Werkzeugs liegt darin, dass es auch erlaubt, im Innenstadtbereich eine sehr detaillierte Streckenführung zu beschreiben. Zusätzlich berechnet das Werkzeug automatisch einen mittleren Kraftstoffverbrauch für die bewältigte Strecke. Nachteilig ist hingegen, dass keine Angaben über den Auslastungsgrad des Fahrzeugs gemacht werden. Daher wird die Annahme getroffen, dass die berechneten Mittelklasse-Fahrzeuge eine Gesamtkapazität von 5 Personen haben. Orientiert an den statistischen Angaben anderer Untersuchungen wird von einer mittleren Auslastung von 1,5 Personen oder 30,0% ausgegangen. Diese Annahme ist begründet durch das reale

Szenario, dass viele Reisende durch eine zweite Person zum Bahnhof oder Flughafen gefahren werden. Ein nicht geringer Teil insbesondere der Flugreisenden fährt allein zum Flughafen. Diese Form der Anreise verstärkt sich auch bei der Bahn. Für den Zu-/Abgang mit der NV-Bahn werden überwiegend S- und U-Bahnen benutzt, die hier anhand der Münchner S-Bahn als Grundlage für die Berechnungen angesetzt werden.

| <b>Kenngroße</b>     | <b>Wert</b> |
|----------------------|-------------|
| Fahrzeugtyp          | 423         |
| Höchstgeschw. [km/h] | 140         |
| Leistung [kW]        | 2350        |
| Sitzplätze           | 192         |
| Fahrzeuggewicht [kg] | 105000      |

**Tabelle 6-1: Leistungsdaten der Münchener S-Bahn  
BR 423, [SCHU2001]**

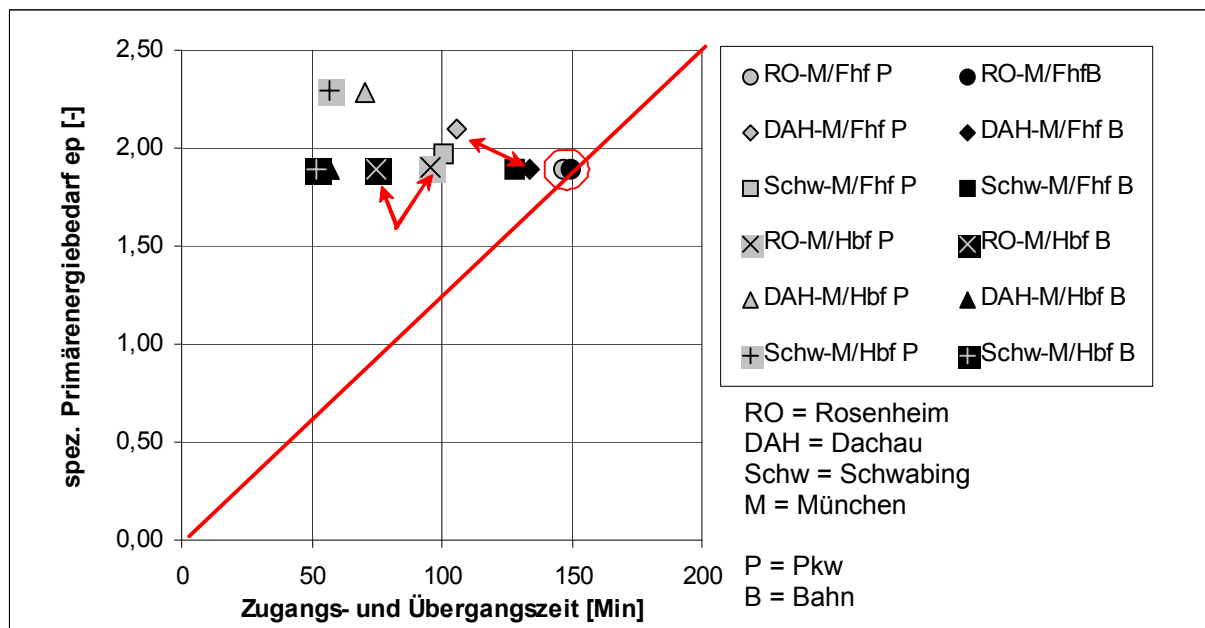
Ein wesentliches Hindernis bei der Untersuchung des Zu- und Abgangs mit der Bahn ist in den nicht zugänglichen Simulationswerkzeugen für diesen Einsatzbereich zu sehen. Daher kann im Rahmen dieser Arbeit nur mit den verfügbaren öffentlichen Daten und Annahmen gearbeitet werden, die überschlägige Anhaltswerte liefern.

Für die Leistungsbedarfs- und Zeitberechnung wird von einer mittleren Geschwindigkeit von 78 km/h ausgegangen. Die oben angegebene Antriebsleistung entspricht der max. Dauerleistung bei der Betriebsgeschwindigkeit von *140 km/h*. Für die mittlere Reisegeschwindigkeit resultiert hieraus ein proportional reduzierter Leistungsbedarf von *1306 kW*.

Eine besondere Problematik ergibt sich in der Berechnung des Energiebedarfs für Zugang und Abgang daraus, dass die Verkehrsmittelwahl sehr individuell gestaltet wird. Daher wird in dieser Arbeit die prozentuale Verteilung der bevorzugten Verkehrsmittel aus Kapitel 3.3 für die Anreise zum Bahnhof und Flughafen eingesetzt, so dass sich bezogen auf die mittlere Besetzung eines Zuges bzw. Flugzeugs auch der Gesamtenergiebedarf für den Zu- und Abgang abschätzen lässt. Für den Abgang werden in gleicher Weise Verbrauch und Laufzeiten zum Zielpunkt ermittelt.

Die Zugänge zum Bahnhof (M/Hbf) und Flughafen (M/Fhf) München werden von den Startorten Rosenheim (RO), Dachau (DAH) und Schwabing (Schw) betrachtet. Dabei wird sowohl die Anreise mit dem Pkw (P) als mit der Nahverkehrsbahn (B) analysiert.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen einschließlich der Übergangsphasen sind in der nachfolgenden Graphik dargestellt:

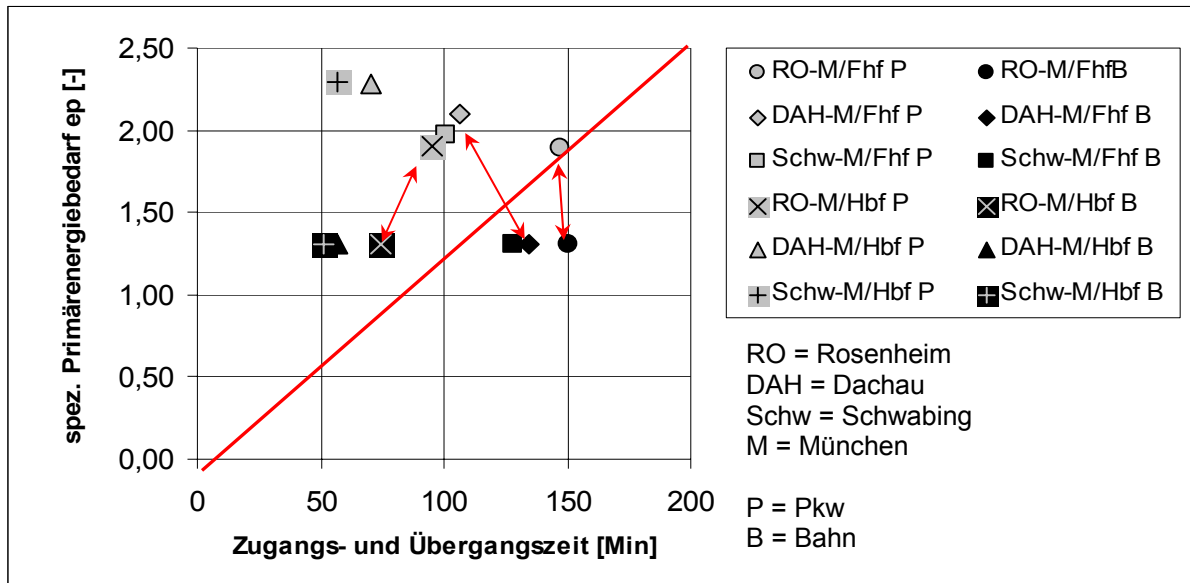


**Bild 6-2: Transporteffizienz für den Zu- und Übergang mit Bahn mit  $\eta_0=0,55$  und Pkw**

Die Darstellung zeigt anhand der grauen Symbole die Transporteffizienz für den Zugang mit Pkws. Die schwarzen Symbole deuten auf die Ergebnisse beim Zugang mit S- und U-Bahnen. Mit Pfeilen sind beispielhaft einige Wertepaare herausgehoben, die den Zugang sowohl mit dem Pkw als auch mit S-/U-Bahn beschreiben. Hier ist erkennbar, dass beim Zugang von Rosenheim aus keines der untersuchten Verkehrsmittel einen Effizienzvorteil zeigt. Der Zugang von Dachau erfolgt mit dem Pkw schneller, was aber mit einem höheren Energieeinsatz bezahlt wird. Hier bietet die Bahn einen nahezu optimalen Kompromiss hinsichtlich der Effizienz. Erfolgt der Zugang von Schwabing aus, so sind S-/U-Bahn bei gleichem Energieeinsatz dem Pkw überlegen.

Erst mit einem Auslastungsgrad von 80% erreicht die Bahn für alle Zugangspaare eine höhere Effizienz gegenüber dem Pkw, wenn dessen Auslastung weiter bei 30% bleibt.





**Bild 6-3: Transporteffizienz für den Zu- und Übergang mit Bahn mit  $\eta_0=0,80$  und Pkw**

Da der Taktfahrplan der Bahn unabhängig vom Auslastungsgrad ist, erfolgt die Effizienzsteigerung ausschließlich über den geringeren spezifischen Primärenergiebedarf.

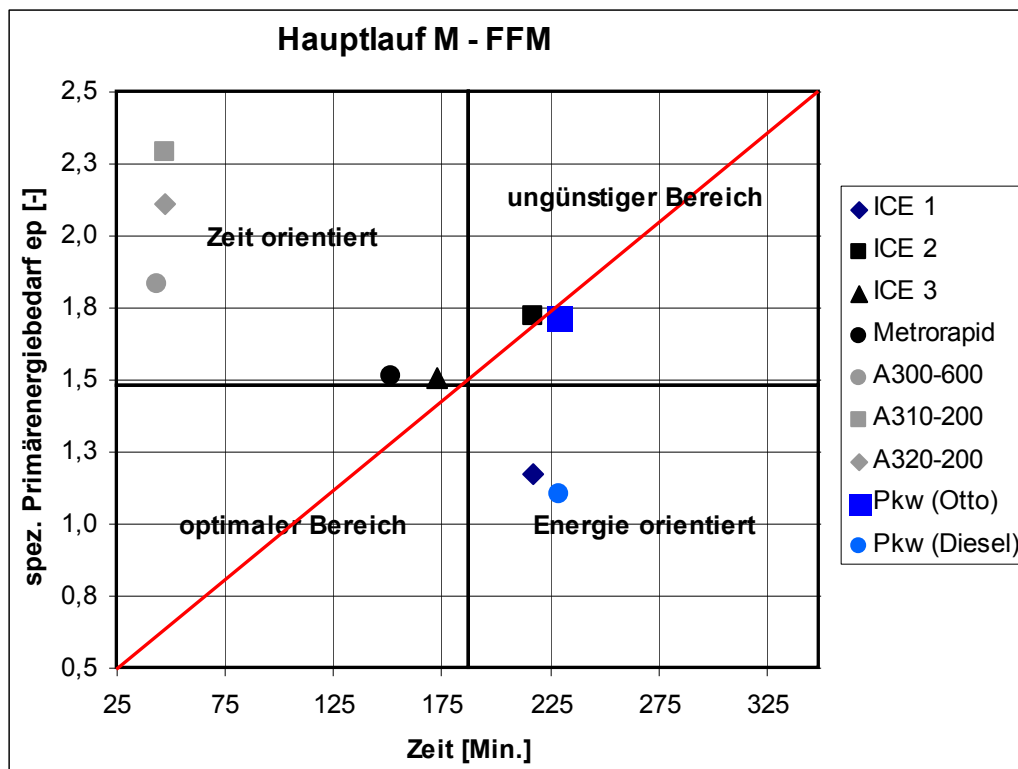
#### 6.4.2 Bewertung der Gesamtmission über den Verbrauch

##### 6.4.2.1 Gegenüberstellung Hauptlauf und Gesamtmission

Die Aussagekraft des Effizienzkriteriums wird an den Ergebnissen für die verschiedenen Referenzstrecken überprüft, wozu beispielhaft die Ergebnisse für die Strecken Schwabing – München – Frankfurt und Rosenheim – München – Hamburg diskutiert werden. Die übrigen Ergebnisse sind im Anhang E aufgeführt.

Die nachfolgende Graphik zeigt die Auswertung der Transporteffizienz für den Hauptlauf der Strecke München – Frankfurt. Hier wurden verschiedene Verkehrsmittel einheitlich mit einem Auslastungsgrad von 0,55 bewertet. Als wesentliches Ergebnis ist erkennbar, dass bei ausschließlicher Betrachtung der Hauptreisestrecke, Reisen mit dem Flugzeug auf dieser Strecke zeitlich effizienter sind als bei Nutzung der Bahn oder des Pkw. Der Zeitvorteil wird jedoch mit einem, im Vergleich zu den anderen Verkehrsmitteln, hohen spezifischen Primärenergiebedarf erkaufte. Dieser große zeitliche Vorteil resultiert vor allem aus der direkten Punkt-zu-Punkt-Verbindung, die Flugzeuge realisieren. Die Bahn fährt

auf dem Hauptlauf verschiedene Haltepunkte an, wo Passagiere aus- und zusteigen, die den Streckenwirkungsgrad, den Zeitaufwand und die Auslastung beeinflussen. Bei den Pkw erfolgt in der Regel kein Aus- und Zusteigen während der Fahrt, jedoch verlaufen die Autobahnen so, dass verschiedene Orte angebunden werden. Diese Anbindung verlängert die Fahrstrecke und führt zu erhöhtem Energie- und Zeitbedarf.

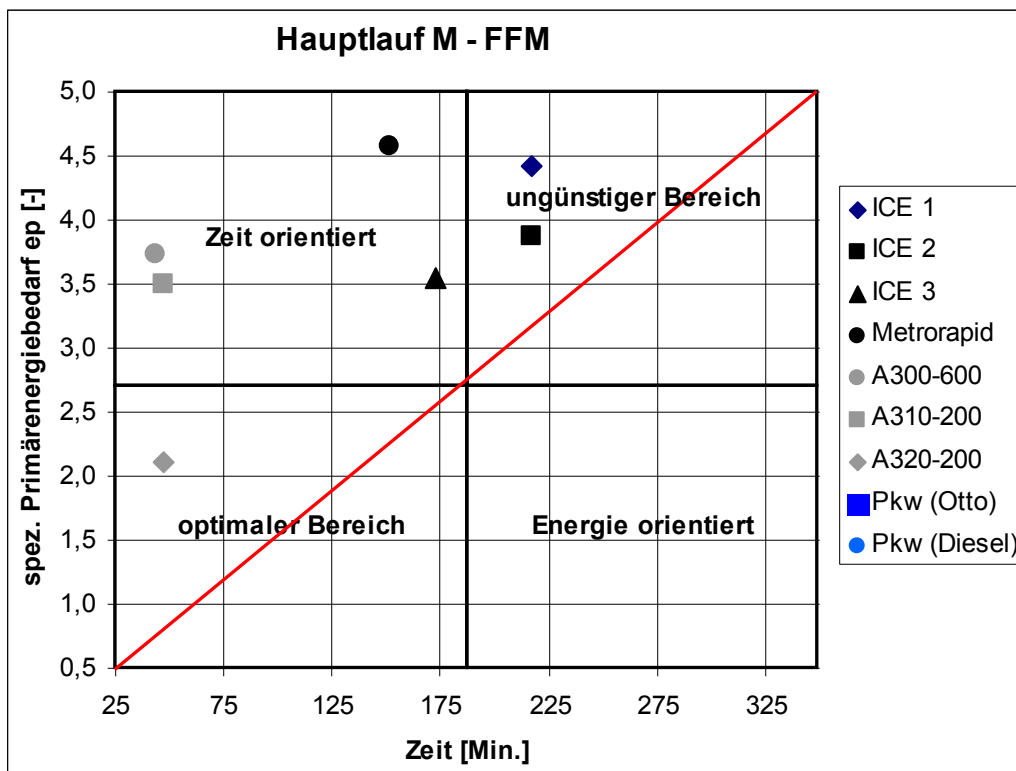


**Bild 6-4: Transporteffizienz auf dem Hauptlauf München – Frankfurt bei einheitlicher Auslastung von  $\eta_0=0,55$**

Metrorapid und ICE 3 zeigen im Vergleich zum ICE 1 und ICE2 die Entwicklung der Bahn zum schnellen Transport, der mit einem höheren Energieeinsatz im Vergleich zum ICE1 einhergeht. Der ICE 1 und die Pkw mit Dieselmotor zeigen in dieser Untersuchung eine Energie orientierte Effizienz, da sie bei vergleichbarem Zeitaufwand einen geringeren Energieeinsatz erfordern. Pkw mit Ottomotor, ebenso wie der ICE2 erweisen sich als weniger effizient, da sie bei gleichem Zeitaufwand wie ICE1 und Diesel-Pkw einen deutlich höheren spezifischen Primärenergieaufwand für die Bewältigung der Strecke erfordern. Aufgrund der für diese Arbeit verfügbaren Daten, ergibt sich für den ICE 2 ein um 65% höherer Energiebedarf, siehe Anhang F und [MNIC1998]. Der ICE1 fällt vor allem durch seine hohe Kapazität von rund 700

Passagieren günstig aus, da bei 55% Auslastung hier 368 Passagiere befördert werden, im Vergleich zu 217 Passagieren, die mit dem ICE2 reisen. Der Diesel-Pkw ist durch einen um 32% günstigeren Verbrauch gegenüber dem Pkw mit Ottomotor im Vorteil.

Ein anderes Bild zeigt sich, wenn die Aufgabenstellung nicht auf einer einheitlichen prozentualen Auslastung basiert, sondern durch die Beförderung von z.B. 100 Passagieren mit Gepäck beschrieben ist. In diesem Fall stellen sich für alle Verkehrsmittel sehr unterschiedliche prozentuale Auslastungsgrade ein, die zwischen 14% und 55% variieren. Bei dieser Aufgabenstellung weist der A320 gegenüber den Großraumflugzeugen einen deutlich geringeren spezifischen Primärenergiebedarf auf, wie die folgende Graphik zeigt.

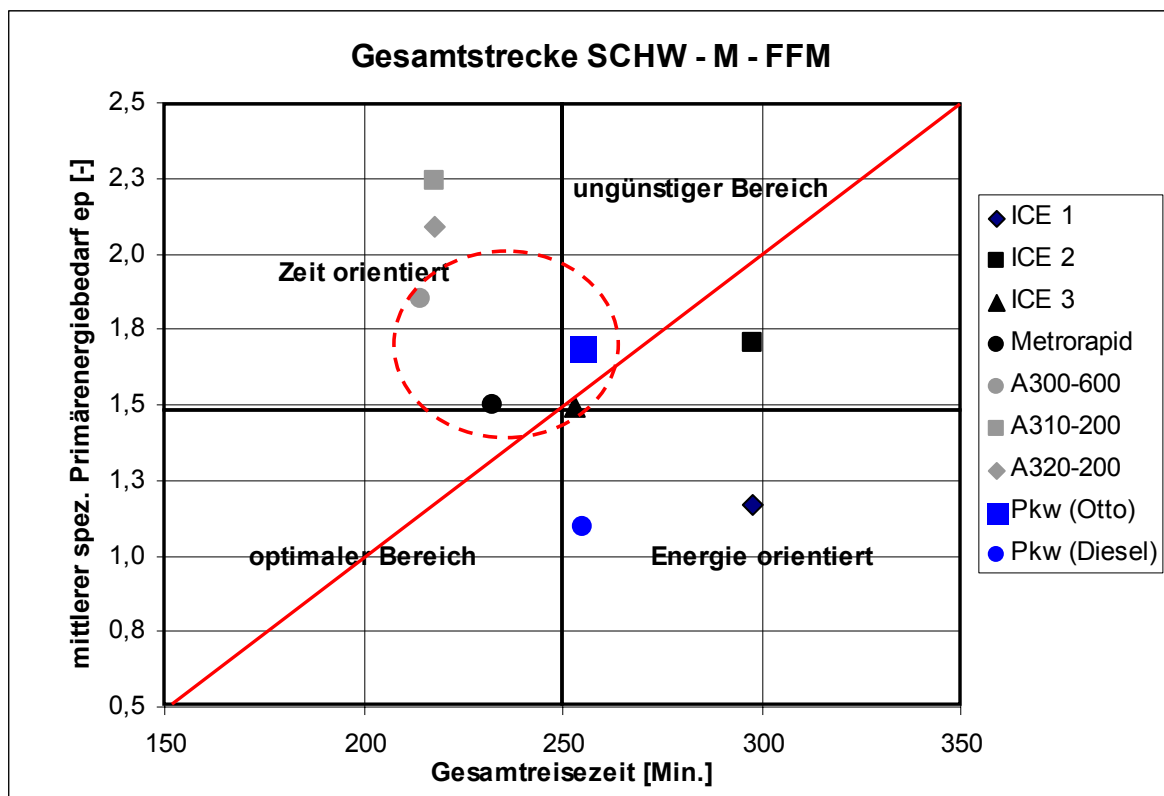


**Bild 6-5: Transporteffizienz auf dem Hauptlauf München – Frankfurt bei Beförderung von 100 Passagieren**

Ebenso zeigen sich auch der ICE 2 und der ICE 3 gegenüber ICE 1 und Metrorapid als die effizienteren Verkehrsmittel. Die Darstellung der Pkw ist in dieser Aufgabenstellung nicht repräsentativ, da Pkw über keine Kapazitäten von 100 Passagieren verfügen.

Aus dieser Betrachtung ist abzuleiten, dass kleinere Verkehrsmittel insbesondere auf Strecken mit phasenweise niedrigeren Auslastungen hinsichtlich der Transporteffizienz zu bevorzugen sind. Die Umsetzung dieses Ergebnisses wird insbesondere am Beispiel des ICE 2 deutlich. Basierend auf der Technik des ICE 1 hinsichtlich Aerodynamik und Antrieb, wurde der ICE 2 als Halbzug-Konzept ausgelegt. Gekoppelte Halbzüge kommen auf hoch ausgelasteten Streckenabschnitten zum Einsatz, während auf Abschnitten geringer Auslastung die effizienteren Teilzüge fahren. Der ICE 1 fährt auf Strecken mit geringer Auslastung nicht effizient, da er seine Kapazitäten nicht an die Erfordernisse anpassen kann.

Werden die Berechnungen auch auf die Zu- und Abgangsphasen erweitert, so verändert sich das Bild weiter, wenn wiederum mit einer einheitlichen Auslastung von 0,55 gearbeitet wird. Hierbei eignet sich der Startort Schwabing besonders gut, da er zentral in München liegt und somit vergleichbare Werte zu den Hauptlaufauswertungen liefert.



**Bild 6-6: Transporteffizienz auf der Strecke München – Frankfurt mit Startort München/Schwabing**

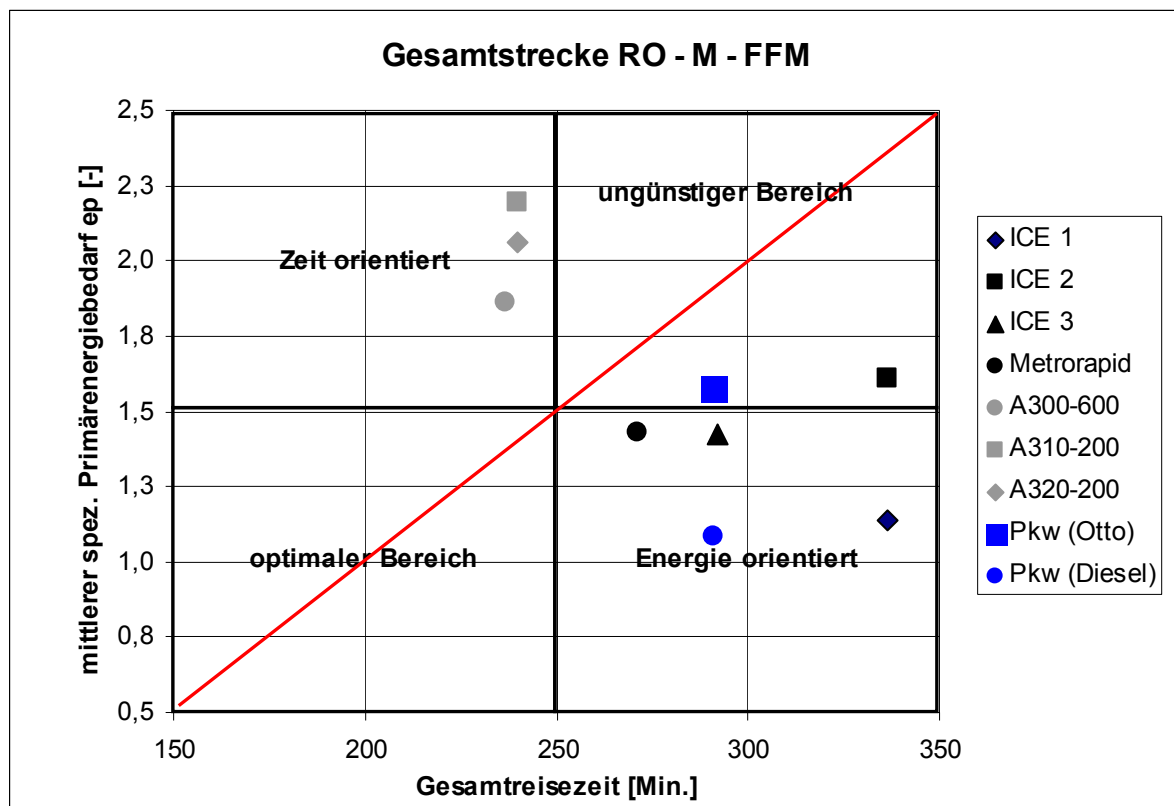
Beim Einsatz des Flugzeugs geht der große zeitliche Vorteil durch die langen Zu- und Übergangsphasen verloren. Auch der spezifische Primärenergieeinsatz steigt an, da in der Zugangsphase überwiegend Pkw mit einer geringen Auslastung über eine längere Zugangsstrecke benutzt werden. Bei dieser Gesamtbetrachtung wird die Wettbewerbssituation zwischen dem Flugzeug A300 sowie den Bahnsystemen ICE 3 und Metrorapid und den Pkw sichtbar. Insbesondere der Pkw profitiert von dem Umstand, dass von Schwabing aus die Autobahn sehr schnell erreicht wird, so dass mit einer relativ gleichförmigen hohen Geschwindigkeit nahe am Auslegungspunkt des Pkw-Antriebs gefahren werden kann. Auch hier zeigt sich der Pkw mit Dieselmotor aufgrund des besseren Antriebswirkungsgrades als sehr effizientes Transportmittel sowohl gegenüber den Pkw mit Ottomotoren, als auch im Vergleich den Hochgeschwindigkeitszügen.

Bei Reisen mit der Bahn erfolgt auch der Zugang überwiegend mit S- und U-Bahn, die aufgrund der höheren Auslastung einen geringeren spezifischen Primärenergiebedarf aufweisen. Hinzu kommt, dass die Zu- und Abgänge zu den Bahnhöfen in der Regel kürzer ausfallen als zum Flughafen und somit ein geringerer Energiebedarf anfällt. Nachteilig auf die Effizienz der Bahn wirken sich die Verweilzeiten im Bahnhof aus, die aber im Vergleich zum Flughafen geringer sind. Die Benutzung des Pkw erweist sich gegenüber den 250 km/h schnellen ICE 1 und ICE 2 unter Berücksichtigung der Zu- und Abgangsphasen als günstiger. Mit den neuen Bahnsystemen ICE 3 und Metrorapid stehen jedoch gegenüber dem Pkw effiziente Bahnsysteme zur Verfügung, die im Falle des Metrorapid schneller sind. Das Flugzeug verfügt hier über einen Zeitvorteil von rund 10-25 Minuten bei einem um rund 20% höheren spezifischen Primärenergiebedarf.

#### 6.4.2.2 Einfluss des Startortes

Variiert man den Startort für die Referenzstrecke und beginnt die Reise in Rosenheim, so verbessert sich Effizienz des Flugzeugs hinsichtlich des Gesamtreisezeitaufwands, wo eine um rund 40-60 Minuten kürzere Gesamtreisezeit gegenüber Metrorapid, ICE3 und Pkw festzustellen ist. Dieser Zeitvorteil resultiert vor allem aus der deutlich größeren Reisegeschwindigkeit des Flugzeugs im Hauptlauf. Für alle betrachteten Verkehrsmittel erhöht sich die Gesamtreisezeit, was sich hinsichtlich der Transporteffizienz jedoch lediglich für die Bahn nachteilig auswirkt.

Die lange und Zeit aufwendige Anfahrt von Rosenheim zum Bahnhof München entwickelt sich hier zum Nachteil für die Bahn.

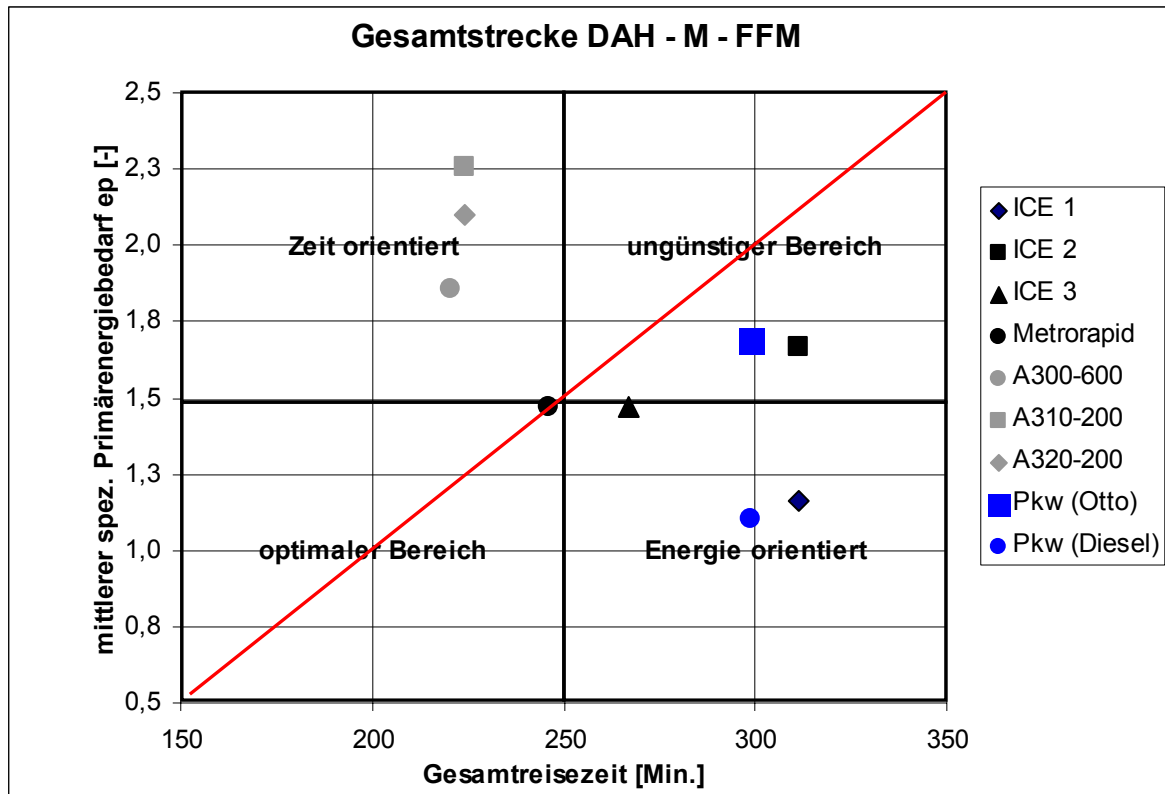


**Bild 6-7: Transporteffizienz auf der Strecke München – Frankfurt mit Startort Rosenheim**

Lediglich der Metrorapid ist mit einer Hauptlaufgeschwindigkeit von 350 km/h gegenüber dem Pkw im Vorteil. Der spezifische Primärenergiebedarf ist für die drei Verkehrsmittel nahezu gleich, wenn man bei den Pkw nur Fahrzeuge mit Ottomotor betrachtet. Die Systeme ICE 1 und 2 liegen hinsichtlich der zeitlichen Effizienz gegenüber den anderen Verkehrsmitteln deutlich zurück. Allerdings ist der ICE 1 im Energiebedarf gegenüber Pkw und den anderen Bahnsystemen sehr interessant.

Um die Effizienz der Bahnsysteme weiter zu steigern, ist bei weiter entfernten Orten wie Rosenheim die Zugangszeit zu verkürzen. Ergänzend führt eine weitere Erhöhung der Hauptlaufgeschwindigkeit, wie mit dem Metrorapid angezeigt, zu weiteren Verbesserungen.

Die Auswirkungen dieser beiden Optimierungsmöglichkeiten zeigen sich in der nächsten Graphik, wo mit Dachau ein relativ zentraler Startort gewählt wurde, der die Zugangszeit zum Bahnhof deutlich verkürzt.

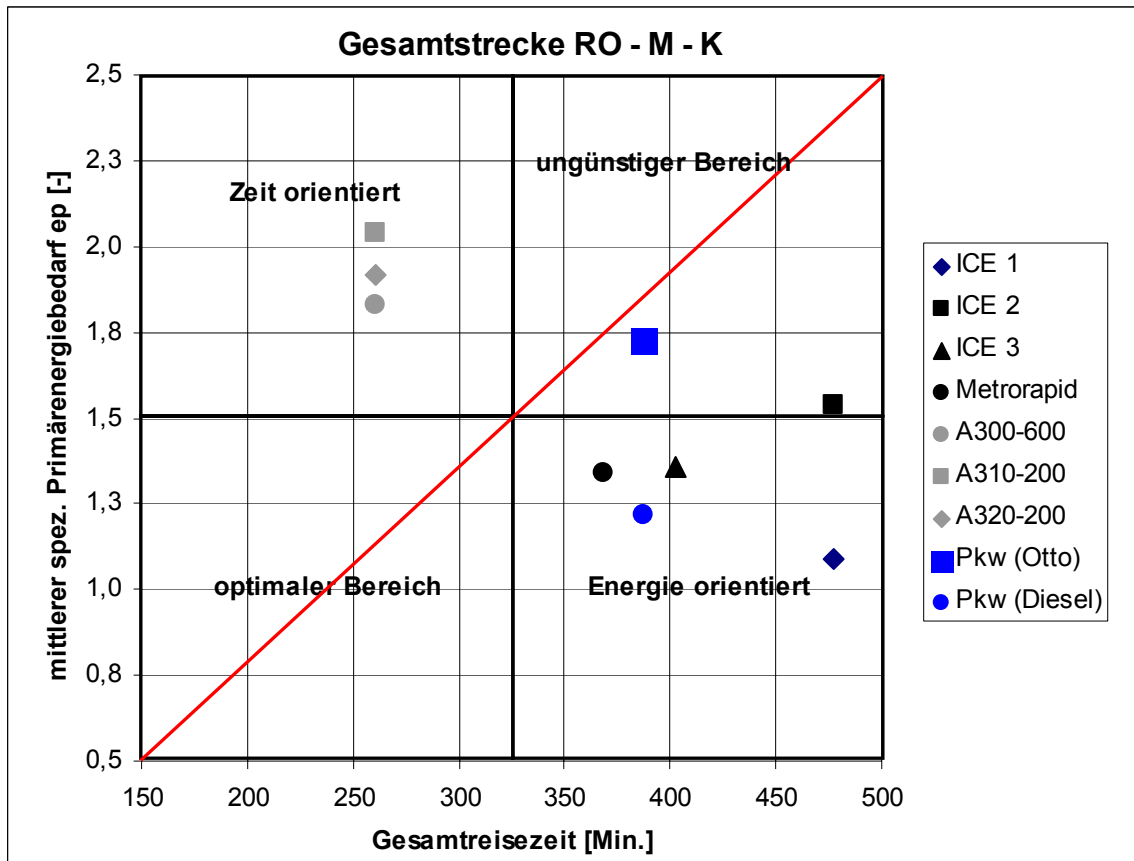


**Bild 6-8: Transporteffizienz auf der Strecke München – Frankfurt mit Startort Dachau**

Werden die Zu- und Übergangszeiten bei der Bahn weiter verkürzt und gleichzeitig die Hauptlaufgeschwindigkeit erhöht, so kann die Bahn gegenüber dem Flugzeug eine höhere Effizienz erreichen. Der höhere spezifische Primärenergiebedarf des Flugzeugs wird derzeit durch den Zeitvorteil von rund 25 Minuten gegenüber Metrorapid und über 1 Stunde gegenüber ICE und Pkw gerechtfertigt.

#### 6.4.2.3 Einfluss der Hauptläufe

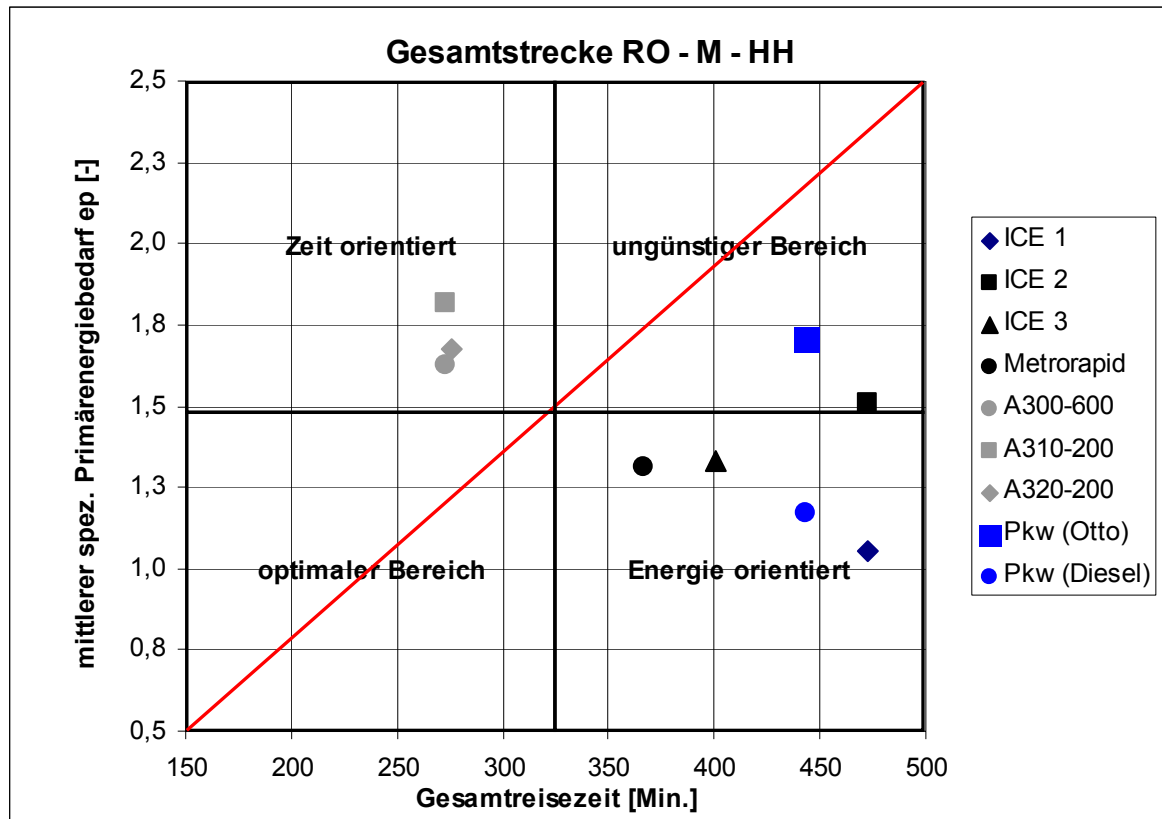
Betrachtet man die Transporteffizienz der Verkehrsmittel auf verschiedenen Hauptläufen in Bild 6-7, Bild 6-9 und Bild 6-10, so ist keine grundsätzliche Änderung der beschriebenen Relationen zu beobachten.



**Bild 6-9: Transporteffizienz auf der Strecke München – Köln mit Startort Rosenheim**

Das Flugzeug wird als zeiteffizientestes Verkehrsmittel ausgewiesen. Für die ICE 1-3 und den Metrorapid sowie die Flugzeuge sind Absenkungen im spezifischen Primärenergiebedarf mit zunehmender Streckenlänge zu beobachten, wenn man die Strecken München – Frankfurt, München – Hamburg und München – Köln im Vergleich gegenüberstellt.





**Bild 6-10: Transporteffizienz auf der Strecke München – Hamburg mit Startort Rosenheim**

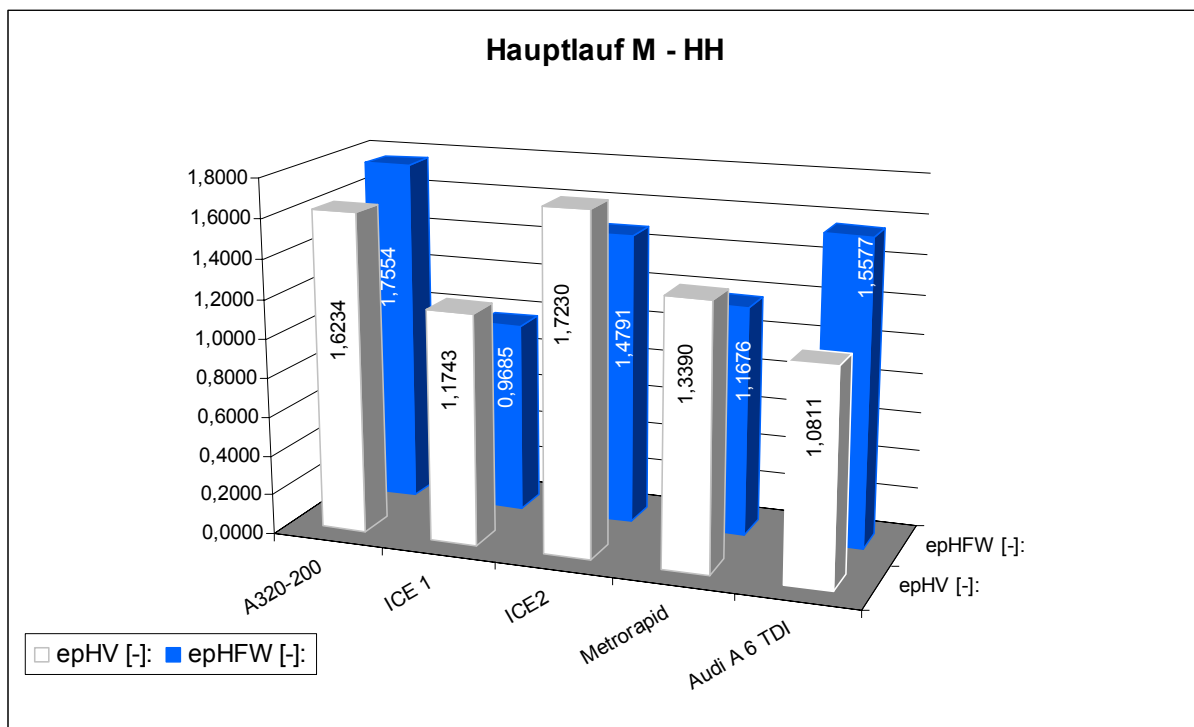
Für Pkw ist zu beobachten, dass diese einen relativ hohen Energiebedarf auf allen Strecken aufweisen und diesen Energieeinsatz nur gegenüber dem ICE 1 und ICE 2 durch eine kürzere Fahrzeit kompensieren. Der ICE 1 weist den geringsten spezifischen Primärenergieeinsatz auf. Sein Nachteil ist hier der fast doppelt so hohe Zeitaufwand im Vergleich zum Flugzeug.

Der Metrorapid und der ICE 3 zeigen in dieser Gegenüberstellung, dass sie auf allen Strecken die größten Wettbewerber für das Flugzeug werden können. Für die Fern-Bahn wie für Flugzeuge ist auf allen untersuchten Strecken zu beobachten, dass sie jeweils in Auslegung und Betrieb versuchen, ihre einseitigen Defizite zu reduzieren, so dass die Bahn zeiteffizienter und das Flugzeug energieeffizienter werden.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit des entwickelten Kriteriums kann festgestellt werden, dass es sich für den Entwurf neuer Verkehrssysteme gut eignet. Anhand des Kriteriums können die Transporteffizienz und die Wettbewerbsfähigkeit neuer Verkehrssysteme schnell festgestellt werden.

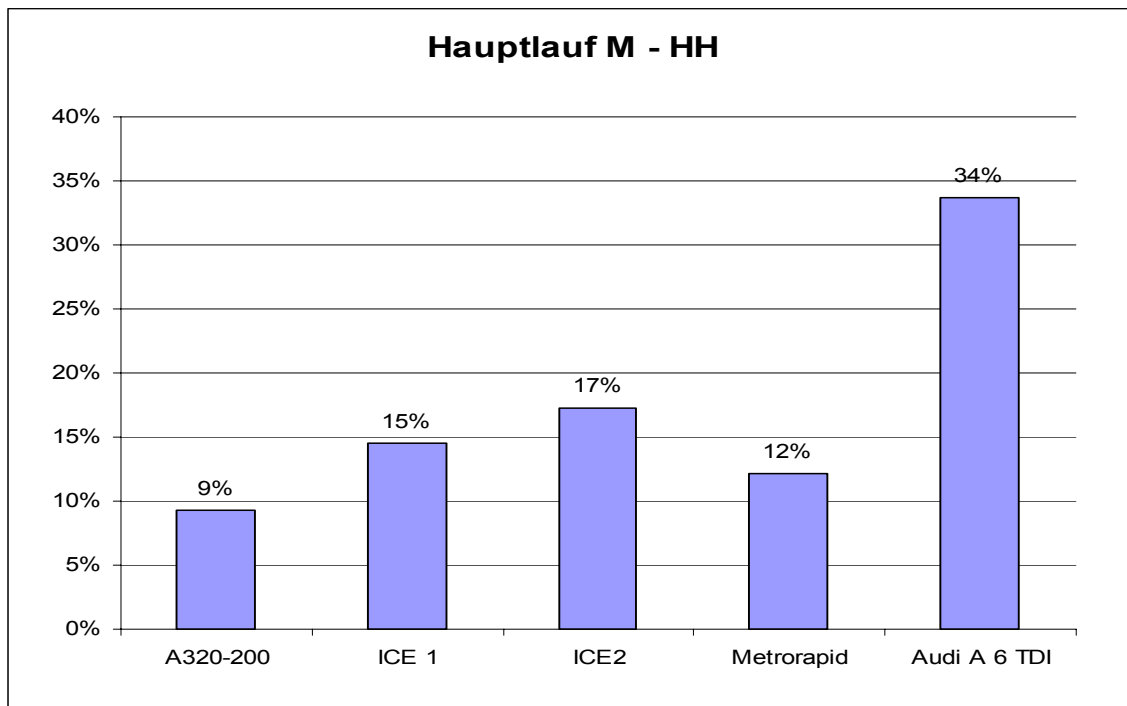
### 6.4.3 Bewertung der Gesamtmission über die Fahrwiderstände

Der spezifische Primärenergiebedarf kann wie in Kapitel 6.3.1.2 dargestellt auch über die Fahrwiderstände berechnet und in gleicher Weise wie zuvor beschrieben in dem Effizienzkriterium eingetragen werden. In diesem Fall ist jedoch entscheidend, ob die Bestimmung über den Fahrwiderstand zu vergleichbaren Ergebnissen führt wie die Berechnung über den Verbrauch. Die folgende Graphik zeigt die Ergebnisse für die unterschiedlichen Berechnungswege am Hauptlauf der Strecke München - Hamburg.



**Bild 6-11: Spez. Primärenergiebedarf für die Strecke München – Hamburg berechnet über Verbrauch und Fahrwiderstand**

Für die Verkehrssysteme A320-200 sowie ICE1 und ICE2 ist ein sehr hohes Maß an Übereinstimmung der Ergebnisse erkennbar. Die übrigen Verkehrssysteme zeigen größere Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Berechnungswegen. Entsprechend hoch liegen die Standardabweichungen, wie die nachfolgende Darstellung zeigt.



**Bild 6-12: Standardabweichungen für die Berechnungen nach Verbrauch und Fahrwiderstand**

Während die Abweichungen für den A320, den ICE 1 und 2 sowie den Metrorapid bei 5-12% liegen, zeigen die Rechnungen für den Pkw Abweichungen von 34%. Ein wesentlicher Grund für diese große Streuung liegt in der Genauigkeit der verfügbaren Verkehrssystemdaten. Der A320 sowie ICE1 und ICE2 sind in der Literatur umfassend und detailliert beschrieben, während für die Pkw abhängig von der Motorisierung und Ausstattung stark streuende Daten bekannt sind, [LISSY1990], [BOSC1997].

Eine weitere bedeutsame Unsicherheitsquelle liegt in der Beschreibung der Streckenverläufe und der damit verbundenen unsicheren Berechnung der Fahrwiderstände.

Entgegen dem Vorgehen in anderen Arbeiten wird hier vorgeschlagen, Vergleiche jeweils nur auf der Basis einer Berechnungsmethode anzustellen, vgl. [WOLF1997].

Damit kann sichergestellt werden, dass systematische Unsicherheitsquellen die Vergleiche nicht beeinträchtigen.

Die detailliertere Untersuchung der Berechnungsmethode über die Fahrwiderstände und die Schaffung einer validierten Datenbasis ist für den zukünftigen Ausbau der Methode daher anzustreben.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird eine Methode zur vergleichenden Bewertung der Transporteffizienz verschiedener Verkehrsmittel entwickelt.

Hierzu werden zunächst die Transportabläufe betrachtet. Die Analyse der Transportabläufe zeigt für die untersuchten Transportsysteme Kraftfahrzeug, Bahn und Flugzeug große Ähnlichkeiten auf. Anhand des entwickelten Phasenmodells werden die systemspezifischen Besonderheiten der verschiedenen Transportsysteme deutlich, die deren Effizienz nachhaltig beeinflussen. Im Gegensatz zum Kraftfahrzeug beinhalten Transporte mit der Bahn und dem Flugzeug immer eine Übergangsphase im Bahnhof oder Flughafen, die zusätzliche Reisezeiten erfordert, ohne in eine Transportleistung zu münden. Diese Übergangszeiten liegen im Bahnhof bei rund 25 Minuten, während im Flughafen durchschnittlich 60 Minuten zugebracht werden. Beim Abgang, also am Ende einer Reise, fallen die Verweilzeiten in Bahnhof und Flughafen um rund 50% kürzer aus.

Aus der Untersuchung der Hauptläufe wird für die verschiedenen Transportsysteme abgeleitet, dass der Entfernungsbereich zwischen 300 km und 1000 km die primären Wettbewerbsstrecken für Kraftfahrzeug, Bahn und Flugzeug darstellt. Alle übrigen Entfernungsbereiche unterliegen keinem vergleichbaren Wettbewerb. Aus diesem Grunde werden Inlandsfernreisestrecken als Grundlage für die Detailbetrachtungen zur Transporteffizienz gewählt.

Die weitere Analyse der zeitlichen Aufwände für Transporte zeigt, dass bei einer Inlandsflugreise bis zu 70% der Reisezeit in der Zu- und Übergangsphase anfallen. Hieraus ist zu schließen, dass eine Erhöhung der Fluggeschwindigkeit zu keiner Verbesserung der Transporteffizienz führt. Vielmehr ist in einer Beschleunigung der Abfertigungsabläufe im Flughafen Potential zur Effizienzsteigerung zu sehen, während im Bahnhof kaum noch Optimierungspotential zu beobachten ist. Zwischen Bahn- und Flugreisen sind keine signifikanten Zeitvorteile in den Zu- und Übergangsphasen für eines der betrachteten Systeme erkennbar. Aufgrund der bisherigen moderaten Reisegeschwindigkeiten im Vergleich zum Flugzeug liegt in der Erhöhung der Reisegeschwindigkeit unter dem Zeitaspekt ein Verbesserungspotential der Bahn. Kraftfahrzeuge erfordern trotz des fehlenden Zeitverlustes in der Übergangsphase gleiche oder längere Reisezeiten und sind nur

bei Entfernungen bis rund 400 km der Bahn oder dem Flugzeug vom Reisezeitaufwand her ebenbürtig.

Aus der Untersuchung der Fahrwiderstände gehen die Einflussgrößen Masse, Aerodynamik und Antriebe als wesentliche, konstruktiv beeinflussbare Parameter hervor. Bei der weitergehenden Betrachtung zeigt sich der Konstruktionswirkungsgrad als Verhältnis von maximaler Nutzlastkapazität zur Gesamtmasse als ein entscheidendes Beurteilungskriterium, das auf alle Transportsysteme angewendet werden kann. Bei Personentransportssystemen wird anhand des Konstruktionswirkungsgrads deutlich, dass maximal 30% der Gesamtmasse als wirtschaftliche Nutzmasse transportiert werden. Während Pkw hier Vorteile aufweisen, zeigen sich bei der Bahn entscheidende Nachteile und Verbesserungspotentiale, da sie nur rund 10% wirtschaftliche Transportmasse befördern kann. Das Flugzeug nimmt mit einem Nutzlastanteil von rund 20% eine mittlere Position ein. Im Gütertransport verfügt die Bahn dagegen mit Konstruktionswirkungsgraden von über 60% ebenso wie Lkw über klare Vorteile, und Flugzeuge erscheinen für den Gütertransport weniger optimiert.

Die Analyse der Aerodynamik ergibt für alle untersuchten Verkehrssysteme deutliche Verbesserungen von bis zu 50%, die in den siebziger- und achtziger Jahren erreicht wurden. In den letzten Jahren ist eine Stabilisierung der aerodynamischen Widerstände auf einem niedrigen Niveau zu beobachten. Ein unmittelbarer, quantitativer Vergleich der aerodynamischen Güte zwischen den verschiedenen Transportsystemen ist aufgrund unterschiedlicher Bezugsgrößen nicht möglich. Qualitativ ist für keines der Transportsysteme ein entscheidender Effizienzvorteil zu beobachten. Tunnel führen als streckenspezifisches Merkmal vor allem bei der Bahn zu einer Widerstandserhöhung, die bei den untersuchten Strecken aufgrund der geringen Streckenanteile mit 1-2% als vernachlässigbar anzusehen ist.

Hinsichtlich des Rollwiderstands weist vor allem der Pkw Potential zur Reduktion auf, während für die Bahn eher eine Erhöhung anzustreben ist. Bei Flugzeugen fällt der Rollwiderstand nicht ins Gewicht, wohingegen für Lkw schon ein sehr niedriger Rollwiderstand erreicht ist.

Der Steigungswiderstand beeinflusst alle Transportsysteme und ist nur beim Flugzeug durch eine geeignete Planung des Fahr-/Flugprofils beeinflussbar. Bei

Landfahrzeugen ist er von der Geländetopographie abhängig und lässt sich nur sehr schwer bestimmen. In dieser Arbeit wird eine einfache Näherung aus den topographischen Betrachtungen der Referenzstrecken abgeleitet, die zu einer mittleren Ersatzsteigung von rund 0,25% bezogen auf die Gesamtstrecke führt. Diese Ersatzsteigung führt im Vergleich zu einer abschnittsweise ermittelten Steigung zu einem Fehler von rund 8% und ist damit für Abschätzungen gut geeignet. Dieser Wert wirkt sich bei Bahnfahrzeugen aufgrund der geringen Rollreibung und des hohen Eigengewichts aus, während Kraftfahrzeuge davon nahezu unbeeinflusst bleiben.

Die Fahrzeugantriebe zeigen vergleichbare Wirkungsgrade für Fahrzeug- und Flugmotoren, während die Elektro- und Magnetantriebe deutlich bessere Antriebswirkungsgrade aufweisen. Bei den Getrieben sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Verkehrssystemen festzustellen. Für eine Bewertung der Verbrennungs- und Elektroantriebe sind die Wandlungsprozesse der Energieträger Kraftstoff und Strom mit zu berücksichtigen. Es zeigt sich dann, dass beide Antriebsformen sehr ähnliche Wirkungsgrade aufweisen.

Für die Bewertung der Transporteffizienz wird der dimensionslose spezifische Primärenergieeinsatz in Relation zur erforderlichen Transportzeit als graphische Kenngröße gewählt. Die Verwendung des graphischen Ansatzes in Verbindung mit dem dimensionslosen spezifischen Primärenergiebedarf und der Transportzeit erlaubt einen Vergleich zwischen verschiedenen Transportsystemen und insbesondere unterschiedlichen Antriebssystemen. In die Berechnung gehen auslegungsorientierte Gütemaße wie Konstruktions- und Antriebswirkungsgrade ebenso ein wie transportabhängige Gütemaße in Form der Auslastungs- und Streckenwirkungsgrade. Durch Bezug auf die Primärenergie werden des weiteren auch Einflüsse erfasst, die die Wandlung der Energieträger beschreiben.

Dabei kann der spezifische Primärenergieeinsatz sowohl aus dem Verbrauch als auch aus den Fahrwiderständen bestimmt werden. Die Berechnung aus dem Verbrauch hat einen unmittelbaren praktischen Nutzen für den Anwender, da er hier den gemessenen Verbrauch einsetzen kann und schnell zu vergleichbaren Ergebnissen kommt. Ein weiterer Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, dass keine detaillierten Systemkenntnisse über ein Transportmittel erforderlich sind.

Wird der spezifische Primärenergiebedarf über die Fahrwiderstände bestimmt, ist der

Einfluss verschiedener Auslegungs- und Betriebsgrößen darstellbar. Dieses Vorgehen ist insbesondere für Entwurfsaufgaben zu bevorzugen, da dann konstruktive Einflussgrößen variiert werden können.

Durch die Kombination des spezifischen Primärenergiebedarfs mit dem Zeitaufwand für eine Transportaufgabe ist eine transparente und einheitliche Vergleichsmethode gegeben.

Die Anwendung der Methode auf die gewählten Referenzstrecken und Verkehrssysteme zeigt, dass beim Zugang und Übergang die NV-Bahn nur bei hohen Auslastungsgraden eine Transporteffizienz aufweist, die mit dem Pkw konkurrieren kann. Hier wirkt sich der niedrige Konstruktionswirkungsgrad nachteilig aus, da beim Zeitaufwand unabhängig vom Startort NV-Bahn und Pkw nahezu gleich effektiv sind.

Werden die Verkehrssysteme ausschließlich auf dem Hauptlauf miteinander verglichen, so ist das Flugzeug der Fern-Bahn und dem Pkw auf allen untersuchten Strecken hinsichtlich der Reisezeit überlegen, was allerdings mit einem erhöhten Primärenergiebedarf einhergeht. Diese Situation ändert sich auch nicht, wenn die Zu-, Über- und Abgangsphasen mit berücksichtigt werden, da deren Streckenanteile gegenüber dem Hauptlauf gering sind. Allerdings führt der erforderliche Zeitaufwand in diesen Phasen zu einer deutlichen Verschlechterung der Transporteffizienz des Flugzeugs. Lange Zugangsstrecken benachteiligen vor allem die Bahn, da hier erheblicher Zeit-, aber auch Energieaufwand anfällt. Dichtere Streckennetze können hier für Verbesserungen sorgen. Das Auto mit Ottomotor fällt bei allen Untersuchungen durch einen hohen spezifischen Primärenergieeinsatz auf, der nicht mit entsprechend kurzen Fahrzeiten einhergeht, während der Primärenergieeinsatz bei Pkw mit Dieselmotoren deutlich geringer ausfällt und zu einer höheren Effizienz der Dieselfahrzeuge führt. Dagegen ist beim ICE 1 zu beobachten, dass dieser einen geringen Primärenergiebedarf erfordert und gleichzeitig die längsten Reisezeiten aufweist. In der Gesamtbewertung erweist sich jedoch das Flugzeug in dem untersuchten Streckenbereich trotz des signifikanten Zeitaufwands in den Zu- und Übergangsphasen als das zeiteffizienteste Verkehrsmittel. Der Metrorapid kommt dem Flugzeug aufgrund seiner hohen Reisegeschwindigkeit sehr nahe. Der ICE 1 zeigt sich dagegen als effizient mit Blick auf den Energiebedarf.

Eine veränderte Situation stellt sich ein, wenn anstatt einer gleichförmigen Auslastung eine absolute Transportmenge in Form einer festgelegten Passagierzahl

zu Grunde gelegt wird. In diesem Fall variieren die Auslastungsgrade sehr stark und der A320 erweist sich als das zeit- und energieeffizienteste Transportmittel, wenn z.B. 100 Passagiere von München nach Frankfurt zu befördern sind. Damit beeinflusst die Art der Aufgabenstellung die Bewertung der Transporteffizienz in erheblichem Maße. Es zeigt sich weiter, dass kleinere oder teilbare Verkehrsmittel wie der A320 oder der ICE2 auf Strecken mit stark schwankender oder geringerer Auslastung die effizienteste Form des Transportes darstellen.

Neben diesen bewertenden Ergebnissen haben die Untersuchungen ergeben, dass das entwickelte Effizienzkriterium geeignet ist, schon in der Entwurfsphase die Wettbewerbsfähigkeit neuer Entwicklungen hinsichtlich Energie- und Zeitaufwand zu bewerten. Damit sind schon in einer sehr frühen Entwicklungsphase Aussagen über die Güte eines Entwurfs möglich.

Da bisher nur die Energie- und Zeitaufwände einer Transportmission betrachtet werden, die unmittelbar mit den Transportsystemen verbunden sind, bleiben Energieaufwände unberücksichtigt, die sich aus dem Betrieb der notwendigen Infrastruktur wie Flughäfen und Bahnhöfe ergeben. Ebenso sind Energiebetrachtungen über die Herstellung, Wartung und anschließende Entsorgung noch nicht eingeflossen. In dieser ganzheitlichen Betrachtungsweise liegt eine interessante Erweiterung der vorgestellten Methode, um einen weiteren Schritt zu einer vollständigen Erfassung zu gehen.

Daneben spielt auch der Kostenfaktor eine wesentliche Rolle bei der Bewertung der Effizienz von Transportsystemen. Hierzu kann das vorgestellte Bewertungskriterium um die dritte Dimension einer Kostenachse erweitert werden.

Mit dieser Erweiterung der Methodik lässt sich ein vollständiges Bild über die Transporteffizienz anhand aller relevanten Merkmale Zeit, Energie und Kosten zeichnen, so dass sich für eine gegebene Transportaufgabe das effizienteste Verkehrssystem ermitteln lässt.



---

## 8 Literatur

- [ADAM1998] P. Adamis, R. Petersen, L. Hofmann: „Antriebskonzepte mit automatisierten Schaltgetrieben – Einfluss unterschiedlicher Motor- und Getriebekonfigurationen auf Kraftstoffverbrauch und Fahrdynamik, VDI-Bericht 1393, „Getriebe in Fahrzeugen“, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1998
- [ADV 1995] J. Schulz, et. al.: Bedeutung der Umweltwirkungen von Schienen- und Luftverkehr in Deutschland“, Studie der PROGNOSE AG im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen ADV, Stuttgart 1995
- [ADV 1997] B.M. Nierobisch: „Luftfahrt und Umwelt“, Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen ADV, Stuttgart 1997
- [ADV 2000] H. Bernhardt: „Schienenanbindung der deutschen Flughäfen“, Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen ADV, Stuttgart 2000
- [AERO1995] R. Metzler: „Der große Aero-Test München – Frankfurt mit Jet, ICE, Pkw“, Zeitschrift AERO 3/1995,
- [AHME1984] S.R. Ahmed, G. Ramm, G. Faltin: „Some Salient Features of the Time Averaged Ground Vehicle Wake“, SAE Paper No.840300, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1984
- [AIRB2000] Airbus Industries: „Current Market Outlook“, Airbus Industries, Toulouse, 2000
- [ASHF1984] N. Ashford, H.P.M. Stanton, C.A. Moore: „Airport Operations“, 1<sup>st</sup> Edition, John Wiley&Sons, New York 1984
- [BAEK1999] B. Bäker, T. Forchert: „Onbord Diagnosekonzepte für zukünftige Kraftfahrzeuge – Fehlerdiagnose, Energie- und Informationsmanagement“, VDI-Bericht 1505 „Technologien rund um das 3-Liter-Auto, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1999

- [BECK2001] K.J. Beckmann: „Mobilität“, Verkehr – Straße, Schiene – Luft, Ernst&Sohn Verlag, Berlin 2001
- [BERT1995] T. Bertram: „Anreiseverhalten von Fluggästen im innerdeutschen Linienverkehr“, Diplomarbeit LST123, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, Mai 1995
- [BEHR1995] U. Behrenbeck: „Anreiseverhalten von Fluggästen zum Flughafen München“, Diplomarbeit LST175, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, 1995
- [BIAL1990] W. Bialonski, P. Vanck, et. al.: „Spezifischer Energieeinsatz im Verkehr – Ermittlung und Vergleich der spezifischen Energieverbräuche“, Forschungsbericht 90 247/88, Verkehrswissenschaftliches Institut, RWTH Aachen, 1990
- [BMVB2001] BMVBW: „Verkehr in Zahlen 2001/2002“ Deutscher Verkehrs-Verlag, 2001
- [BOEI1999] N.N.: „Current Market Outlook“, Internet-Veröffentlichung [www.boeing.com/commercial/cmo](http://www.boeing.com/commercial/cmo), Boeing Company, 1999
- [BOND2000] Lothar Bondzio: „Modelle für den Zugang von Passagieren zu Flughäfen“, Internationales Verkehrswesen (52), Ausgabe 12/2000
- [BOSC1997] Bosch AG: „Kraftfahrtechnisches Taschenbuch“, Vieweg Verlag, Braunschweig, 23. Auflage, 1997
- [BROC1995] D. Brocke: „Eisenbahnbedingter Straßenpersonenverkehr in Einzugsbereichen von Bahnhöfen“, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1995
- [BRÜN1986] H. Brüning, X. Hafer, G. Sachs: „Flugleistungen“, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg - New York, 2. Auflage, 1986

- [BUHE2003] Butterworth-Heinemann: „ExCel-Tabelle über Airbus-Daten“  
[www.bh.com/companions/034074152X/appendices/data-a/table-1/atable1.xls](http://www.bh.com/companions/034074152X/appendices/data-a/table-1/atable1.xls), London, 2003
- [DALB2001] F. Dalby: „Gegenüber dem Jet spielt der Turboprop seine Trümpfe aus“, Planet Aerospace, Nr.4, Juli-September 2001, Résidence Verlag GmbH, Postfach 29, 59515 Mönnesee
- [DREW2000] U. Drews: „Vorfahren, Einchecken, Abfliegen – ein schätzenswerter Dreiklang“, Internationales Verkehrswesen (52), Ausgabe 9/2000
- [DAUE2002] A. Dauensteiner: „Der Weg zum Ein-Liter-Auto“, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg New York, 2002
- [DBAG1985] N.N.: „Offizieller Jubiläumsband der Deutschen Bundesbahn – 150 Jahre Deutsche Eisenbahnen“, 2. Auflage, ELV Eisenbahn Lehrbuch Verlagsgesellschaft mbH, München, 1985
- [DBAG2000] Deutsche Bahn AG, WWF-Club Deutschland: „Reisen und Umwelt in Deutschland“, Version 1.2 für Windows 9x / Windows NT 4.0, Mai 2000,  
[www.bahn.de/home/db\\_holding/angebote/db\\_holding\\_computer\\_programm.html](http://www.bahn.de/home/db_holding/angebote/db_holding_computer_programm.html), Mai 2000
- [DBAG2001] Deutsche Bahn AG: „ICE Streckennetz 2000/2001“, [www.bahn.de](http://www.bahn.de), März 2002
- [DFS 2001] A. Dannenberg: „Flugaufzeichnungen der Deutschen Flugsicherung auf ausgewählten innerdeutschen Strecken“, Persönliche Mitteilung der DFS“, Deutsche Flugsicherung Offenbach 2001
- [DFS 2002] Deutsche Flugsicherung: „Streckenkarte – Enroute Chart“, Eichbaum Verlag 2002
- [EMME1997] H.-J. Emmelmann, W.H. Hucho, Herausg.: „Aerodynamics of Road Vehicles – Performance of Cars and Light Trucks“, SAE International, Warrendale, Pa., 4. Auflage 1997

- [EUKO1999] N.N.: „Luftverkehr und Umwelt – Wege zu einer nachhaltigen Entwicklung“, Mitteilung der EU Kommission, Brüssel 1999
- [FISC1993] J.W: Fischer, A. Schaefer-Enekelen: “Elektrische Hochleistungslokomotive EuroSprinter“, eb – Elektrische Bahnen 91, Nr. 8, R. Oldenbourg Verlag, 1993
- [FIEL2001] J.P. Fielding: „Introduction to Aircraft Design“, Cambridge University Press, Cambridge, 2001
- [FILI1995] Z. Filipovic: "Elektrische Bahnen", 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1995
- [FILI2002] A. Filippone.: „Aerodynamic Database – Lift-to-Drag Ratios“, [www.aerodyn.org/highLift/ld-tables.html](http://www.aerodyn.org/highLift/ld-tables.html)
- [FRIC2001] H. Fricke: „Luftverkehr“, Vorlesung WS 2001/2002, Institut für Luftfahrt, TU Dresden, 2001
- [GAEB1997] M. Gaebges: „Die Zukunft des Luftverkehrs“, Tagungsband II der DGLR-Jahrestagung 1997, München 14.-17.9.1997, Seite 1457-1472
- [GILH1979] A. Gilhaus, E. Hau: „Aerodynamische Verkleidungen als Energiesparmaßnahme bei Lastzügen“, Automobil Revue, Nr. 35, 1979
- [GILH1980] A. Gilhaus, E. Hau: „Über den Luftwiderstand von Fernlastzügen, Ergebnisse aus Modellmessungen im Windkanal“, Automobil-Industrie, Heft 3 September 1979 und Heft 3 September 1980
- [GÖTZ1997] H. Götz, G. Mayr: „Aerodynamics of Road Vehicles – Commercial Vehicles“, SAE International, Warrendale, Pa., 4. Auflage 1997
- [GLÜC1981] H. Glück: „Die Aerodynamik schnellfahrender Züge – Ein Überblick über den Stand der Erkenntnisse“, AET(36), S.23-40, 1981

- 
- [GLÜC1985] H. Glück: „Aerodynamik der Schienenfahrzeuge“, aus der Reihe Fahrzeugtechnische Schriftreihe, TÜV Rheinland, 1985
- [GANZ1987] U. Ganzer: „Gasdynamik“, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1987
- [GAWT1978] R.G. Gawthorpe: „Aerodynamics in Railway Engineering Part I: Aerodynamics of Trains in the Open Air“, Institute of Mechanical Engineering. Railway Engineering International, pp. 7-12, 1978
- [GOOL1992] K. Gool, O’Toole: „What happens next?“, Flight International 18/1992, Seite 24
- [HAGE1982] H. Hagen: „Fluggasturbinen und ihre Leistungen“, G. Braun Verlag, Karlsruhe, 1982
- [HIRS2001] E.H. Hirschel, H. Prem, G. Madelung: „Luftfahrtforschung in Deutschland“, Reihe „Die Deutsche Luftfahrt“, Band 30, Bernard & Graefe Verlag, Bonn 2001
- [HUCH1997] W.H. Hucho: „Aerodynamics of Road Vehicles – Aerodynamic Drag of Passenger Cars“, SAE International, Warrendale, Pa., 4. Auflage 1997
- [HÜNE1989] K. Hünecke: „Das Kampflugzeug von Heute“, 2. Auflage, Motorbuch Verlag Stuttgart, 1989,
- [HÜNE1983] K. Hünecke: „Flugtriebwerke – Ihre Technik und Funktion“, 3. Auflage Motorbuchverlag, Stuttgart 1983
- [HÜNE2000] K. Hünecke: „Die Technik des modernen Verkehrsflugzeuges“, Motorbuch-Verlag Stuttgart, 2000
- [IFEU2000] N.N: „Wissenschaftlicher Grundlagenbericht zur Mobilitätsbilanz und zum Softwaretool Reisen und Umwelt in Deutschland“, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, 8. November 2000

- [IFEU2002] N.N: „Wissenschaftlicher Grundlagenbericht zur Mobilitätsbilanz und zum Softwaretool Reisen und Umwelt in Deutschland“, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, 2. Mai 2002
- [JAKO1982] H.G. Jakob: „Rechnergestützte Optimierung statischer und dynamischer Systeme“, Fachberichte Messen-Steuern-Regeln, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg New York, 1982
- [JÄNS1995] E. Jänsch: “Schienenschnellverkehr und Luftfahrt als ökologische Alternativen zum Straßenverkehr“, eb – Elektrische Bahnen 93, Nr. 1/2, R. Oldenbourg-Verlag 1995
- [JÄNS2001] E. Jänsch: „Hochgeschwindigkeitsverkehr auf DB-Strecken“, Internationales Verkehrswesen (53), 11/2001, Deutscher Verkehrs Verlag
- [JANK2001] Janke: „Programmierung eines Flugplangenerators zur Erzeugung von Verkehrsszenarien für ein Tower Simulationsprogramm“, Studienarbeit, Rechenanlage des Mechanik-Zentrums, TU Braunschweig, 27. Januar 2001
- [JENK1999] L.R. Jenkinson, P. Simpkin, D. Rhodes: „Civil Jet Aircraft Design“, Arnold Publishers, London, 1999
- [JUNI1999] M. Junio, A. Roesgen, F. Corvasce: „Rolling Resistance of Tires“, VDI-Berichte 1505 „Technologien um das 3-Liter Auto“, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1999
- [KAPI2002] S. Kapitzke: „Bestimmung fahrdynamischer Daten auf Schienenfahrzeugen anhand des Verlaufs von Zugfahrten“, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 12 Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik, Bericht Nr.501, VDI-Verlag, Düsseldorf 2002
- [KIEß1996] B. Kießling, J. Wach: „Güterzuglokomotive Baureihe 152 der Deutschen Bahn“, eb – Elektrische Bahnen 94, Nr. 8/9, R. Oldenbourg-Verlag, 1996

- 
- [KOSS1984] H. Kossira: „Flugzeugbau I“, Vorlesungsmanuskript des Lehrstuhls und Instituts für Flugzeugbau und Leichtbau, Technische Universität Braunschweig, WS 1984/85
- [KOSS1985] H. Kossira: „Flugzeugbau II“, Vorlesungsmanuskript des Lehrstuhls und Instituts für Flugzeugbau und Leichtbau, Technische Universität Braunschweig, SS 1985
- [KRAU2001] P. Kraus: „Güterverkehr“, Verkehr – Straße, Schiene – Luft, Ernst&Sohn Verlag, Berlin 2001
- [KRÖG2001] S. Kröger: „Fliegen auf Schienen“; Welt am Sonntag, Nr.40, vom 7 Oktober 2001
- [KURZ1995] H. Kurz: „Neue InterCityExpress-Triebzüge für die Deutsche Bahn“, eb – Elektrische Bahnen 93, Nr. 1/2, R. Oldenbourg-Verlag, 1995
- [LANG2002] E. Lange: „Auf leisen Flügeln in eine saubere Zukunft“; VDI-Nachrichten, Nr.50, 13. Dezember 2002, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2002
- [LARS1994] G. Larsson, P. Adamis, G. Grüschow, C. Heimermann: „Trends im Antriebsstrangmanagement“, VDI-Bericht 1170 „Innovationen im Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen“, VDI-Verlag, Düsseldorf 1994
- [LARS1993] G. Larsson, H. Wester, M. Hazelaar, F. Schneider: „Fahrzeugkonzepte im Verbrauchsvergleich – Grenzen und Machbarkeit“, VDI-Bericht 1099 „Beiträge der Fahrzeugtechnik zur Verbrauchsreduzierung“, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1993
- [LISSY1990] N.N.: „A320 Mini Study“, Lissys Research, Dezember 1990
- [LUFT1998] N.N.: „Lufthansa Umweltbericht 1997/98“, Deutsche Lufthansa AG, Frankfurt, 1998
- [LUFT2002] Deutsche Lufthansa: „Lufthansa Magazin“, Mai 2002

- [MACK1987] P.-A. Mackrodt, E. Pfizenmaier: „Aerodynamik und Aeroakustik für Hochgeschwindigkeitszüge“, Physik in unserer Zeit, Jahrg. 18, Nr.3, VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1987
- [MATH1998] J. Mathes: „Berechnung der aerodynamischen Güte und des spezifischen Primärenergieeinsatzes von Passagierflugzeugen in den einzelnen Missionsabschnitten“, Semesterarbeit LT-SA 98/2, Lehrstuhl für Luftfahrttechnik, TU München, 1998
- [MATH1997] J. Mathes, A. Strohmayer, H.A. Niedzballa: „Daten und Berechnungsgrundlagen zum Vortrag der DGLR Jahrestagung 1997, Technischer Bericht, LT-TB 97/2, Lehrstuhl für Luftfahrttechnik, TU München, 1997
- [MEHL2001] G. Mehlhorn, Hrsg.: „Verkehr – Straße, Schiene, Luft“, Verlag Ernst & Sohn, Verlag GmbH, Berlin 2001
- [MENS1993] H. Mensen: „Moderne Flugsicherung“, 2. Auflage, Springer-Verlag 1993
- [MITS1995] M. Mitschke: „Dynamik der Kraftfahrzeuge“, Band A, 3. Auflage, Springer Verlag, 1995
- [MNIC1998] P. Mnich: „Neuartige und weiterentwickelte Bahnsysteme – Teil 1, Vorlesung Wintersemester 1998/99, Institut für Land- und Seeverkehr (ISS), Technische Universität Berlin.
- [MNIC1999] P. Mnich: „Elektrische Bahnen auf Erfolgskurs“, Eisenbahntechnische Rundschau ETR48, Heft 3, 1999
- [NIED1998] H.A. Niedzballa, D. Schmitt: „Vergleich des spezifischen Energiebedarfs von Flugzeugen und anderen Verkehrsmitteln“, Technischer Bericht, Lehrstuhl für Luftfahrttechnik, TU München, 1998
- [NIED2001] H.A. Niedzballa, D. Schmitt: „Comparison of the specific energy demand of aeroplanes and other vehicle systems“, Aircraft Design 4 (2001), pp 163-178, Elsevier Science Ltd., 2001



- 
- [OBER1994a] H.-J. Obermayer, J. Deppmeyer: „Deutsche Eisenbahnen – Güterwagen“, Weltbild-Verlag, Augsburg 1994
- [OBER1994b] H.-J. Obermayer, J. Deppmeyer: „Deutsche Eisenbahnen – Reisezugwagen“, Weltbild-Verlag, Augsburg 1994
- [OBER1994c] H.-J. Obermayer, J. Deppmeyer: „Deutsche Eisenbahnen – Triebfahrzeuge“, Weltbild-Verlag, Augsburg 1994
- [OBER1994d] H.-J. Obermayer, J. Deppmeyer: „Deutsche Eisenbahnen – Elektrolokomotiven“, Weltbild-Verlag, Augsburg 1994
- [PROG2002] J. Grotrian, et. al.: „Verkehrsentwicklung Sommer 2002 - Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr“, Projekt-Nr. 96.0792/2002 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Prognos AG, Basel
- [POVE1997] R. Povel: „Die Zukunft des Straßengüterverkehrs“, Tagungsband II der DGLR – Jahrestagung 1997, München 14.-17.9.1997, Seite 1433-1455
- [RUPP2001] O. Rupp: „Instandhaltungskosten bei zivilen Strahltriebwerken“, DGLR-Workshop, Maintenance von Flugzeugen und Triebwerken, TU München, 5.-6. Juli 2001, München
- [RADL1981] K. Radlbeck: „Bahnhof und Empfangsgebäude – Die Entwicklung vom Haus zum Verkehrswegeknoten“, Dissertation am Lehrstuhl für Städtebau, Orts- und Regionalplanung, Technische Universität München, 1981
- [SHEL2000a] N.N.: Shell Atlas, Ausgabe 1999/2000, Mayr Verlag
- [SHEL2000b] N.N.: Shell Routenplaner, Version 1999/2000, Mayr Verlag
- [SCHÄ1995] H. Schäfer, B. Geiger, M. Rudolf: „Energiewirtschaft und Umwelt“, Reihe Umweltschutz: Grundlagen und Praxis, Economica Verlag 1995

- [SCHE1994] E. Schesky, K. Peter, M. Schütze: „Spezifischer Ressourcenverbrauch der einzelnen Verkehrszweige im Gütertransport“, Abschlußbericht zur Studie, Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, TU Dresden, Dresden, 1994
- [SCHE2001] E. Schesky: „Luftfahrzeuge und Landfahrzeuge im Vergleich: Besonderheiten im Betrieb“, Internationales Verkehrswesen (53), Ausgabe 4/2001,
- [SCHR2002] T. Schroeder: „Energie sparen an Bord“, VDI-Nachrichten, Nr.25, 21. Juni 2002, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf
- [SCHU2002a] J. Schulze: „Übung Antriebstechnik“ zur Vorlesung „Neuartige und weiterentwickelte Bahnsysteme I“, Institut für Land- und Seeverkehr, TU Berlin, 2002
- [SCHU2002b] J. Schulze: „Übung Vergleich im Nah- und Regionalverkehr“ zur Vorlesung „Neuartige und weiterentwickelte Bahnsysteme I“, Institut für Land- und Seeverkehr, TU Berlin, 2002
- [SCHU2002c] J. Schulze: „Übung Vergleich ICE und Transrapid“ zur Vorlesung „Neuartige und weiterentwickelte Bahnsysteme I“, Institut für Land- und Seeverkehr, TU Berlin, 2002
- [SCHU1993] T. Schulze: „Der Rollwiderstand von Reifen und seine Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch von Pkws“, VDI-Berichte-1099 „Beiträge der Fahrzeugtechnik zur Verbrauchssenkung“, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1993
- [SCHU1976] K. Schubert: „Bewertung unterschiedlicher Antriebsaggregate in Lkw und Omnibussen durch rechnerische Methoden“, VDI-Vortragsreihe 100 Jahre Ottomotoren, Köln, 1976
- [SCHW1997] K. Schweda, E. Wendler: „Perspektiven für das deutsche Hochgeschwindigkeitsnetz“, Eisenbahntechnische Rundschau 46, Heft 9, 1997

- 
- [SOCK1994] H. Sockel: „Aerodynamics of trains“, in Handbook of Fluid Dynamics and Fluid Machinery, J.A. Schetz, A.E. Fuhs Ed., Volume III: Applications of Fluid Dynamics, John Wiley & Sons Inc., New York, 1994
- [STAS1984] G. Staska: „Bestimmung der Fahrwiderstände von Kraftfahrzeugen im Fahrversuch“, Mitteilungen des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Heft 40, Technische Universität Graz, 1984
- [STIL1996] L. Still, W. Hammer: „Auslegung und elektrischer Leistungsteil der Lokomotive Baureihe 101 der Deutschen Bahn“, eb – Elektrische Bahnen Nr. 8/9, R. Oldenbourg-Verlag, 1996
- [TEST1997] N.N: „So kommen Sie am besten weg – Verkehrsmittel im Vergleich“, Zeitschrift TEST, Ausgabe 12/97
- [TITZ1998] G. Titze: „Persönliche Mitteilungen“, LufthansaCargo AG, Frankfurt, Oktober 1998
- [VDI 1999] Verein Deutscher Ingenieure: „Fahrzeug und Verkehrstechnik – Jahrbuch 1999“, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1999
- [VDI 2002] R.R. Rossberg: „Mit Tempo 300 vom Rhein zum Main“, VDI-Nachrichten Nr.30, 26. Juli 2002
- [VOIG1973] F. Voigt: „Verkehr – Erster Band: Die Theorie der Verkehrswirtschaft“, Berlin 1973
- [WEGE2002] M. Wegener: „Formelsammlung Schienenbahnwesen“, [www.marco-wegener.de](http://www.marco-wegener.de), 2002
- [WOLF1997] K.F. Wolff: „Vergleich des spezifischen Primäreinsatzes verschiedener Transportsysteme“, Semesterarbeit LT-SA 97/13 des Lehrstuhls für Luftfahrttechnik, TU München, 1997
- [WOLT2002] S. Wolterek: „Heavy Metal – Autos immer schwerer“, Donau Kurier, Nr. 267, 19. November 2002, Courier-Verlag, Ingolstadt, 2002

[ZAPP2002] K. Zapp: „Power Optimized Aircraft“, Internationales Verkehrswesen (54), Nr.5/2002, Deutscher Verkehrs-Verlag, 2002

---

# Anhang

---

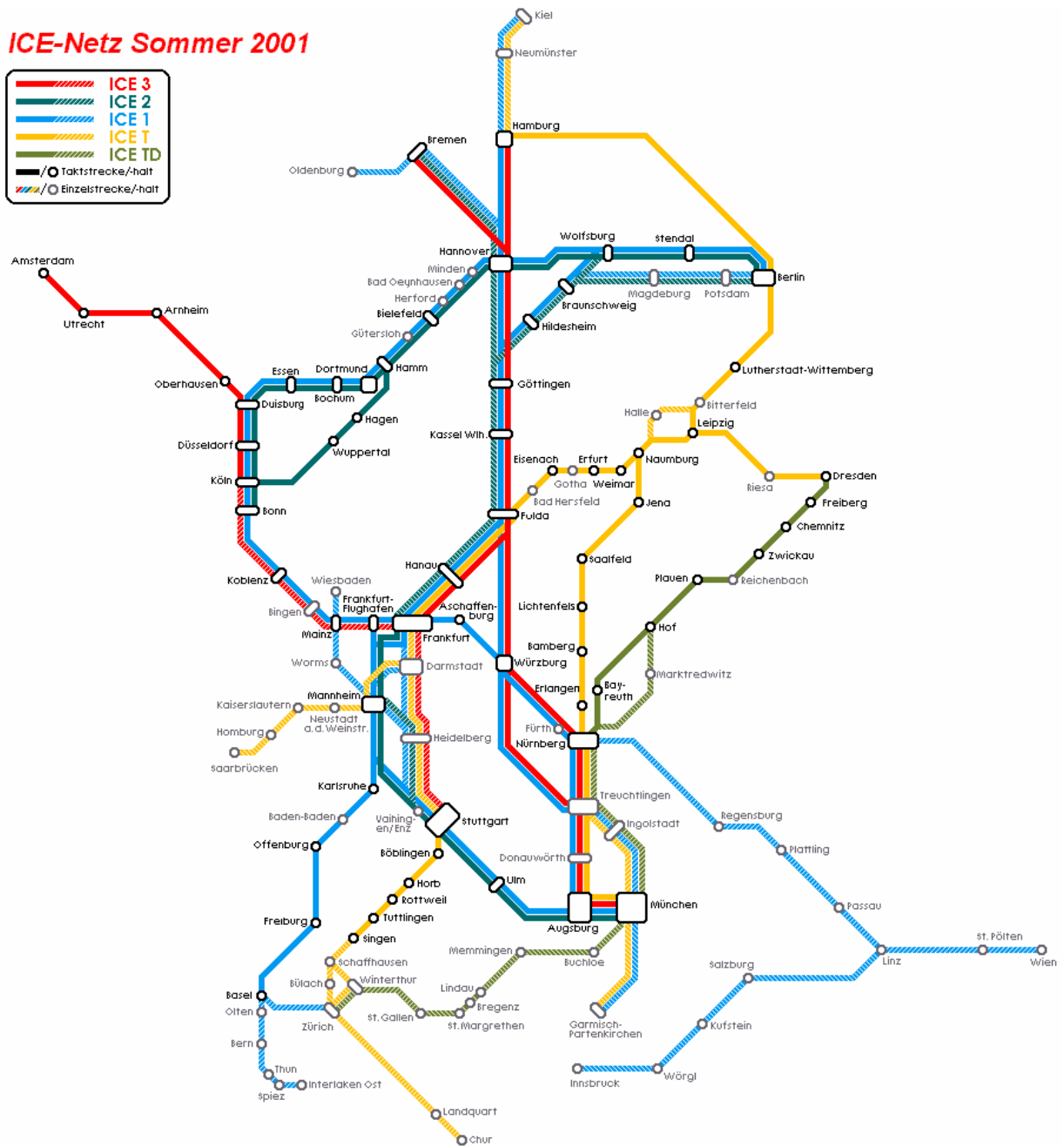


## Anhang A: Streckennetze Schiene, Straße, Luft

Nachfolgend sind die Streckennetze für Bahn, Kraftfahrzeug und Luftverkehr für den Verkehrsraum Deutschland dargestellt.



Bild A-1: Bundesfernstraßennetz 2000, aus [SHEL2000]



**Bild A-2: ICE-/Fernstreckennetz der Deutschen Bahn AG Sommer 2001, [DBAG2001]**





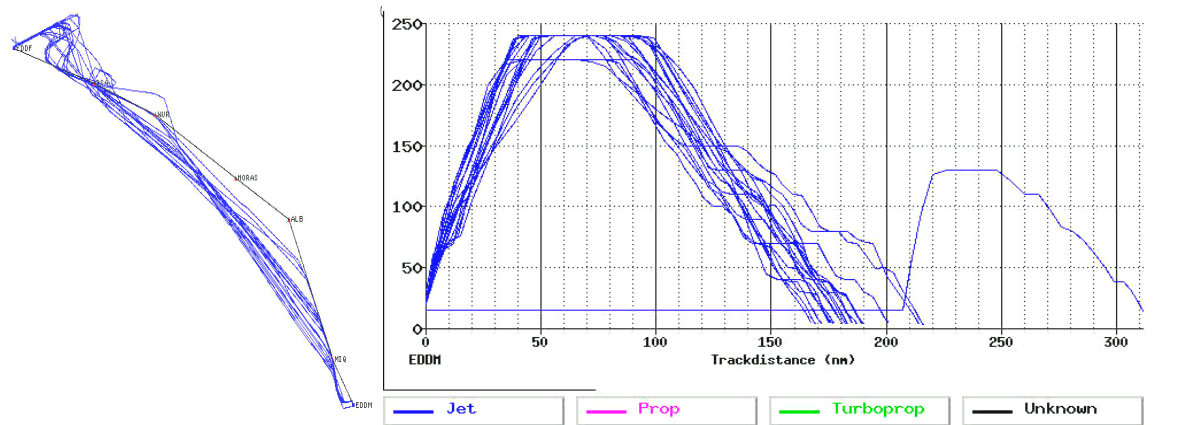
Bild A-3: Innerdeutsches Streckennetz der Lufthansa, [LUFT2001]



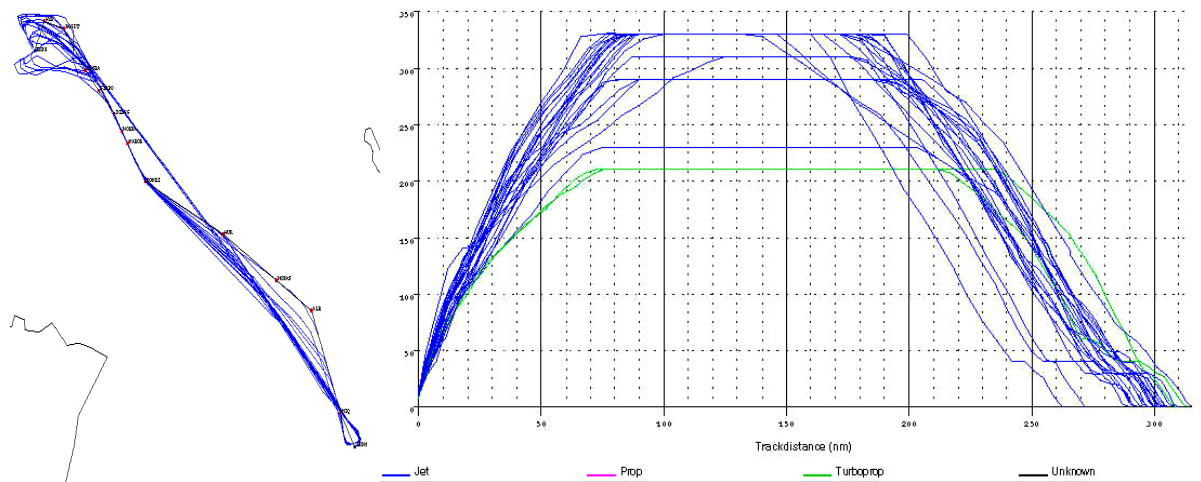


## Anhang B: Aufgezeichnete Flugrouten und Flugprofile

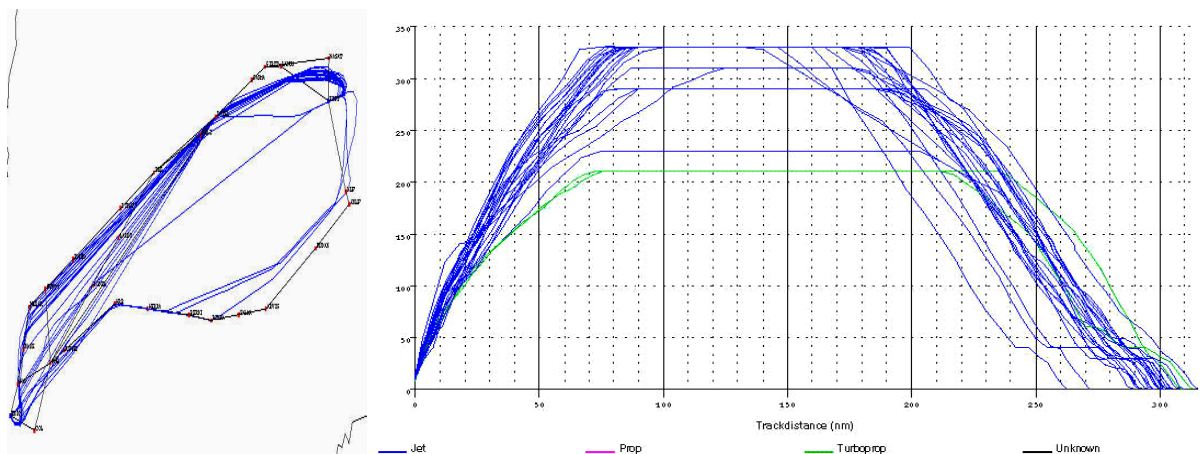
Die folgenden Graphiken zeigen Auswertungen der DFS der Flugprofile für die Relationen München – Frankfurt, München – Köln; Köln - Berlin



**Bild B-1: Strecken- und Flughöhenprofil München – Frankfurt, [DFS2001]**



**Bild B-2: Strecken- und Flughöhenprofil München – Köln, [DFS2002]**



**Bild B-3: Strecken- und Flughöhenprofil Köln – Berlin, [DFS2001]**



# Anhang C: Auswertung der Reisezeiten

|                                | Auswertung der Zugangs- und Übergangsstrecken und -zeiten |              |              |            |              |              |              |              |            |               |              |              |              |            |            |              |
|--------------------------------|---|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|
|                                | Ro-M-HH   |              |              | Ro-M-Köln  |              |              | Ro-M-FFM     |              |            | Köln - Berlin |              |              |              |            |            |              |
|                                | Kfz   | Bahn/Bahn    | Bahn/Pkw     | Fiz/Bahn   | Fiz/Pkw      | Kfz          | Bahn/Bahn    | Bahn/Pkw     | Fiz/Bahn   | Fiz/Pkw       | Kfz          | Bahn/Bahn    | Bahn/Pkw     | Fiz/Bahn   | Fiz/Pkw    |              |
| Zugang [km]                    | 3,2   | 66           | 73           | 114        | 111          | 3,2          | 66           | 73           | 114        | 111           | 2,9          | 0            | 3            | 0          | 16         |              |
| Übergang [km]                  | 84,5  | 0            | 0            | 0          | 0            | 84,5         | 0            | 0            | 0          | 0             | 4            | 0            | 0            | 0          | 0          |              |
| Hauptlauf [km]                 | 773   | 813          | 813          | 644        | 644          | 579          | 606          | 606          | 532        | 532           | 564,1        | 571          | 571          | 532        | 532        |              |
| Übergang [km]                  | 2,5   | 0            | 0            | 0          | 0            | 2,2          | 0            | 0            | 0          | 0             | 2            | 0            | 0            | 0          | 0          |              |
| Abgang [km]                    | 10,1  | 2,3          | 0            | 0          | 16           | 3,7          | 0            | 0            | 0          | 17            | 0            | 0            | 0            | 0          | 6,4        |              |
| <b>Gesamtstrecke [km]</b>      | <b>867</b>  | <b>879</b>   | <b>888,3</b> | <b>788</b> | <b>765,1</b> | <b>676,9</b> | <b>672</b>   | <b>682,1</b> | <b>646</b> | <b>659</b>    | <b>489,7</b> | <b>503</b>   | <b>512,2</b> | <b>471</b> | <b>485</b> | <b>554,4</b> |
| (Zu-/Über-Abgang)/Gesamt [Stre | 11%   | 8%           | 8%           | 15%        | 16%          | 15%          | 10%          | 11%          | 18%        | 19%           | 20%          | 13%          | 15%          | 24%        | 0%         | 4%           |
| Streckenwirkungsgrad njs [-]   | 0,7439  | 0,7338       | 0,7261       | 0,8609     | 0,8430       | 0,7505       | 0,7560       | 0,7448       | 0,7664     | 0,7709        | 0,7622       | 0,7117       | 0,6989       | 0,7601     | 0,7381     | 0,8377       |
| Zugangszeit [Min.]             | 7   | 50           | 71           | 87         | 84           | 7            | 50           | 71           | 87         | 84            | 10           | 0            | 12           | 8          | 0          | 29           |
| Übergangszeit [Min.]           | 50  | 25           | 25           | 63         | 63           | 45           | 25           | 25           | 63         | 63            | 25           | 25           | 63           | 63         | 63         | 65           |
| Hauptlaufzeit [Min.]           | 353   | 372          | 372          | 65         | 65           | 309          | 329          | 329          | 63         | 63            | 320          | 237          | 237          | 282        | 282        | 282          |
| Übergangszeit [Min.]           | 3   | 13,5         | 13,5         | 22         | 22           | 8            | 13,5         | 13,5         | 22         | 22            | 6            | 13,5         | 13,5         | 22         | 22         | 22           |
| Abgangszeit [Min.]             | 26  | 10           | 5            | 10         | 29           | 9            | 10           | 5            | 10         | 29            | 7            | 10           | 5            | 10         | 10         | 21           |
| <b>Gesamtzeit [Min.]</b>       | <b>439</b>  | <b>470,5</b> | <b>486,5</b> | <b>247</b> | <b>263</b>   | <b>378</b>   | <b>427,5</b> | <b>443,5</b> | <b>245</b> | <b>261</b>    | <b>291</b>   | <b>335,5</b> | <b>351,5</b> | <b>247</b> | <b>255</b> | <b>336</b>   |
| (Zu-/Über-Abgang)/Gesamt [Zeit | 20%   | 21%          | 24%          | 74%        | 75%          | 18%          | 23%          | 26%          | 74%        | 76%           | 21%          | 29%          | 33%          | 74%        | 75%        | 59%          |

|                                | DAH-M-Köln   |              |              |            |              |              | DAH-M-FFM    |              |            |              |              |              |              |            |              |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|
|                                | Kfz          | Bahn/Bahn    | Bahn/Pkw     | Fiz/Bahn   | Fiz/Pkw      | Kfz          | Bahn/Bahn    | Bahn/Pkw     | Fiz/Bahn   | Fiz/Pkw      | Kfz          | Bahn/Bahn    | Bahn/Pkw     | Fiz/Bahn   | Fiz/Pkw      |
| Zugang [km]                    | 7,4          | 37           | 18,4         | 54         | 36,3         | 7,4          | 37           | 18,4         | 54         | 36,3         | 0            | 0            | 0            | 0          | 0            |
| Übergang [km]                  | 15,7         | 0            | 0            | 0          | 0            | 15,7         | 0            | 0            | 0          | 0            | 0            | 0            | 0            | 0          | 0            |
| Hauptlauf [km]                 | 773          | 813          | 813          | 644        | 644          | 579,5        | 606          | 606          | 532        | 532          | 375,6        | 437          | 437          | 357        | 357          |
| Übergang [km]                  | 3,8          | 0            | 0            | 0          | 0            | 2,2          | 0            | 0            | 0          | 0            | 2,7          | 0            | 0            | 0          | 0            |
| Abgang [km]                    | 2,5          | 0            | 2,3          | 0          | 10,1         | 2,2          | 0            | 3,1          | 0          | 16           | 3,7          | 0            | 2,2          | 0          | 17           |
| <b>Gesamtstrecke [km]</b>      | <b>796,1</b> | <b>850</b>   | <b>831,4</b> | <b>688</b> | <b>680,3</b> | <b>612,3</b> | <b>643</b>   | <b>627,5</b> | <b>666</b> | <b>666,3</b> | <b>389,4</b> | <b>474</b>   | <b>487,6</b> | <b>441</b> | <b>410,3</b> |
| (Zu-/Über-Abgang)/Gesamt [Stre | 8%           | 4%           | 2%           | 7%         | 7%           | 6%           | 3%           | 3%           | 9%         | 9%           | 4%           | 8%           | 5%           | 13%        | 13%          |
| Streckenwirkungsgrad njs [-]   | 0,7424       | 0,6953       | 0,7108       | 0,8467     | 0,8687       | 0,71534      | 0,69118      | 0,69801      | 0,74744    | 0,74961      | 0,74474      | 0,61181      | 0,63374      | 0,70560    | 0,70680      |
| Zugangszeit [Min.]             | 15           | 32           | 46           | 71         | 43           | 15           | 32           | 46           | 71         | 43           | 15           | 32           | 46           | 71         | 43           |
| Übergangszeit [Min.]           | 12           | 25           | 25           | 63         | 63           | 45           | 25           | 25           | 63         | 63           | 25           | 25           | 63           | 63         | 63           |
| Hauptlaufzeit [Min.]           | 353          | 372          | 372          | 65         | 65           | 309          | 329          | 329          | 63         | 63           | 229          | 237          | 237          | 282        | 282          |
| Übergangszeit [Min.]           | 3            | 13,5         | 13,5         | 22         | 22           | 8            | 13,5         | 13,5         | 22         | 22           | 3            | 13,5         | 13,5         | 22         | 22           |
| Abgangszeit [Min.]             | 26           | 10           | 5            | 10         | 29           | 9            | 10           | 5            | 10         | 29           | 7            | 10           | 5            | 10         | 21           |
| <b>Gesamtzeit [Min.]</b>       | <b>409</b>   | <b>452,5</b> | <b>461,5</b> | <b>231</b> | <b>222</b>   | <b>386</b>   | <b>409,5</b> | <b>418,5</b> | <b>229</b> | <b>220</b>   | <b>299</b>   | <b>317,5</b> | <b>326,5</b> | <b>231</b> | <b>214</b>   |
| (Zu-/Über-Abgang)/Gesamt [Zeit | 14%          | 18%          | 19%          | 72%        | 71%          | 20%          | 20%          | 21%          | 72%        | 71%          | 23%          | 25%          | 27%          | 72%        | 70%          |

|                                | M/Schw-M-Köln |              |              |            |              |              | M/Schw-M-FFM |              |            |              |              |              |              |            |              |
|--------------------------------|---------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|
|                                | Kfz           | Bahn/Bahn    | Bahn/Pkw     | Fiz/Bahn   | Fiz/Pkw      | Kfz          | Bahn/Bahn    | Bahn/Pkw     | Fiz/Bahn   | Fiz/Pkw      | Kfz          | Bahn/Bahn    | Bahn/Pkw     | Fiz/Bahn   | Fiz/Pkw      |
| Zugang [km]                    | 9,9           | 10           | 10,3         | 58         | 33,3         | 9,9          | 10           | 10,3         | 58         | 33,3         | 9,9          | 10           | 10,3         | 58         | 33,3         |
| Übergang [km]                  | 0             | 0            | 0            | 0          | 0            | 0            | 0            | 0            | 0          | 0            | 0            | 0            | 0            | 0          | 0            |
| Hauptlauf [km]                 | 773           | 813          | 813          | 644        | 644          | 578,5        | 606          | 606          | 532        | 532          | 375,6        | 437          | 437          | 357        | 357          |
| Übergang [km]                  | 3,8           | 0            | 0            | 0          | 0            | 2,2          | 0            | 0            | 0          | 0            | 2,7          | 0            | 0            | 0          | 0            |
| Abgang [km]                    | 2,5           | 0            | 3,1          | 0          | 16           | 2,2          | 0            | 3,1          | 0          | 16           | 3,7          | 0            | 2,2          | 0          | 17           |
| <b>Gesamtstrecke [km]</b>      | <b>789,2</b>  | <b>823</b>   | <b>823,3</b> | <b>702</b> | <b>677,3</b> | <b>599,1</b> | <b>616</b>   | <b>619,4</b> | <b>590</b> | <b>581,3</b> | <b>391,9</b> | <b>447</b>   | <b>449,5</b> | <b>415</b> | <b>407,3</b> |
| (Zu-/Über-Abgang)/Gesamt [Stre | 2%            | 1%           | 2%           | 8%         | 7%           | 3%           | 2%           | 2%           | 10%        | 8%           | 4%           | 2%           | 3%           | 14%        | 12%          |
| Streckenwirkungsgrad njs [-]   | 0,7679        | 0,7363       | 0,7361       | 0,8632     | 0,8947       | 0,7581       | 0,7354       | 0,7314       | 0,7678     | 0,7793       | 0,7732       | 0,6779       | 0,6741       | 0,7301     | 0,7439       |
| Zugangszeit [Min.]             | 16            | 27           | 32           | 65         | 38           | 16           | 27           | 32           | 65         | 38           | 16           | 27           | 32           | 65         | 38           |
| Übergangszeit [Min.]           | 0             | 25           | 25           | 63         | 63           | 0            | 25           | 25           | 63         | 63           | 0            | 25           | 25           | 63         | 63           |
| Hauptlaufzeit [Min.]           | 353           | 372          | 372          | 65         | 65           | 309          | 329          | 329          | 63         | 63           | 229          | 237          | 237          | 282        | 282          |
| Übergangszeit [Min.]           | 3             | 14           | 14           | 22         | 22           | 8            | 14           | 14           | 22         | 22           | 7            | 14           | 14           | 22         | 22           |
| Abgangszeit [Min.]             | 26            | 10           | 5            | 10         | 29           | 9            | 10           | 5            | 10         | 29           | 7            | 10           | 5            | 10         | 21           |
| <b>Gesamtzeit [Min.]</b>       | <b>398</b>    | <b>447,5</b> | <b>447,5</b> | <b>225</b> | <b>217</b>   | <b>342</b>   | <b>404,5</b> | <b>404,5</b> | <b>223</b> | <b>215</b>   | <b>255</b>   | <b>312,5</b> | <b>312,5</b> | <b>225</b> | <b>209</b>   |
| (Zu-/Über-Abgang)/Gesamt [Zeit | 11%           | 17%          | 17%          | 71%        | 70%          | 14%          | 19%          | 19%          | 72%        | 71%          | 10%          | 24%          | 24%          | 71%        | 69%          |



## Anhang D: Höhenverläufe der Referenzstrecken

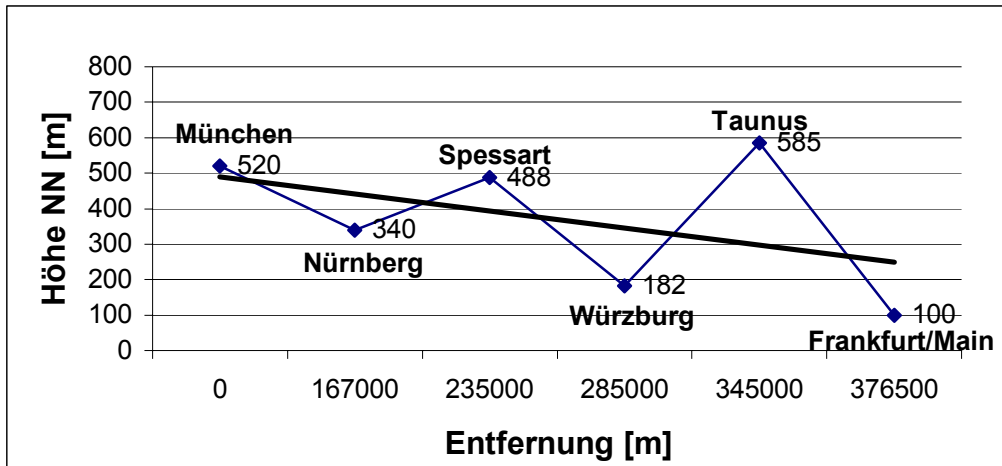


Bild D-1: Höhenverlauf der Strecke München – Frankfurt

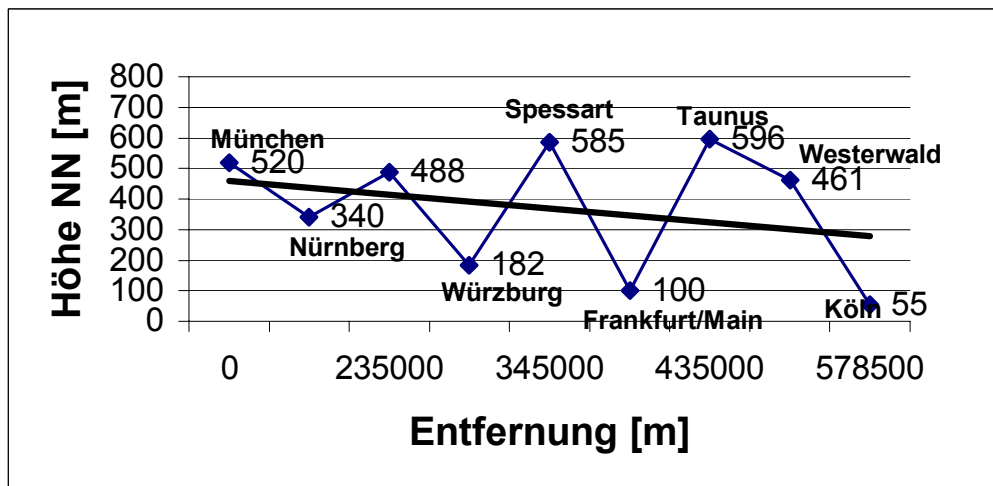


Bild D-2: Höhenverlauf der Strecke München – Köln

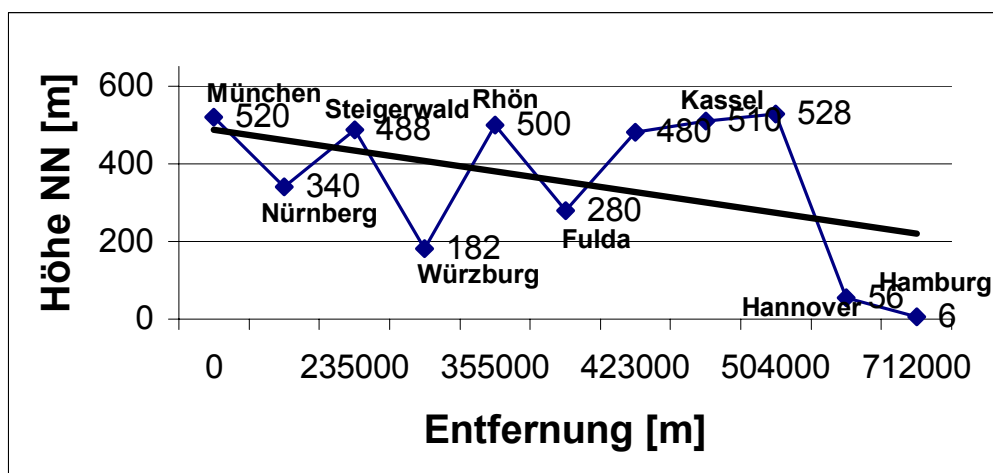


Bild D-3: Höhenverlauf der Strecke München – Hamburg

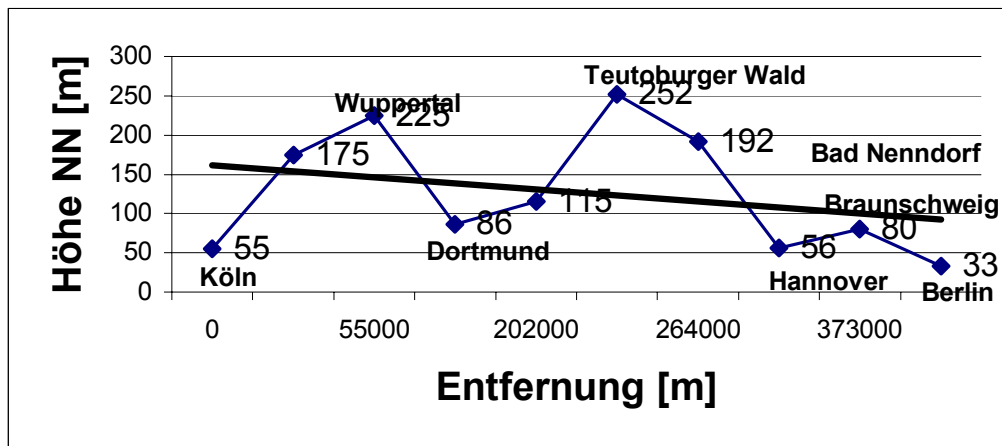


Bild D-4: Höhenverlauf der Strecke Köln – Berlin



Anhang E: Auswertungen zur Transporteffizienz

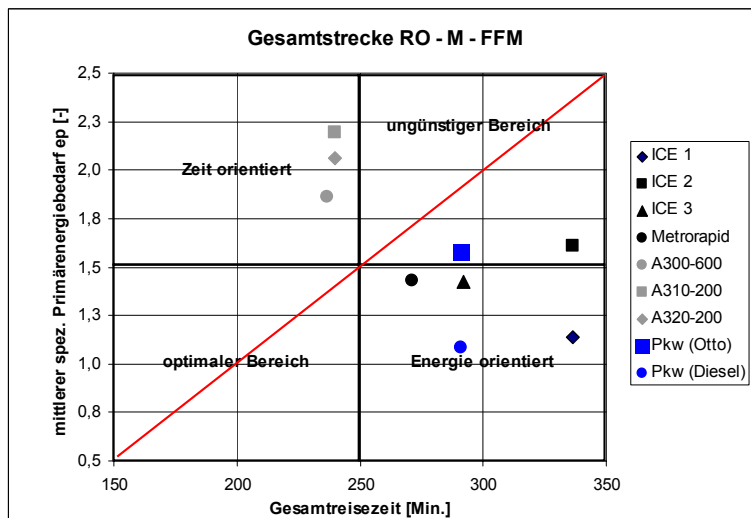
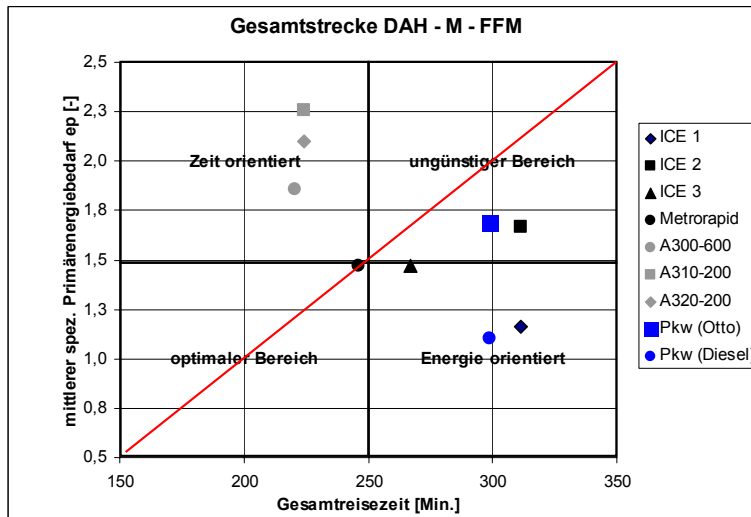
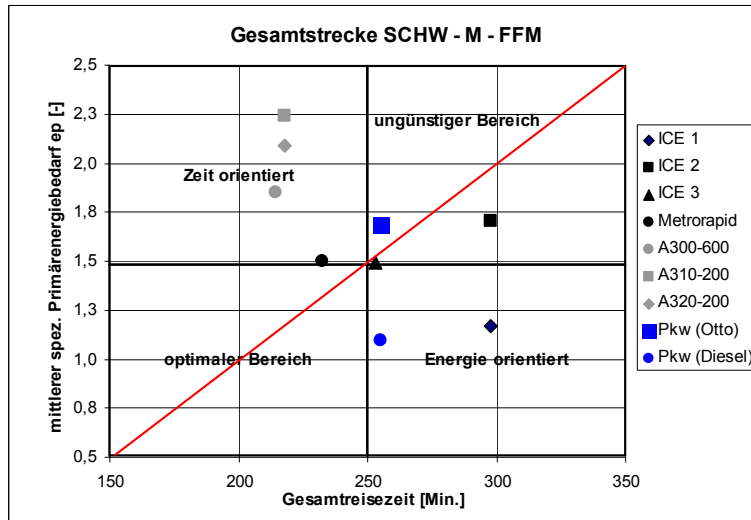
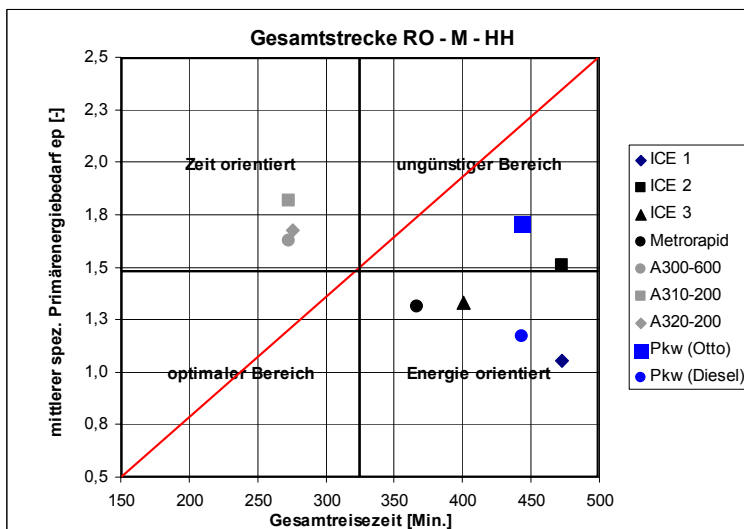
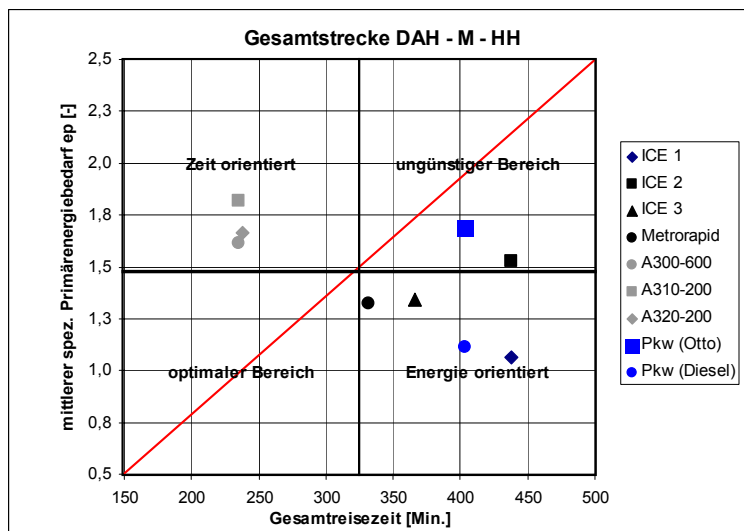
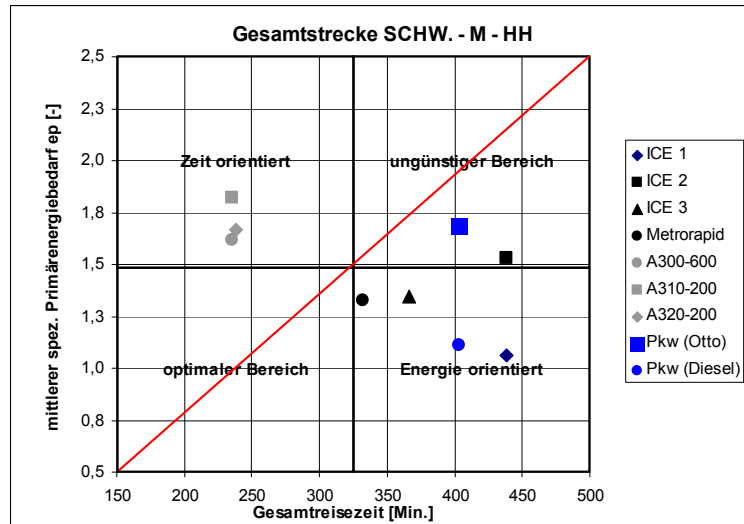
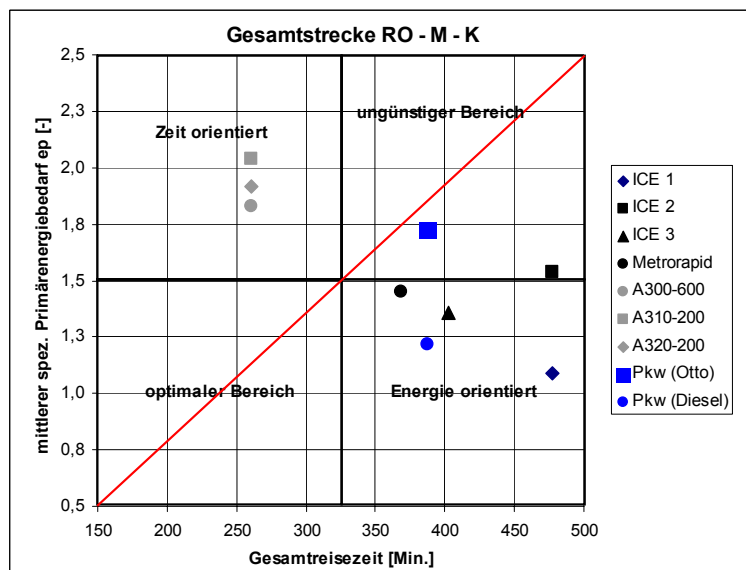
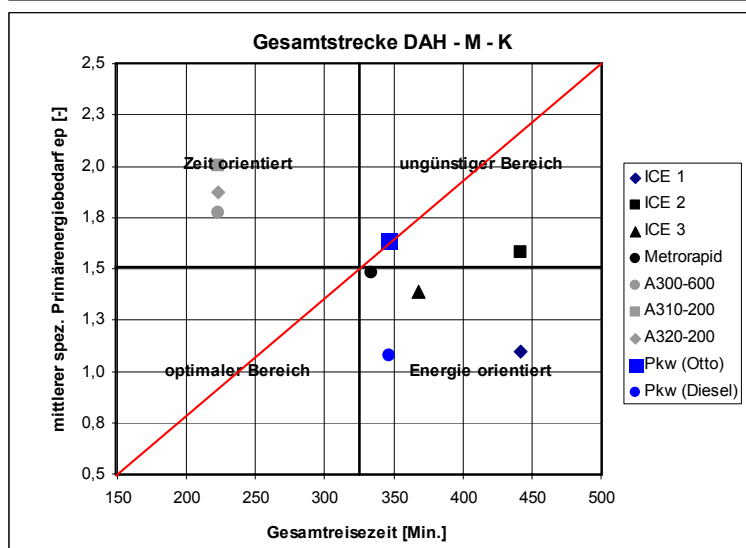
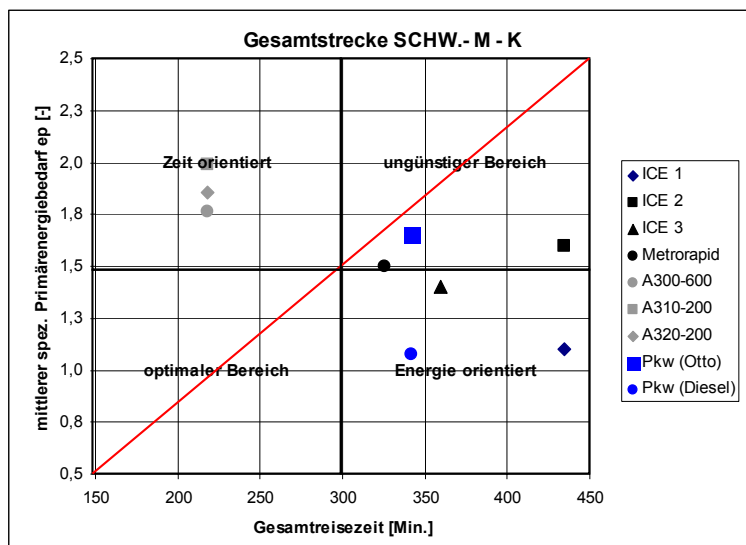


Bild E-1: Strecke München – Frankfurt mit verschiedenen Startorten



**Bild E-2: Strecke München – Hamburg mit verschiedenen Startorten**



**Bild E-3: Strecke München – Köln mit verschiedenen Startorten**



## Anhang F: Beispielrechenblätter zur Bestimmung des spez. Primärenergiebedarfs über den Verbrauch

| <b>Titel:</b>  | <b>M - FFM</b> |               |               |                   |
|--|----------------|---------------|---------------|-------------------|
| <b>Berechnung über den Verbrauch:</b>                        |                |               |               |                   |
| <b>Fahrzeugdaten:</b>  | <b>ICE1</b>    | <b>ICE2</b>   | <b>ICE3</b>   | <b>Metrorapid</b> |
| Verbrauch [kWh/Zugkm]:                                       | 22,3           | 19,2          | 17,58         | 18,9              |
| Leergewicht [kg]:  | 782000         | 409500        | 409000        | 282000            |
| Nutzlast [kg]:   | 53500          | 31500         | 33000         | 36000             |
| Sitzplätze [Stk.]  | 669            | 394           | 415           | 536               |
| Anzahl Zwischenwagen   | 12             | 7             | 8             | 5                 |
| Mittlere Bordleistung je Wagen                               | 17,5           | 17,5          | 17,5          | 17,5              |
| Gesamtbordleistung [kW]                                      | 210            | 122,5         | 140           | 87,5              |
| max. Reisegeschwindigkeit [km/h]:                            | 250            | 250           | 300           | 340               |
| <b>Verkehrsystem-Daten:</b>                                  |                |               |               |                   |
| Gesamtwirkungsgrad zw. Primär- und Endenergie $\eta_{Ges}$ : | 0,354          | 0,354         | 0,354         | 0,354             |
| geographischer Wirkungsgrad $\eta_G$ :                       | 0,689          | 0,689         | 0,689         | 0,689             |
| operativer Wirkungsgrad $\eta_O$ :                           | 0,55           | 0,55          | 0,55          | 0,55              |
| operativer Wirkungsgrad $\eta_O$ (100 Pax):                  | 0,15           | 0,25          | 0,24          | 0,19              |
| Streckenlänge [km]:  | 425            | 425           | 425           | 425               |
| Reisezeit [min]:   | 217            | 217           | 173           | 152               |
| Anzahl der Haltepunkte:                                      | 5              | 5             | 5             | 5                 |
| Haltezeit [Min.]   | 2              | 2             | 2             | 2                 |
| Gesamthaltezeit [Min]  | 10             | 10            | 10            | 10                |
| Nettofahrzeit [Min.]:  | 207            | 207           | 163           | 142               |
| Reisegeschwindigkeit [km/h]                                  | 123            | 123           | 148           | 168               |
| <b>Auswertung:</b>   |                |               |               |                   |
| Max. Gesamtgewicht [N]                                       | 835500         | 441000        | 442000        | 318000            |
| Reales Gesamtgewicht [N]:                                    | 811425         | 426825        | 427150        | 301800            |
| Konstruktionswirkungsgrad $\eta_K$ :                         | 0,064          | 0,071         | 0,075         | 0,113             |
| erforderliche Energie EE [J]:                                | 34125433412    | 29379752824   | 26900809412   | 28918874677       |
| effektive Gleitzahl $\varepsilon_{eff}$ :                    | 0,0101         | 0,0165        | 0,0151        | 0,0230            |
| <b>spez. Primärenergieeinsatz <math>e_P</math>:</b>          | <b>1,1743</b>  | <b>1,7230</b> | <b>1,5082</b> | <b>1,5134</b>     |

**Tabelle F-1: Berechnung des Primärenergiebedarfs für ICE und Metro-rapid über den Verbrauch**

| Titel: A320-200 (München - Hamburg)                          |                 |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
|--|-----------------|---------|-------|------------|---------------------------|-------------------------|----------------|------------|----------|-----------|----------|
| <b>Berechnung über den Verbrauch:</b>                        |                 |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| <b>Fahrzeug- und Kraftstoffdaten:</b>                        |                 |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| Betriebsleergewicht OEW [N]:                                 | 409886          |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| Max. Nutzlast mNmax [N]:                                     | 188525          |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| Kraftstoff mB [N]:   | 24044           |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| mittlerer Heizwert [kJ/kg]:                                  | 43000           |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| gesamter Schub [kN]:   | 222             |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| <b>Verkehrsystem-Daten:</b>                                  |                 |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| Gesamtwirkungsgrad zw. Primär- und Endenergie $\eta_{Ges}$ : | 0,926           |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| geographischer Wirkungsgrad $\eta_G$ :                       | 0,919           |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| operativer Wirkungsgrad $\eta_O$ :                           | 0,55            |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| reale Nutzlast mN [N]:                                       | 103689          |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| Rampengewicht mR [N]:  | 537619          |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| <b>Fahrprofil:</b>   |                 |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| Betriebszustand  | $\Delta S$ [km] | v [m/s] | t [s] | Schub in % | erforderlicher Schub [kN] | SFC in 10E-05 x (kg/sN) | Verbrauch [kg] | $E_k$ [kJ] | $\eta_A$ | mphase[N] | $\eta_K$ |
| Engine-Start & Taxi-Out                                      | 2               | 3,70    | 541   | 7,00%      | 16                        | 1,511                   | 127            | 5457,73    | 0,0057   | 536374    | 0,1933   |
| Take-Off & Initial Climb                                     | 8,33            | 84,47   | 99    | 95,00%     | 211                       | 0,829                   | 172            | 7413,82    | 0,2370   | 534682    | 0,1939   |
| Climb  | 92,6            | 173,00  | 535   | 40,00%     | 89                        | 1,601                   | 761            | 32721,83   | 0,2513   | 527217    | 0,1967   |
| Cruise   | 370,4           | 230,00  | 1610  | 15,31%     | 34                        | 1,796                   | 983            | 42271,35   | 0,2978   | 517573    | 0,2003   |
| Descent  | 148,16          | 169,97  | 872   | 5,00%      | 11                        | 1,15                    | 111            | 4784,63    | 0,3437   | 516482    | 0,2008   |
| Holding  | 20              | 108,03  | 185   | 15,17%     | 34                        | 1,491                   | 93             | 3997,33    | 0,1685   | 515570    | 0,2011   |
| Landing  | 37,04           | 70,55   | 525   | 15,00%     | 33                        | 0,842                   | 147            | 6329,93    | 0,1949   | 514126    | 0,2017   |
| Taxi-in  | 2               | 6,67    | 300   | 7,00%      | 16                        | 1,214                   | 57             | 2432,44    | 0,0128   | 513571    | 0,2019   |
| <b>Auswertung:</b>   |                 |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| Länge des Fahrprofils [m]:                                   | 680530          |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| Konstruktions-wirkungsgrad $\eta_K$ :                        | 0,367           |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| erforderliche Energie $E_P$ [J]:                             | 330934,07       |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| effektive Gleitzahl $\epsilon_{eff}$ :                       | 0,3016          |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| spez. Primärenergie-einsatz $e_P$ :                          | 1,6234          |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |
| Blockzeit [min]  | 78              |         |       |            |                           |                         |                |            |          |           |          |

**Tabelle F-2: Berechnung des Primärenergiebedarfs für A320 auf der Strecke M – HH über den Verbrauch**

| Titel: Otto-Motor  |                |               |               |               |
|--|----------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Berechnung über den Verbrauch:</b>                        |                |               |               |               |
|  | <b>M - FFM</b> | <b>M - K</b>  | <b>M - HH</b> | <b>K - B</b>  |
| <b>Fahrzeug- und Kraftstoffdaten:</b>                        | A6 4.2         | A6 4.2        | A6 4.2        | A6 4.2        |
| Verbrauch [l/100km]:   | 9,5            | 9,5           | 9,5           | 9,5           |
| Leergewicht [kg]:  | 1130           | 1130          | 1130          | 1130          |
| Zuladung [kg]:   | 475            | 475           | 475           | 475           |
| mittlerer Heizwert [kJ/kg]:                                  | 43500          | 43500         | 43500         | 43500         |
| Dichte [kg/l]:   | 0,755          | 0,755         | 0,755         | 0,755         |
| <b>Verkehrsystem-Daten:</b>                                  |                |               |               |               |
| Gesamtwirkungsgrad zw. Primär- und Endenergie $\eta_{Ges}$ : | 0,926          | 0,926         | 0,926         | 0,926         |
| geographischer Wirkungsgrad $\eta_G$ :                       | 0,767          | 0,783         | 0,784         | 0,829         |
| operativer Wirkungsgrad $\eta_O$ :                           | 0,55           | 0,55          | 0,55          | 0,55          |
| <b>Wegdaten:</b>   |                |               |               |               |
| Streckenlänge [km]:  | 375,6          | 579           | 773           | 564,1         |
| Reisezeit [Min.]:  | 229            | 309           | 353           | 320           |
| <b>Auswertung:</b>   |                |               |               |               |
| Streckenlänge [km]:  | 375,6          | 578,5         | 773           | 564,1         |
| Konstruktionswirkungsgrad $\eta_K$ :                         | 0,341          | 0,341         | 0,341         | 0,341         |
| erforderliche Energie $E_P$ [J]:                             | 7987           | 7824          | 7814          | 7390          |
| effektive Gleitzahl $\epsilon_{eff}$ :                       | 0,2286         | 0,2286        | 0,2286        | 0,2286        |
| spez. Primärenergieeinsatz $e_P$ :                           | <b>1,7141</b>  | <b>1,6790</b> | <b>1,6769</b> | <b>1,5859</b> |

**Tabelle F-3: Berechnung des Primärenergiebedarfs für Pkw mit Ottomotoren über den Verbrauch**



# Anhang G

| Titel: A320-200 (München-Hamburg)                                |                |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
|--|----------------|----------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|-----------|-----------------------------|-------------------|------------------------|------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------|-------------|
| <b>Berechnung über den Verbrauch:</b>                            |                |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| <b>Fahrzeug- und Kraftstoffdaten:</b>                            |                |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| Leergewicht [N]:   | 409886         | e [-]:         | 0,849                | Λ [-]               | 10,4                |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| Nutzlast [N]:  | 188525         | k [-]:         | 0,0361               | A [m <sup>2</sup> ] | 111                 |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| Kraftstoffmenge [N]:   | 24044          |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| Max. Design Abfluggewicht [N]:                                   | 622465         |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| mittlerer Heizwert [kJ/kg]:                                      | 43300          | CASstart [-]:  | 2,68                 |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| gesamter Schub [kN]:   | 222            | CALand [-]:    | 0,61                 |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| <b>Verkehrsystem-Daten:</b>                                      |                |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| Gesamtwirkungsgrad zw. Primär- und Endenergie η <sub>ges</sub> : | 0,926          |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| geographischer Wirkungsgrad η <sub>G</sub> :                     | 0,919          |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| operativer Wirkungsgrad η <sub>O</sub> :                         | 0,55           |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| <b>Wegdaten:</b>   |                |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| <b>Fahrprofil:</b>   |                |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| <b>Betriebszustand</b>   | <b>ΔS [km]</b> | <b>v [m/s]</b> | <b>vmittel [m/s]</b> | <b>t [s]</b>        | <b>Vpkt [m/s*2]</b> | <b>Ha [m]</b> | <b>He [m]</b> | <b>a [m/s]</b> | <b>Ma [-]</b> | <b>Cw</b> | <b>ρ [kg/m<sup>3</sup>]</b> | <b>Schub in %</b> | <b>erf. Schub [kN]</b> | <b>SFC in 10E- Verbrauch</b> | <b>mges [N]</b> | <b>Faero [N]</b> | <b>Froll [N]</b> | <b>Fbesch [N]</b> | <b>Fateig [N]</b> | <b>E [J]</b> |             |
| Engine-Start & Taxi-Out  | 2              | 3,70           | 3,70                 | 541                 | 0,0068              | 0             | 0             | 340,294        | 0,0109        | 0,2790    | 1,225                       | 7,00%             | 16                     | 1,511                        | 127             | 621210           | 260              | 1242              | 434               | 0            | 3871376,21  |
| Take-Off & Initial Climb   | 8,33           | 84,47          | 44,09                | 99                  | 0,8190              | 0             | 450           | 338,369        | 0,2496        | 0,2790    | 1,167                       | 95,00%            | 211                    | 0,829                        | 172             | 619519           | 129960           | 0                 | 51742             | 628964       | 6743683388  |
| Climb  | 92,6           | 173,00         | 108,54               | 535                 | 0,1654              | 450           | 11000         | 316,719        | 0,5462        | 0,0335    | 0,388                       | 40,00%            | 89                     | 1,601                        | 761             | 612057           | 22149            | 0                 | 10323             | 1089940      | 1,0394E+11  |
| Cruise   | 370,4          | 230,00         | 169,27               | 1610                | 0,0354              | 11000         | 11000         | 295,069        | 0,7795        | 0,0335    | 0,364                       | 15,31%            | 34                     | 1,796                        | 983             | 602416           | 35765            | 0                 | 2174              | 0            | 1,4053E+10  |
| Descent  | 148,16         | 170,00         | 169,64               | 872                 | -0,0688             | 11000         | 450           | 316,719        | 0,5388        | 0,0335    | 1,171                       | 5,00%             | 11                     | 1,15                         | 111             | 601325           | 62877            | 0                 | -4221             | -420810      | -5,3657E+10 |
| Holding  | 20             | 108,03         | 138,83               | 185                 | -0,3347             | 6000          | 6000          | 316,428        | 0,3414        | 0,0335    | 0,660                       | 15,17%            | 34                     | 1,491                        | 93              | 600414           | 14303            | 0                 | -20494            | 0            | -123896223  |
| Landing  | 37,04          | 70,55          | 104,69               | 525                 | -0,0714             | 450           | 1             | 338,369        | 0,2085        | 0,4873    | 1,167                       | 15,00%            | 33                     | 0,842                        | 147             | 598970           | 157083           | 0                 | -4360             | -47983       | 3879557028  |
| Taxi-in  | 2              | 6,67           | 6,67                 | 300                 | -0,2130             | 0             | 0             | 340,294        | 0,0196        | 0,4873    | 1,225                       | 7,00%             | 16                     | 1,214                        | 57              | 598415           | 1474             | 1197              | -13000            | 0            | -20658477,7 |
| <b>Auswertung:</b>   |                |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| Länge des Fahrprofils [km]:                                      | 680,530        |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| Konstruktionswirkungsgrad η <sub>K</sub> :                       | 0,367          |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| erforderliche Energie E <sub>r</sub> [J]:                        | 330931,42      | 74814134192    |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| Zuschlag für Nebenverbraucher [%]:                               | 10%            |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| Gesamtennergiebedarf [J]   | 82295547611    |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| effektive Gleitzahl α <sub>eff</sub> :                           | 0,3016         |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |
| spez. Primärenergie-einsatz e <sub>p</sub> :                     | 1,7554         |                |                      |                     |                     |               |               |                |               |           |                             |                   |                        |                              |                 |                  |                  |                   |                   |              |             |

**Tabelle G-2: Berechnung des Fahrwiderstands für A320 auf der Strecke M - HH**

| Titel: Klasse D (Dieselmotor)                                    |                            |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
|--|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------|---------------|--------------------------|--------------|--------------|---------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------|---------------------------|
| <b>Berechnung über den Widerstand:</b>                           |                            |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| <b>Fahrzeugdaten:</b>  |                            |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| Leergewicht [kg]:  | 1415                       |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| Zuladung [kg]:   | 580                        |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| Luftwiderstands-beiwert C <sub>w</sub> :                         | 0,29                       |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| Stirnfläche A [m <sup>2</sup> ]:                                 | 1,98                       |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| Rollwiderstands-beiwerte:  | f <sub>R,0</sub>           | f <sub>R,1</sub>                 | f <sub>R,4</sub>               |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| Zuschlagsfaktor für die Trägheit der rot. Massen ε:              | 0,009                      | 0,002                            | 0,0008                         |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| Leerlaufverbrauch [Wh/s]:  | 2,2                        |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| <b>Verkehrsystem-Daten:</b>                                      |                            |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| Gesamtwirkungsgrad zw. Primär- und Endenergie η <sub>ges</sub> : | 0,926                      |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| geographischer Wirkungsgrad η <sub>G</sub> :                     | 0,784                      |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| operativer Wirkungsgrad η <sub>O</sub> :                         | 0,55                       |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| <b>Wegdaten:</b>   |                            |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| Tunneleinfluß (Luftwiderstand):                                  | 0,1                        |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| <b>Fahrprofil: M-HH</b>  |                            |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| <b>Betriebszustand</b>   | <b>a [m/s<sup>2</sup>]</b> | <b>v<sub>Anfang</sub> [km/h]</b> | <b>v<sub>Ende</sub> [km/h]</b> | <b>t [s]</b> | <b>ΔS [m]</b> | <b>Tunnel-anteil [%]</b> | <b>P [%]</b> | <b>Gan g</b> | <b>ε</b>      | <b>f<sub>R</sub></b> | <b>A<sub>L</sub> [kJ]</b> | <b>A<sub>R</sub> [kJ]</b> | <b>A<sub>B</sub> [kJ]</b> | <b>A<sub>S</sub> [kJ]</b> | <b>E<sub>Leerlauf</sub> f [kJ]</b> | <b>η<sub>A</sub></b> | <b>E<sub>K</sub> [kJ]</b> |
| Leerlauf   | 0                          | 0                                | 20                             | 0            | 0,005         | 0,000                    | 0,0000       | 0,000        | 0,0000        | 0,000                | 0,00                      | 0,00                      | 0,00                      | 0,00                      | 0,00                               | 0,04                 | 0,00                      |
| Beschleunigung   | 0,83                       | 0                                | 15                             | 5            | 10            | 0,00                     | 0,005        | 1            | 0,250         | 0,0091               | 0,02                      | 1,61                      | 18,66                     | 1,02                      | 0,00                               | 0,26                 | 83,57                     |
| Gangwechsel  | 0                          | 15                               | 15                             | 2            | 8             | 0,00                     | 0,005        | 0,000        | 0,0093        | 0,005                | 1,31                      | 0,00                      | 0,81                      | 0,00                      | 0,00                               | 0,00                 | 2,18                      |
| Beschleunigung   | 0,62                       | 15                               | 35                             | 9            | 62            | 0,00                     | 0,005        | 2            | 0,150         | 0,0095               | 1,06                      | 10,10                     | 77,22                     | 6,11                      | 0,00                               | 0,25                 | 384,10                    |
| Gangwechsel  | 0                          | 35                               | 35                             | 2            | 19            | 0,00                     | 0,005        | 0,000        | 0,0097        | 0,65                 | 3,22                      | 0,00                      | 1,90                      | 0,00                      | 0,00                               | 0,00                 | 5,77                      |
| Beschleunigung   | 0,52                       | 35                               | 50                             | 8            | 94            | 0,00                     | 0,005        | 3            | 0,100         | 0,0099               | 4,63                      | 15,87                     | 93,71                     | 9,25                      | 0,00                               | 0,24                 | 518,75                    |
| Gangwechsel  | 0                          | 50                               | 50                             | 2            | 28            | 0,00                     | 0,005        | 0,000        | 0,0101        | 1,88                 | 4,75                      | 0,00                      | 2,72                      | 0,00                      | 0,00                               | 0,00                 | 9,35                      |
| Beschleunigung   | 0,43                       | 50                               | 70                             | 13           | 217           | 0,00                     | 0,005        | 4            | 0,075         | 0,0103               | 21,24                     | 38,02                     | 173,86                    | 21,23                     | 0,00                               | 0,23                 | 1110,67                   |
| <b>konst. Geschwindigkeit</b>                                    | <b>0</b>                   | <b>70</b>                        | <b>70</b>                      | <b>400</b>   | <b>7792</b>   | <b>0,00</b>              | <b>0,005</b> | <b>0,000</b> | <b>0,0106</b> | <b>1039,91</b>       | <b>1404,47</b>            | <b>0,00</b>               | <b>762,48</b>             | <b>0,00</b>               | <b>0,2</b>                         | <b>15719,90</b>      |                           |
| Verzögerung  | -0,69                      | 70                               | 50                             | 8            | 134           | 0,00                     | 0,005        | 0,000        | 0,0000        | 0,00                 | 0,00                      | 0,00                      | 13,09                     | 0,02                      | 0,00                               | 13,11                |                           |
| <b>konst. Geschwindigkeit</b>                                    | <b>0</b>                   | <b>50</b>                        | <b>50</b>                      | <b>600</b>   | <b>8376</b>   | <b>0,00</b>              | <b>0,005</b> | <b>0,000</b> | <b>0,0101</b> | <b>574,09</b>        | <b>1432,80</b>            | <b>0,00</b>               | <b>819,63</b>             | <b>0,00</b>               | <b>0,19</b>                        | <b>14876,42</b>      |                           |
| Beschleunigung   | 0,43                       | 50                               | 70                             | 13           | 218           | 0,00                     | 0,005        | 5            | 0,060         | 0,0103               | 21,51                     | 38,21                     | 172,15                    | 21,31                     | 0,00                               | 0,23                 | 1105,59                   |
| <b>konst. Geschwindigkeit</b>                                    | <b>0</b>                   | <b>70</b>                        | <b>70</b>                      | <b>350</b>   | <b>1000</b>   | <b>0,00</b>              | <b>0,005</b> | <b>0,000</b> | <b>0,0106</b> | <b>134,42</b>        | <b>180,38</b>             | <b>0,00</b>               | <b>97,85</b>              | <b>0,00</b>               | <b>0,2</b>                         | <b>2022,81</b>       |                           |
| Beschleunigung   | 0,24                       | 70                               | 101                            | 35           | 831           | 0,00                     | 0,005        | 5            | 0,060         | 0,0111               | 164,90                    | 157,48                    | 366,69                    | 81,34                     | 0,00                               | 0,22                 | 3486,06                   |
| <b>konst. Geschwindigkeit</b>                                    | <b>0</b>                   | <b>101</b>                       | <b>101</b>                     | <b>1300</b>  | <b>36335</b>  | <b>0,00</b>              | <b>0,005</b> | <b>0,000</b> | <b>0,0118</b> | <b>9982,93</b>       | <b>7313,36</b>            | <b>0,00</b>               | <b>3555,55</b>            | <b>0,00</b>               | <b>0,21</b>                        | <b>98357,76</b>      |                           |
| Beschleunigung   | 0,28                       | 101                              | 131                            | 30           | 965           | 0,00                     | 0,005        | 5            | 0,060         | 0,0128               | 350,62                    | 209,19                    | 496,38                    | 94,38                     | 0,00                               | 0,22                 | 5206,20                   |
| <b>konst. Geschwindigkeit</b>                                    | <b>0</b>                   | <b>131</b>                       | <b>131</b>                     | <b>19700</b> | <b>716095</b> | <b>0,00</b>              | <b>0,005</b> | <b>0,000</b> | <b>0,0140</b> | <b>332773,51</b>     | <b>170087,33</b>          | <b>0,00</b>               | <b>70073,30</b>           | <b>0,00</b>               | <b>0,22</b>                        | <b>2592462,17</b>    |                           |
| Verzögerung  | -0,69                      | 131                              | 91                             | 16           | 493           | 0,00                     | 0,005        | 0,000        | 0,0000        | 0,00                 | 0,00                      | 0,00                      | 48,27                     | 0,04                      | 0,00                               | 48,30                |                           |
| Verzögerung  | -1,04                      | 91                               | 61                             | 8            | 169           | 0,00                     | 0,005        | 0,000        | 0,0000        | 0,00                 | 0,00                      | 0,00                      | 16,56                     | 0,02                      | 0,00                               | 16,57                |                           |
| Verzögerung  | -1,39                      | 61                               | 1                              | 12           | 104           | 0,00                     | 0,005        | 0,000        | 0,0000        | 0,00                 | 0,00                      | 0,00                      | 10,16                     | 0,03                      | 0,00                               | 10,18                |                           |
| <b>Auswertung:</b>   |                            |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| Länge des Fahrprofils [m]:                                       | 772951                     |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| Konstruktions-wirkungsgrad η <sub>K</sub> :                      | 0,334                      |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| ges. Luftwiderstandsarbeit [kJ]:                                 | 345071,42                  | 57%                              |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| ges. Rollwiderstandsarbeit [kJ]:                                 | 180898,11                  | 30%                              |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| ges. Beschleunigungswiderstandsarbeit [kJ]:                      | 1398,68                    | 0%                               |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| ges. Steigungswiderstandsarbeit [kJ]:                            | 75636,96                   | 13%                              |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| gesamte Widerstandsarbeit [kJ]:                                  | 603005,16                  | 100%                             |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| erforderliche Energie E <sub>r</sub> [J]:                        | 8863,09                    |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| effektive Gleitzahl α <sub>eff</sub> :                           | 0,2080                     |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |
| spez. Primärenergie-einsatz e <sub>p</sub> :                     | 1,5577                     |                                  |                                |              |               |                          |              |              |               |                      |                           |                           |                           |                           |                                    |                      |                           |

**Tabelle G-3: Berechnung des Fahrwiderstands für Audi A 6 TDI auf der Strecke M - HH**