

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Wagner
Dr.-Ing. Jan Scholten

ABSCHLUSSBERICHT

zur

MACHBARKEITSSTUDIE CONTAINERTRANSPORT DURCH UNTERIRDISCHE ROHRLEITUNGEN

(Verbundvorhaben Rohrleitungstransport)

Teilvorhaben: Ruhr-Universität Bochum,
Lehrstuhl für Maschinenelemente und Fördertechnik

Auftraggeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung

Förderkennzeichen: 19 G 3011 B

Wissenschaftliche Leitung: Juniorprofessor Dr.-Ing. Jan Scholten

Wissenschaftliche Bearbeitung: Dipl.-Ing. Martin Schmitt

Bearbeitungszeitraum: 01.05.2003 – 30.09.2004

VERWENDETE FORMELZEICHEN	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
1 EINFÜHRUNG.....	1
1.1 Wachstumsprognose für den Güterverkehr	1
1.2 Interdisziplinäres Projekt: Machbarkeitsstudie „Containertransport durch unterirdische Rohrleitungen“	4
1.3 Aufgabenstellung und Aufbau des Berichts	5
2 VERKEHRSSYSTEME IM KOMBINIERTEN GÜTERVERKEHR.....	7
3 ANFORDERUNGEN AN DAS TRANSPORTFAHRZEUG	10
3.1 Externe Anforderungen	10
3.1.1 Ladungsformen zu transportierender Güter	11
3.1.2 Bauraum	17
3.1.3 Fahrweg	18
3.2 Interne Anforderungen	19
3.2.1 Fahrdynamik	20
3.2.2 Energiebedarf.....	21
3.2.3 Betrieb und Wartung	22
4 ERARBEITUNG VON FAHRZEUGKONZEPTEN.....	24
4.1 Präzisierung der Aufgabenstellung	24
4.2 Lösungsfindung	24
4.2.1 Lastaufnahmekonzept	25
4.2.2 Antriebskonzept.....	35
4.2.3 Fahrwerkskonzept.....	45
4.2.4 Regelungs- und Steuerungskonzept	47
5 KONZEPTBEWERTUNG UND -VERGLEICH	51
5.1 Konzeptbewertung	51
5.1.1 Lastaufnahmekonzept	52

5.1.2	Antriebskonzept.....	54
5.1.3	Fahrwerkskonzept.....	56
5.1.4	Regelungs- und Steuerungskonzept	56
5.1.5	Ergebnis	57
5.2	Vergleich Konzept mit dem Verkehrsträger Lkw	59
6	TERMINALGESTALTUNG.....	62
7	FAHRWEGAUSSTATTUNG	65
8	ZUSAMMENFASSUNG	68
9	LITERATUR	71
10	ANHANG	74
10.1	Anforderungsliste	74
10.2	Berechnungsgrundlage Antriebskonzepte	75

Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
$A_{Q,Fahrrohr}$	$[m^2]$	Querschnittsfläche des Fahrrohrs
A_S	$[m^2]$	Stirnfläche des Fahrzeug
$a_{Br,genz}$	$[m/s^2]$	maximale Verzögerung
$a_{Br,gew}$	$[m/s^2]$	gewählte Verzögerung
$a_{Br,real}$	$[m/s^2]$	reale Verzögerung
B_{max}	$[mm]$	maximale Breite Ladungsform
$b_{Zul,max}$	$[mm]$	maximale Breite der Zuladung
c_W	$[-]$	Luftwiderstandsbeiwert
f_R	$[mm]$	Rollwiderstandsbeiwert
g	$[m/s^2]$	Erdbeschleunigung
H_{max}	$[mm]$	maximale Höhe Ladungsform
$h_{Zul,max}$	$[mm]$	maximale Höhe der Zuladung
k	$[-]$	Tunnelfaktor
L_{max}	$[mm]$	maximale Länge Ladungsform
L_2	$[mm]$	Überhang über dem Eckbeschlag
L_3	$[mm]$	Überhang über dem Eckbeschlag
$l_{Zul,max}$	$[mm]$	maximale Länge der Zuladung
$m_{Fz,Zul,max}$	$[kg]$	Masse der maximalen Zuladung
m_{ges}	$[kg]$	Gesamtmasse
m_{Nutz}	$[kg]$	maximale Nutzlast des Fahrzeugs
m_{Fz}	$[kg]$	Masse des unbeladenen Fahrzeugs
n	$[-]$	Anzahl Ladeeinheiten (in Anhang als Zählvariable)
P_{mot}	$[kW]$	Antriebsleistung
$P_{mot,erf}$	$[kW]$	erforderliche Antriebsleistung
P_{gew}	$[kW]$	gewählte Antriebsleistung Fahrzeug
R	$[mm]$	Längenabstand Eckbeschläge
r_{Rad}	$[mm]$	Radradius

r_{Lager}	[mm]	Lagerradius der Radlagerung
$r_{\text{min,gew}}$	[m]	gewählter minimaler Kurvenradius
r_{min}	[m]	minimaler Kurvenradius
S	[mm]	Breitenabstand Eckbeschläge
s_{Br}	[m]	Bremsweg
t_{S}	[s]	Signallaufzeit
v_{F}	[km/h]	Fahrgeschwindigkeit
$v_{\text{F,max}}$	[km/h]	maximale Fahrgeschwindigkeit
\dot{v}	[m/s ²]	Beschleunigung
\dot{v}_{max}	[m/s ²]	maximale Beschleunigung
W_{S}	[N]	Steigungswiderstand
W_{B}	[N]	Beschleunigungswiderstand
W_{L}	[N]	Luftwiderstand
W_{Lauf}	[N]	Laufwiderstand
$W_{\text{Bo,DB}}$	[N]	Bogenwiderstand (nach Deutscher Bahn)
Z	[N]	Zugkraft
Z_{grenz}	[N]	übertragbare Zugkraft
Z_{erf}	[N]	erforderliche Zugkraft
α	[rad]	Steigungswinkel der Strecke
α_{max}	[rad]	max. Steigungswinkel der Strecke
η_{G}	[-]	Wirkungsgrad Getriebe
Φ	[-]	Versperrungsmaß
μ_{Lager}	[-]	Lagerreibungsbeiwert
μ_{RS}	[-]	Haftreibungsbeiwert Rad-Schiene
ρ	[kg/m ³]	Dichte der Luft
η_{A}	[-]	Wirkungsgrad Antrieb
ζ	[-]	Zuschlagsfaktor zur Berücksichtigung der rotierenden Massen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Güterverkehrsleistung Binnenschiff, Eisenbahn, Lkw in 1998 und 2001 i 2	
Abbildung 2	Systeme im kombinierten Verkehr Straße-Schiene	7
Abbildung 3	Systemschnittstellen	11
Abbildung 4	Bauformen von Containern.....	12
Abbildung 5	Handhabung von Containern	14
Abbildung 6	Wechselbehälter und Umschlag.....	14
Abbildung 7	Sattelanhänger (Koffer und Kesselaufbau)	16
Abbildung 8	Bezugslinie G2.....	17
Abbildung 9	Streckenlayout des Transportsystems.....	18
Abbildung 10	Sattelanhänger auf erweiterter Grenzlinie G2	26
Abbildung 11	Umschlagsstrategie X – vertikaler Umschlag.....	27
Abbildung 12	einstellbare Sattelkupplung	28
Abbildung 13	Umschlagsstrategie Y – horizontaler Umschlag	29
Abbildung 14	CargoBeamer®	29
Abbildung 15	„Verladevorgang im Schnitt“	29
Abbildung 16	Umschlagsstrategie Z – horizontaler Umschlag durch Drehen	30
Abbildung 17	Grenzlinie, Tragwagen und Umschlag – System [Modalohr2003].....	30
Abbildung 18	Ladeschema – Container und Wechselbehälter.....	33
Abbildung 19	Abschätzung der Biegebeanspruchung im Tragwerk	34
Abbildung 20	Zugkraft in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Beschleunigung, vertikal begrenzt durch maximal übertragbare Zugkraft (exemplarisch) ...	38
Abbildung 21	Leistung in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Beschleunigung, vertikal begrenzt durch installierte Leistung (exemplarisch)	39
Abbildung 22	maximal mögliche Beschleunigung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.....	40
Abbildung 23	Antriebskonzept A – autonome Transporteinheit	41
Abbildung 24	Antriebskonzept B – autonome Transporteinheit mit angehängtem Tragwagen	42
Abbildung 25	Antriebskonzept D – sechssachsige autonome Transporteinheit.....	44
Abbildung 26	Drehgestell	46
Abbildung 27	Lastaufnahmekonzepte.....	52
Abbildung 28	Antriebskonzepte	54
Abbildung 29	Terminallayout - Prinzip.....	62
Abbildung 30	Ablauf eines Verladevorgangs.....	63

1 Einführung

Der Erfolg eines Produkts und insbesondere seine Nachfrage hängen im marktwirtschaftlichen System in hohem Maße von seinem Preis ab. Die im Zuge der fortschreitenden Globalisierung steigende Möglichkeit, Waren auf immer größer werdenden Märkten einzukaufen zu können, bringt produzierende Unternehmen in die Situation, die Kosten, die bei der Entwicklung, der Herstellung, der Vermarktung und dem Verkauf ihrer Produkte entstehen, reduzieren zu müssen. Der Begriff Outsourcing, der in diesem Zusammenhang geprägt wurde, beschreibt ein Werkzeug, dessen sich viele Unternehmen heute bedienen. Nicht konkurrenzfähige Unternehmensbereiche werden geschlossen und durch Einkauf von Ware und Dienstleistungen bei Drittunternehmen ersetzt, deren Produktionsstandorte nicht zuletzt aufgrund günstigerer Lohnkosten oft weit vom Auftraggeber entfernt gelegen sind.

Dieser Trend, die Fertigungstiefe zu reduzieren und auf globalen Märkten einzukaufen, trug neben der Ausweitung der Absatzmärkte weit stärker als das allgemeine Wirtschaftswachstum zu der in den letzten Jahren aufgetretenen überproportionalen Steigerung des Güterverkehrsaufkommens bei.

1.1 Wachstumsprognose für den Güterverkehr

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) geht bei einem angenommenen Wirtschaftswachstum von „durchschnittlich 2,1% pro Jahr“ [BMVBW2000] davon aus, dass die Güterverkehrsleistung bezogen auf das Jahr 1997 (371 Mrd. tkm¹) bis 2015 um 64% auf 608 Mrd. tkm steigen wird [ebd.]. „Für die [...] Steigerung der Güterverkehrsnachfrage sind die deutlich überproportionalen Zunahmen der Güterverkehrsnachfrage nach Verbrauchs- (+ 120 Prozent) und Investitionsgütern (+ 85 Prozent) in Kombination [...] mit deutlich überproportional wachsenden grenzüberschreitenden Güterverkehren (insgesamt + 91 Prozent gegenüber 1997; Transit + 105 Prozent) ursächlich.“ [ebd.]

Des Weiteren sieht die Politik eine Entwicklung des Transportmarktes zugunsten des Verkehrsträgers Lkw. „Die Entwicklung der bisherigen und künftigen Güterstruktur zeigt: Der Transportmarkt wächst am stärksten in den Segmenten, die aufgrund ihrer Transportmerkmale allgemein als Lkw-affin bezeichnet werden. Diese können über die konventionellen Transportangebote der Bahn (Wagenladungsverkehr) und der Binnenschifffahrt nur bedingt erschlossen werden.“ [BMVBW2001]

¹ tkm: Tonnenkilometer; Einheit für die Verkehrsleistung; Produkt aus Transportmenge [t] und Entfernung [km]

Die bisherige Entwicklung bekräftigt diese Prognose, wenn auch in leicht abgeschwächter Form. Abbildung 1 zeigt die anteilmäßige Zusammensetzung der im Jahr 1998 und 2001 von den Verkehrsmitteln Binnenschiff, Eisenbahn und Lkw erbrachten Güterverkehrsleistung², neben dem für 2015 ohne verkehrspolitische Einflussnahme prognostizierten Modal Split.

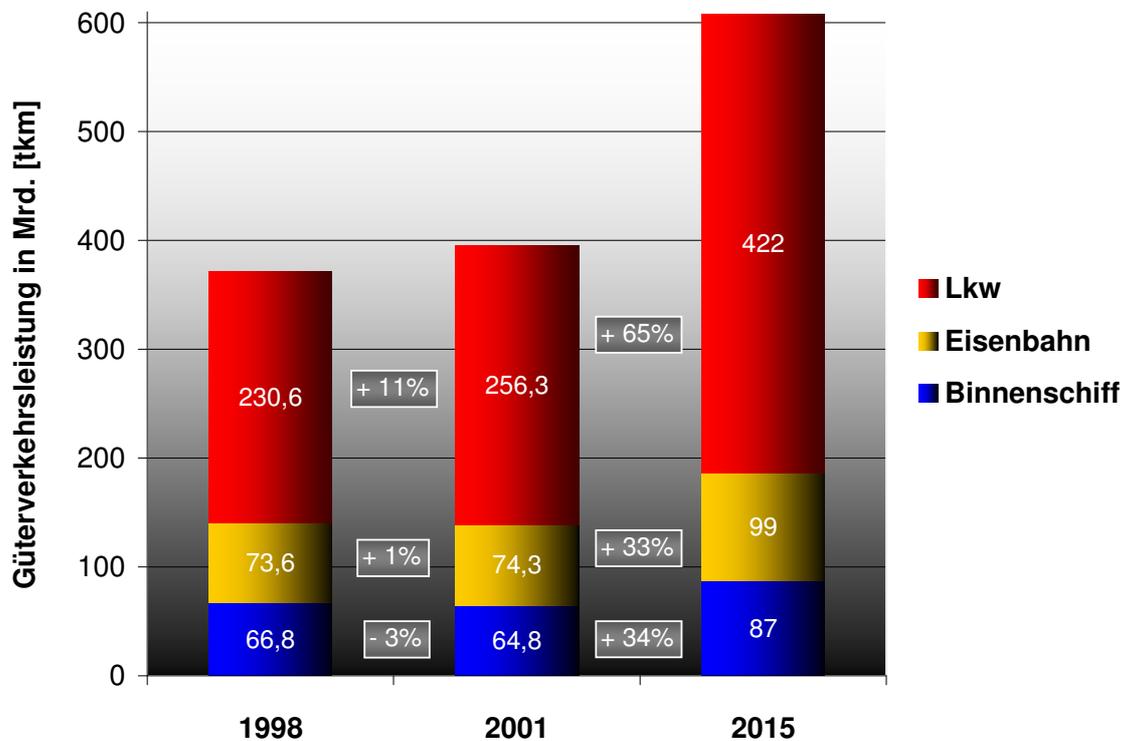


Abbildung 1 Güterverkehrsleistung Binnenschiff, Eisenbahn, Lkw in 1998 und 2001 in Mrd. [tkm] nach [BMVBW2003/2004]; Prognose für 2015 „Laisser-faire-Szenario“ nach [BMVBW2000]

Zunächst fällt auf, dass das Verkehrssystem Lkw bereits heute den weitaus stärksten Anteil der Güterverkehrsleistung der drei berücksichtigten Verkehrsträger ausmacht (2001: 64,8%). Auf die Verkehrsträger Binnenschiff und Eisenbahn entfielen in 2001 lediglich 16,4% bzw. 18,8%. Weiterhin ist aus der Grafik deutlich erkennbar, dass der Lkw von 1998 bis 2001 einen deutlichen Zuwachs (11%) erfuhr, während die Entwicklung der aufsummierten Güterverkehrsleistungen Bezug nehmend auf oben erwähnte Prognose unterdurchschnittlich verlief.

² Der Anteil des Transports von Rohöl in Rohrleitungen an der Gesamtgüterverkehrsleistung ist für die Untersuchung unbedeutend und aus der Betrachtung ausgeschlossen. Sein Anteil an der Transportmenge „lag seit 1991 in den meisten Jahren konstant zwischen 2,1 und 2,2%“ [destatis2004] und ist damit insgesamt vernachlässigbar klein.

Eine weitere Entwicklung, die sich am Güterverkehrsmarkt abzeichnet, ist der steigende Anteil in Container und Wechselbehälter verladener und transportierter Güter. Dies folgt nicht zuletzt aus der Tatsache, dass sich im Überseegüterverkehr die Ladungsform ISO-Container zum alleinigen Standard entwickelt hat. Aber auch im Binnenschiff-, Eisenbahn- und Lkw-Verkehr kommen Container und Wechselbehälter aufgrund ihrer guten Handhabbarkeit immer häufiger zum Einsatz.

Aus einem Bericht des Statistischen Bundesamtes [destatis2004] geht hervor, dass im Eisenbahngüterverkehr im Jahr 2002 mit 45,3 Mio. t 15,2% der Gesamttransporte in Großcontainern, Wechselbehältern und Straßenfahrzeugen durchgeführt wurden. Der Anteil von Containern und Behältern/Wechselaufbauten an der im Güterverkehr deutscher Lkw transportierten Tonnage betrug nach [destatis2004] in 2002 zusammen 8,9%. Im Vergleich zu 2001 war ein Mengenzuwachs bei der Containerbeförderung im Straßengüterverkehr von 11,9% zu verzeichnen.

Aus den von der Entwicklung der letzten Jahre bekräftigten und vom BMVWB und der Bundesregierung für die Planung zugrunde gelegten Prognosen zeichnet sich ein klarer Trend für die Zukunft ab:

- Die Güterverkehrsleistung wird deutlich steigen.
 - Für das Wachstum sind vor allem Verbrauchs-, Investitions- und grenzüberschreitender Güterverkehr verantwortlich.
- ⇒ **Im Güterverkehr nehmen die Ladungsformen Container und Wechselbehälter einen immer wichtigeren Stellenwert ein.**
- ⇒ **Die Güterverkehrsleistung des bereits heute dominierenden Verkehrsmittels Lkw wird deutlich steigen.**

Die oben skizzierte Entwicklung des Güterverkehrs aus den Mechanismen des Marktes heraus wird zu einer enormen zusätzlichen Belastung der Straßeninfrastruktur führen. Die Politik steht dem sehr kritisch gegenüber, da in diesem, vom BMVWB als „Laissez-faire-Szenario“ bezeichneten Fall große Investitionen in eine Erweiterung der Straßeninfrastruktur erforderlich wären, während die übrigen Verkehrssysteme noch ungenutzte Kapazitäten bereithalten und darüber hinaus als verkehrssicherer und ökologisch vorteilhafter einzuordnen sind. (vgl. Abbildung 1 – 2015)

Aus diesem Grund hat sich die Bundesregierung im Zuge ihrer Verkehrspolitik dazu entschieden die Wettbewerbssituation der Verkehrssysteme Wasserstraße und Schiene zur Entlastung der Straße zu verbessern und auf die Vernetzung der Verkehrsträger hinzuwirken. Spezielles Augenmerk ist dabei nach [BMVWB2000] auf die Optimierung der Schnittstellen zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern zu legen, um die Bildung in-

tegrierter Transportketten zu fördern. Ziel ist es, zur Erfüllung einer Transportaufgabe die jeweiligen systembedingten Kosten- und Leistungsvorteile der für Teilaufgaben unterschiedlich gut geeigneten Verkehrsträger zu kombinieren. Ein zentrales Thema der Verkehrspolitik der Bundesregierung ist somit die Stärkung des intermodalen Verkehrs mit speziellem Fokus auf den kombinierten Verkehr.

1.2 Interdisziplinäres Projekt: Machbarkeitsstudie „Containertransport durch unterirdische Rohrleitungen“

Der im Jahr 1998 initiierte interdisziplinäre Forschungsverbund „Transport- und Versorgungssysteme unter der Erde“ der Ruhr-Universität Bochum sucht nach „neuen, effizienten und umweltgerechten“ [CargoCap2002] Lösungen, um das künftig steigende Transportaufkommen bewältigen zu können. „Das Ergebnis der bisherigen intensiven Zusammenarbeit ist das Konzept CargoCap, welches zur Verlagerung von logistisch wichtigen und großen Teilen des Güterverkehrs auf regionaler Ebene von der Straße in unterirdische Fahrrohrleitungen ausgelegt ist.“ [ebd.]

Im Rahmen einer vom Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung in Auftrag gegebenen Machbarkeitsstudie gilt es nun zu untersuchen, ob und inwiefern sich ein auf die Ansprüche des Güterfernverkehrs angepasstes, auf dem CargoCap Konzept basierendes unterirdisches Transportsystem im in Kapitel 1.1 aufgezeigten Verkehrsumfeld neben den bestehenden Verkehrssystemen technisch, ökonomisch und ökologisch sinnvoll realisieren lässt. Dies soll anhand einer ausgewählten Trasse zur Verbindung der Nordseehäfen Hamburg-Altenwerder, Bremen und Bremerhaven mit dem Ruhrgebiet, für das die Umschlagsterminals Bochum Langendreer und Duisburg Logport als Schnittstellen an die bestehende Infrastruktur herangezogen werden, untersucht werden.

Der Auftrag³ an das interdisziplinäre Forschungsteam umfasst hierbei die

- Analyse des Ist-Zustands und die Auswertung der Prognosen
- technische Konzeption des unterirdischen Transportsystems
- Bewertung der Relevanz des Transportsystems im Hinblick auf
 - Kostenaspekte
 - die Vermeidbarkeit zur Bewältigung des steigenden Verkehrsaufkommens zwingend nötiger Erweiterungsmaßnahmen bei den Verkehrssystemen Straße und Schiene

³ Zu einer ausführlichen Beschreibung des Vorhabens und der Aufgaben siehe [CargoCap2002].

- potentielle Chancen und Risiken seiner Realisierung im Vergleich zu einer ausreichenden Kapazitätserweiterung der Verkehrssysteme Straße und Schiene.

Eine fachgerechte Bearbeitung einer derart umfassenden Themenstellung ist ohne Zusammenarbeit auf den aufgabenbedingt unterschiedlichen Fachgebieten unterschiedlich qualifizierter Partner nicht möglich. Aus diesem Grund sind in dieses Projekt teils privatwirtschaftliche, teils universitäre Institute involviert. Neben dem Ingenieurbüro Stein & Partner (S&P), das die bautechnische Untersuchung und die Projektleitung übernimmt, befasst sich der Lehrstuhl für elektrische Energietechnik und Leistungselektronik (EELE) der Ruhr-Universität Bochum mit der elektrotechnischen Aufgabenstellung. Mit der Untersuchung der Güterverkehrsströme des Verkehrssystems Straße ist die Ingenieurgruppe für Verkehrswesen und Verfahrensentwicklung (IVV) beauftragt; das Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb (IVE) der Universität Hannover führt ähnliche Untersuchungen für das Verkehrssystem Schiene durch. Die ökonomische Aufgabenstellung bearbeitet das Ruhr-Forschungsinstitut für Innovations- und Strukturpolitik e.V. und für juristische Fragen ist das Institut für Berg- und Energierecht (IBE) ebenfalls der Ruhr-Universität Bochum im Team zuständig.

1.3 Aufgabenstellung und Aufbau des Berichts

Der Lehrstuhl für Maschinenelemente und Fördertechnik der Fakultät Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum betreut die maschinenbautechnische Aufgabenstellung dieser Machbarkeitsstudie, die in sechs Teilaufgaben gegliedert ist:

1. Erarbeitung von Randbedingungen aus der Referenzstrecke hinsichtlich Transportentfernung und -volumen sowie Dimensionierung des Transportsystems.
2. Analyse hinsichtlich geeigneter Antriebskonzepte unter Berücksichtigung der gefundenen Randbedingungen in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner aus der Elektrotechnik.
3. Untersuchung von geeigneten Spurführungskonzepten unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen aus den gefundenen Antriebskonzepten und Randbedingungen.
4. Erarbeitung von Konzepten zur konstruktiven Realisierung der Fahrzeuge unter Berücksichtigung der gefundenen Randbedingungen (aus 1) sowie der besonderen Anforderungen aus dem gewählten Antrieb (aus 2) und der Spurführung.
5. Erarbeitung der notwendigen elektrischen Ausrüstung in Zusammenarbeit mit dem Partner aus der Elektrotechnik.

6. Bestimmung möglicher Realisierungsprobleme sowie möglicher technischer Risiken bei dem Betrieb der Fahrzeuge.

Primäres Ziel der Tätigkeit des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Fördertechnik im Rahmen der übergeordneten Studie ist es folglich, ein Konzept für ein Transportfahrzeug zu entwickeln, das den erarbeiteten Anforderungen gerecht wird.

Nach einer kurzen Einführung in die Begrifflichkeiten des kombinierten Güterverkehrs und einer vergleichenden Darstellung der heute in unterschiedlichem Umfang angewendeten Verkehrssysteme, sind daher zunächst die Anforderungen an das zu konzipierende Transportfahrzeug zu erarbeiten. Diese werden einerseits von den Projektpartnern als zum Teil bereits quantifizierbare Schnittstelle vorgegeben, andererseits gilt es, nicht vorgegebene Anforderungen sinnvoll zu entwickeln.

Um den Prozess der Konzeptentwicklung übersichtlich, nachvollziehbar und lösungsneutral zu halten, wird ein methodischer Ansatz gewählt, zu dessen Beginn eine präzise Beschreibung der Aufgabenstellung erfolgt. Die Zerlegung der Fahrzeuggesamtfunktion ermöglicht die Lösungsfindung in Form von Teilkonzepten. Der kritischen Bewertung der gefundenen Lösungen folgt ein Vergleich mit dem Verkehrsträger Lkw.

Anschließend sind über die Konzeption eines Transportfahrzeugs hinausgehende Untersuchungen hinsichtlich der möglichen Gestaltung der Umschlagsterminals und der Fahrgewegausstattung erläutert.

Das abschließende Kapitel beinhaltet neben einer Zusammenfassung der Ergebnisse einen kritischen Rückblick auf die durchgeführte Untersuchung und das Gesamtprojekt sowie einen Ausblick.

2 Verkehrssysteme im kombinierten Güterverkehr

Der Beschreibung und Unterscheidung der im Gütertransport gängigen Verkehrsträger sei zunächst eine Definition der Begrifflichkeiten, die im intermodalen Verkehr Verwendung finden, vorangestellt.

[UIRR2003] definiert wie folgt:

„**Intermodaler Verkehr:** Transport von Gütern in ein- und derselben Ladeeinheit oder demselben Straßenfahrzeug, mit zwei oder mehreren Verkehrsträgern, wobei“ die Ladeeinheit den Verkehrsträger wechselt, „aber kein Umschlag der (in der Ladeeinheit, Anm. des Verf.) transportierten Güter selbst erfolgt.“

Kombinierter Verkehr (KV, Anm. des Verf.) Straße-Schiene: Intermodaler Verkehr, bei dem der überwiegende Teil der Beförderung über die Schiene läuft, mit einem Vor- und Nachlauf über die Straße.

Unbegleiteter KV: Beförderung eines von seinem Fahrer nicht begleiteten Kraftfahrzeugs oder eines Containers, Wechselbehälters oder Sattelanhängers.

Rollende Landstraße (RoLa, begleiteter Verkehr): Beförderung eines von seinem Fahrer begleiteten Kraftfahrzeugs auf der Schiene.“

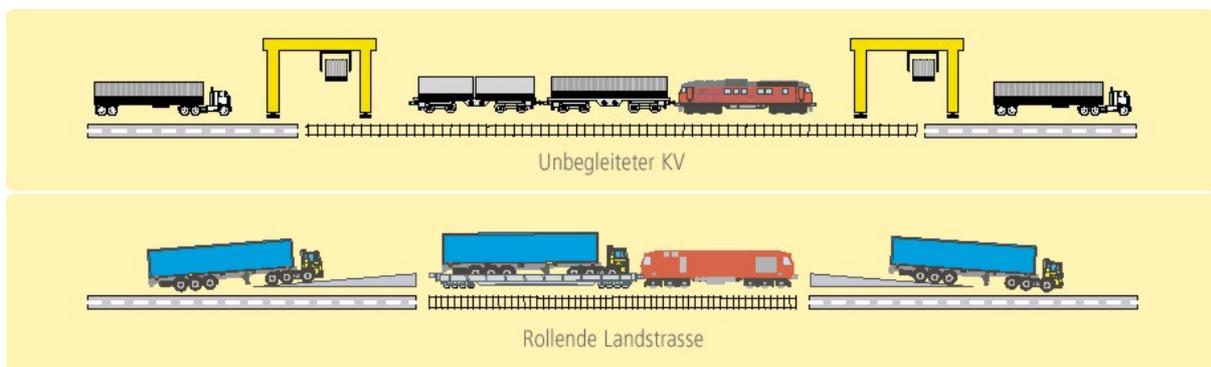


Abbildung 2 Systeme im kombinierten Verkehr Straße-Schiene nach [UIRR2003]

Die von der „Internationalen Vereinigung der Gesellschaften für den kombinierten Verkehr Schiene-Straße (UIRR)“ gegebenen Definitionen konzentrieren sich auf die Verkehrsträger Eisenbahn und Lkw. Eine allgemeinere Beschreibung liefert [BMVBW2001]: „Zum Kombinierten Verkehr (KV) bzw. Kombinierten Ladungsverkehr (KLV) wird der intermodale Verkehr erst dann, wenn der überwiegende Teil der zurückgelegten Strecke mit der Eisenbahn, dem Binnenschiff oder dem Seeschiff bewältigt wird und der Vor- und Nachlauf auf der Straße so kurz wie möglich ist.“

Der kombinierte Güterverkehr zielt folglich auf den Transport von Gütern mit den Verkehrsträgern Eisenbahn, Binnenschiff und Lkw. Voraussetzung dafür sind einheitliche

Ladungsformen, die allen Transportsystemen gerecht werden (Container, Wechselbehälter und Sattelanhänger) und einen schnellen kostengünstigen Umschlag ermöglichen.

Der Straßengüterverkehr erbringt heute den weitaus größten Anteil der gesamten Transportleistung (ca. 65% in 2001). Die Schiene trug im Jahr 2001 19% bei, die Binnenschifffahrt lediglich 16%. Die Gründe für diese Verteilung sind in den Systemunterschieden der drei Verkehrsträger zu finden.

Der maßgebliche Vorteil der Eisenbahn liegt im Zusammenhang zwischen Auslastung der Transportkapazität und Energieeffizienz. Die Rollreibung des Stahlrads auf Schienen ist drei bis sechs Mal niedriger als die der Lkw-Gummireifen auf den Straßen [UIRR2003]. Daraus folgen für den Schienengütertransport deutlich geringere Rollreibungsverluste. „Dieser Energievorteil ist bei langen Zügen mit einem guten Nutzlast-Totlast-Verhältnis, vor allem bei Wechselbehälter- und Containerverkehren, am höchsten.“ [ebd.]

Die „Überlegenheit der Schiene“ wird nach [UIRR2003] unter Berücksichtigung der Unterschiede bei der Energieerzeugung noch deutlicher. Hierfür zieht das UIRR als Vergleichsmerkmale den Primärenergieverbrauch und die CO₂-Emissionen, die von der Gewinnung über die Verarbeitung, den Transport und die Umwandlung bis zum eigentlichen Verbrauch durch das Triebfahrzeug auftreten. Während den Untersuchungen im Falle der Eisenbahn ein Energiemix aus Atomkraft, fossilen Energieträgern, Wasserkraft und anderen erneuerbaren Energien zugrunde liegt, findet als Treibstoff für Lkws und Binnenschiffen nahezu ausschließlich aus Erdöl raffinierter Dieselkraftstoff Verwendung. Die Studie des [UIRR2003] kommt zu drei wesentlichen Schlüssen:

1. „Unbegleiteter kombinierter Verkehr spart auf der Schiene verglichen mit der Straße 29% der Energie ein, die Rollende Landstraße rund 11%.“
2. „Unbegleiteter kombinierter Verkehr reduziert CO₂-Emissionen verglichen zum Straßenverkehr um 55%, während KV-Ketten mit der Rollenden Landstraße eine Reduktion von rund 18% erbringen.“
3. „Der gesamte kombinierte Verkehr vermindert die CO₂-Emissionen um jährlich 1,8 Millionen Tonnen und senkt damit die Umweltkosten um 180 Millionen EUR.“

Dem setzt eine Studie des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH zum gleichen Thema entgegen, dass die „geringen CO₂-Emissionen im Kombinierten Verkehr [...] meist durch hohe Atomstromanteile im Bahnverkehr ‚erkauft‘ werden. „Damit erscheint der Kombinierte Verkehr paradoxerweise gerade in den Ländern besonders ‚umweltfreundlich‘, in denen die Energieerzeugung mit besonders hohen Risiken und schwer kalkulierbaren Folgekosten verbunden ist.“ [IFEU2002] Das Fazit dieser Untersuchung lautet:

„Umweltvorteile bietet der kombinierte Verkehr nur dann, wenn die Einflussfaktoren eine optimale Ausnutzung seiner bahnspezifischen Vorteile erlauben, nämlich wenn:

- der Vor- und Nachlauf im Kombinierten Verkehr günstig gelegen ist,
- die Kapazitätsauslastung der Züge hoch ist und
- diese Züge eine Mindestlänge aufweisen.“ [IFEU2002]

Aus den erwähnten Zusammenhängen kann abgeleitet werden, dass sowohl Wirtschaftlichkeit als auch Umweltfreundlichkeit des Gütertransports mittels Eisenbahn oder Binnenschiff eine Mindestauslastung der jeweiligen Kapazität voraussetzen. Der zeitnahe Transport eiliger Güter führt daher in den meisten Fällen zu ökonomisch und energetisch ineffizientem Betrieb, was eine Verlagerung solcher Transporte auf die Straße nach sich zieht, und zum Verlust der ökologischen Vorteile.

Darüber hinaus kann der Zeitraum zwischen Beginn der Beladung eines Lkw und seiner Abfahrt aufgrund seiner im Vergleich zu den anderen Systemen relativ gering angelegten Kapazität deutlich kürzer gehalten werden. Die Dauer, die sich eine Transporteinheit auf ihrem Weg befindet, ist bei gut ausgelasteten Transporten mit Schiff und Eisenbahn in der Mehrzahl der Fälle durch die Tatsache, dass durch Zwischenhalte, an denen beispielsweise teilweise entladen, rangiert oder geflügelt⁴ werden muss, bedeutend länger als bei Nutzung des Lkw-Güterverkehrs. Im System Eisenbahn wird dies durch die strikte Festlegung der Zugfahrzeiten in Fahrplänen noch verstärkt.

Ein weiterer erheblicher Vorteil des Lkw-Güterverkehrs ist, dass die Be- und Entladung grundsätzlich überall erfolgen kann, während vor dem Umschlag einer Ladungseinheit auf ein Schiff oder einen entsprechenden Waggon ein vorheriger Transport des Gutes vom Versender an eine Kayanlage bzw. einen Anschluss an das Gleisnetz nötig ist. Diesem als Vorlauf bezeichneten Transport folgt nach dem Hauptlauf der Nachlauf, der den Abtransport der Ladungseinheit von der Kayanlage bzw. dem Gleisanschluss über das Straßennetz an den Empfänger beschreibt.

Der Grund für die Vorrangstellung des Verkehrsträgers Lkw ist in seiner Eignung bezüglich der seitens der Wirtschaft an ein Transportsystem gestellten Forderungen nach Flexibilität, Schnelligkeit, Transportqualität und Preis zu finden. Aufgrund der zunehmenden Belastung der Straßeninfrastruktur bestrebt die Verkehrspolitik der Bundesregierung eine Verlagerung der Güterverkehre auf die Verkehrsträger Schiene und Binnenschiff, die im Vergleich zum Straßengüterverkehr unter bestimmten Voraussetzungen ökologische Vorteile besitzen. Ein neues Transportsystem, dass in diesem Umfeld als Alternative be-

⁴ flügeln: Eisenbahnjargon für Aufbrechen eines Zuges und Sortieren nach weiterem Bestimmungsort

stehen soll, muss auf Seiten der Nutzer, der Transportanbieter und der Politik Akzeptanz finden. Demnach gilt es neben der betrieblichen Rentabilität auch die Ansprüche an Flexibilität, Zeitbedarf, Transportqualität, Energieeffizienz und Ökologie im erforderlichen Maße zu erfüllen.

3 Anforderungen an das Transportfahrzeug

Bis auf die Kenntnis der zu transportierenden Ladungsformen gehen aus der Aufgabenstellung zunächst keine konkreten Randbedingungen hervor. Im Laufe der Projektarbeit sind die Anforderungen an das Transportfahrzeug teils direkt durch die Arbeit der Projektpartner (externe Anforderungen) teils in Abstimmung mit den Projektpartnern durch den Autor (interne Anforderungen) selbst entwickelt worden. Das entsprechend der ursprünglichen Projektbeschreibung verfolgte Ziel des Transports von Containern durch unterirdisch verlegte Rohrleitungen ist vom Projektteam um die Ladungsformen Sattelanhänger und Wechselbehälter erweitert worden. Um das Transportaufkommen nochmals erweitern zu können, wurde im Projektplenum die Möglichkeit der Übernahme von Güterzügen aus dem öffentlichen Schienennetz an das Transportsystem als Anforderung formuliert, was das Suchfeld für die Fahrzeugkonzepte aufgrund der somit vorgegebenen Fahrweggestaltung einschränkt. Vor diesem Hintergrund ergeben sich aus der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung [EBO] bezüglich der Spurführung, der zulässigen Radsatzlast, des Lichtraumprofils, etc. konkrete Anforderungen. Diese in Kapitel 3.1 beschriebenen Anforderungen sind ergänzt durch Anforderungen, die aus dem Vergleich der existierenden Verkehrssysteme Eisenbahn und Lkw und ihren jeweiligen Vorteilen folgen. So muss ein Transportsystem, das als Alternative zum Lkw dienen soll, eine hohe Flexibilität aufweisen. In diesem Zusammenhang bieten einzelne selbst angetriebene Transporteinheiten geringer Kapazität entscheidende Vorteile gegenüber dem Güterzug. Um der Forderung seitens der Politik hinsichtlich der Ökologie nachkommen zu können, ist ein Ziel der Konzeption, den Energiebedarf durch ein hohes Verhältnis zwischen Nutzlast und Eigengewicht des Transportfahrzeugs gering zu halten. Da die Transportfahrzeuge in unterirdisch verlegten Rohrleitungen betrieben werden, sind besondere Anforderungen an die Zuverlässigkeit im Betrieb und die Wartung zu stellen, die durch die Verwendung bewährter Technik berücksichtigt werden können.

3.1 Externe Anforderungen

Die Festlegung der Ladungsformen zu transportierender Güter und die daraus resultierende Transportleistung sind im Wesentlichen auf die Arbeit des wirtschaftswissenschaftlichen Projektpartners zurückzuführen. Anforderungen bezüglich des Lichtraumprofils, das den Querschnitt des Fahrzeugs begrenzt, ergeben sich direkt aus dem bautechnisch vorgegebenen Fahrrohrquerschnitt. Dieser folgt, ergänzt durch Vorgaben zum Fahrweg,

aus der Entscheidung des Projektplenums, Güterwagen, wie sie im Schienennetz der Deutschen Bahn AG verkehren, im Transportsystem erfassen zu können.

In Abbildung 3 sind die Schnittstellen des Transportfahrzeugs zum Transportsystem und die Beschränkung des Fahrzeugquerschnitts qualitativ dargestellt.

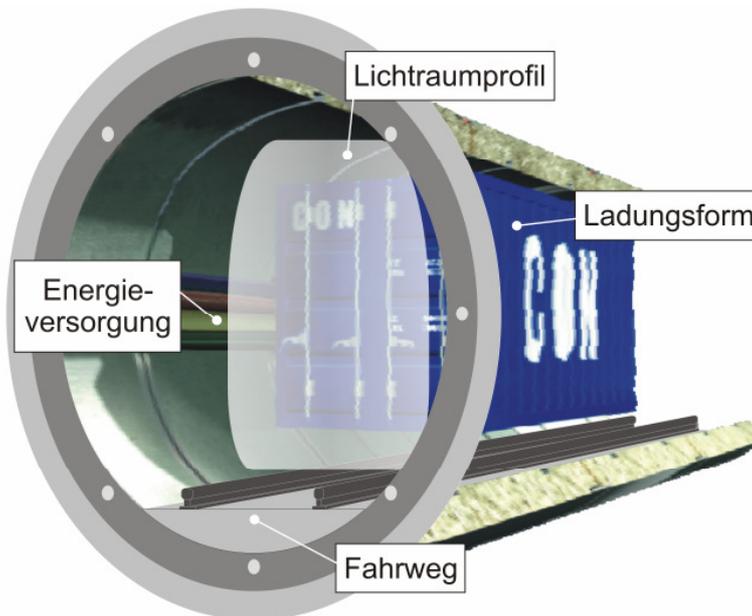


Abbildung 3 Systemschnittstellen

Die Untersuchung des LMF befasst sich über die Bestimmung der daraus für das zu konzipierende Transportfahrzeug folgenden Rahmenbedingungen hinaus nicht mit der Thematik DB-Netz kompatible Güterwagen durch das unterirdische Fahrrohr durchzuschleusen. Es sei lediglich erwähnt, dass, wie innerhalb des Projektteams diskutiert, bei Übernahme eines Güterzugs eine marktübliche, elektrisch angetriebene Lokomotive, die entsprechend auf das Transportsystem angepasst ist (Energieübertragung, automatische Steuerung), die bemannte Lokomotive ersetzt.

3.1.1 Ladungsformen zu transportierender Güter

Wie bereits angesprochen war die ursprüngliche Aufgabe dieses Projekts, die Machbarkeit eines unterirdischen, rohrleitungsgebundenen Transportsystems für Container zu untersuchen (vgl. [CargoCap2002]). Eine Erweiterung der zu transportierenden Ladungsformen um Wechselbehälter und Sattelanhänger erlaubt darüber hinaus eine Ausweitung der für das Transportsystem relevanten Verkehre.

Während die beiden in Form und Handhabung nahezu identischen Ladungsformen Container und Wechselbehälter sich vornehmlich in ihren Abmessungen unterscheiden, stellen die auf die Bedürfnisse des Straßenverkehrs zugeschnittenen Sattelanhänger prinzip-

bedingt vielfältigere Anforderungen an den Verladungsvorgang und das Lastaufnahme-konzept des Fahrzeugs.

Container

Der ursprünglich für militärische Zwecke entwickelte Container nimmt im Güterverkehr eine zunehmend wichtigere Stellung ein. Vor allem im Off-Shore Bereich hat sich diese Ladungsform neben Schütt- und flüssigen Gütern als alleiniger Standard etabliert.

Neben der am häufigsten auftretenden geschlossenen Form (Dry Freight) gibt es im Wesentlichen vier weitere Containertypen (vgl. Abbildung 4). Kühlcontainer (Reefer) sind thermisch isoliert und verfügen über Einrichtungen zur Kühlung des enthaltenen Transportguts. Die Ausführung „Open Top“ ermöglicht den Transport überhoher Güter und die Beladung von oben (z.B. Kranbeladung), da hier als Dach eine abnehmbare Plane fun-giert. Um sehr sperrige Ware transportieren zu können, sind bei so genannten „Flat Racks“ weder Dach noch Seitenwände vorhanden. High Cube Container sind mit 9'6" hö-her als Standardcontainer (Höhe 8'6"). In Abbildung 4 nicht dargestellt sind Tankcontai-ner für den Transport von Flüssigkeiten.

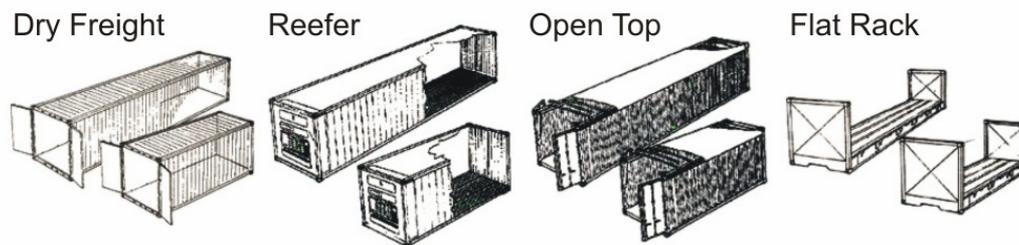


Abbildung 4 Bauformen von Containern

Die Abmessungen und zulässigen Gesamtgewichte von ISO-Containern sind in der internationalen Norm [DIN ISO 668] grundsätzlich festgelegt.

Trotz dieser Standardisierung findet im Güterverkehr eine weitaus größere Palette an Containern, die beispielsweise in Länge oder auch zulässigem Gesamtgewicht von der Norm abweichen, Verwendung (vgl. Tabelle 1). So kommen im Überseegüterverkehr neben den in der Norm aufgeführten 20' und 40'-Containern vermehrt 45'-Container zum Einsatz. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass die Ausnutzung der Kapazität der Container bei der Mehrzahl der Transporte seltener durch das zulässige Gesamtgewicht des Behälters als durch sein Volumen begrenzt wird. Durch die Verlängerung um 5' kann bei ebenso guter Ausnutzung des Behältervolumens zusätzlich eine bessere Ausnutzung der maximalen Zuladung eines Lkw, der meist im Vor- bzw. Nachlauf des Überseetransports Gebrauch findet, erzielt werden.

Den in [DIN ISO 668] aufgeführten 10' und 30'-Containern kommt im Güterverkehr heutzutage eine sehr untergeordnete Rolle zu, weshalb sie für die Fahrzeugkonzeption keine weitere Berücksichtigung finden. Andererseits existieren in [DIN ISO 668] keine Angaben zu 45'-Containern, die wie bereits erwähnt verstärkt Verwendung finden.

Eine Bezugnahme allein auf die in der Norm aufgeführten Containerabmessungen und -gewichte ist folglich im Hinblick auf eine erfolgreiche Konzeption des Transportfahrzeugs unzureichend. Ziel muss es vielmehr sein, die marktüblichen Containergrößen und -bauformen zu berücksichtigen. Dementsprechend sind die in Tabelle 1 aufgeführten Daten über Abmessungen und zulässige Gesamtgewichte unterschiedlicher Containerbauarten aus der Norm, Angaben des Containerhersteller Maersk (vgl. [Maersk]) und des Containerhändlers Star Container (vgl. [Star Container]) zusammengetragen. Für die Fahrzeugkonzeption relevant sind hierbei die in Tabelle 1 unterstrichenen Maximalwerte.

Tabelle 1 Auslegungsrelevante Abmessungen und Massen – Container

Typ	äußere Abmessungen			zul. Gesamtgewicht [t]
	Nennlänge [Fuß / Zoll]	Länge [mm]	Breite [mm]	
20 std (20' x 8' x 8' 6'')	6058	2438	2591	<u>30,48</u>
40 std (40' x 8' x 8' 6'')	<u>12192</u>			32,5
40 high (40' x 8' x 9' 6'')			<u>2896</u>	<u>34,4</u>
45 high (45' x 8' x 9' 6'')	<u>13716</u>		32,5	

Im innereuropäischen Güterverkehr besitzen Container einen entscheidenden Nachteil. Die Innenbreite, die nach [DIN ISO 668] für ISO-Container mindestens 2330mm betragen muss, lässt keine zweireihige Beladung mit Euro-Paletten, die bei innereuropäischen Transporten die häufigste Ladung darstellen [Kessel&Partner2002], zu, da deren Grundfläche 1200x800mm beträgt.

Zur Handhabung von Container kommen unterschiedliche fördertechnische Systeme zum Einsatz. Als Greifpunkte sind hierfür einheitlich an allen Ecken eines jeden Containers genormte ISO-Eckbeschläge angebracht. Mit Spreadern ausgestattete Krane greifen Container von oben (Top-Lift-Umschlag; vgl. Abbildung 5), wobei jeweils ein Twistlock in die vier Eckbeschläge abgesenkt und durch Drehen verriegelt wird. Eine weitere Funktion der Eckbeschläge ist die Sicherung des Containers beim Transport durch fahrzeugseitig angebrachte Twistlocks. Die Positionen der Eckbeschläge sind durch [DIN ISO 668] festgelegt.



Abbildung 5 Handhabung von Containern

Wechselbehälter

Wechselbehälter sind für „den Gütertransport bestimmte Lkw-Aufbauten, die variabel auch für den innereuropäischen multimodalen Transport geeignet sind“ [Kessel&Partner2002]. Sie unterscheiden sich von Containern im Wesentlichen darin, dass sie „im Hinblick auf die Abmessungen und Eigenschaften von Straßenfahrzeugen optimiert wurde[n]“ [ebd.]. Aus diesem Grund erlauben sie beim Transport von Europaletten eine zweireihige Beladung und damit eine bessere Ausnutzung des Stauraums.



Abbildung 6 Wechselbehälter und Umschlag

Wechselbehälter gibt es je nach Anwendung in unterschiedlichen Bauformen. Während der Transport gekühlter Güter in Thermalwechselbehältern erfolgt, finden Wechseltanks zur Beförderung flüssiger Stoffe Verwendung. Ein als Wechselkoffer bezeichneter Lkw-Aufbau verfügt über feste Stahlwände und -dach. Variationen ergeben sich im Hinblick auf unterschiedliche Beladungsmöglichkeiten. So können Wechselbehälter mit festen Stirnwänden und Dach mit seitlichen Schiebegardinen ausgestattet sein. Bei einer so genannten Wechselbrücke oder Wechselpritsche sind sowohl Stirn- und Seitenwände als auch Dach mit einer Plane abgespannt. Während Wechselbehälter zum Teil für den Top-

Lift-Umschlag geeignet sind, können z.B. Wechselbrücken nur mit speziellen Spreadern umgeschlagen werden, die über Greifarme verfügen. In den meisten Fällen besitzen Wechselbehälter klappbare Stützfüße, die einen schnellen Umschlag von einem Lkw-Chassis auf ein anderes ermöglichen.

Es sind zwei Größenklassen von Wechselbehältern zu unterscheiden. Die Maße und Gesamtgewichte der Wechselbehälter der Klasse A sind in [DIN EN 425] geregelt; [DIN EN 284] definiert diese Werte für Wechselbehälter der Klasse C. Innerhalb dieser Klassen existieren je drei unterschiedliche Behälterlängen, von denen Tabelle 2 die größte Behälterlänge je Klasse angibt.

Tabelle 2 Auslegungsrelevante Abmessungen und Massen – Wechselbehälter

Klasse	äußere Abmessungen			zul. Gesamtgewicht [t]
	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	
C	<u>7820</u>	<u>2600</u>	2670	16
A	13600			34

Die durch die Norm vorgegebenen Positionen der Eckbeschläge sind auf die für Container festgelegten Greifpunkte abgeglichen.

Binnencontainer

Binnencontainer sind in Aufbau und Handhabung im Wesentlichen mit ISO-Containern identisch. Allerdings lassen Binnencontainer mit ihrer Breite von 2500mm ebenso wie Wechselbrücken eine zweireihige Beladung mit Euro-Paletten zu. Ihre Höhe beträgt nach [DIN ISO 15190] 2600mm. Die Längenabstufung der Binnencontainer erfolgt in den vier Containergrößen B6, B7, B9, und B12. Binnencontainer der Klasse B6 haben die gleiche Länge wie 20'-ISO-Container. Die gleiche Beziehung besteht zwischen der Klasse B12 und 40'-ISO-Containern. Die Klassen B7 und B9 stellen auf den Straßengüterverkehr optimierte Binnencontainer dar.

Tabelle 3 Abmessungen und Massen – Binnencontainer nach [DIN ISO 15190]

Klasse	äußere Abmessungen			zul. Gesamtgewicht [t]
	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	
B6	6058	2500	2600	24
B7	7150			16
B9	<u>9125</u>			25,4
B12	12192			30,48

Die Handhabung von Binnencontainern erfolgt auf gleiche Weise wie bei ISO-Containern. Für das Fahrzeugkonzept sind hier im Weiteren lediglich die Maße der Klasse B9 von Bedeutung, da die Positionen der Eckbeschläge, die als Punkte zur Ladungssicherung herangezogen werden, von denen der bereits berücksichtigten ISO-Container und der Wechselbehälter abweicht.

Sattelanhänger

Sattelanhänger sind das dominierende Transportmittel im Güterfernverkehr und werden in einer Reihe unterschiedlicher Bauformen angeboten. Ihre Verbindung zur Sattelzugmaschine erfolgt über den Königszapfen, der zur Übertragung der Zugkraft in die Sattelkupplung der Zugmaschine eingreift. Sattelanhänger besitzen je nach Ausführung bis zu drei gebremste Achsen. Die pneumatischen Bremsen werden über eine Kopplung der Bremsleitung mit der Druckluftversorgung der Sattelzugmaschine angesteuert. Bei abgekuppelter Zugmaschine stützt sich der Sattelanhänger auf im Fahrbetrieb eingefahrene Stützwinden ab und ist durch eine Feststellbremse gegen Wegrollen gesichert.



Abbildung 7 Sattelanhänger (Koffer und Kesselaufbau)

Die zulässige Länge, Breite und Höhe und das zulässige Gesamtgewicht sind in der Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO) für einen Sattelzug bestehend aus Sattelzugmaschine und -anhänger festgelegt. Im Zuge der Förderung des kombinierten Verkehrs wurde im Jahre 1992 die EU-Richtlinie 92/106/EWG erlassen, die für Sattelzüge ein zulässiges Gesamtgewicht von 44t statt wie nach StVZO 40t zulässt, solange diese Teil einer Transportkette im Sinne des kombinierten Verkehrs sind.

Da aus der Literatur für Sattelanhänger selbst keine Aussagen über zulässige Länge und Gesamtgewicht hervorgehen, sind die in Tabelle 4 angegebenen Maximalwerte abgeschätzt. Die bewusst hohe Wahl dieser Werte ist sicherheitsbedingt und vermeidet bei der späteren Konzeption des Transportfahrzeugs, dass Lösungen für das Transportfahrzeug betrachtet werden, die die Menge transportierbarer Sattelanhänger einschränken.

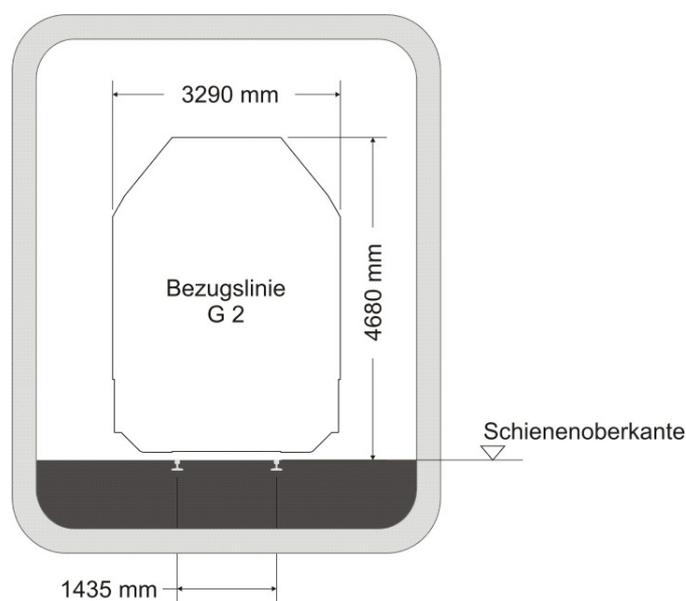
Tabelle 4 Auslegungsrelevante Abmessungen und Massen – Sattelanhänger

zul. äußere Abmessungen nach StVZO			zul. Gesamtgewicht [t]
Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	
<u>14000</u>	<u>2600</u>	<u>4000</u>	<u>39</u>

3.1.2 Bauraum

Um die Option der Übernahme kompletter Züge aus dem DB-Netz zu gewährleisten muss die Dimensionierung des Fahrrohrs auf Basis der vom Gesetzgeber gegebenen Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung [EBO] erfolgen. In dieser Bestimmung ist mit den Bezugslinien G1 und G2 der zulässige Querschnitt im DB-Netz verkehrender Fahrzeuge begrenzt. Da davon auszugehen ist, dass übernommene Güterzüge auch Fahrzeuge beinhalten, „die nicht im grenzüberschreitenden Verkehr eingesetzt werden“ [EBO], müssen die Abmessungen des für das Transportfahrzeug zulässigen Lichtraumprofils mindestens den Abmessungen des größeren Lichtraumprofils nach Bezugslinie G2 entsprechen.

Eine Beachtung der zusätzlichen Auflagen bei Oberleitung ist aufgrund der vom Projektpartner EELE vorgeschlagenen Energieübertragung mittels dritter Schiene nicht relevant.

**Abbildung 8** Bezugslinie G2 nach [EBO]

Der Fahrrohrquerschnitt ist vom für die bautechnische Aufgabenstellung zuständigen Projektpartner S&P für einspurige Streckenabschnitte als Rechteckquerschnitt mit einer lichten Breite von 5310mm und einer lichten Höhe von 6197mm festgelegt. Der Rechteckquerschnitt besitzt in doppelspurigen Abschnitten, in denen in entgegen gesetzte Rich-

tung fahrende Fahrzeuge aneinander vorbeifahren können, eine lichte Breite von 10080mm.

3.1.3 Fahrweg

Zu Beginn der Bearbeitung erstellten die Projektpartner ein Streckenlayout auf Basis der in der Aufgabenstellung benannten Terminals. Eine Bewertung dieses Layouts unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zeigt auf, dass zwei von den Projektpartnern alternativ betrachtete Netze ökonomisch vorteilhaft gegenüber dem ursprünglich Angenommenen sind. Abbildung 9 zeigt das Streckenlayout der beiden Netzvarianten, indem neben der engen Netzvariante mit den Terminals Hamburg-Altenwerder, Bremen-Roland, Bochum-Langendreer und Duisburg-Logport die von den Projektpartnern alternativ untersuchte Erweiterung um die Terminals Hagen-Vorhalle und Köln-Eifeltor zum weiten Netz dargestellt ist.

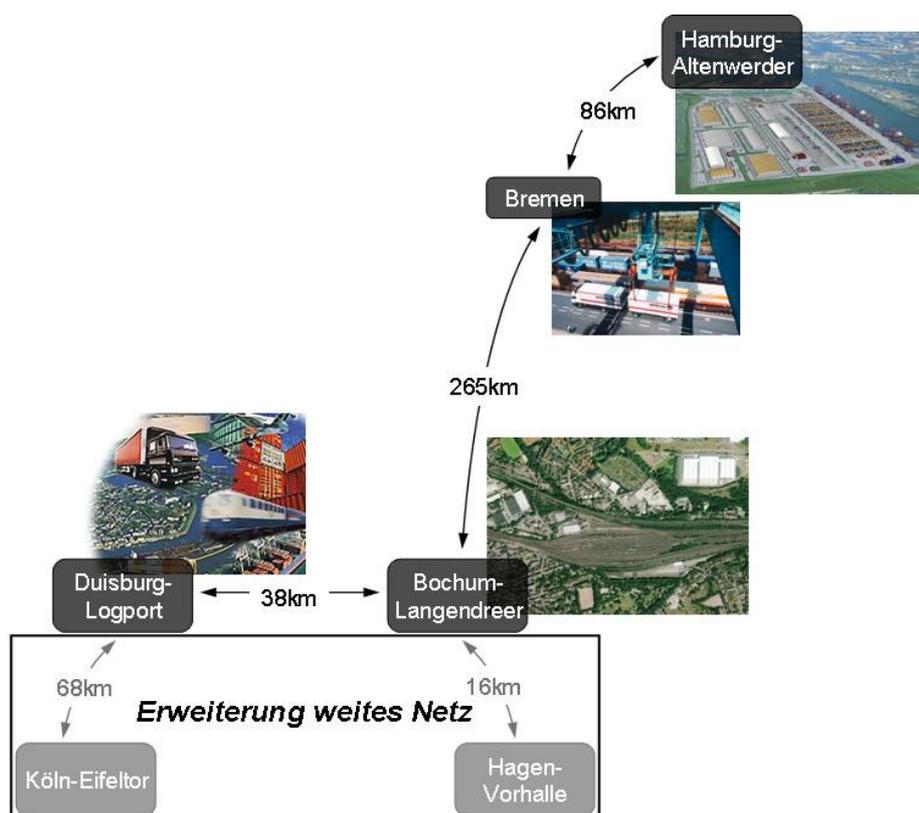


Abbildung 9 Streckenlayout des Transportsystems

Die Streckenabschnitte zwischen den Terminals sind einspurig angesetzt, wobei sich begegnende Fahrzeuge an dafür vorgesehenen zweispurigen Abschnitten ohne Geschwindigkeitsreduzierung aneinander vorbeifahren können. Dieses Streckenlayout verringert die Baukosten, setzt allerdings einen getakteten Betrieb und damit eine planmäßige Festlegung der Abfahrtszeiten bestimmter Relationen voraus.

Bezüglich der Lastübertragung, der Spurführung, der Fahrwegeigenschaften und seiner Ausstattung liefert die im vorigen Kapitel angesprochene Systementscheidung noch konkretere Anforderungen als an den Bauraum des Fahrzeugs:

Das Fahrzeug muss auf Gleisen mit einer Spurweite von 1435mm fahren können, wobei die Spurführung durch Spurkränze erfolgt. Da das Schienenprofil, um die Übernahme von Güterzügen aus dem öffentlichen Schienennetz zu ermöglichen, nach [EBO] gewählt werden muss, scheint die Verwendung kompatibler marktüblicher Stahlräder sinnvoll. Dem Vorteil der Rad-Schiene-Technik, hohe Lasten bei geringer Rollreibung bewegen zu können, steht der Nachteil der niedrigeren Haftreibung ($\mu_H \leq 0,14$) zur Übertragung der zum Vortrieb erforderlichen Zugkraft entgegen.

Tabelle 5 Randbedingungen der Schnittstelle zum Fahrweg

Spurweite	1435mm	Schienenprofil	nach [EBO]
zul. Radsatzlast (Stahl-Stahl)	22,5t	Spurführung	Spurkränze
max. Längsneigung Strecke	12,5‰	min. Kurvenradius	500m

Die zulässige Radsatzlast ist nach [EBO] für Fahrzeuge, deren Radsätze einen Abstand von wenigstens 1500mm zueinander besitzen, auf 18t begrenzt. Der Zusatz des entsprechenden Paragraphen, dass „höhere Radsatzlasten und Fahrzeuggewichte [...] zulässig [sind], wenn sie vom Oberbau und von den Bauwerken sicher aufgenommen werden können“, gestattet es, diesen Grenzwert auf 22,5t anzuheben.

Die Längsneigung der Strecke ist auf maximal 12,5‰ festgelegt und der Kurvenradius darf in Streckenabschnitten, die mit Nenngeschwindigkeit (80km/h) befahren werden, das Minimum von 500m nicht unterschreiten.

Die am besten geeignete Lösung zur Energieübertragung bieten laut Projektpartner EELE Systeme mit einem spannungsführenden Leiter, bei denen die Schienen als Rückleiter genutzt werden.

3.2 Interne Anforderungen

Auch die im Weiteren beschriebenen Anforderungen an das Transportfahrzeug stehen in direktem Zusammenhang mit den Forderungen an das Gesamtkonzept des Transportsystems. Sie sind allerdings nicht quantitativ von anderen Projektpartnern vorgegeben, sondern basieren auf der Analyse der Problemstellung aus technischer Sicht.

3.2.1 Fahrdynamik

Die wesentlichen Anforderungen an die Fahrdynamik eines Fahrzeugs lassen sich in den Kennwerten Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungs-, Verzögerungsvermögen und Elastizität quantifizieren. Je nachdem, welchen Systembedingungen ein Fahrzeug unterliegt, besitzen diese Größen bei der Entwicklung eines Antriebskonzepts unterschiedliche Priorität. So ist beispielsweise bei Fahrzeugen, die im ständigen Stop-and-go- bzw. Kurzstreckenverkehr betrieben werden (z.B. U-Bahn, Regalbediengerät) die Höchstgeschwindigkeit von weitaus geringerer Bedeutung als die maximale Beschleunigung. Bei dieser als Dreiecksbetrieb bezeichneten Arbeitsweise wird die Höchstgeschwindigkeit nur für einen geringen Zeitanteil der Fahrt bzw. überhaupt nicht erreicht. Dagegen ist der Einfluss der Beschleunigung auf die durchschnittliche Geschwindigkeit und die Fahrzeit für ein Fahrzeug, das aufgrund der Infrastruktur vorwiegend mit Nenngeschwindigkeit fahren kann, geringfügig.

Das der Untersuchung zugrunde liegende Betriebskonzept des Transportsystems sieht vor, dass Fahrzeuge beim Verlassen eines Terminals auf ihre Nenngeschwindigkeit beschleunigen und diese bis zum Beginn des Bremsvorgangs vor Einfahrt in das Zielterminal konstant halten. Diese Nenngeschwindigkeit steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der geforderten Transportleistung, der Streckenlänge, dem vorgeschriebenen Abstand der Fahrzeuge zueinander und dem aus dem Streckenlayout entwickelten Fahrplan. Im Laufe des Arbeitsprozesses wurde die Nenngeschwindigkeit in Abstimmung mit den Projektpartnern auf 80km/h festgesetzt. Da der Nennbetrieb eine höhere Geschwindigkeit weder fordert noch zulässt, erfolgt die Antriebsauslegung auf Basis dieser konstant zu realisierenden (Maximal-)Geschwindigkeit.

Die Antriebsleistung eines Fahrzeugs wird neben seinem Beschleunigungsvermögen wesentlich durch seine Steigfähigkeit bestimmt. Die im Rahmen der untersuchten Systemgrenzen vorliegenden geringen Anforderungen an die Beschleunigung führen dazu, dass die Antriebsauslegung maßgeblich durch die maximale Streckensteigung bestimmt wird, die das Fahrzeug mit seiner Nenngeschwindigkeit bewältigen muss und an der es im Ausnahmefall auch anfahren können muss. Mit einer möglichen Erweiterung des Streckennetzes steigt die Bedeutung der Beschleunigung allerdings erheblich. Ein für den Anschluss weiterer Terminals erforderlicher flächenorientierter Ausbau des Streckennetzes führt zu einer höheren Anzahl von Verzweigungspunkten, die sich zueinander in kürzeren Abständen befinden. Je enger ein solches Netz ausgeführt ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass Fahrzeuge abbremsen und beschleunigen müssen, um beispielsweise in Weichen mit geringeren Radien als 500m die zulässige Seitenbeschleunigung nicht zu überschreiten oder anderen Fahrzeugen an Verzweigungen Vorfahrt zu gewähren. Erweist sich das

im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie konzipierte unterirdische Transportsystem als sinnvoll, muss die Erweiterbarkeit sichergestellt sein.

Die Leistung des Transportfahrzeugs ist im betrachteten System wie bereits angesprochen in erster Linie durch die geforderte Steigfähigkeit von 12,5‰ bei 80km/h vorgegeben. Vor diesem Hintergrund kann für die durchschnittliche Beschleunigung ein Wert von mindestens $0,5\text{m/s}^2$ gefordert werden.

Eine weitere Anforderung an das Transportfahrzeug ist die zulässige Bremsverzögerung. Für diese Größe ist ein Wert von $0,5\text{m/s}^2$ ausreichend und problemlos realisierbar.

3.2.2 Energiebedarf

Ökologische Gesichtspunkte wie Primärenergieverbrauch und CO₂-Emissionen stellen bei der vergleichenden Bewertung von Verkehrsträgern ein immer gewichtigeres Kriterium dar. „Sollte das Verursacherprinzip eingeführt werden, so hätte der kombinierte Verkehr zukünftig einen echten, zusätzlichen kommerziellen Vorteil [gegenüber dem reinen Straßengütertransport; der Verf.]. In einer Übergangsphase, bis die von der EU angekündigte Politik, alle externen Kosten einzubeziehen, verwirklicht ist, rechtfertigen diese und andere Umweltvorteile Maßnahmen zur Förderung des kombinierten Verkehrs.“ Zurückzuführen ist diese Aussage des [UIRR2003] auf die bis zu sechsfach geringere Rollreibung der Schiene gegenüber der Straße, die sich bei entsprechend guter Auslastung der Zugkapazität, repräsentiert durch ein gutes Nutzlast-Totlast-Verhältnis, in einem Energievorteil auswirkt. Allerdings wirkt einem einzelnen fahrenden Transportfahrzeug im Fahrrohr bei dem vom bautechnischen Projektpartner vorgegebenen Fahrrohrquerschnitt ein im Vergleich zu den erwähnten Transportsystemen ca. 4,3-fach höherer Luftwiderstand entgegen, da die Strömung der Luft durch die räumliche Begrenzung gehemmt wird. Die Fahrt mehrerer Fahrzeuge im Fahrzeugverband bzw. in einer Kolonne verringert den Luftwiderstand deutlich [vgl. Hucho1973].

Soll das untersuchte unterirdische Transportsystem sowohl wirtschaftlich attraktiv als auch politisch akzeptabel sein, muss es neben den technischen Anforderungen zusätzlichen ökologischen Ansprüchen gerecht werden. Daher strebt die Konzeption des Transportfahrzeugs neben den technischen auch aus ökologischen Überlegungen heraus entstandene Ziele an. Um den Energiebedarf zu minimieren, gilt es, das Verhältnis zwischen Nutz- und der nicht wertschöpfend bewegten Totlast des Fahrzeugs zu optimieren, was eine Optimierung der Antriebsauslastung bezüglich der im Nennbetrieb auftretenden Transportaufgaben voraussetzt.

3.2.3 Betrieb und Wartung

Das von bautechnischer Seite vorgegebene Betriebskonzept und das auf dieser Basis entwickelte Streckenlayout sieht vor, dass für jede planmäßig von Start- zu Zielort zur Verfügung gestellte Trasse ein Fahrzeugverband die Strecke befahren kann. Die maximale Länge eines solchen Fahrzeugverbandes bestimmt maßgeblich die erforderliche Länge der doppelspurigen Begegnungsabschnitte. Auf Basis der maximal zulässigen Länge eines Güterzuges im öffentlichen Schienennetz von ca. 750m hat der Projektpartner S&P die maximale Länge der Begegnungsabschnitte auf 2700m dimensioniert. Da innerhalb dieser Strecke ein Anhalten möglich sein muss, ergibt sich bei bekanntem Bremsvermögen eines Transportfahrzeugs und dem daraus folgenden maximalem Bremsweg die zulässige Länge eines Fahrzeugverbandes und je nach Art der Zugbildung die maximale Anzahl an Fahrzeugen im Fahrzeugverband.

Ein momentan entscheidender Vorteil des Verkehrsträgers Lkw gegenüber der Schiene ist, dass er auch kleine Transportmengen wirtschaftlich und ohne lange Wartezeiten (z.B. zur Verladung, Zugbildung) transportieren kann. Aus diesem Grund und um eine Erweiterbarkeit des Transportsystems beibehalten zu können, muss das Fahrzeugkonzept einer flexiblen Systemgestaltung zur Verbesserung der Transportqualität gerecht werden.

Das Systemkonzept erlaubt es nicht, einzeln fahrende Transporteinheiten im absoluten Bremswegabstand, der sich jeweils aus dem maximalen Bremsweg eines Fahrzeugs und einem Sicherheitsabstand zusammensetzt, fahren zu lassen. Eine solche Betriebsweise stellt geringe Anforderungen an die Überwachung und Regelung der Fahrzeuge im Verband, führt jedoch zu einer sehr hohen Länge der Fahrzeugverbände und ist daher bei dem einspurig angelegten Streckenlayout unter dem angenommenen Verkehrsaufkommen nicht tragbar. Eine Verringerung der Fahrzeugabstände kann neben der klassischen mechanischen Kopplung der Fahrzeuge durch neue Entwicklungen zur Abstandsregelung ermöglicht werden. Unabhängig von der Art der Zugbildung muss zur Anpassung der Transportkapazität an das Aufkommen die Zugbildung automatisch und vor allem flexibel erfolgen können.

Der vollautomatische und unterirdische Betrieb, der dem Transportsystem zugrunde liegt, stellt sehr hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Transportfahrzeuge. Aus dem gewählten Streckenkonzept folgt eine zusätzliche Steigerung dieser Anforderungen, da der Ausfall eines Fahrzeugs in einem einspurigen Streckenabschnitt zum Zusammenbrechen des gesamten Betriebs in der entsprechenden Relation führt. Daher ist bei der Konzeption des Fahrzeugs eine Redundanz der Funktionen (z.B. Antrieb) zu gewährleisten. Weiterhin sind Systeme vorzusehen, die eine Überwachung des Betriebszustands ermöglichen und dabei Wartungsbedarf frühzeitig erkennen und selbsttätig melden. Darüber hinaus muss die Möglichkeit geboten werden Sendungen zu verfolgen (Track´n´Trace),

um der vermehrt von der Industrie an die Transportunternehmen gestellten Forderung nach Information gerecht zu werden.

Um eine hohe Zuverlässigkeit im Betrieb sicherzustellen und die Realisierbarkeit des untersuchten Transportsystems quantitativ beurteilen zu können, ist die Verwendung bewährter und damit beherrschter technischer Komponenten zweckmäßig. Darüber hinaus weist diese Herangehensweise im Hinblick auf die gestellte Transportaufgabe nicht nur Kostenvorteile gegenüber der Entwicklung neuer Technologien auf.

4 Erarbeitung von Fahrzeugkonzepten

Dieses Kapitel befasst sich mit der Entwicklung verschiedener, den in Kapitel 3 aufgestellten Anforderungen entsprechender Fahrzeugkonzepte. Vor der Erarbeitung einzelner Lösungen erfolgt eine faktische Beschreibung der eigentlichen Aufgabe, die das Fahrzeug zu erfüllen hat. Diese theoretisch als Zusammenfassung der Anforderungen zu verstehende Beschreibung soll verhindern, dass Lösungen entwickelt werden, die die Aufgabe nicht oder nur unzulänglich erfüllen.

4.1 Präzisierung der Aufgabenstellung

Aufgabe ist die Konzeption eines gleisgeführten Fahrzeugs für den Transport der Ladungsformen Container, Wechselbehälter und Sattelanhänger.

Sein Querschnitt richtet sich nach der Bezugslinie G2 nach [EBO]. Den Fahrweg bilden Gleise im Abstand von 1435mm, die eine maximale Längsneigung von 12,5‰ und einen minimalen Kurvenradius von 500m aufweisen. Die Energieübertragung erfolgt über ein Stromschienensystem, wobei das Fahrzeug über einen entsprechenden Schleifkontakt verfügen muss.

Die Beschleunigung auf eine Höchstgeschwindigkeit von $v = 80 \text{ km/h}$ ist mit mindestens durchschnittlich $\dot{v} = 0,5 \text{ m/s}^2$ zu ermöglichen; der gleiche Betrag gilt für die minimale Verzögerung.

Ein weiteres Ziel ist es, die Konzepte so auszurichten, dass sie bestenfalls die Vorteile der Verkehrssysteme Straße und Schiene kombinieren. Diesbezüglich sind bei der Konzepterstellung Anforderungen bezüglich Ökologie und Wirtschaftlichkeit des Transportfahrzeugs in Form von hinsichtlich der Rahmenbedingungen optimierten Energiebedarf und akzeptabler Flexibilität zu berücksichtigen.

In Hinblick auf die Systemeigenschaften des unterirdischen Gütertransports müssen die Transportfahrzeuge eine hohe Zuverlässigkeit im Betrieb aufweisen. Um dies mit vertretbarem Wartungsaufwand zu ermöglichen, müssen die Konzepte die Verwendung im Schienengüterverkehr angewandeter technischer Komponenten ermöglichen.

4.2 Lösungsfindung

Die schrittweise Konzeption des Fahrzeugs beleuchtet seine Funktion zunächst hinsichtlich der Lastaufnahme. Aus dem abgeleiteten Ladeschema ergeben sich zu transportierende Lasten, die der Antriebskonzeption zugrunde liegen. Überlegungen zum Fahrwerk und der Regelung und Steuerung komplettieren die Untersuchung, wobei sich innerhalb

des Regelungs- und Steuerungskonzepts ein Schwerpunkt der Untersuchung bezüglich des Fahrens im Fahrzeugverband ergibt.

4.2.1 Lastaufnahmekonzept

Sattelanhänger:

Während die Verladung und die Ladungssicherung von Containern und Wechselbehältern aufgrund der standardisierten Schnittstellen der Ladeeinheiten und der vielfältigen Lösungen aus dem Bereich der Fördertechnik als unproblematisch anzusehen ist, stellt sich die Aufnahme von Sattelanhängern weitaus schwieriger dar.

Ein 2,6m breiter Sattelanhänger mit einer Höhe von 4m erlaubt, soll er die Grenzlinie G2 nicht überragen, aufgrund der Verjüngung der Grenzlinie G2 im oberen Bereich eine Höhe der Ladefläche von 44mm über der Schienenoberkante. Bei einer erzielten Ladeflächenhöhe von 680mm schließt die Oberkante des zulässigen Querschnitts eines Sattelanhängers mit der oberen Begrenzung ab, was allerdings zur Folge hat, dass der Fahrzeugquerschnitt nicht innerhalb der Grenzlinie G2 liegt. So ragen die oberen Ecken des Sattelanhängers bei Ausnutzung der gesamten Grenzlinienhöhe und unter Vernachlässigung fahrdynamischer Verschiebungen und der Annahme symmetrischer Beladung je Seite maximal 515mm horizontal über die Grenzlinie G2 hinaus.

Setzt das öffentliche Schienennetz die strenge Einhaltung dieser Grenzlinie voraus, können die im System der rollenden Landstraße verwendeten Niederflurwagen, die eine Ladehöhe von 270mm aufweisen, bereits 2,55m breite Sattelanhänger nur bis zu einer Eckhöhe von maximal 3805mm transportieren. Da 4m hohe Sattelanhänger im Straßengütertransport weit verbreitet sind, würde eine Begrenzung der zulässigen Eckhöhe für transportierbare Sattelanhänger auf weniger als die nach StVZO zulässige Fahrzeughöhe von 4m zu einem merklichen Verlust bezüglich des Transportaufkommens für das untersuchte Transportsystem führen.

Der für das Transportsystem zur Verfügung stehende Bauraum ist faktisch letztlich durch die Abmessungen des Fahrrohrs, der notwendigen Streckenausrüstung und entsprechend vorzusehender Sicherheitsabstände begrenzt. Somit kann unter der Voraussetzung, dass die zu konzipierenden Transportfahrzeuge das im Rahmen der Machbarkeitsstudie untersuchte Transportsystem nicht verlassen, eine neue erweiterte Grenzlinie definiert werden, die die Grenzlinie G2 vollständig einschließt.

Abbildung 10 zeigt einen Sattelanhänger des Querschnitts 4000mm x 2600mm in der auf die Grenzlinie G2 einschließenden erweiterten Grenzlinie.

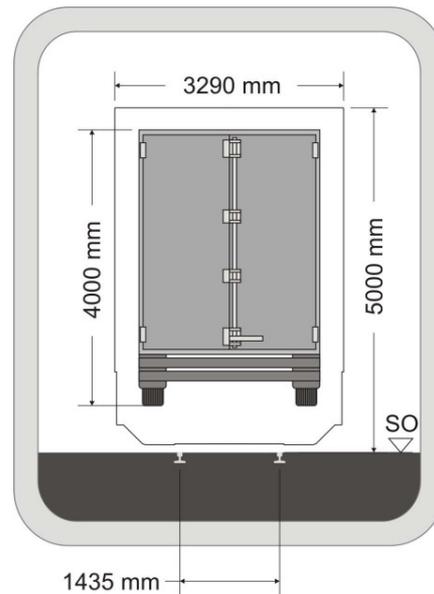


Abbildung 10 Sattelanhänger auf erweiterter Grenzlinie G2

Ein für die Transportanbieter akzeptables Transportsystem darf keine zusätzlichen Anforderungen an die Sattelanhänger stellen. In der Praxis zeigt sich, dass Systeme wie beispielsweise die bahnüblichen Taschenwagen, die die Kranbarkeit von Sattelanhängern voraussetzen, nur mäßigen Erfolg erzielen. Gleiches gilt für so genannte bimodale Systeme, deren Prinzip auf speziellen Sattelanhängern mit verstärktem Tragrahmen, die an dafür vorbereiteten Angriffspunkten auf Gleisfahrgestelle abgesetzt werden, basiert. Daher ist bei der Konzeption verstärkt Wert darauf zu legen, dass das Fahrzeug den Transport jeglicher straßentauglicher Sattelanhänger gestattet. Einzig Kippsattelanhänger zur Beförderung von Schüttgütern wie Erde, Sand, Kies usw., die hohe Achs- und Sattellasten bei entsprechend geringer Länge aufweisen, können ausgenommen werden. Sie stellen für das untersuchte Transportsystem kein relevantes Aufkommen dar, da sie zumeist über kurze Strecken zum Einsatz kommen. Somit stellen Sattelanhänger mit Tankaufbauten zur Aufnahme flüssiger Güter die höchsten Anforderungen an das Tragwerk.

In Hinblick auf den Umschlagsprozess können zwei Zustände unterschieden werden. Vor Beginn des Umschlags stellt der Sattelzugführer den Sattelanhänger an der dafür vorgesehenen Position, die aufgrund der anzunehmenden Fertigkeit der Fahrer eine ausreichend geringe Toleranz in Längs- und Querrichtung aufweisen kann, ab. Einparkhilfen, wie etwa seitlich der Ladefläche angebrachte Spurführungsschienen, erhöhen die Positionsgenauigkeit zusätzlich. Nach Abkuppeln der Sattelzugmaschine steht der Sattelanhänger auf seinen Rädern und den ausgefahrenen Stützwinden. Im zweiten Zustand ist der Sattelanhänger ausreichend gegen Längs-, Quer- und vertikale Verschiebung gesichert mit dem Transportfahrzeug verbunden, so dass das Transportfahrzeug den Befehl

zur Abfahrt erhalten kann. Zwischen diesen Zuständen liegt der Umschlag, der sich in Lastaufnahmeprozess und Ladungssicherungsprozess unterteilen lässt.

Die Entwicklung eines Lastaufnahmekonzepts ist nur unter Berücksichtigung der jeweils mit dem untersuchten Konzept möglichen Umschlagsstrategie sinnvoll. Daher werden im Folgenden zunächst verschiedene Strategien zum universellen Umschlag von Sattelanhängern vorgestellt.

Sattelanhänger sind im Allgemeinen nicht für den vertikalen Umschlag vorbereitet. In speziellen, kranbaren Ausführungen sind Greifkanten vorgesehen, die entsprechend dem Umschlag von Wechselbrücken (vgl. Abbildung 6) als Aufnahmepunkte für mit Greifarmen ausgestattete Spreader dienen. Um beim Transport von Sattelanhängern auf die Voraussetzung dieser optionalen Ausstattung verzichten zu können, muss eine Vorrichtung zur Adaption der Schnittstellen zwischen Sattelanhänger und Umschlaggerät vorgesehen werden.

Als nutzbare Schnittstellen zur Aufnahme der Sattelanhänger für den Umschlag, die Verladung und den Transport kommen letztlich drei Einrichtungen in Betracht, über die jeder Sattelanhänger standardmäßig verfügt. Die Verbindung zur Sattelzugmaschine erfolgt über den Königszapfen, der horizontale Kräfte sowohl in Längs- als auch in Querrichtung übertragen kann und an dem sich der Sattelanhänger vertikal auf der Sattelkupplung abstützt. Die Stützwinden verhindern, dass der Sattelanhänger im abgekuppelten Zustand um die Querachse kippt und ermöglichen seine Beladung, ohne dass eine Zugmaschine zwingend vorhanden sein muss. Die dritte Schnittstelle stellen die Räder des im Normalfall ein- bis dreiachsigen Fahrwerks dar.

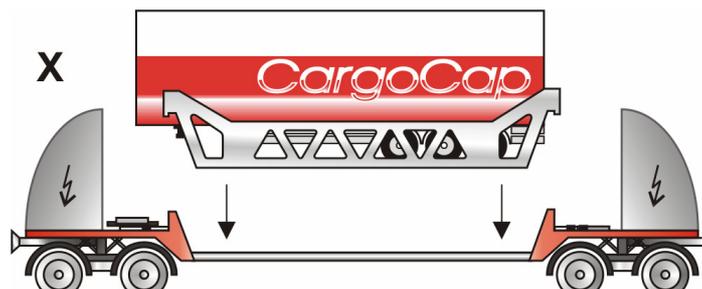


Abbildung 11 Umschlagsstrategie X – vertikaler Umschlag

Abbildung 11 zeigt ein Lademodul, das in Längsrichtung befahrbar ist und vertikal auf das Transportfahrzeug aufgesetzt wird. Der Sattelanhänger muss nach Abkuppeln der Sattelzugmaschine im Lademodul gesichert werden. Während die Feststellbremse des Sattelanhängers zur Sicherung in Längsrichtung und die ausgefahrenen Stützwinden als vertikale Abstützung für den Umschlag ausreichen können, ist zur Aufnahme der während des Transports auftretenden Kräfte, eine zusätzliche Abstützung über den Königszapfen

vorzusehen. Dazu bietet sich eine angepasste Sattelkupplung an, die, nachdem das Lademodul auf dem Fahrzeug abgesetzt und arretiert ist, den Sattelanhänger am Königszapfen greift und vertikal abdrückt (siehe Skizze in Abbildung 12). Um die Ausstattung der Lademodule möglichst gering zu halten, ist es sinnvoll, diese Aufnahme am Transportfahrzeug vorzusehen. Die Vermeidung seitlicher Bewegungen des Sattelanhängers während der Fahrt ist beispielsweise durch Spurschienen oder Radmulden in der Ladefläche des Lademoduls realisierbar.

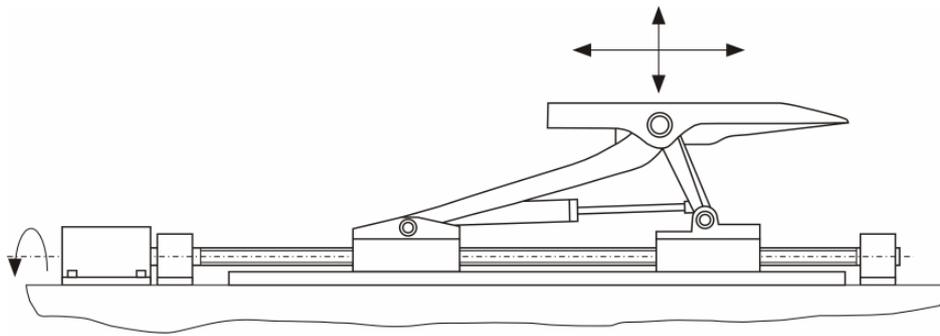


Abbildung 12 einstellbare Sattelkupplung

Zur Unterstützung eines geringen Eigengewichts des Lademoduls ermöglicht eine geschickte Lasteinleitung die Minimierung der Biegebeanspruchung des Lademoduls. Das Fahrwerk eines Sattelanhängers überträgt den größeren Teil der vertikalen Last. Folglich ist es sinnvoll, den Sattelanhänger auf dem Lademodul so zu positionieren, dass der Abstand zwischen seinem Fahrwerk und dem fahrwerksseitigen Auflagerpunkt des Lademoduls am Transportfahrzeug so klein als möglich ist. Dies wird durch die in Längsrichtung verschiebbliche Aufnahme des Königszapfens (vgl. Abbildung 12) auch bei unterschiedlichen Längen von Sattelanhängern gewährleistet.

Als Schnittstelle des vertikal zu verladenden Lademoduls zum Umschlaggerät bietet sich die Verwendung eines ohnehin erforderlichen Systems, also entweder Twistlocks zum Containerumschlag oder Greifarme für Wechselbehälter an.

Ein System, dem das Prinzip des horizontalen Umschlags von Sattelanhängern zugrunde liegt, ist das Konzept CargoBeamer® (vgl. [CargoBeamer2003]). Als horizontale Umschlagssysteme werden Systeme bezeichnet, bei denen die Hauptbewegung des Umschlags quer zur Fahrtrichtung erfolgt. Ähnlich dem in Abbildung 13 skizzierten Fahrzeugkonzept besteht ein CargoBeamer®-Fahrzeug aus einem auf zwei Gleisfahrgestellen aufgesetzten, einfach strukturierten Tragwerk, auf das ein Waggonaufsatz seitlich verschoben, anschließend abgesenkt und arretiert wird.

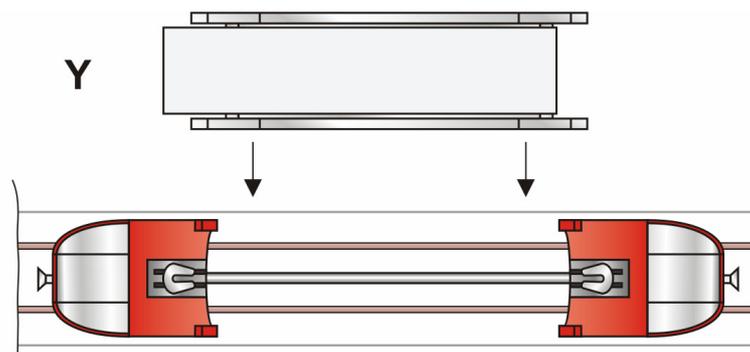


Abbildung 13 Umschlagstrategie Y – horizontaler Umschlag

Das Konzept, das als zukunftssträchtige Alternative für den schienengebundenen Transport von Sattelanhängern entwickelt worden ist, zeichnet sich durch die Möglichkeit des parallelen Umschlags mehrerer Sattelanhänger aus (vgl. Kapitel 1). Der Transport von Containern und Wechselbehältern ist nach [CargoBeamer2003] mit diesem System ebenfalls möglich, was eine entsprechende Ausstattung der Waggonaufsätze mit Twistlocks oder ähnlichen Sicherungsvorrichtungen voraussetzt.

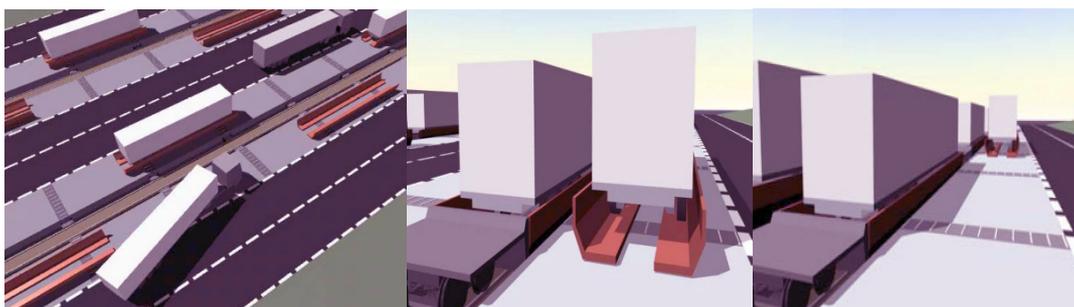


Abbildung 14 CargoBeamer®, entnommen aus [CargoBeamer2003]

Die Einrichtung der Umschlagsstelle besteht aus seitlich der Gleise angebrachten hydraulischen Hubvorrichtungen und Rollbahnen zur seitlichen Verschiebung der Waggonaufsätze. Abbildung 15 gibt eine Schnittdarstellung des Verladevorgangs beim Systems CargoBeamer®.

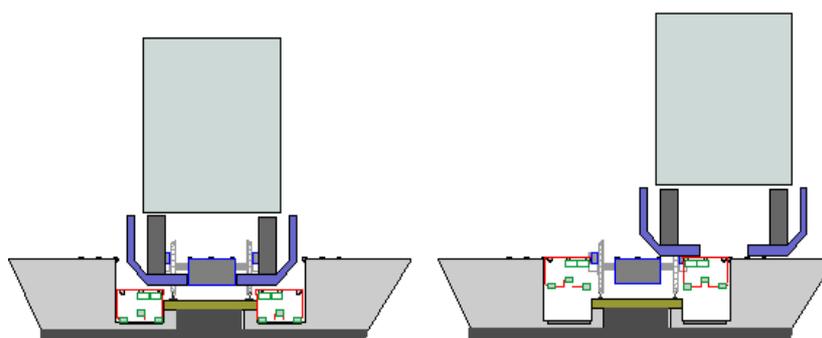


Abbildung 15 „Verladevorgang im Schnitt“, [CargoBeamer2002]

Bezüglich der Gestalt des Waggonaufsatzes ergibt sich der Vorteil, dass er sich während des gesamten Umschlagsvorgangs auf die Rollbahnen abstützt. Somit ist einzig die Biegebeanspruchung im verladenen Zustand auslegungsrelevant, die obiger Erläuterung entsprechend durch die lasteinleitungsgerechte Gestaltung des Waggonaufsatzes positiv beeinflusst wird.

Abbildung 16 zeigt eine dritte, ebenfalls als horizontal zu charakterisierende Umschlagsstrategie, die auf der Drehung der Ladefläche um die Vertikale basiert.

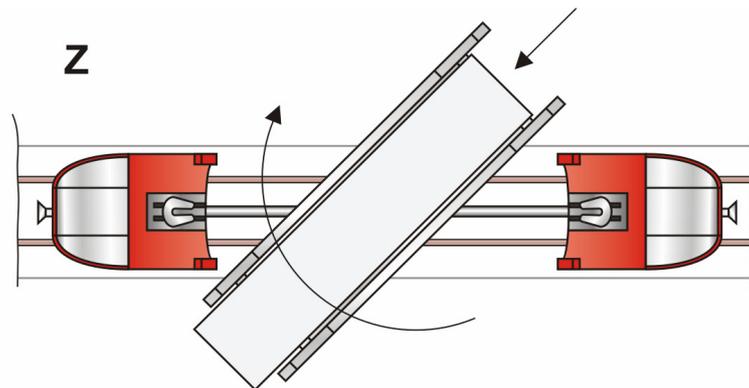


Abbildung 16 Umschlagsstrategie Z – horizontaler Umschlag durch Drehen

Dieses Prinzip findet im System Modalohr[®] des französischen Waggonherstellers Lohr seine Realisierung. Die paarweise verbundenen Tragwagen (Abbildung 17 zeigt die Hälfte eines sechssachsigen Doppelwagens) sind als flache, Gelenk-Taschenwagen ausgestaltet, die jeweils über eine mittig angeordnete Drehachse verfügen. Die Ladefläche ist über die Drehachse fest mit dem Fahrgestell verbunden.

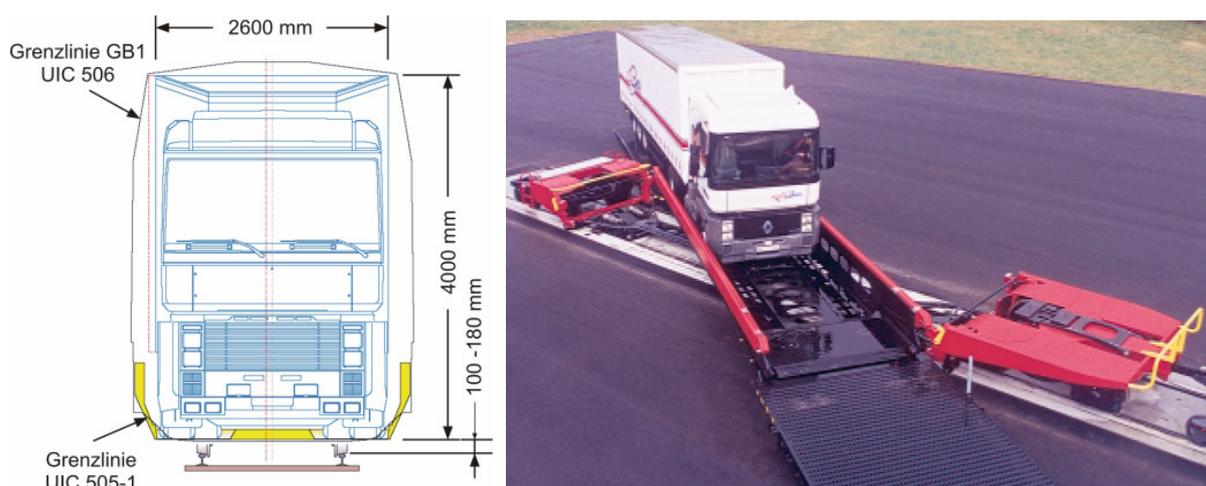


Abbildung 17 Grenzlinie, Tragwagen und Umschlag – System [Modalohr2003]

An der Umschlagsstelle hebt, nachdem die Verriegelung zum Fahrgestell manuell gelöst ist, eine zwischen den Schienen angebrachte Hub- und Drehvorrichtung die Ladefläche an

und dreht sie aus der Fahrtrichtung. Die Verladung der Sattelanhänger erfolgt durch die eigene Sattelzugmaschine, die, wenn sich der Sattelanhänger in der richtigen Position befindet abgekoppelt wird. Die Ladefläche wird nun in Fahrstellung gedreht, abgesenkt und verriegelt.

Zur Aufnahme der während der Fahrt auf den Sattelanhänger wirkenden Längs- und Querkräfte verfügt der Tragwagen über eine seitliche Führung der Räder und eine einstellbare Vorrichtung zur Fixierung des Königszapfens. Zur Abstützung der vertikalen Kräfte nutzt das System Modalohr die Stützwinden und Achsen, der Königszapfen dient ausschließlich der horizontalen Sicherung.

Die Tragwagen sind so konzipiert, dass der Querschnitt auch bei Beladung mit Sattelanhängern mit der Höhe von 4m nicht über die von internationalen Eisenbahnverband UIC im Datenblatt UIC 506 beschriebene Grenzlinie GB 1 hinausragt. Diese auf einigen Strecken des französischen Eisenbahnnetzes gültige Grenzlinie besitzt eine andere Form als die in Abbildung 8 dargestellte Grenzlinie G2 nach [EBO] und erlaubt eine größere Eckhöhe der Fahrzeuge. Die Höhe der Ladefläche über der Schienenoberkante ist mit 100 – 180mm sehr gering. Die Oberkante des Sattelanhängers liegt somit maximal 4180mm über der Schiene. Eine Anwendung dieses Lastaufnahmesystems ist bezüglich des dieser Studie zugrunde gelegten Fahrrohrquerschnitts jedoch nicht problematisch.

Für den Transport von Containern und Wechselbehältern sind die Tragwagen des Systems Modalohr nicht ausgestattet. Eine entsprechende Anpassung der Ladefläche ist jedoch mit vertretbarem Aufwand möglich.

Vorteil dieses Systems ist die Möglichkeit der parallelen Verladung. Die Ausrüstung der Umschlagsstellen besteht lediglich aus der Hub- und Drehvorrichtung und Rampen zum Befahren der Ladefläche. Der Platzbedarf je Umschlagsstelle ist größer als bei der Verladung durch seitliches Verschieben.

Bei der Wahl der Umschlagsstrategie muss die Lage der Energieversorgung des Fahrzeugs berücksichtigt werden. Eine seitlich angeordnete Stromschiene muss, soll der Umschlag entsprechend Abbildung 16 durch Drehung der Ladefläche erfolgen, so angebracht werden, dass sie zum Zwecke der Verladung den Raum seitlich des Fahrzeugs freigibt. Im Falle des vertikalen Umschlags muss der Raum oberhalb des Fahrzeugs während des Verladeprozesses frei sein.

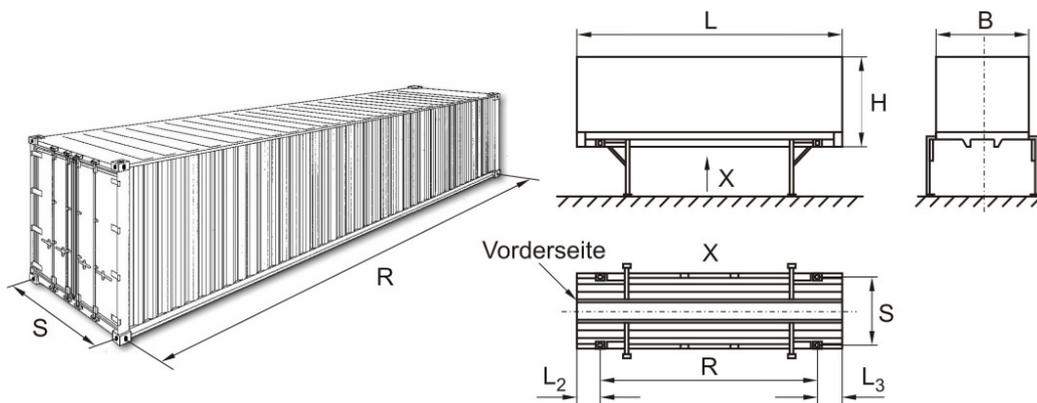
Container und Wechselbehälter:

Wie eingangs dieses Kapitels bereits erwähnt, stellt die Aufnahme von Containern und Wechselbehältern schon aufgrund ihrer Entwicklung für die Anwendung im kombinierten Verkehr erfüllbare Anforderungen an das Lastaufnahmekonzept. Sowohl Umschlagssysteme als auch Elemente zur Ladungssicherung (vgl. Abbildung 5 bzw. Abbildung 6) sind

in zahlreichen unterschiedlichen Ausführungen am Markt verfügbar. Je nach Anzahl der Einheiten pro Transportfahrzeug führen diese Ladungsformen aufgrund ihres zulässigen Gesamtgewichts allerdings zu einer höheren Beanspruchung der Tragstruktur als der Transport von Sattelanhängern. Um dies abzuschätzen wird im Folgenden ein Ladeschema entwickelt.

Die Anschlussmaße der Container und Wechselbehälter sind durch die in den verschiedenen Normen festgelegten Positionen der Eckbeschläge bekannt.

Tabelle 6 Abmessungen und Anschlussmaße – Container und Wechselbehälter



[mm]	Container 20'	Container 40'	Container 45'	Klasse A	Klasse C	B9
L_{\max}	6058	12192	13716	13600	7820	9125
B_{\max}	2438			2600		2500
H_{\max}	2591	2896		2670	2670	2600
R	5853	11985	<i>13509</i>	11985	5853	8918
S	2259		<i>2259</i>	2259		2259
L_2	<i>105,5</i>	<i>103,5</i>		max. 900	max. 983,5	<i>103,5</i>
L_3				max. 715		

Die Größen R und S sind, soweit sie nicht kursiv gedruckt sind, aus den für die Ladungsformen gegebenen Normen entnommen.

Da, wie in Kapitel 3.1.1 bereits erwähnt, je Wechselbehälterklasse drei unterschiedliche Gesamtlängen erhältlich sind, sind für die längsseitigen Abstände L_2 und L_3 der Stirnseiten von den Eckbeschlägen die jeweils größten Werte aus der entsprechenden Norm angegeben. Da die Greifpunkte bei Containern an den Ecken angebracht sind, existieren in den Normen für die Überhänge keine Angaben. Die in Tabelle 6 angegebenen Werte entsprechen der halben Differenz zwischen der Nennlänge der entsprechenden Containerart

und ihrem Wert R. Bisher ist keine Norm verfügbar, die die Abmessungen und Massen eines 45'-Containers definiert. Das Maß S ist für diese Art ebenfalls mit dem Wert 2259mm bekannt. Unter der Annahme, dass L_2 bzw. L_3 dem für 40'-Containern angegebenen Wert entspricht, beträgt das Maß R hier 13509mm.

Aus den in Tabelle 6 aufgeführten Abmessungen und Anschlussmaßen der Ladungsformen Container und Wechselbehälter und auf Basis der zur Verladung von Sattelanhängern erforderlichen Ladeflächenlänge kann ein Ladeschema entworfen werden, das die Grundlage zur Abschätzung der Beanspruchung der Tragstruktur bildet.

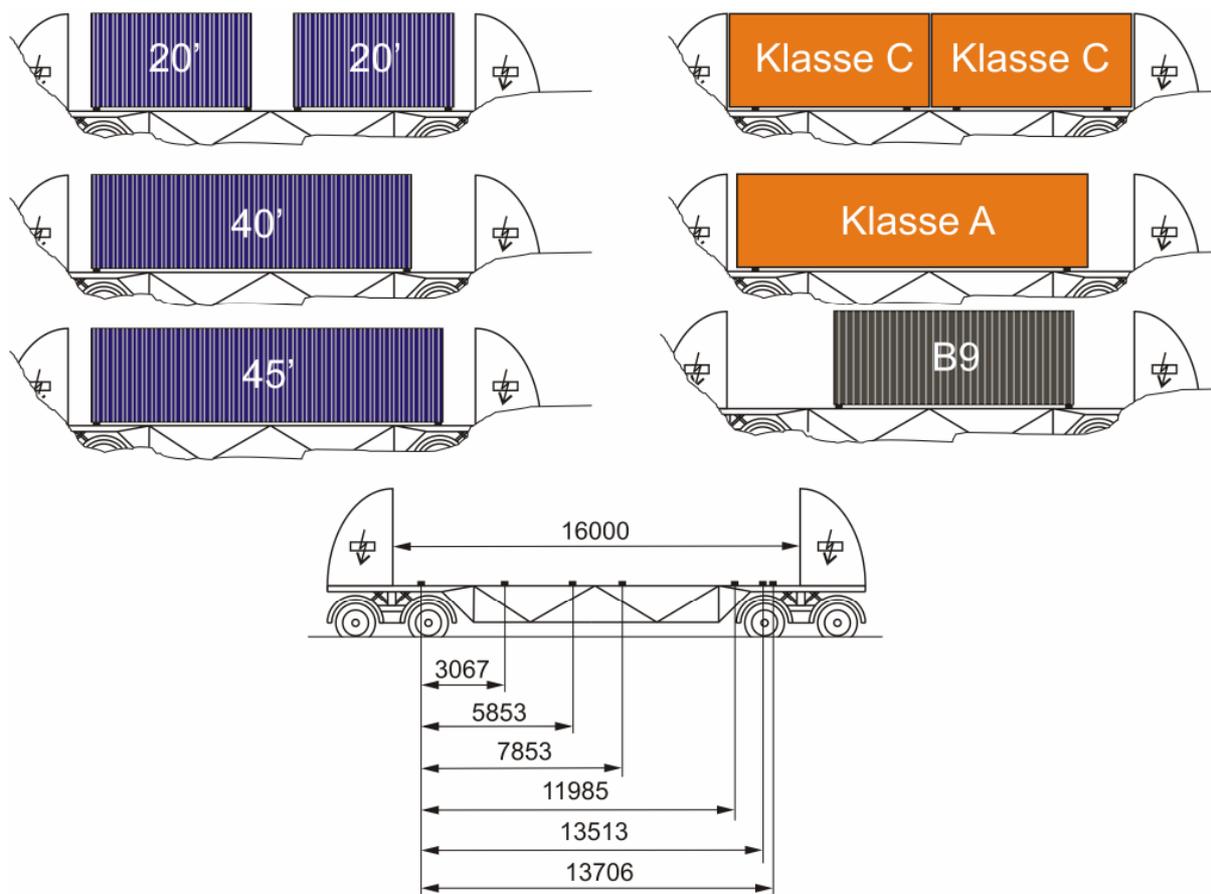


Abbildung 18 Ladeschema – Container und Wechselbehälter

Wie in Abbildung 18 zu sehen, ist die für die Länge der Ladefläche ausschlaggebende Ladungsform der Wechselbehälter der Klasse C mit ihrer maximalen Gesamtlänge von 7820mm. Eine Ladelänge von 16m erlaubt den Transport zweier solcher Wechselbehälter und darüber hinaus auch den Transport eines Sattelanhängers, dessen maximale Länge ca. 14m beträgt.

Die Positionen der Twistlocks können ebenfalls aus dem Ladeschema abgeleitet werden. Da 20'-Container und Wechselbehälter Klasse C identische Anschlussmaße besitzen, können sie durch dieselben Twistlocks gesichert werden. Gleiches gilt für 40'-Container und

Wechselbehälter der Klasse A, wobei lediglich eine Twistlockposition der kleinen Ladungsformen verwendet werden kann. Mit zwei weiteren Twistlockpositionen zur Sicherung eines 45'-Container und eines Binnencontainers der Klasse B9 ergibt sich die erforderliche Gesamtzahl der Sicherungspunkte in Längsrichtung zu sieben. Die Abstände der Twistlocks sind ebenfalls in Abbildung 18 angegeben.

Kapitel 3.1.2 beschreibt die Anforderungen bezüglich des Bauraums in Form der Grenzlinie G2. Sie umrandet den Querschnitt, über den das Transportfahrzeug inklusive Ladung nicht hinausragen darf. Aus den Querschnittsmaßen der Ladungsformen Container und Wechselbehälter und der in Anlage 8 der [EBO] qualitativ beschriebenen Grenzlinie G2 kann die Höhe der Ladefläche über der Schienenoberkante für den Transport von Containern und Wechselbehälter jeglicher Ausprägungen auf maximal 1248mm berechnet werden. Dieses Maß lässt genügend Raum zur Konstruktion eines Fahrzeugs mit durchgehender Ladefläche, wie in Abbildung 18 skizziert. Als Vergleichswert kann die Höhe der Ladefläche eines zum Containertransport üblichen Tragwagens mit 1155mm über Schienenoberkante angegeben werden.

Die größte Beanspruchung für die tragende Struktur resultiert aus der Beladung mit zwei 20'-Containern. Unter voller Auslastung des Ladevermögens beträgt ihr Gesamtgewicht maximal 30,48t. Daraus ergeben sich bei vereinfachter Betrachtung und der Annahme symmetrischer Lastverteilung an den vier Ladungssicherungspunkten jedes Containers Auflasten von ca. 75kN.

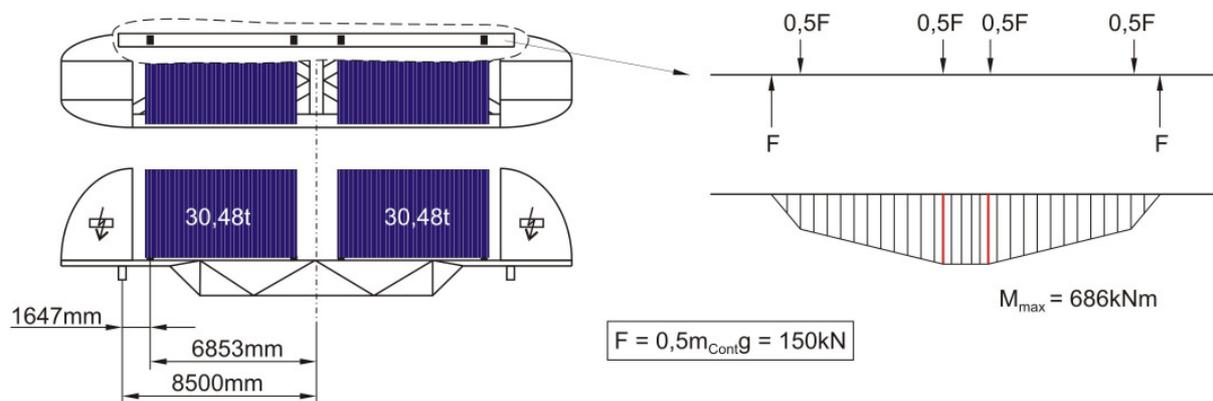


Abbildung 19 Abschätzung der Biegebeanspruchung im Tragwerk

Aus der Betrachtung eines Längsträgers des Tragwerks folgt bei den überschlägig angenommenen Abmessungen (vgl. Abbildung 19) und gleichmäßiger Lastverteilung ein maximales Biegemoment von 686kNm.

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen hat „Richtlinien für das Packen von Ladung [...] in oder auf Beförderungseinheiten (CTUs) bei Beförderung mit

allen Verkehrsmitteln zu Wasser und zu Lande“ definiert [Froböse1999]. Danach muss der „Schwerpunkt der gepackten Ladung [...] auf oder in unmittelbarer Nähe der Längsmittellinie der CTU und unter der halben Höhe des Laderaums der CTU liegen.“ „Wenn Güter mit verschiedenen Gewichten verladen werden oder wenn der Raum des Containers nicht voll genutzt wird [...], müssen die Pack- und Sicherungsmaßnahmen so durchgeführt werden, daß der Gewichtsschwerpunkt der Ladung etwa auf der halben Länge des Containers liegt. [...] Keinesfalls darf mehr als 60% des Ladungsgewichts in weniger als der halben Länge, von einem Ende gemessen, konzentriert sein.“ [ebd.] Nach dieser Forderung beträgt der maximale Abstand des Schwerpunkts zur Mitte des Containers bei ungleichmäßiger Beladung bis ca. 303mm in Längsrichtung. Somit kann die Auflast an den angenommenen Lasteinleitungspunkten in einem Bereich von $\pm 10\%$ variieren. Im Falle der ungünstigsten Beladung, wenn für beide Containern die hohen Auflasten in Nähe der Fahrzeugmitte liegen, führt dies bei den vorliegenden Abmessungen zu einer Erhöhung des Biegemoments und der -spannung im Träger um ebenfalls 10%.

Eine überschlägige Dimensionierung des in Abbildung 19 freigeschnittenen Balkens zeigt, dass ein Breitflanschträger der Größe IPB 500 auch die aus ungleichmäßiger Beladung resultierende Biegespannung ertragen kann. Folglich lässt der gegebene Bauraum die Konstruktion eines beanspruchungsgerechten Tragwerks zu. Darüber hinaus ist je nach Wahl des Antriebskonzepts die Annahme geringerer Lasten für die Auslegung des Tragwerks möglich.

4.2.2 Antriebskonzept

Der Dimensionierung des Fahrtriebs sind systembedingt zwei Grenzen gesetzt. Grundsätzlich besteht die Forderung, dass das Transportfahrzeug auf der Strecke mit konstanter Geschwindigkeit fahren soll. Folglich muss an einem Streckenabschnitt maximaler Steigung die zur Überwindung der Fahrwiderstände erforderliche Zugkraft übertragen werden können und die installierte Leistung muss ausreichen, um das entsprechende Antriebsmoment bei Nenngeschwindigkeit zu erzeugen. Darüber hinaus sollte, für den Fall, dass ein Fahrzeug an der maximalen Steigung betriebsbedingt zum Stehen kommt, die Möglichkeit erneuten Anfahrens bestehen. Die geforderte durchschnittliche Beschleunigung ist für diesen Betriebsfall zu realisieren.

Der Fahrwiderstand (vgl. Anhang 10.2) setzt sich aus Beschleunigungs-, Steigungs-, Roll-, Lagerreibungs-, Bogen- und Luftwiderstand zusammen. Die Teilwiderstände sind mit Ausnahme des Luftwiderstands prinzipiell masseabhängig. Der Beschleunigungswiderstand ergibt sich aus der zu beschleunigenden Masse und der gewählten Beschleunigung. Der Steigungswiderstand berücksichtigt die Hangabtriebskraft, die eine Masse an einer Steigung erfährt. Der Berechnung dieser beiden Fahrwiderstände muss die maximal zulässige Gesamtmasse zugrunde gelegt werden. Der Laufwiderstand setzt sich aus Roll-

und Lagerreibungswiderstand zusammen, die die zur Kompensation der Verluste durch die Rollreibung zwischen Rad und Schiene bzw. die Reibung in der Radsatzlagerung erforderliche äquivalente Zugkraft angeben. Der Bogenwiderstand berücksichtigt das aufgrund der Gleichheit der Drehzahl von kurveninnerem und -äußerem Rad eines starren Radsatzes bei Kurvenfahrt auftretende Längs- und Quergleiten. Die im Anhang (vgl. Kapitel 10.2) angesetzte Formel zur Berechnung des Bogenwiderstands entspricht der von der Deutschen Bahn verwendeten Gleichung.

Der Luftwiderstand, der auf ein Fahrzeug wirkt, geht von der vor ihm gestauten Luft aus. Er wächst proportional mit der angeströmten Fläche, deren Form einen bestimmten c_W -Wert vorgibt, und quadratisch mit der Anströmgeschwindigkeit. Bei konstanter Fahrt mit einer Geschwindigkeit von 80km/h, wie sie dem Fahrzeugkonzept zugrunde liegt, im Freien auf ebener Strecke nimmt der Luftwiderstand bereits einen großen Anteil am Fahrwiderstand ein.

Fährt ein Fahrzeug zusätzlich in einen Tunnel, so taucht es in eine „stehende“ Luftsäule ein. Es entsteht eine Druckwelle, die den Tunnel mit Schallgeschwindigkeit durchläuft und vor dem Fahrzeug als Zone erhöhten Druckes wirkt. Die anschließende Reflektion der Druckwelle am Tunnelende führt zum Abbau der Druckerhöhung vor dem Fahrzeug. Gleichzeitig beschleunigt das Fahrzeug die Luftsäule im Tunnel, wobei sich eine Ringströmung zwischen Fahrzeugaußenwand und Innenwand des Tunnels ausbildet.

Die verstärkende Wirkung des Tunnels auf den Luftwiderstand steht in engem Zusammenhang mit dem als Versperrungsmaß bezeichneten Verhältnis zwischen der Frontfläche des Fahrzeugs und der Querschnittsfläche des Tunnels. Nach [Gaillard1973] kann der „Luftwiderstand des Zuges [...] in zweispurigen Tunnels bis zu 2 mal grösser werden“. [Hucho1973] beschreibt Modellversuche, die durch Tunnel fahrende Busse abbildeten. Aufgrund des vergleichsweise hohen Versperrungsmaßes von 0,54 ergaben die Messungen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 50km/h und einem 2200m langen Tunnel einen bis zu sechsfach höheren Luftwiderstand als auf freier Strecke. Darüber hinaus zeigen die Versuche, dass „bei Bus-Pulkbildung Verbesserungen des Widerstands um bis zu 50% möglich sind.“ [Hucho1973]

Unter den der Berechnung zugrunde gelegten Annahmen dominiert ein um den Faktor sechs gesteigerter Luftwiderstand den Fahrwiderstand bei konstanter Fahrt mit 80km/h in der Ebene mit ca. 90%. Hinsichtlich der erforderlichen Antriebsleistung des Fahrzeugs wird dieser für den Nennbetrieb sehr hohe Anteil durch den weit höheren Einfluss des Steigungs- und Beschleunigungswiderstands auf die Antriebsleistung relativiert, da bezogen auf den maximalen Fahrwiderstand (Beschleunigen an der maximalen Steigung) sein maximaler Anteil nur ca. 15% beträgt. Der verringernde Einfluss der Kolonnenfahrt auf den Luftwiderstand, führt im durchschnittlichen Nennbetrieb bei dem zugrunde liegenden

Betriebskonzept (mittlere Fahrzeuganzahl je Fahrzeugverband, Fahrzeugverbände bedienen ausschließlich Punkt-zu-Punkt Relationen) zu einer Verringerung des Energiebedarfs, die allerdings schwer quantifizierbar ist. Da das grundlegende Fahrzeugkonzept, dass auf autonomen Transporteinheiten beruht, die den flexiblen Transport auch geringer oder zeitkritischer Gütermengen mit einzelnen Fahrzeugen gewährleisten, nicht grundsätzlich von der Zugbildung ausgeht, findet dieser Einfluss für die Bewertung verschiedener Antriebskonzepte keine Berücksichtigung.

Die Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Versperrungsmaß und Luftwiderstand zeigt, dass die Verringerung des Fahrrohrquerschnitts eine exponentiale Steigerung des Anteils des Luftwiderstands am Fahrwiderstand auch einzelner Fahrzeuge und damit des Energieverbrauchs vor allem im Nennbetrieb hervorruft. Aus Abbildung 10 geht hervor, dass die Höhe des Fahrzeugs 5000mm betragen darf. Somit besitzt das Transportfahrzeug, wenn seine Breite wie maximal möglich 3290mm entspricht, eine Stirnfläche von $16,45\text{m}^2$. Eine Verringerung des Fahrrohrquerschnitts ausgehend von einem Versperrungsmaß von 0,5 bei dem von bautechnischer Seite angesetzten Fahrrohrquerschnitt von $32,9\text{m}^2$ um 17% führt nach einer Abschätzung auf Basis der in [prEN 14067-5:2003] gegebenen Beziehung zwischen Versperrungsmaß und Tunnelfaktor zu einem um ca. 110% höheren Energiebedarf. Das Projektteam beschloss daher eine Festlegung des maximalen Versperrungsmaßes auf 0,5. Nach oben erwähnter Abschätzung, die auf den in [prEN 14067-5:2003] gegebenen Beziehungen beruht, kann der Einfluss der Tunnelfahrt auf den Luftwiderstand bei einem Versperrungsmaß von 0,5 unter Berücksichtigung der relativen Ähnlichkeit zu den oben erwähnten Versuchen für die Antriebskonzeption mit einem Tunnelfaktor von 4,3 angenommen werden.

Anhang 10.2 zeigt eine rechnergestützte Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Fahrdynamik, Streckenparametern, Massen, Zugkraft und Leistung. Sie dient als Werkzeug, um die physikalischen Eigenschaften in die Antriebskonzeption einzubeziehen und die Konzepte und ihre technische Machbarkeit auf dieser Basis gegeneinander vergleichen zu können.

Wie bereits erwähnt, ist die Fahrdynamik begrenzt durch die maximal übertragbare Zugkraft. Sie ergibt sich aus der vertikal auf die Schiene wirkenden Kraft und den für die Reibpartner Rad und Schiene angenommenen Haftreibungsbeiwert von $\mu = 0,14$. Die Zugkraft ist die Summe aller Fahrwiderstände und somit im Wesentlichen von den Parametern Masse, maximale Streckensteigung, Beschleunigung und Geschwindigkeit abhängig. Alle weiteren Parameter der Berechnung (c_w -Wert und Stirnfläche des Fahrzeugs, Rad- und Lagerradien, Reibwerte, minimaler Kurvenradius) sind einmalig ermittelt, vorgegeben und in der gesamten Konzeptphase konstant gehalten.

Bei vorgegebener zulässiger Gesamtmasse und der maximalen Streckensteigung, kann nun eine funktionale Beschreibung der Abhängigkeit der erforderlichen Zugkraft Z_{erf} von der Geschwindigkeit v und der Beschleunigung \dot{v} (vgl. Abbildung 20) hergeleitet werden.

Das Gleichsetzen dieser Funktion mit der maximal übertragbaren Zugkraft und Auflösen nach der Beschleunigung führt zu einem Zusammenhang, der die maximal mögliche Beschleunigung \dot{v} einer zugrunde gelegten Masse m unter den bei einer Geschwindigkeit v herrschenden Fahrwiderständen begrenzt durch die übertragbare Zugkraft Z_{grenz} beschreibt (in Abbildung 20 erkennbar als Schnittlinie der schrägen Fläche mit der Ebene $Z_{erf} = Z_{grenz} \approx 100000N$).

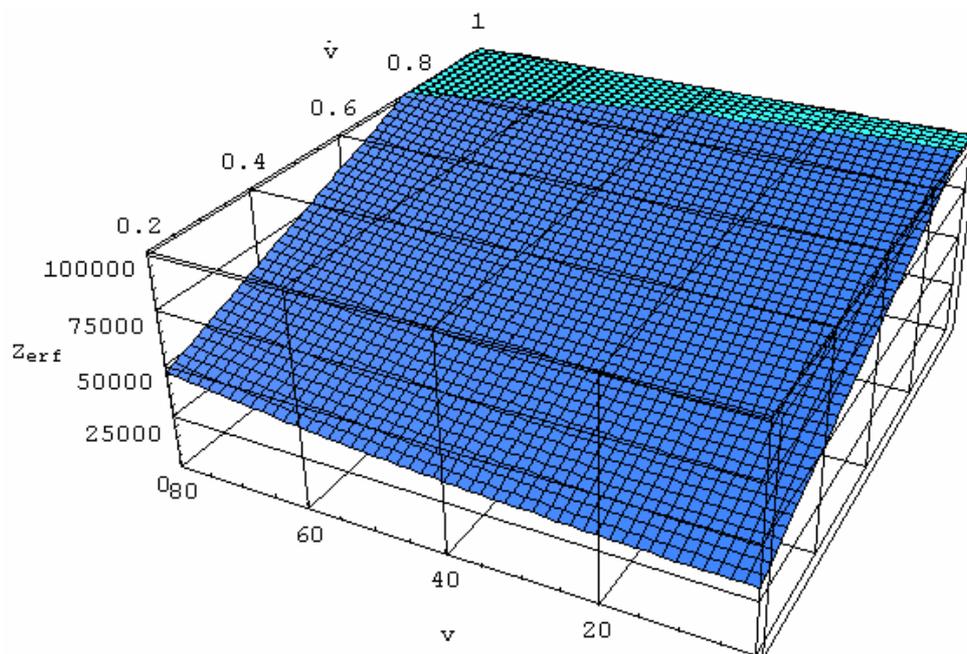


Abbildung 20 Zugkraft in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Beschleunigung, vertikal begrenzt durch maximal übertragbare Zugkraft (exemplarisch)

Die erforderliche Leistung kann ebenfalls in Form einer von den vier eben aufgezählten Parametern abhängigen Funktion dargestellt werden. Entsprechend obiger Vorgehensweise entsteht eine funktionale Abhängigkeit der erforderlichen Leistung $P_{mot.erf}$ von der Geschwindigkeit v und der Beschleunigung \dot{v} .

Auch hier kann durch Gleichsetzen der Funktion mit einer gewählten Leistung eine Abhängigkeit der Beschleunigung von der Geschwindigkeit hergestellt werden. Die erhaltene Beziehung gibt die maximale mögliche Beschleunigung \dot{v} einer zugrunde gelegten Masse m unter den bei einer Geschwindigkeit v herrschenden Fahrwiderständen auf Basis der

„installierten“ Leistung⁵ (vgl. Abbildung 21 Schnittlinie der Fläche mit der Ebene $P_{mot,erf} = P_{mot,gew} = 800kW$).

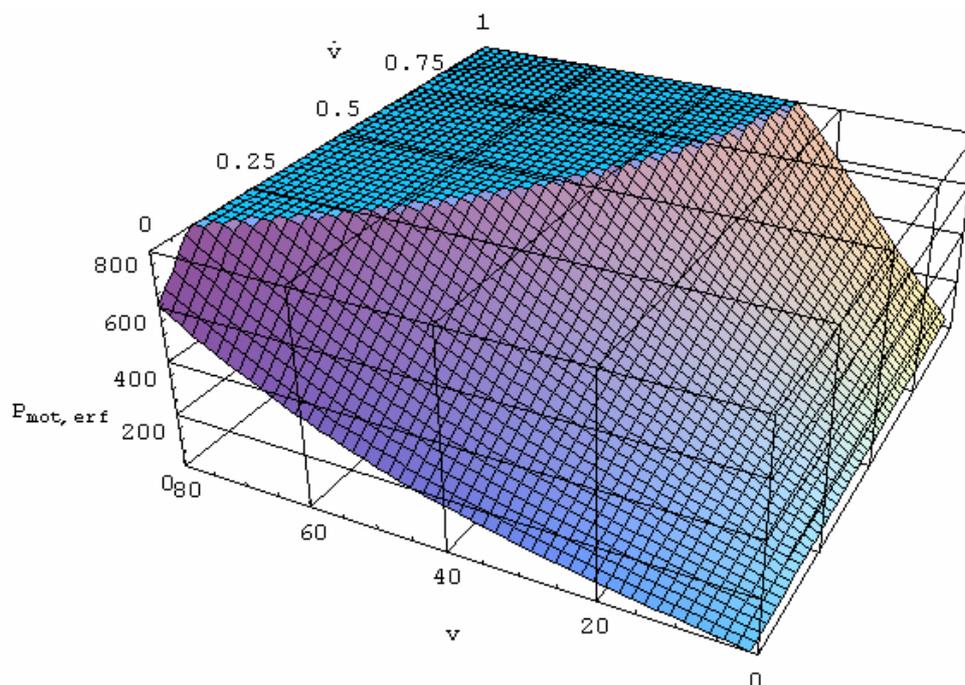


Abbildung 21 Leistung in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Beschleunigung, vertikal begrenzt durch installierte Leistung (exemplarisch)

Aus der Überlagerung der beiden Funktionen $\dot{v}(v)$ im Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 80km/h folgt die in Abbildung 22 gezeigte Begrenzungslinie der Beschleunigung. Sie zeigt auf, dass im Bereich geringer Geschwindigkeit die Begrenzung der erreichbaren Beschleunigung durch die übertragbare Zugkraft begründet ist. Ab einer als Schnittpunkt der Kurven erkennbaren Geschwindigkeit bestimmt der geschwindigkeitsabhängige Luftwiderstand, der die zum Beschleunigen verfügbare Leistungsreserve zunehmend verringert, das maximale Beschleunigungsvermögen.

Die im Bereich von 0 bis 80km/h von den beiden Kurven und der Hochachse eingeschlossene Fläche kann durch abschnittsweise Integration bestimmt werden. Die Division des erhaltenen Wertes durch die Integrationsbreite (80km/h) führt zu einer mittleren Beschleunigung, die mit dem zugrunde gelegten Konzept erreicht werden kann.

⁵ Der Verwendung des Begriffs „installierte“ Leistung ist kritisch anzumerken, dass die erläuterte Berechnung nicht die Charakteristik des letztendlich verwendeten Motors berücksichtigt. Die Berechnung geht davon aus, dass der Antrieb die erforderliche Leistung in jeder Phase des Beschleunigungsvorgangs zur Verfügung stellt, was im Bereich bis ca. 30km/h somit ein konstantes Anfahrmoment und von ca. 30 – 80 km/h eine konstante Leistung voraussetzt.

Die wiederholte Durchführung der gesamten Berechnung mit einem Steigungswinkel von 0° ergibt einen Wert für die mögliche mittlere Beschleunigung in der Ebene.

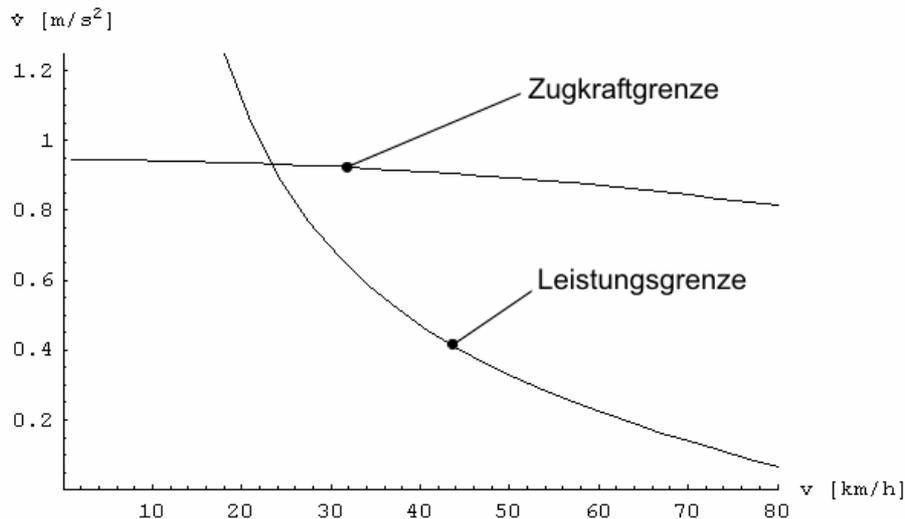


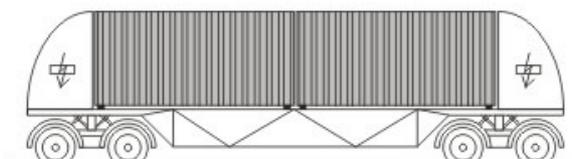
Abbildung 22 maximal mögliche Beschleunigung in Abhängigkeit von der Fahrzeugschwindigkeit

Für die Auslegung der Antriebsleistung eines Fahrzeugs sind somit grundlegend die zu bewegenden Massen, die sich aus dem Eigengewicht des Fahrzeugs und der Zuladung zusammensetzen, ausschlaggebend. Wie in den Anforderungen ersichtlich, reicht die zul. Gesamtmasse der Ladungsformen von 16t (Wechselbehälter Klasse C) über 30,48t und 34,4t (Container 20' bzw. 40') bis 39t (Sattelanhänger).

Der Bestimmung des Leergewichts der im Antriebskonzept untersuchten Fahrzeuge liegen abgeschätzte Massen einzelner Komponenten zugrunde. Das Leergewicht eines nicht angetriebenen Containertragwagens der DB mit vier Radsätzen, für den nach Angaben eines Herstellers ein Stückpreis von ca. € 80.000 anzusetzen ist, beträgt ca. 18-20t. Bei einem Eigengewicht eines nicht angetriebenen Drehgestells (Typ Y25) von 5t ergibt sich eine Masse des Tragrahmens von 8-10t. Die Aufteilung der Kosten nach Drehgestell und Tragrahmen ist mit € 30.000 je Drehgestell und € 20.000 für den Tragrahmen abgeschätzt. Die Annahme einer Masse für die Ausstattung des Fahrzeugs mit Motoren, Umrichter, Transformatoren, Stromabnehmer, Getriebe, etc. ist abhängig von der Leistung. Die in Tabelle 7 angegebenen Massen und Preise für die in die Drehgestelle integrierten Antriebe und die sonstigen Komponenten stellen in Abstimmung mit dem Projektpartner EELE auf Basis von Herstellerkatalogen abgeschätzte Werte dar. Sie sind bewusst hoch angesetzt, da eine Reduzierung der Massen und Preise das Ergebnis der Untersuchung nur positiv beeinflussen kann.

Tabelle 7 Fahrzeugkomponenten – angenommene Massen und Kosten

Komponente	Stufung	Masse	Kosten
Tragrahmen	$m_{\text{Nutz}} = 55\text{t}$	10t	€ 20.000
	$m_{\text{Nutz}} = 39\text{t}$	8t	
Drehgestell	zweiachsig	5t	€ 30.000
Antrieb	400kW	2t	€ 56.000
	350kW	1,7t	€ 45.000
	300kW	1,5t	€ 34.000
Sonstige	$P = 1050\text{kW}$	16	€ 150.000
	$P = 800\text{kW}$	11	€ 100.000
	$P = 600\text{kW}$	9	€ 75.000

Antriebskonzept A:**Abbildung 23** Antriebskonzept A – autonome Transporteinheit

Antriebskonzept A geht von einer autonomen Transporteinheit zum Transport aller relevanten Ladungsformen aus. Die im Fahrzeug installierte Antriebsleistung muss in jedem Fall den Transport aller Ladungsformen bei voller Ausnutzung ihres jeweiligen zulässigen Gesamtgewichts erlauben. Vor dem Hintergrund des im Lastaufnahmekonzept entwickelten Ladeschemas (vgl. Abbildung 18), stellt die Beladungsvariante mit zwei 20'-Containern á 30,48t mit ca. 61t die maximal mögliche Zuladung dar.

Die Ausstattung eines Fahrzeugs mit einer auf diese Nutzlast ausgelegten Antriebsleistung ist jedoch unter den gegebenen Randbedingungen weder möglich noch ökonomisch sinnvoll, wie aus zwei Gründen schnell ersichtlich wird:

Bei einer vom Fahrweg vorgegebenen zulässigen Achslast von 22,5t (vgl. Kapitel 3.1.3: externe Anforderungen zum Fahrweg) und einem angenommen vierachsigen Fahrzeug, ergibt sich ein zulässiges Gesamtgewicht von 90t. Das Leergewicht des Fahrzeugs, das nach Abzug der erforderlichen Nutzlast von 61t verbleibt, beträgt 29t. Diese Masse bietet in Anbetracht des Leergewichts eines nicht angetriebenen Containertragwagens von 18-20t mit 9-11t keine ausreichende Reserve für die vorzusehenden elektrischen Einrichtun-

gen und die Antriebe. Aus der zu Beginn dieses Kapitels beschriebenen Berechnung ergibt sich für dieses Fahrzeugkonzept eine erforderliche Leistung von 800kW. Entsprechend der in Tabelle 7 gegebenen Baugruppenmassen berechnet sich die Masse zu

$$m_{Leer,A} = 10t + 2 \cdot 5t + 2 \cdot 2t + 11t = 35t .$$

Die maximal zur Verfügung stehende Nutzlast beträgt folglich 55t. Das „maximale“ Nutzlast-Totlast-Verhältnis bei Ausnutzung der maximalen Nutzlast liegt bei 1,57.

Ein weiteres Argument gegen die Auslegung der Antriebsleistung auf 55t Nutzlast entsteht aus der oben formulierten Anforderung der guten Antriebsauslastung im Nennbetrieb. Nach einer statistischen Erhebung zum „Güterverkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge“ des [KBA2003] liegt die durchschnittliche Auslastung des Ladevermögens für Behältern und Wechsellaufbauten über sechs Metern bei 37,7% und für Sattelanhänger, deren Sattelzugmaschinen eine Leistung von 258kW und mehr besitzen, bei 69,3%. Für einen 20'-Container beträgt das durchschnittliche Gesamtgewicht damit 11,5t⁶ und für einen Sattelanhänger ca. 26,6t.

Im Nennbetrieb führt die anzunehmende durchschnittliche Beladung der Ladungsformen zu einer geringen Auslastung der für dieses Fahrzeugkonzept maximalen Nutzlast von 61t. Dies resultiert unmittelbar in einer schlechten Antriebsauslastung und einem niedrigen Nutzlast-Totlast-Verhältnis im realen Betrieb.

Antriebskonzept B:

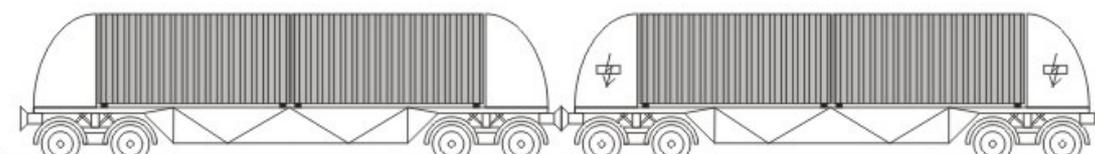


Abbildung 24 Antriebskonzept B – autonome Transporteinheit mit angehängtem Tragwagen

Um die Antriebsauslastung relativ zu Konzept A zu verbessern, bietet es sich an, der beladenen angetriebenen Transporteinheit einen Containertragwagen anzuhängen, der, da er keine Antriebe und elektrischen Einrichtungen besitzt, ein geringeres Eigengewicht aufweist. Ziel ist es, im Vergleich zu zwei autonomen Transporteinheiten nach Konzept A bei durchschnittlicher Beladung der Ladungsformen ein besseres „durchschnittliches“ Nutzlast-Totlast-Verhältnis zu erreichen.

⁶ Annahme: Auslastung des Gesamtgewichts der Behälter $\approx 37,7\%$.

Allerdings reduziert sich unter der Annahme, dass das Leergewicht eines solchen Anhängers 18t beträgt, die maximale Nutzlast des Gespanns verglichen mit der autonomen Transporteinheit, von 55t, auf 37t. Der Bereitstellung zusätzlicher Ladefläche mit dem Ziel, die Antriebsauslastung zu verbessern, steht somit eine bezogen auf die Ladekapazität geringe Nutzlast gegenüber, die große Einschränkungen bezüglich der Ladungskombinationen mit sich bringt. So erlaubt sie beispielsweise weder den Transport von vier durchschnittlich beladenen 20'-Containern (4x11,5t) noch den zweier durchschnittlich beladener Sattelanhänger (2x26,6t).

Des Weiteren zeigt sich für dieses Konzept ein aus dem eben geschilderten Zusammenhang folgendes schlechtes maximales Nutzlast-Totlast-Verhältnis von 0,70 und schlechte Beschleunigungswerte, da die übertragbare Zugkraft aufgrund der geringeren Masse und damit Radlast des angetriebenen Fahrzeugs bei im Vergleich zu Konzept A ähnlicher zu bewegender Masse geringere Werte annimmt.

Eine sich in diesem Fall anbietende Erhöhung der Antriebsleistung bringt das Konzept zurück zu seiner Ausgangssituation, was aus Sicht der Antriebsauslastung wiederum eine Verlängerung des Gespanns um einen Anhänger sinnvoll erscheinen lässt. In letzter Konsequenz führt dieser Kreislauf zu unflexiblen Zügen geringer Fahrdynamik, die aus einem unbeladenen Triebfahrzeug, in dem die Antriebsleistung konzentriert vorliegt, und leichten Tragwagen bestehen und für den effizienten Betrieb eine Mindestauslastung der Ladekapazität voraussetzen.

Antriebskonzept C:

Aufbauend auf Konzept A ergibt sich als zweite Möglichkeit zur Verbesserung der Auslastung der Antriebe, das Fahrzeug auf eine entsprechend niedrigere Nutzlast zu dimensionieren. Bei der angenommenen Ladelänge ist die Beladungsvariante mit dem zweithöchsten zulässigen Gesamtgewicht ein voll beladener Sattelanhänger der Masse 39t.

Neben der besseren Auslastung der aufgrund der niedrigeren erforderlichen Leistung leichteren Antriebe kann die tragende Struktur ebenfalls in einer leichteren Bauweise ausgeführt sein, was bei aufgrund der letztendlich durchschnittlichen Beladung der Ladungsformen im Vergleich zu Konzept A in der Summe der Transporte automatisch zu einem besseren durchschnittlichen Nutzlast-Totlast-Verhältnis führt.

Das maximale Nutzlast-Totlast-Verhältnis kann hier nur schwer angegeben werden, da im Zuge der Fahrzeugkonzeption keine differenzierte Betrachtung der Konstruktion und ihrer Massenwerte erfolgt. Ein maximales Nutzlast-Totlast-Verhältnis von 1,57, das dem Wert von Konzept A, entspricht, ließe ein Fahrzeugleergewicht von 24,8t zu. Für die weitere Betrachtung wird für dieses Konzept ein Eigengewicht von 30t angesetzt. Dieser Wert setzt sich aus dem Leergewicht eines auf eine entsprechend geringere Nutzlast aus-

gelegten Containertragwagens der DB von 18t und der Annahme aufgrund der niedrigeren Leistung leichterer Antriebe zusammen:

$$m_{Leer,C} = 8t + 2 \cdot 5t + 2 \cdot 1,5t + 9t = 30t$$

Aus der Berechnung der Fahrwiderstände folgt eine erforderliche Antriebsleistung von 600kW.

Eine Einschränkung dieses Antriebskonzepts besteht bezüglich des zulässigen Gesamtgewicht von 20'-Containern. Die Summe der Gesamtgewichte zweier 20'-Container kann die maximale Nutzlast von 39t übersteigen. Dies ist bei der Verladung in Form einer Auswahl zueinander passender Container zu berücksichtigen. Der Transport zweier durchschnittlich beladener 20'-Container ist problemlos möglich.

Antriebskonzept D

Die auf die durchschnittliche Beladung ausgelegte autonome Transporteinheit (Konzept C) weist ein geringeres Gesamtgewicht auf als ein Fahrzeug nach Konzept A. Somit liegt die Achslast des Fahrzeugs nach Konzept C unterhalb der zulässigen Achslast, auf der die Entwicklung des Konzepts A aufbaut.

Konzept D basiert auf dem Ziel, die Reserve bezüglich der zulässigen Achslast auszunutzen. Die Verbindung zweier Fahrzeuge zu einer Einheit erlaubt die Einsparung eines Drehgestells und damit die Verringerung der toten Masse im Vergleich zu zwei Transporteinheiten nach Konzept C, ohne die Beschleunigungswerte negativ zu beeinflussen. Die Verringerung der Achszahl macht bei gleich bleibender Beschleunigung eine Erhöhung der Antriebsleistung je Drehgestell auf 350kW erforderlich, so dass sich die Antriebsleistung des Fahrzeugs zu ca. 1050kW ergibt.

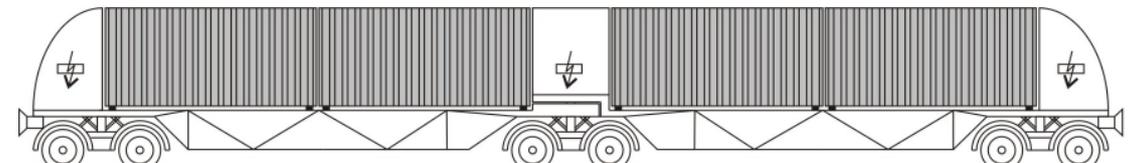


Abbildung 25 Antriebskonzept D – sechssachsige autonome Transporteinheit

Dadurch kann eine maximale Nutzlast von $2 \cdot 39t = 78t$ bei einem minimierten Leergewicht erreicht werden, das für die weitere Untersuchung mit

$$m_{Leer,D} = 2 \cdot 8t + 3 \cdot 5t + 3 \cdot 1,7t + 16t \approx 52t$$

angenommen ist.

Dieses Konzept lässt die gleichen Ladekombinationen wie Konzept C zu. Allerdings ist bei der Beladung eines so gestalteten Fahrzeugs verstärkt darauf zu achten, dass die Achsen des mittleren Drehgestells nicht über die zulässige Achslast hinaus belastet werden.

Da das Fahrwerk eines dreiachsigen Sattelanhängers, das nach StVZO maximal 24t übertragen darf, eine höhere Last als der Königszapfen und die Stützwinden in die tragende Struktur einleitet, kann der Transport von Sattelanhängern nur derart erfolgen, dass die Königszapfen der verladenen Sattelanhänger zum mittleren Drehgestell hin ausgerichtet und die Sattelanhänger so nahe wie möglich am ersten bzw. dritten Drehgestell auf der Ladefläche positioniert sind. Die für dieses Konzept weitaus kritischere Beladung besteht aus vier 20'-Containern, die mit einer Masse von je 19,5t die maximale Nutzlast des Fahrzeugs ausschöpfen. In diesem Fall ergibt sich unter der Annahme gleichmäßiger Beladung und symmetrischen Aufbaus des Fahrzeugs eine auf das mittlere Drehgestell wirkende Last von 39t. Die zulässige Radsatzlast von 22,5t bietet bei dieser auf dem mit zwei Radsätzen ausgestatteten Drehgestell aufliegenden Last mit 6t eine zu geringe Reserve, um das hinzukommende Eigengewicht des Drehgestells, der elektrischen Komponenten und des Tragrahmens tragen zu können. Dementsprechend gilt für den Transport von Containern eine geringere zulässige Nutzlast, bzw. bei der Verladung darf eine für den jeweiligen Ladeplatz vorgeschriebene Nutzlast nicht überschritten werden. Durch das Hinzufügen eines dritten Radsatzes kann das mittlere, dann dreiachsig ausgeführte Drehgestell eine um 22,5t höhere Last aufnehmen, allerdings verringert sich der Vorteil der geringeren Totlast gegenüber Antriebskonzept C. Eine weitere Maßnahme stellt die aus technischer Sicht mögliche Erhöhung der Radsatzlast dar, was jedoch nach einer Verstärkung des Fahrwegs im Vergleich zu den Anforderungen der [EBO] verlangt. Unter der Annahme, dass die Transportfahrzeuge das Transportsystems nicht verlassen, kann eine Dimensionierung des Fahrwegs auf eine Radsatzlast von beispielsweise 28t in Erwägung gezogen werden und unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte bewertet werden.

4.2.3 Fahrwerkskonzept

Die Rahmenbedingungen zur Entwicklung eines Fahrwerkskonzepts sind in den vorhergehenden Kapiteln bereits implizit dargestellt. Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, bilden Schienen, deren Profil, Spurweite, zulässige Streckenlasten, Überhöhung usw. nach [EBO] geregelt sind, den Fahrweg für das Transportfahrzeug. In Hinblick auf schnelle Realisierbarkeit und hohe Zuverlässigkeit ist es sinnvoll, in möglichst hohem Umfang auf bewährte Technik zurückzugreifen.

Eine Reihe von technischen Entwicklungen haben im Laufe der Zeit unterschiedliche Schienenfahrwerke für ihre Anwendung im weiten Feld des Eisenbahnverkehrs hervorgebracht.

Schienenfahrzeuge besitzen je nach zugrunde liegendem Gesamtgewicht zwei bis sechs Radsätze. Fahrzeuge mit höheren Radsatzanzahlen sind bei Spezialanwendungen möglich. Bei Fahrzeugen, die über mehr als zwei Radsätze verfügen, sind je zwei bis drei Radsätze in einem Drehgestell vereint, das elastisch mit dem Traggestell des Wagens verbunden ist. Dies ermöglicht es, dass sich die Drehgestelle beim Befahren eines Gleisbogens in den Grenzen ihrer Beweglichkeit aus der Fahrzeuglängsrichtung herausdrehen und an den Schienenverlauf anpassen können.

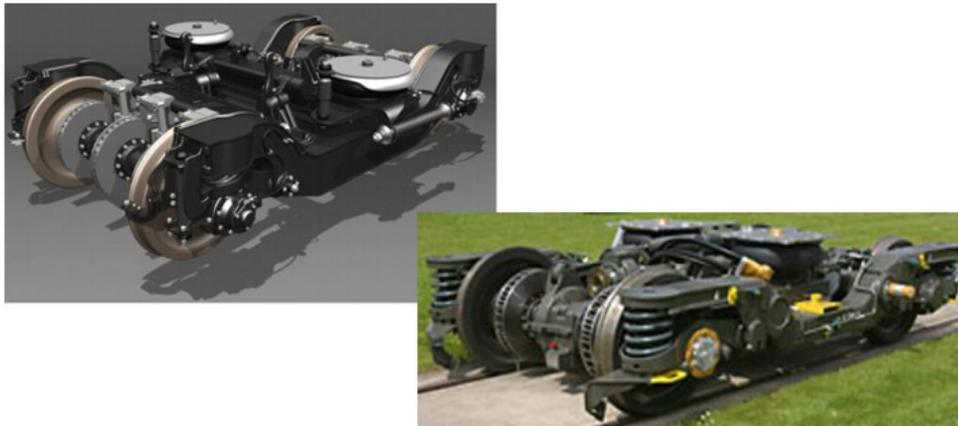


Abbildung 26 Drehgestell

Die Anordnung je zweier angetriebener Radsätze in einem Drehgestell eines vierachsigen Fahrzeugs wird als Bo'Bo'-Anordnung bezeichnet. Triebfahrzeuge mit sechs angetriebenen Achsen, von denen je drei in einem Drehgestell zusammengefasst sind besitzen die Achsfolge Co'Co'.

Besonders flache Wagen, die beispielsweise bei dem System Rollende Landstraße zum Einsatz kommen, sind mit kleineren Rädern ausgestattet. Da mit Verringerung des Raddurchmessers die Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene abnimmt, ist die Verwendung kleiner Laufräder von höherem Rad- und Schienenverschleiß begleitet, was zu steigendem Wartungsaufwand und höheren Kosten führt.

Die Form der Räder und Radsätze im öffentlichen Schienenverkehr ist in Anlage 6 der [EBO] festgelegt. Die Räder eines Radsatzes sind starr miteinander verbunden. Somit weist das kurvenäußere Rad beim Durchfahren eines Gleisbogens die gleiche Drehzahl auf wie das kurveninnere. Dies führt zu verstärktem Verschleiß, da in der Kurve stets mindestens eines der beiden Räder eines Radsatzes auf der Schiene gleitet. Mit diesem Phänomen verbunden sind weitere Nachteile wie beispielsweise das geschwindigkeitsabhängige Schlingern der Drehgestelle, dem in der Praxis durch Dämpfersysteme entgegengewirkt werden kann.

Aus den in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Antriebskonzepten können im Wesentlichen zwei Fahrwerksanordnungen abgeleitet werden, die jeweils auf zweiachsigen Drehgestellen beruhen. Solche angetriebenen Drehgestelle sind in den aus den Antriebskonzepten folgenden Leistungsklassen am Markt erhältlich, so dass keine erneute Konzeption und Entwicklung, sondern lediglich eine Anpassung erforderlich ist. Gleiches gilt für Bremssysteme und die elastische Verbindung der Drehgestelle mit dem Traggestell des Transportfahrzeugs.

Bezüglich des Schienenverschleißes sind, da der Aufwand und die Gefährdung bei Wartungsarbeiten an der Strecke im Vergleich zu oberirdisch verlegten Gleisen aufgrund des schlechten Zugriffs sehr hoch ist, verschärfte Anforderungen zu definieren. In diesem Zusammenhang kann sich die Suche nach intelligenten Lösungen zur Verschleißminderung, beispielsweise im Bereich der Fahrwerkstechnik, durch ein je Achse vorzusehendes Differentialgetriebe, als sinnvoll erweisen, wobei die je Fahrzeug zusätzlich entstehenden Kosten durch längere Wartungsintervalle des Gleiskörpers kompensiert werden.

4.2.4 Regelungs- und Steuerungskonzept

Zur grundsätzlichen Entscheidung und Bewertung der sich ergebenden Fahrzeugkonzepte und der Folgen für das im Rahmen der Machbarkeitsstudie untersuchte übergeordnete Transportsystem ist die Art der Zugbildung von sehr hoher Bedeutung.

Wie in Kapitel 3.2.3 bereits erläutert, verwehrt es das Trassenkonzept, autonome Transporteinheiten geringer Transportkapazität im Fahrzeugverband mit absolutem Bremswegabstand⁷ fahren zu lassen. Für die reine Anwendung der konzipierten Transportfahrzeuge auf die definierte Transportaufgabe, also zur fahrplanmäßigen Verbindung eines Startpunkts mit einem Endpunkt, scheint daher eine mechanische Kopplung der Fahrzeuge im Fahrzeugverband sinnvoll. Unabhängig vom gewählten Konzept muss die Zugbildung in einem vollautomatisch agierenden System ebenfalls vollautomatisch erfolgen können.

Aus der mechanischen Kopplung der Fahrzeuge im Fahrzeugverband ergeben sich Vorteile bezüglich der Redundanz der Fahrfunktion. Bei Ausfall der Steuerung, des Antriebs oder der Kommunikationseinrichtung eines Transportfahrzeugs kann es im mechanischen Zugverband unter Verringerung der fahrdynamischen Leistung weitergeführt werden. Eine starre mechanische Kopplung von Fahrzeugen kann nur bei gleichzeitiger Synchronisierung ihrer Fahrsteuerungen erfolgen, da für die Antriebs und Bremseinrichtungen

⁷ Fahren im absoluten Bremswegabstand: Die zulässige Höchstgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und dem eigenen Bremsvermögen. Das Bremsvermögen und die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs werden nicht berücksichtigt.

sonst die Gefahr der Überlastung gegeben ist. Erschwerend wirkt sich in diesem Zusammenhang die Wirkung unterschiedlicher Beladung auf die Fahrdynamik der einzelnen Fahrzeuge im mechanisch gekoppelten Verband aus. Somit ist es erforderlich, dass eine mechanische Kupplung in gewissen Grenzen elastisch ausgeführt ist, um einer Überlastung der Antriebe im Nennbetrieb entgegenzuwirken.

Ein auf mechanische Kopplung der Fahrzeuge ausgerichtetes Fahrzeugkonzept besitzt den entscheidenden Nachteil, einer Erweiterung des Streckennetzes durch seine mangelnde Flexibilität entgegenzustehen. Das Ausscheren eines Fahrzeugs, das ein anderes Ziel hat als das ihm direkt Nachfolgende, an einer Abzweigung aus dem Verband ist im Falle der vollautomatisch arbeitenden mechanischen Kopplung mit einem höheren Regelungsaufwand als beim abstandsgeregelten Fahren verbunden und birgt darüber hinaus bei einer Geschwindigkeit von 80km/h ein weitaus höheres Gefahrenpotential. Somit ist die mechanische Kopplung nur für Fahrzeugverbände, die eine Punkt-zu-Punkt Verbindung bedienen empfehlenswert. Der steigenden Knotenanzahl des Netzes folgt dann mit steigender Zahl der Punkt-zu-Punkt Verbindungen eine Verlängerung der Standzeiten der Güter im Verladeterminale. Ein so gestaltetes System weist keine markant bessere Flexibilität als der Schienengüterverkehr auf, was mit der Konkurrenzfähigkeit zum Straßengüterverkehr ein vorrangiges Ziel des Systems in Frage stellt.

Bezogen auf die Flexibilität des Transportsystems bietet eine elektronische Abstandsregelung deutliche Vorteile. Auch bei der Bahn zielen neuere Betriebskonzepte auf das Fahren im relativen Bremswegabstand ab. Hierbei errechnet jedes Fahrzeug aus seiner eigenen und der Geschwindigkeit des Vorausfahrenden unter Berücksichtigung seines Bremsvermögens und dem des vorausfahrenden Fahrzeugs den erforderlichen Abstand. Innerhalb dieses Weges kann das Fahrzeug, ohne mit dem maximal verzögernden vorausfahrenden Fahrzeug zu kollidieren, zum Halten kommen. Theoretisch kann dieser Abstand, wenn beide Fahrzeuge exakt dieselbe Geschwindigkeit und Verzögerung besitzen, den Wert null annehmen. In der praktischen Anwendung ist jedoch neben einem Mindestsicherheitsabstand der Aspekt unterschiedlicher Verzögerungen hintereinander fahrenden Fahrzeuge zu berücksichtigen. Für den Fall, dass keine elektronische Bremskraftregelung vorgesehen ist und die Haftreibung zwischen Rad und Schiene voll ausgeschöpft wird, wirkt sich eine ungleiche Beladung zweier Fahrzeuge aufgrund der proportional zum Eigengewicht sinkenden übertragbaren Bremskraft in unterschiedlichem Bremsvermögen aus. Im schlechtesten Fall fährt ein unbeladenes Fahrzeug einer mit maximaler Nutzlast beladenen Transporteinheit hinterher. Auf Basis der übertragbaren Zugkraft, ist auf gleiche Weise wie bei der Berechnung der Beschleunigungswerte in Kapitel 4.2.2 eine Bestimmung der maximal möglichen Verzögerung möglich. Für eine an einem Streckenabschnitt mit maximalem Gefälle (12,5‰) fahrende Transporteinheit nach Konzept C folgt bei voller Beladung eine maximal mögliche Verzögerung von $1,264\text{m/s}^2$ und für ein Unbeladenes

$0,974\text{m/s}^2$. Beginnen beide Fahrzeuge bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 80km/h exakt zum selben Zeitpunkt zu bremsen, ergibt sich bereits bei der geringen Verzögerungsdifferenz von $0,29\text{m/s}^2$ ein Bremswegunterschied von 58m . Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Fahrzeuge bei der zugrunde gelegten Nenngeschwindigkeit in einer Sekunde $22,2\text{m}$ zurücklegen. Folglich führt jede zeitliche Verzögerung zwischen Beginn der Bremsung des ersten und des zweiten Fahrzeugs zu einer erheblichen Verlängerung des erforderlichen Abstands.

Im Bereich der elektronischen Abstandsregelung werden nicht zuletzt zum Zwecke der Verbesserung der Leistung und Sicherheit im Straßenverkehr zahlreiche Studien und Entwicklungen vorangetrieben. Je enger der Abstand zweier Fahrzeuge zueinander sein soll, desto schneller muss ein System zur Abstandsregelung agieren können. Zur Objekterkennung werden vorwiegend Radar, Laserscanner und Bildverarbeitungssysteme eingesetzt, wobei jedes dieser Verfahren Unsicherheiten aufweist. So sind Bildverarbeitungssysteme bei häufig wechselnden Lichtverhältnissen ebenso überfordert, wie Laserscanner, die in schmutzigen Umfeld oder nebliger und regnerischer Umgebung eingesetzt werden.

Obwohl Systeme zur Abstandsregelung aus Anwendungen im Straßenverkehr (ACC) bekannt sind, besteht auf diesem Bereich enormer Forschungsbedarf. Das Bremsvermögen ist aufgrund der im Vergleich zum Straßenverkehr ca. sechsfach geringeren Haftreibung zwischen Rad und Schiene im Schienenverkehr geringer. Dies führt zu längeren Bremswegen und damit zu größeren Abständen der Fahrzeuge im Fahrzeugverband als im Straßenverkehr. Die CargoCap-Modellstrecke, die der Lehrstuhl für Maschinenelemente und Fördertechnik im Rahmen der Forschungstätigkeit am Projekt CargoCap baut, ermöglicht die Suche nach Lösungen für das Fahren im relativen Bremswegabstand, das eine deutlich höhere Auslastung der CargoCap-Strecke im Vergleich zum heutigen Eisenbahnverkehr erlaubt.

Die Ortung der Fahrzeuge im Transportsystem kann über die Aufzeichnung des zurückgelegten Weges erfolgen, der sich bei bekanntem Radradius aus der Messung der Radumdrehungen ergibt. Zur Tarierung der Messwertaufnahme und zum Abgleich der Positionsangabe ruft das Fahrzeug in definierten Abständen eine absolute Ortsinformation von streckenseitig angebrachten Transpondern ab, wobei es diese durch Induktion mit der von ihnen zur Übertragung der Daten benötigten Energie versorgt. Jedes Fahrzeug übergibt sein Ortungssignal mit allen weiteren steuerungsrelevanten Daten als Datenpaket entweder an die zentrale Steuerung oder die anderen Fahrzeuge im Fahrzeugverband weiter, so dass aus der fahrzeugeigenen Ortsinformation und der des vorausfahrenden Fahrzeugs die Brems- bzw. Beschleunigungsinformation an die Motorsteuerung weitergegeben werden kann. Wie bereits angesprochen nimmt hierbei die Übertragungsrates der

Kommunikationsdaten starken Einfluss auf die Abstände der Fahrzeuge im abstandsgeregelten Fahrzeugverband.

Die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander und mit dem Betriebsleitsystem wird durch die unterirdische Trassenführung erschwert, da weit entwickelte funkbasierte Systeme im abgeschlossenen Fahrrohr nur eingeschränkt funktionsfähig sind. Bei U-Bahnen und Bahnen findet zur Datenübertragung die Technik der linienförmige Zugbeeinflussung (LZB) häufig Verwendung, bei der entlang des Schienenwegs verlegte Kabel- oder Schienenlinienleiter Daten an das Fahrzeug übergeben. Auf diese Kommunikationstechnik greift beispielsweise die fahrerlose U-Bahn der Stadt Nürnberg zurück, deren Betriebsstart nach [Stadtverkehr2002] für das Jahr 2006 geplant ist. Als alternatives System hat die Firma Siemens im Feldversuch die Anwendbarkeit der Kommunikation über das Energieversorgungssystem (Powerline Communication) erfolgreich getestet [Siemens2002]. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Mikrowellen als Informationsträger zu nutzen, wie dies bei einer in Singapur im Jahre 2003 in Betrieb genommenen automatischen fahrerlosen U-Bahn-Linie realisiert ist [Signal+Draht2003].

Die Beantwortung der Frage, welche Art der Datenübertragung für ein Transportsystem, wie es die übergeordnete Machbarkeitsstudie betrachtet, optimale Funktionalität bietet, ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Für die Entwicklung und Bewertung eines Fahrzeugkonzepts reicht die Belegung der technischen Machbarkeit der Kommunikation zwischen Fahrzeugen aus. Die erwähnten Beispiele angewandter Steuerungs-, Regelungs- und Kommunikationstechnik lassen die Aussage zu, dass Systeme für automatisch betriebene Fahrzeuge am Markt verfügbar sind, die auf das untersuchte Transportsystem angepasst werden können. Die Abstandsregelung im virtuellen Zugverband fahrender Transporteinheiten, die einen geringen Abstand zueinander aufweisen, stellen hierbei zusätzliche, hohe Anforderungen sowohl an die Kommunikation als insbesondere auch an die Steuerung und Regelung. Da innerhalb des nach außen abgeschlossenen Transportsystems bei der Auswahl geeigneter Regelungs- und Steuerungstechnik nicht auf vorhandene Einrichtungen und Systeme geachtet werden muss, besteht die Chance, die Anwendung optimal zugeschnittener Konzepte zur Ortung, Kommunikation usw. zu verfolgen.

5 Konzeptbewertung und -vergleich

Die in den vorhergehenden Kapiteln vorgestellten Teilkonzepte zur Lastaufnahme, zum Antrieb, dem Fahrwerk und der Regelung und Steuerung sind ohne Einschränkungen kombinierbar, so dass sich insgesamt 24 theoretische Gesamtkonzepte ergeben. Da sie voneinander unabhängig sind, bietet es sich an, die Lösungen innerhalb der Teilkonzepte zu vergleichen. Ein abschließender Vergleich des am besten bewerteten Fahrzeugkonzepts mit dem Verkehrsträger Lkw ermöglicht eine Aussage zur Konkurrenzfähigkeit, die, wenn bestimmte Voraussetzungen bezüglich des Betriebs und der Anschlusslogistik des übergeordneten Transportsystems gegeben sind, erreichbar ist.

Tabelle 8 zeigt die je Teilfunktion des Transportfahrzeugs entwickelten Konzepte, die im Folgenden kurz zusammenfassend dargestellt und anschließend miteinander verglichen werden.

Tabelle 8 Zusammenfassung der Lösungen

Lastaufnahme	Konzept X		Konzept Y		Konzept Z	
Antrieb	Konzept A	Konzept B	Konzept C	Konzept D		
Zugbildung	<u>m</u> echanisch			<u>a</u> bstandsgeregelt		

5.1 Konzeptbewertung

Um die Bewertung der entwickelten Konzepte nachvollziehbar zu gestalten, liegen ihr Kriterien zugrunde, die mittelbar aus den Anforderungen abgeleitet sind. Da je nach Teilkonzept unterschiedliche Aspekte von Bedeutung sind, müssen funktionspezifische Kriterien definiert werden. Hierbei ergeben sich aus der objektiven technischen Betrachtung einerseits konkrete Kriterien (z.B. Nutzlast-Totlast-Verhältnis) andererseits können einige entscheidende Unterschiede der Fahrzeugkonzepte nur in subjektiver Form beurteilt werden, da die Möglichkeit eines analytischen Nachweises nur bedingt gegeben ist. Jedes Kriterium ist zur Berücksichtigung seiner Bedeutung mit einem Gewichtungsfaktor zwischen „weniger wichtig“ (Gewicht 1) und „sehr wichtig“ (Gewicht 3) ausgestattet. Der Bewertung der Lösungen bezüglich der Kriterien liegt die Staffelung „ungenügend“ (0 Punkte), „tragbar“ (1 Punkt), „ausreichend“ (2 Punkte), „gut“ (3 Punkte) zugrunde. Die Summe der Produkte aus der je Kriterium erhaltenen Wertung und dem Gewicht des Kriteriums ergibt die Gesamtpunktzahl der Lösung. Die technische Wertigkeit einer Lösung berechnet sich als Quotient aus seiner Gesamtpunktzahl und der maximal möglichen Punktzahl.

Die Bewertung der Konzepte erfolgte zunächst unabhängig voneinander von allen am Projekt beteiligten Mitarbeitern des LMF und wurde anschließend in gemeinsamer Diskussion je Teilkonzept in einer Bewertungstabelle zusammengeführt. In Hinblick auf die Objektivität ist es hierbei besonders wichtig, zunächst die Kriterien unter der Fragestellung, wie wichtig sie für das übergeordnete Transportsystem sind, mit einem Gewicht zu belegen und erst anschließend die Bewertung der Konzepte durchzuführen.

5.1.1 Lastaufnahmekonzept

Die Verladung und die Ladungssicherung von Containern und Wechselbehältern sind aufgrund der standardisierten Schnittstellen der Ladeeinheiten und der vielfältigen Lösungen aus dem Bereich der Fördertechnik als unproblematisch anzusehen.

Kapitel 4.2.1 stellt drei verschiedene Lösungen zum Transport von Sattelanhängern vor, die keine spezielle Vorbereitung der Sattelanhänger voraussetzen. Innerhalb eines jeden Lastaufnahmekonzepts bildet ein als Adapter fungierendes befahrbares Lademodul die Schnittstelle zwischen Sattelanhänger und Transportfahrzeug. Allerdings kann das Lademodul je nach Umschlagprinzip verschieden schwer ausgeführt werden, was sich letztlich auf das Gesamtgewicht der Transportfahrzeuge niederschlägt. Da die betrachteten Systeme in der Lage sind auch Container und Wechselbehälter aufzunehmen, reicht ihr Vergleich zur Wahl eines Lastaufnahmekonzepts.

Das Lastaufnahmekonzept X basiert auf dem vertikalen Umschlag der auf Lademodulen abgestellten Sattelanhänger mittels Kran auf das Transportfahrzeug. Lastaufnahmekonzept Y liegt das System CargoBeamer® [vgl. CargoBeamer2002] zugrunde, das als Waggonaufsatz bezeichnete Lademodule vorsieht, die sich zur Aufnahme von Sattelanhängern, Containern und Wechselbehältern eignen und durch Verschieben quer zur Fahrtrichtung seitlich verladen werden. Lastaufnahmekonzept Z verwendet das Prinzip der bereits vom Transporttechnikhersteller Lohr am Markt angebotenen Modalohr-Tragwagen [vgl. Modalohr2003], das auf der Rotation der Ladefläche um die als Drehachse in Fahrzeugmitte ausgeführte Verbindung zum Tragrahmen beruht.

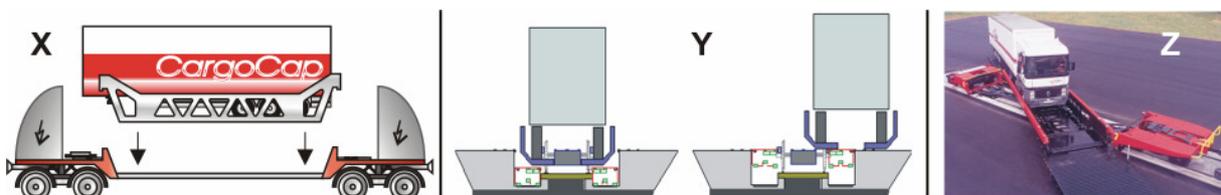


Abbildung 27 Lastaufnahmekonzepte

Der Energiebedarf eines Fahrzeugs steigt mit seiner Masse. Daher ist ein Vergleich der Lastaufnahmekonzepte in Bezug auf das **Eigengewicht** des **Lademoduls** sinnvoll. Ge-

wichtsdifferenzen sind in der je nach Lastaufnahmekonzept unterschiedlichen Lastübertragung vom Lademodul sowohl auf das Fahrzeug, als auch auf die Umschlagseinrichtung zu suchen. Eine ungünstige Lasteinleitung führt zu höheren Beanspruchungen und damit zu einem höheren Eigengewicht des Lademoduls. Weitere fahrzeugbezogene Bewertungskriterien sind der **Aufwand** zur **Ladungssicherung** und der **Kostenaufwand** des **Lademoduls**, der je nach Konzept bzw. Umschlagprinzip unterschiedlich zu beurteilen ist.

Tabelle 9 Lastaufnahmekonzepte – Bewertung

Kriterium	Gewicht	X	Y	Z	Max.
Eigengewicht Lademodul	2	3	3	2	3
Aufwand Ladungssicherung	2	2	1	1	3
Kostenaufwand Lademodul	2	2	3	2	3
Kostenaufwand Umschlagstelle	2	3	1	2	3
Raumbedarf Umschlagstelle	1	3	2	1	3
Handhabung	3	1	3	3	3
Personalaufwand Umschlag	1	2	3	3	3
Umschlagdauer	3	1	3	2	3
paralleler Umschlag	2	1	3	3	3
Erweiterbarkeit	2	1	3	3	3
Summe		35	51	45	60
technische Wertigkeit		0,58	0,85	0,75	1

Die aus dem Umschlagprinzip als wesentlicher Unterschied der dargestellten Lastaufnahmekonzepte folgenden Vor- und Nachteile bezüglich des Verladevorgangs stellen bei der Bewertung eines Fahrzeugkonzepts in Hinblick auf seine Eignung für das Transportsystem wichtige Aspekte dar, da sie großen Einfluss auf die Transportdauer und vor allem die Kosten der Terminals nehmen. Als Bewertungskriterien werden der **Kostenaufwand** der **Umschlagsstelle**, der **Raumbedarf** der **Umschlagsstelle**, die **Handhabung** der Umschlagseinrichtung, der **Personalaufwand**, die **Umschlagsdauer** und die Möglichkeit des **parallelen Umschlags** herangezogen. Die Bewertung der Konzepte anhand dieser Kriterien erfolgt auf Basis der technischen Beurteilung des Umschlagaufwands. Die **Erweiterbarkeit** gibt die Beurteilung der Eignung eines Lastaufnahmekonzepts im Hinblick auf eine Erweiterung des Streckennetzes über die im Rahmen der Machbarkeitsstudie untersuchte Streckenführung hinaus wieder.

5.1.2 Antriebskonzept

Antriebskonzept A basiert auf einer Auslegung des Transportfahrzeugs auf die Nutzlast von 55t, die bei einem angenommenen Eigengewicht des vierachsigen konzipierten Fahrzeugs von 35t die nach [EBO] zulässige Achslast von 22,5t ausschöpft.

Aufgrund der schlechten Ausnutzung des Ladevermögens der Ladungsformen zielt das Antriebskonzept B durch die Erweiterung der Transportkapazität einer Transporteinheit durch Anhängen eines nicht angetriebenen Tragwagens auf eine Verbesserung der Antriebsauslastung im Nennbetrieb ab. Das Anhängen eines Tragwagens reduziert allerdings die Nutzlast, auf die die angetriebene Transporteinheit ausgelegt ist, um sein Eigengewicht und bringt darüber hinaus Einschränkungen bezüglich der Ladungskombinationen und vor allem der Fahrdynamik mit sich. Letzteres beruht darauf, dass nicht die gesamte zu bewegende Masse auf den angetriebenen Achsen lastet, was den Grenzwert der übertragbaren Zugkraft deutlich senkt.

Antriebskonzept C basiert auf der Überlegung, die Antriebsleistung der durchschnittlichen Nutzlast anzupassen. Da in diesem Fall die streckenseitig zulässige Achslast nicht ausgeschöpft wird, kann eine weitere Verringerung der Totlast durch Reduktion der Achszahl beziehungsweise der Drehgestelle erreicht werden.

So stellt Antriebskonzept D mit der Transportkapazität zweier Transporteinheiten eine aus Sicht der Antriebsauslastung und des Energiebedarfs optimierte Alternative zu zwei Einzelfahrzeugen dar.



Abbildung 28 Antriebskonzepte

In Tabelle 10 sind die zur Bewertung herangezogenen Daten der Antriebskonzepte zusammengefasst. Die Beträge der Leermassen setzen sich ebenso wie die Investitionskosten aus den in Tabelle 7 angegebenen Massen und Preisen der Komponenten zusammen. Die Leistungen und Beschleunigungswerte folgen aus der in Anhang 10.2 aufgeschlüsselten Berechnung.

Als Merkmal zur Beurteilung der Qualität der Antriebskonzepte bezüglich der Erfüllung der gestellten Transportaufgabe ist für jedes Konzept das Nutzlast-Totlast-Verhältnis (NTV) angegeben. Es berechnet sich aus dem zugrunde gelegten Eigengewicht und der je nach Beladung anzusetzenden Nutzlast. Aufgrund der Vielzahl verschiedener Ladungskombinationen, erfolgt die Bestimmung auf Basis einer Beladung mit jeweils einer La-

ungsform, wobei sich die Anzahl n der Behälter bzw. Sattelanhänger aus der nach dem Lastaufnahmekonzept angenommenen maximalen Anzahl an Ladungsformen pro Transportfahrzeug ergibt. Als Nutzlast wird hierbei das durchschnittliche Gesamtgewicht der aufgenommenen Ladungsform bezeichnet, d.h. das Leergewicht eines Sattelanhängers, Containers oder Wechselbehälters gilt für das Transportfahrzeug ebenso als Nutzlast wie die in der Ladungsform verpackten Güter. Die Angabe des maximalen Nutzlast-Totlast-Verhältnisses basiert auf einer vollen Ausschöpfung der maximal möglichen Nutzlast des jeweiligen Fahrzeugkonzepts.

Tabelle 10 Antriebskonzepte – Fahrzeugdaten und NTV

	Konzept A		Konzept B		Konzept C		Konzept D	
m_{Fz} [t]	35		35+18		30		52	
m_{Nutz} [t]	55		37		39		78	
Achsen (davon angetrieben)	4 (4)		2 x 4 (4)		4 (4)		6 (6)	
P [kW]	800 (2x400)		800 (2x400)		600 (2x400)		1050 (3x350)	
Investition [tsd €]	292		372		223		415	
\dot{v} Steigung (Ebene) [m/s ²]	0,53 (0,63)		0,41 (0,50)		0,51 (0,61)		0,51 (0,60)	
Ladeplätze	1x16m		2x16m		1x16m		2x16m	
Investition/Ø Nutzlast [tsd €/t]	22,0		14,0		16,8		15,6	
Ladungsform (Ø Masse)	n	NTV	n	NTV	N	NTV	n	NTV
Sattelanhänger (27,0t)	1	0,77	- ⁸	-	1	0,90	2	1,04
Container 20' (11,5t)	2	0,66	3	0,65	2	0,77	4	0,88
Container 40'/45' (13,0t)	1	0,37	2	0,49	1	0,43	2	0,50
Klasse A (12,8t)	1	0,37	2	0,48	1	0,43	2	0,49
Klasse C (6,0t)	2	0,34	4	0,45	2	0,40	4	0,46
Binnencontainer B9 (9,6t)	1	0,27	2	0,36	1	0,32	2	0,37
Volle Ausnutzung Nutzlast	1,57		0,70		1,30		1,50	

Wie bei der Bewertung der Lastaufnahmekonzepte bereits erwähnt, führt ein höheres Nutzlast-Totlast-Verhältnis zu einem bezogen auf die transportierte Menge niedrigeren Energieverbrauch und geringeren Energiekosten je Transporteinheit. Da im Nennbetrieb

⁸ Die Beladung eines Gespannes mit einem Sattelanhänger ist nicht realistisch, da der angehängte Tragwagen in diesem Fall unbeladen mittransportiert würde.

nicht von einer vollen Ausschöpfung der Nutzlast der Fahrzeuge ausgegangen werden kann, muss dem Vergleich das **durchschnittliche NTV** zugrunde gelegt werden. Ein weiteres Kriterium sind die **Investitionskosten**. Sie sind zum leichteren Vergleich auf eine aus dem Querschnitt über alle Ladungsformen gebildete durchschnittliche Nutzlast von 13,3t bezogen. Eine Beurteilung der Eignung der Antriebskonzepte im Hinblick auf eine Erweiterung des Streckennetzes ist im Kriterium **Erweiterbarkeit** gegeben. Hier ist die Fahrdynamik von entscheidender Bedeutung (vgl. 4.2.2). Das Kriterium **Flexibilität** bewertet, wie flexibel das Transportfahrzeug auf eilige Transporte reagieren kann und ob dies auch nach einer Erweiterung des Transportsystems gegeben ist. Sie kann anhand der Ladekapazität, die für den wirtschaftlichen Betrieb ausgenutzt werden muss und der Fahrdynamik bewertet werden, die jedoch untergeordnet zu beurteilen ist.

Tabelle 11 Antriebskonzepte – Bewertung

Kriterium	Gewicht	A	B	C	D	Max.
Ø NTV	3	1	1	2	3	3
Investition / Ø Nutzlast	2	1	3	2	2	3
Erweiterbarkeit	2	3	1	3	2	3
Flexibilität	3	3	1	3	2	3
Summe		20	14	25	23	30
technische Wertigkeit		0,67	0,47	0,83	0,77	1

5.1.3 Fahrwerkskonzept

Aus Kapitel 4.2.3 geht hervor, dass die Möglichkeit der Verwendung marktüblicher Komponenten keine Entwicklung grundsätzlich neuer Fahrwerkskonzepte erfordert. Bezüglich der detaillierten Gestaltung des Fahrwerks können von den heute angewendeten Komponenten in Teilen abweichende Lösungen zweckmäßig erscheinen. Eine Aussage bezüglich der Anwendbarkeit von Detaillösungen geht jedoch über die Konzeption eines Transportfahrzeugs hinaus.

5.1.4 Regelungs- und Steuerungskonzept

Die nach Kapitel 4.2.4 zu bewertenden Alternativen sind zum einen die mechanische Kopplung mehrerer Transporteinheiten zu einem Fahrzeugverband, zum anderen die Möglichkeit der automatischen Abstandsregelung.

Als Kriterien zur Bewertung der Zugbildungsarten ergeben sich im Wesentlichen subjektiv, aus technischer Sicht zu beurteilende Aspekte, wie **technischer Aufwand**, **Investition** und **Zuverlässigkeit**. Bezüglich der bereits beschriebenen Anforderungen **Erwei-**

terbarkeit und **Flexibilität**, weisen die beiden betrachteten Möglichkeiten ausgeprägte Unterschiede auf. Das Kriterium **Redundanz** geht auf die Aufrechterhaltung des Transportbetriebs im Falle des Antriebsausfalls bei einer Transporteinheit ein.

Tabelle 12 Zugbildung – Bewertung

Kriterium	Gewicht	mechanisch	abstandsgeregelt	Max.
Flexibilität	3	1	3	3
Erweiterbarkeit	2	0	3	3
technischer Aufwand	2	3	1	3
Investition	2	3	1	3
Zuverlässigkeit	3	3	2	3
Redundanz	1	3	1	3
Summe		27	26	39
technische Wertigkeit		0,69	0,67	1

5.1.5 Ergebnis

Nach der Bewertung der für die Teilkonzepte gefundenen Lösungen ist es möglich, ein unter den gegebenen Randbedingungen für die Transportaufgabe am besten geeignetes Fahrzeugkonzept zusammenzusetzen.

Das **Lastaufnahmekonzept Y** nach dem System CargoBeamer® besitzt entsprechend der Bewertung die höchste technische Wertigkeit. Während der vertikale Umschlag (Konzept X) bei den gewichtigen Kriterien (Handhabung, Umschlagdauer) eine schlechte Bewertung erhält und daher insgesamt zurückfällt, stellt das System Modalohr (Konzept Z) eine Alternative zu Konzept Y dar. Allerdings schlägt sich die Lasteinleitung über den zentralen Drehpunkt negativ in Eigengewicht und Kosten des Lademoduls nieder und die Umschlagsdauer ist im Vergleich zu Konzept Y als länger einzustufen, da dem erneuten Beladen des Transportfahrzeugs hier zunächst ein Abladen des angelieferten Sattelanhängers vorausgehen muss. Konzept X weist bezüglich des Kostenaufwands und des Raumbedarfs der Umschlagstelle Vorteile auf, allerdings beeinflusst vor allem letztgenanntes Kriterium seine technische Wertigkeit aufgrund der geringen Gewichtung nur unwesentlich. Diese geringe Gewichtung ist darauf zurückzuführen, dass dem geringeren Raumbedarf der Umschlagstelle ein größerer Lagerplatzbedarf entgegensteht. Da der Grenzdurchsatz eines einzelnen Krans systembedingt geringer ist als der gemeinsam erreichbare Grenzdurchsatz der parallel arbeitenden Verladeeinrichtungen bei Konzept Y und Z, kommt es bei häufigen Ankünften beispielsweise zu Stoßzeiten zu Engpässen in

der Terminallogistik. Demzufolge müssen in ausreichender Anzahl Warteplätze vorgesehen werden. Darüber hinaus widerspricht Konzept X insgesamt dem Gedanken der Modularität und Flexibilität des Transportsystems, was sich hinsichtlich des Kriteriums Erweiterbarkeit als negativ erweist. So ist bei Konzept X eine Steigerung der Umschlagsleistung eines Terminals durch Beschaffung eines weiteren Krans verbunden mit hohen Investitionen nur in großen Stufen möglich, während Konzept Y und Z eine nahezu stufenlose Anpassung des möglichen Durchsatzes an das betriebliche Aufkommen ermöglicht.

Tabelle 11 zeigt, dass ein auf die Beladung mit durchschnittlich ausgelasteten Ladungsformen ausgelegtes Antriebskonzept grundsätzliche Vorteile besitzt. Je höher das Eigengewicht eines Fahrzeugs im Verhältnis zur durchschnittlichen Nutzlast ist, desto mehr Energie ist erforderlich, um die im Nennbetrieb anstehenden Transportaufgaben zu erfüllen. Darüber hinaus steigen mit dem zulässigen Gesamtgewicht erforderliche Leistung und damit die Kosten für alle installierten Komponenten, die letztendlich unter Berücksichtigung der Transportkapazität auf die real durchgeführten Transporte umgeschlagen werden müssen. Vor diesem Hintergrund zeigen sich die Antriebskonzepte C und D als vorteilhaft gegenüber A und B. Im Hinblick auf die Erweiterbarkeit und die Flexibilität sind Konzept A und C den Antriebskonzepten B und D überlegen. Ihre geringere Kapazität führt zu einer kürzeren Umschlagdauer, was, unter der Voraussetzung, dass keine fahrplanmäßigen Wartezeiten eingehalten werden müssen, in geringeren Transportzeiten resultiert. Bezüglich der Erweiterbarkeit besitzt Konzept A wie oben bereits angesprochen den unwesentlichen und daher in die Bewertung nicht einfließenden Vorteil gegenüber Konzept C den Transport zweier durchschnittlich beladener 20'-Container auch dann noch zu erlauben, wenn die Auslastung des Ladevermögens dieser Ladungsform aus der Entwicklung des Transportmarktes heraus über 64% (19,5t) steigt. Allerdings ist auch hier die Auslastung des Ladevermögens zweier 20'-Container durch die maximale Nutzlast von 55t auf ca. 90% begrenzt, was eine Vorsortierung zumindest der 20'-Container vor der Verladung ohnehin erforderlich macht. Zusammenfassend weist daher **Antriebskonzept C** die im Rahmen dieser Bewertung höchste technische Wertigkeit auf.

Die vergleichende Bewertung der Konzepte zur Zugbildung führt unter den angesetzten Kriterien und Gewichtungen zu keinem eindeutigen Ergebnis. Das der Untersuchung vorgegebene Streckenlayout sieht vor, dass die Transportfahrzeuge in fahrplanmäßig geregelten Verbänden im Tunnelsystem verkehren. Da der Abstand der Fahrzeuge zueinander maßgeblich von der Art der Zugbildung bestimmt wird, weist ein Verband aus mechanisch gekoppelten Fahrzeugen die kürzeste „Zuglänge“ auf und bietet damit die größte Streckenkapazität. Da das zugrunde gelegte Streckennetz auf vier Punkt-zu-Punkt Verbindungen zurückgeführt werden kann und die vom bautechnischen Projektpartner ermittelten Taktzeiten zur Bedienung dieser Verbindungen ausreichend gering realisierbar sind, erscheint eine aufwändige Abstandsregelung zunächst unnötig. Im Hinblick auf eine

Erweiterung des Streckennetzes führt eine Verbindung der Fahrzeuge zu einem festen „Zug“ zum Verlust der Flexibilität. Die wesentlichen Vorteile, die das abstandsgeregelte Fahren bezüglich der Flexibilität und der Erweiterbarkeit mit sich bringt, werden durch die Nachteile in Hinblick auf den technischen Aufwand und die Kosten aufgehoben.

Beide Systeme sind mit der erforderlichen Zuverlässigkeit realisierbar, wobei ein steigender Grad der Verwendung von Informationstechnik zur Steuerung, Regelung und Überwachung die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls erhöht, was durch entsprechende Rückfallebenen aufgefangen werden kann. Die Redundanz der Fahrfunktion ist im betrachteten System für beide Fälle sicherzustellen und durch entsprechenden technischen Aufwand herstellbar. Im schlechtesten Fall, den beispielsweise ein gleichzeitiger Ausfall aller Antriebe eines Fahrzeugs herbeiführt, kommt bei der betrachteten Strecke mit einspurigen Abschnitten der gesamte Systembetrieb zum Erliegen. In diesem Fall, den es jedoch prinzipiell zu vermeiden gilt, bietet die mechanische Kopplung der Fahrzeuge den Vorteil, dass die restlichen im Fahrzeugverband befindlichen Fahrzeuge den „Zug“ ausreichend antreiben können.

Die nachteilige Auswirkung der mechanischen Kopplung auf die Flexibilität und die Erweiterbarkeit des Systems ist bei dem der Untersuchung zugrunde gelegten Streckenlayout zunächst von untergeordneter Bedeutung. Im Zuge eines Ausbaus des Streckennetzes ist es jedoch unumgänglich, die feste Verbindung einzelner Transporteinheiten zu einem Zug zu lösen, um als alternatives Transportsystem am Transportmarkt konkurrenzfähig zu sein. Sinnvoll ist vor diesem Hintergrund eine Erstausrüstung der Fahrzeuge für den betrachteten Streckenverlauf mit **mechanischer Kopplung** unter Vorbereitung einer bei Erweiterung des Streckennetzes erforderlichen Umstellung auf ein abstandsgeregeltes System.

5.2 Vergleich Konzept mit dem Verkehrsträger Lkw

Der Lkw ist in der heutigen Zeit das Hauptverkehrsmittel im Güterverkehr und darüber hinaus auch jenes mit den höchsten Wachstumsraten am Transportmarkt. Einer verwertbaren Aussage über die Konkurrenzfähigkeit des untersuchten Transportsystems muss daher der Vergleich zu diesem Verkehrsträger zugrunde gelegt werden. Dieser Vergleich kann nur die Vor- und Nachteile der beiden Systeme bezüglich der Transportaufgabe, auf die das unterirdische Transportsystem konzipiert ist, beleuchten, da Aufgabenbereiche existieren, wie etwa der Kurzstrecken- oder Baustellenverkehr, für die ein unterirdisches Transportsystem prinzipiell keine Alternative darstellen kann. Das zum Vergleich herangezogene Fahrzeugkonzept „C – Y – m“ setzt sich aus der entsprechend der durchgeführten Bewertung besten Lösung des Lastaufnahme- und des Antriebskonzepts zusammen und geht von der bezogen auf den untersuchten Streckenverlauf besten Lösung zur Zug-

bildung aus. Als zum Vergleich herangezogener Lkw dient eine Sattelzugmaschine der Leistung 276kW mit einem angehängten Containerchassis. Der Kaufpreis dieses Gepanss ist mit 90.000 € und sein Gewicht mit 13,2t angesetzt.

In Anlehnung an die Konzeptbewertungen erfolgt dieser Vergleich ebenfalls auf Basis von Kriterien. Auch hier ist die Bewertung bezüglich einiger Kriterien anhand von Kennzahlen möglich, andere können nur subjektiv beurteilt werden. Die angegebenen Kennzahlen basieren auf der Beladung mit einer Nutzlast von 14,1t, die sich aus dem Querschnitt über die durchschnittliche Nutzlast aller in Tabelle 10 aufgeführten Sorten von Containern und Wechselbehältern unter Berücksichtigung der Ladekapazität (vgl. Tabelle 10 - Größe „n“) ergibt. Der Transport von Sattelanhängern ist aus dem Vergleich ausgenommen.

Tabelle 13 Vergleich: Fahrzeugkonzept - Lkw

Kriterium	Gewicht	Konzept C – Y – m		Containersattelzug	
		Betrag	Wertung	Betrag	Wertung
Ø NTV	--	0,77	--	1,74	--
Leistung / Ø Gesamtgewicht	--	13,6	--	6,3	--
Investition / Ø Nutzlast	--	15,8 tsd €	--	6,4 tsd €	--
Energiebedarf [MJ/tkm]	3	1,13	2	1,98	1
Ø Transportgeschwindigkeit	2	~ 80km/h	2	65km/h	1
Personalbedarf	2	~ 0	3	1	1
Flexibilität	3	X	2	X	3
Umschlag	3	X	1	X	2
Summe			25		22

Die in Tabelle 13 aufgeführten Kriterien „Ø NTV“, „Leistung / Ø Gesamtgewicht“ und „Investition / Ø Nutzlast“ dienen mehr der Information als dem Vergleich. Der gegensätzliche Charakter, den die beiden Verkehrssysteme für die Kriterien NTV und Energiebedarf aufweisen, lässt darauf schließen, dass das NTV über die Grenzen des Transportsystems hinweg an Aussagekraft verliert. Dies liegt nicht zuletzt an der Tatsache, dass die Masse der Transporteinheit im Rahmen der Konzeption nur abgeschätzt werden kann. Beispielsweise ist die Masse der sonstigen Komponenten (vgl. Tabelle 7) mit 9t vergleichsweise hoch angesetzt. Die auf das durchschnittliche Gesamtgewicht bezogene Antriebsleistung zeigt, dass die Transporteinheit gegenüber dem Containersattelzug (zweiachsige Zugmaschine 276kW) eine bessere Fahrdynamik aufweist, die jedoch im untersuchten Umfeld von untergeordneter Bedeutung ist. Eine weitere Kennzahl ist die nutzlastbezogene Investition. Aus den Werten kann darauf geschlossen werden, dass die Laufleistung

einer Transporteinheit ca. 2,5-mal höher sein muss, um für das Fahrzeug die gleichen Investitionskosten je Transport zu erreichen.

Aus der Berechnung der erforderlichen Antriebsleistung folgt, unter der Annahme, dass sich die Anteile der Steigungen und Gefälle auf der Strecke aufheben, für die konstante Fahrt einer mit 80km/h einzeln fahrenden Transporteinheit eine Nennleistung von 346kW. Daraus ergibt sich je km ein Energiebedarf von 4,4kWh und bezogen auf die durchschnittliche Nutzlast von 14,1t ein Energiebedarf von 1,13MJ/tkm. Nach [BMVBW2001] beträgt der „spezifische Energieverbrauch beim Lastkraftwagen durchschnittlich 1,98 Mega-Joule (MJ)/tkm, wohingegen er sich beim Schienengüterverkehr auf 0,49 MJ/tkm beläuft“. Somit weist das Transportfahrzeug trotz des schlechteren NTV und der höheren Antriebsleistung einen um 43% geringeren Energiebedarf als der Lkw auf, wobei der Schienengüterverkehr 56,6% weniger Energie für den Transport einer Tonne Nutzlast über die Strecke von einem Kilometer benötigt. Der ökologische Vorteil des konzipierten Transportfahrzeugs gegenüber dem Straßenverkehr resultiert aus den geringeren Rollreibungsverlusten und dem systembedingt geringeren Anteil der Beschleunigungsphasen an der Fahrtzeit. Bei der für den Fernverkehr angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeit des Lkw von 65 km/h legt er eine Strecke von 240km in ca. 3h 42min zurück und braucht damit im Vergleich zum Transportfahrzeug mit 80km/h 42min mehr Zeit. Die angegebene durchschnittliche Transportgeschwindigkeit des konzipierten Fahrzeugs setzt allerdings eine reibungslose Anschlusslogistik, einen schnellen Umschlag und die Möglichkeit der sofortigen Abfahrt nach dem Umschlag voraus. Das Transportfahrzeug benötigt neben dem Personal im Terminal und für Wartungsarbeiten keine weiteren Mitarbeiter. Der Umschlag ist für beide Verkehrsträger ähnlich, wobei im Vergleich zum reinen Straßengüterverkehr je nach Vor- und Nachlauf mindestens zwei weitere Umschläge notwendig sind. Hinsichtlich des Kriteriums Flexibilität kann der Vergleich des Verkehrsträgers Lkw mit dem hier untersuchten Transportsystem, das auf autonomen, schienengebundenen Transporteinheiten mit auf das durchschnittliche Aufkommen angepasster Kapazität basiert, nur bezüglich der Aufgabe, Güter der entsprechenden Ladungsform in der gewählten Relation zu transportieren, erfolgen.

6 Terminalgestaltung

Ein mögliches Terminallayout kann auf Basis des im Zuge der Fahrzeugkonzeption gewählten Umschlagprinzips nach dem Konzept CargoBeamer® (vgl. Kapitel 4.2.1) allerdings ohne Berücksichtigung der am jeweiligen Standort herrschenden Umgebungsbedingungen entworfen werden.

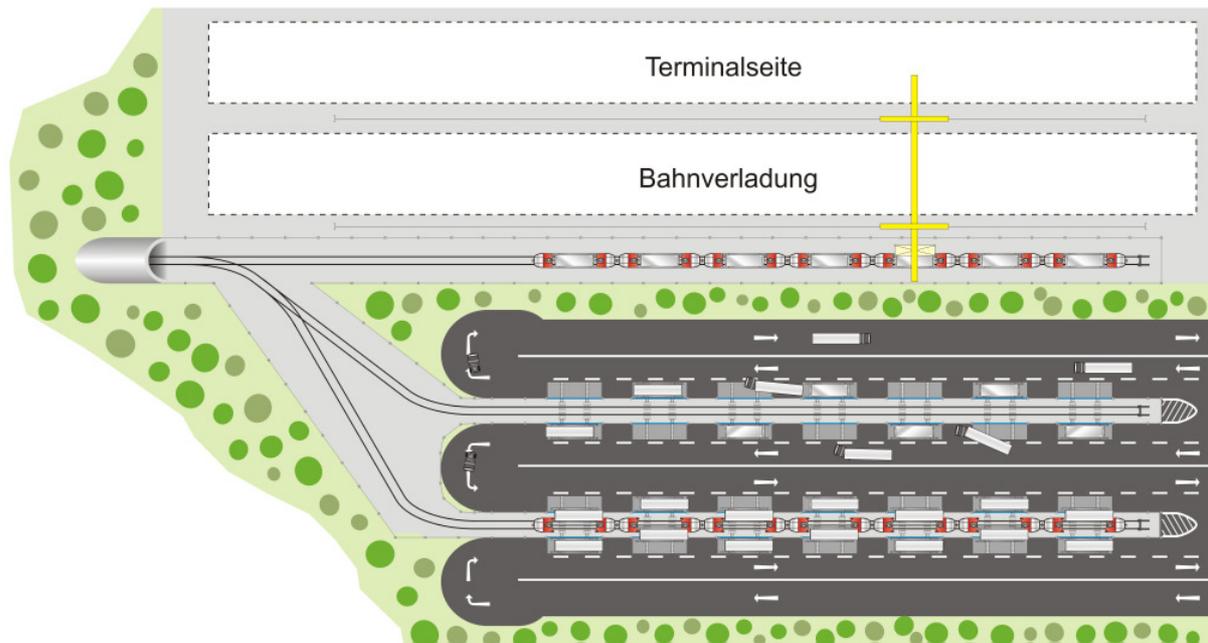


Abbildung 29 Terminallayout - Prinzip

Abbildung 29 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Terminals mit örtlich getrenntem Umschlag von Containern bzw. Wechselbehältern und Sattelanhängern.

Der Umschlag von Containern und Wechselbehältern erfolgt mittels eines Krans und kann beispielsweise in die bestehende Logistik eines im kombinierten Verkehr agierenden Terminals, wenn die örtlichen Gegebenheiten und die logistischen Kapazitäten es erlauben, eingebunden werden. In Abbildung 29 ist diese Möglichkeit in Form eines parallel zu den vom Schienengüterverkehr genutzten Gleisen (Bahnverladung) zusätzlich verlegtes Gleise für die Transportfahrzeuge und einer Erweiterung des Portalkranes um einen Ausleger dargestellt.

Ebenfalls in der Abbildung zu sehen ist der Aufbau des Lkw-Umschlagsbereichs. Die für die Transportfahrzeuge verlegten Schienen sind leicht versenkt in die sie umgebende asphaltierte Fläche eingelassen. Im Falle des automatischen Fahrbetriebs des Transportsystems im Umschlagsbereich, d.h. bei Abfahrt oder Ankunft eines Fahrzeugs oder Fahrzeugverbandes, verhindern die Umzäunung des Fahrwegs und elektrisch betriebene Rolltore oder -zäune an den Umschlagspositionen ein Betreten des automatischen Bereichs.

Zusätzlich kann durch weitere Sicherheitseinrichtungen wie etwa optische Personen- und Objekterkennungssysteme verhindert werden, dass sich Personen im Gefahrenbereich aufhalten. Zu beiden Seiten eines jeden Schienenstrangs befinden sich an definierten Positionen jeweils mit einer Hub- und Verschiebeeinrichtung ausgestattete Abstellplätze für die befahrbaren Lademodule.

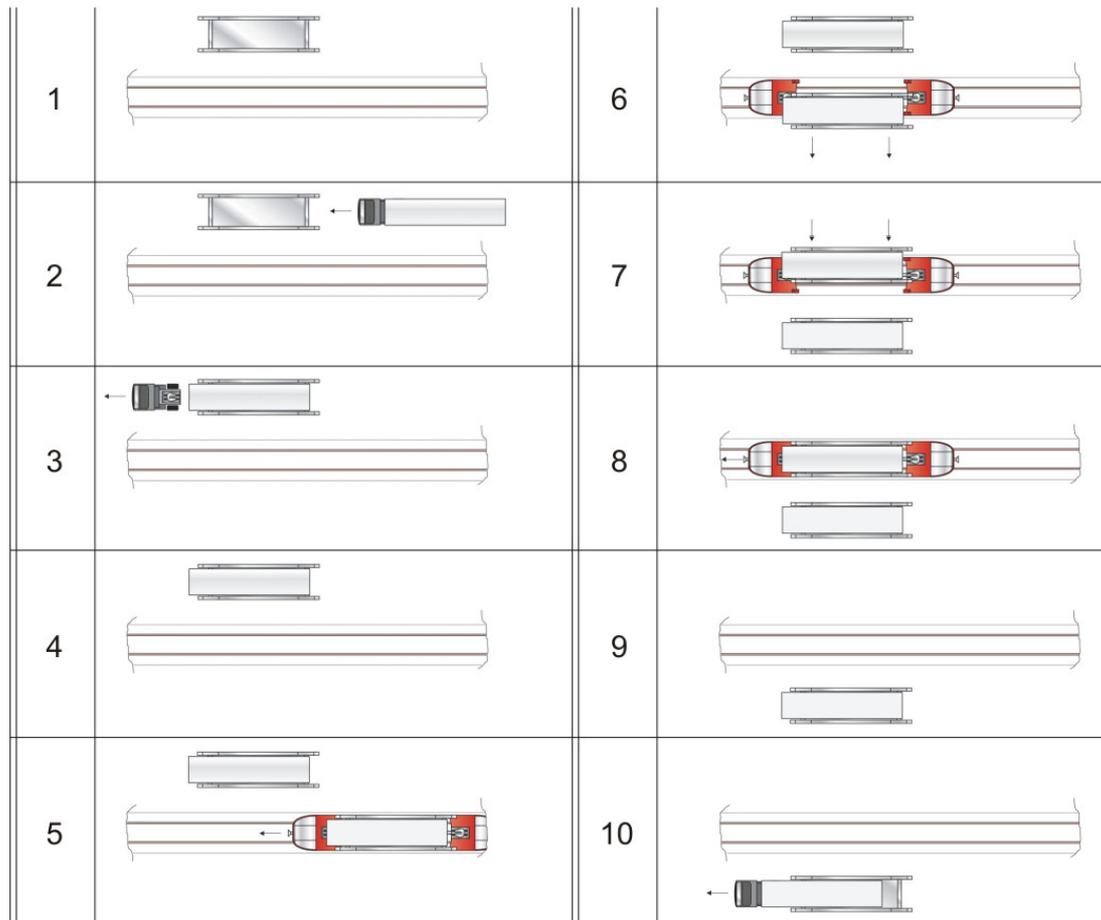


Abbildung 30 Ablauf eines Verladevorgangs

Abbildung 30 zeigt den Ablauf eines Verladevorgangs. Pro Umschlagsposition steht zu jedem Zeitpunkt ein leeres Lademodul (Abbildung 30 – 1) bereit, um einen Sattelanhänger aufzunehmen. Die Lkw-Fahrer füllen die Lademodule vom in Abfahrtsrichtung am Verladegleis vordersten Modul ausgehend (vgl. mittleres Gleis in Abbildung 29) mit Sattelanhängern auf (Abbildung 30 – 2, 3 und 4). Während die Sattelzugmaschinen und die Fahrer somit direkt neuen Transportaufgaben zur Verfügung stehen – beispielsweise kann ein im Transportsystem angelieferter Sattelanhänger direkt abgeholt werden – verbleiben die Sattelanhänger auf den Lademodulen bis der nächste Fahrzeugverband eintrifft. Nach Ankunft eines Fahrzeugverbandes wird die Zufahrt zu den Umschlagspositionen versperrt und der Verladebereich geräumt. Der seitliche Umschlag der Lademodule von den Fahrzeugen auf die freie Seite der Umschlagsstelle (Abbildung 30 – 6) und die

anschließende Verladung der sich in Warteposition befindenden Sattelanhänger (Abbildung 30 – 7) kann nun sowohl halbautomatisch und vom Terminalpersonal überwacht als auch vollautomatisch erfolgen. Im zweiten Fall ist durch entsprechende Sicherheitsmaßnahmen zu verhindern, dass sich Personen im Aktionsbereich der Umschlagsstelle befinden, was wiederum beispielsweise durch optische Überwachungssysteme realisiert werden kann.

Aufgrund der im Vergleich zum vertikalen Umschlag mittels Krananlagen erheblich geringeren Gesamtumschlagszeit für alle Lademodule kann der Umschlagsbereich bereits nach kurzer Zeit wieder für das Befahren freigegeben werden. Stehen die Fahrer mit ihren Sattelzugmaschinen bereit, können Sie ihre Sattelanhänger direkt vom Lademodul abholen. Sattelanhänger die Lademodule blockieren und nicht direkt abgeholt werden, werden mit terminaleigenen Sattelzugmaschinen auf einer gesonderten Parkfläche abgestellt.

7 Fahrwegausstattung

Aufgrund der Entscheidung, die optionale Erfassung von Güterzügen aus dem öffentlichen Schienennetz zu ermöglichen und der sich daraus ergebenden Anforderungen an das Transportfahrzeug ist der Fahrweg in seinen wesentlichen Merkmalen (Spurweite, Längsneigung, Schienenprofil,...) in Anlehnung an die Gegebenheiten im öffentlichen Schienenverkehr zu konzipieren. Somit beschränkt sich die diesbezügliche Untersuchung aus maschinenbautechnischer Sicht auf die Diskussion hinsichtlich des Oberbaus.

Im öffentlichen Schienenverkehr finden im Großteil der Fälle zwei Oberbau-Bauarten Verwendung. Im Tunnel weist der konventionelle Schotteroberbau gegenüber dem System der „Festen Fahrbahn“, die mit drei- bis vierfach höheren Erstinvestitionskosten (Feste Fahrbahn: ca. 2000 €/m) anzusetzen ist, entscheidende Nachteile auf. Vordergrundig ist hier der deutlich höhere Wartungs- und Instandhaltungsaufwand zu nennen, der sich vor allem aus Stopfarbeiten am Schotterbett zum Ausgleich von Setzungen und Verbessern der Gleislagestabilität, häufigeres Schienenschleifen und der Gleisbetteinigung zusammensetzt. Nach Auskunft des Herstellers des Feste Fahrbahn Systems ÖBB/Porr (elastisch gelagerte Gleistragplatte) sind bei einer von der Porr AG selbst 1989 auf freier Strecke erstmals eingebauten Feste Fahrbahn bis dato keine Instandhaltungs- und Wartungskosten angefallen. Unabhängig von der gewählten Oberbauart ist nach Porr direkt nach der Verlegung der Schienen und nach einer Betriebsbelastung von 100 Mio. t eine Schienenschleifung erforderlich, die jeweils mit einem Kostensatz von ca. 3 €/m zu veranschlagen ist. [Lichtenberger2003] schlägt hingegen vor, zur nachhaltigen Verlängerung der Liegedauer der Schienen in kürzeren Abständen zu schleifen, um dem exponential zunehmendem Risswachstum präventiv entgegenzuwirken.

Weiterhin rechnen sowohl Unternehmen der Gleisbaubranche als auch wissenschaftliche Institute und die einschlägige Literatur [vgl. Lichtenberger2003] bei einer Feste Fahrbahn mit einer mit 60 Jahren ca. zweifach höheren Lebensdauer. Nach Erreichen der Betriebsfestigkeit der Fahrbahn ist dann allerdings mit hohen Umbaukosten zu rechnen, die letztlich einem Neubau entsprechen.

Ein Nachteil des Systems der Feste Fahrbahn liegt in seinem gegenüber dem Schotteroberbau schlechten Schalldämpfungsverhalten begründet. Die 16. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes [16. BImSchV] erlaubt eine Abschätzung des emittierten Schalls für die Tagesspitzenbelastung der als Feste Fahrbahn ausgeführten Strecke. Bei 38 scheinengebremsten, abstandsgeregelt fahrenden Fahrzeugen je Stunde und Richtung ergibt sich bei Fahrt auf offener Strecke in einer Entfernung von 10 m zum Emissionsort ein Beurteilungspegel von ca. 70 dB(A). Die Übertragung des Schalls vom Emissions- zum Immisionsort wird stark von den dazwischen liegenden Hin-

dernissen, im Falle des untersuchten Systems also vom Fahrrohr, dem Erdreich, in das es verlegt ist, Lüftungsöffnungen, usw. und deren akustischen Kennwerten (z.B. Absorptionsgrad, Dämpfungskoeffizient des Betons, des Fahrrohrs, usw.), zusammengefasst von baulichen Gegebenheiten beeinflusst. Die Berücksichtigung des Einflusses der topologischen und baulichen Gegebenheiten auf den Beurteilungspegel erlaubt laut [16. BImSchV] die Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen (Schall 03 – Amtsblatt der DB Nr. 14). Inwiefern diese Richtlinie auf das untersuchte System mit hohem Versperrungsmaß und enorm hohem Tunnelanteil der Gesamtstrecke anwendbar ist, bleibt zu untersuchen. Da dies die detaillierte Kenntnis der bautechnischen Randbedingungen voraussetzt, geht eine solche Untersuchung über den Rahmen der durchgeführten Machbarkeitsstudie hinaus. Allerdings vermindert laut [LFU2003] bereits ein Trog, in dem der Fahrweg verlegt ist, den Beurteilungspegel um 15 dB(A), sodass für den unterirdischen Verkehr ein Beurteilungspegel im Abstand von 10m zum Emissionsort von maximal 55 dB(A) angenommen werden kann. Zur weiteren Verringerung der Schallemission finden im Bereich des Schienenwegebau zusätzliche Schallminderungsmaßnahmen wie etwa der Einbau schwingungsdämpfender Masse-Feder-Systeme Anwendung. Solche Systeme können in Abschnitten der Strecke, wo besonders hohe Anforderungen an den Lärm- und Erschütterungsschutz gestellt werden, also beispielsweise bei Unterquerungen von bebautem Gebiet, eingebaut werden. Der angesetzte Kostensatz für die Feste Fahrbahn lässt nach Einschätzung einzelner Hersteller und des Autors eine ausreichende Ausstattung der Strecke mit schalldämmenden und schwingungsisolierenden Komponenten zu.

Nach Meinung von [Lichtenberger2003] ist bei Abwägung der Vor- und Nachteile der „schotterlose Oberbau in Tunneln [...] ohne Zusatzmaßnahmen im Unterbau [...] gegenüber dem Schotteroberbau wirtschaftlich.“ Die eingangs erwähnte, durch ihre Höhe im Vergleich nachteilig erscheinende Erstinvestition für die Feste Fahrbahn wird darüber hinaus durch die niedrigere Bauhöhe dieses Fahrbahntyps und daraus resultierendem geringeren Tunnelquerschnitt und -baukosten relativiert. Allerdings nimmt die Vorgehensweise bei der Erstellung der unterirdisch verlaufenden Strecke großen Einfluss auf die Einbaukosten der Festen Fahrbahn, was für ein solches Projekt die Entwicklung neuer Fertigungstechnologien sinnvoll erscheinen lässt.

Der vom bautechnischen Projektpartner entwickelte Streckenverlauf besteht aus im Wechsel angeordneten Einfach- und Doppelspurabschnitten. Zum Anschluss der Doppelan die Einfachspurabschnitte sind standardmäßig einfache Weichen EW 1200 – 1:18,5 mit einer zulässigen Überfahrgeschwindigkeit von 100 km/h angesetzt, deren Preis sich incl. Einbau auf ca. € 200.000,- beläuft.

Für die Ausstattung des Fahrwegs mit Kommunikations- und Ortungseinrichtungen kann auf Basis einer groben Abschätzung der erforderlichen Komponenten ein Kostensatz von ca. 200 €/m angegeben werden. Dieser setzt sich zusammen aus den vom Projektpartner IVE erhaltenen Angaben zu den Kosten der streckenseitig verlegten Linienleiters für die Linienzugbeeinflussung von 100 €/m und weiteren 100 €/m für darüber hinaus erforderliche Komponenten wie etwa EURO-Balisen zur exakteren Ortung der Fahrzeuge, die das automatische und abstandsgeregelte Fahren der Caps im Fahrzeugverband erfordern kann.

Neben den Kosten für Material und Erstellung der Festen Fahrbahn stellen ihre Projektierung und die Streckenplanung weitere Kostenpunkte dar. Für diese Posten ist nach Angaben der Porr AG in Summe mit ca. 5% der Bausumme der Festen Fahrbahn zu rechnen.

8 Zusammenfassung

Die Globalisierung der Märkte führt zu einem überproportionalen Wachstum des Güterverkehrsaufkommens. Eine Prognose des [BMVBW2000], die der Verkehrswegeplanung der Bundesregierung zugrunde liegt, geht davon aus, dass die Güterverkehrsleistung im Jahr 2015 im Vergleich zu 1997 um 64% gestiegen sein wird. Der prognostizierte Modal Split, der die Aufteilung der Güterverkehrsleistung nach Verkehrsträgern darstellt, zeigt, dass der weitaus größte Anteil des Güterverkehrsaufkommens auf den Verkehrsträger Lkw, der bereits heute den Transportmarkt dominiert, entfallen wird. Die daraus resultierende zusätzliche Belastung der Straßeninfrastruktur macht hohe Investitionen für den Ausbau des Straßennetzes erforderlich. Da sowohl Binnenschiff als auch Eisenbahn im Güterverkehr Kapazitätsreserven besitzen und darüber hinaus als ökologisch vorteilhafter und verkehrssicherer angesehen werden, hat sich die Bundesregierung im Zuge ihrer Verkehrspolitik dazu entschieden, die Wettbewerbssituation dieser beiden Verkehrsträger mit dem Ziel der Entlastung der Straße zu verbessern. Zentrales Thema ist in diesem Zusammenhang die Förderung des kombinierten Verkehrs. Grundgedanke des kombinierten Verkehrs ist es, eine Transportaufgabe durch aus verschiedenen Verkehrsträgern zusammengesetzte Verkehrsketten zu erfüllen, um die jeweiligen systembedingten Kosten- und Leistungsvorteile nutzen zu können.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie hat ein interdisziplinäres Team aus Vertretern der Fachbereiche Wirtschaftswissenschaften, Jura, Eisenbahn- und Straßenverkehrswesen, Bauingenieurwesen, Elektrotechnik und Maschinenbau untersucht, ob und inwiefern sich ein auf die Anforderungen des Güterverkehrs angepasstes unterirdisches Transportsystem, das auf dem Konzept CargoCap basiert, technisch, ökologisch und wirtschaftlich realisierbar ist. Die vorrangige Aufgabe des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Fördertechnik im Rahmen dieses Projektes ist die Konzeption eines Fahrzeugs für den Transport von Containern durch unterirdisch verlegte Rohrleitungen.

Bis auf die Kenntnis der zu transportierenden Ladungsformen gehen aus der Aufgabenstellung zunächst keine konkreten Randbedingungen hervor. Im Laufe der der Projektarbeit sind die Anforderungen an das Transportfahrzeug teils direkt durch die Arbeit der Projektpartner teils in Abstimmung mit den Projektpartnern durch den Autor selbst entwickelt worden. Der zu Beginn der Bearbeitung vom Projekt verfolgte Transport von Containern ist vom Team um die Ladungsformen Sattelanhänger und Wechselbehälter erweitert worden. Um das Transportaufkommen nochmals erweitern zu können, wurde im Projektplenium die Möglichkeit der Übernahme von Güterzügen aus dem öffentlichen Schienennetz an das Transportsystem als Anforderung formuliert, wodurch das Suchfeld für die Fahrzeugkonzepte aufgrund der somit vorgegebenen Fahrweggestaltung einschränkt. Vor diesem Hintergrund ergeben sich aus der Eisenbahn Bau- und Betriebsordnung be-

zöglich der Spurführung, der zulässigen Radsatzlast, des Lichtraumsprofils, etc. konkrete Anforderungen. Diese in Kapitel 3.1 beschriebenen Anforderungen sind ergänzt durch Anforderungen, die aus dem Vergleich der existierenden Verkehrssysteme Eisenbahn und Lkw und ihren jeweiligen Vorteilen folgen. So muss ein Transportsystem, das als Alternative zum Lkw dienen soll, eine hohe Flexibilität aufweisen. In diesem Zusammenhang bieten einzelne selbst angetriebene Transporteinheiten geringer Kapazität entscheidende Vorteile gegenüber dem Güterzug. Um der Forderung seitens der Politik hinsichtlich der Ökologie nachkommen zu können, ist ein Ziel der Konzeption, den Energiebedarf durch ein hohes Verhältnis zwischen Nutzlast und Eigengewicht des Transportfahrzeugs gering zu halten. Da die Transportfahrzeuge in unterirdisch verlegten Rohrleitungen betrieben werden, sind besondere Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Wartung zu stellen, die durch die Verwendung bewährter Technik berücksichtigt werden können.

Die Erarbeitung von Fahrzeugkonzepten erfolgt schrittweise. Die drei untersuchten Lastaufnahmekonzepte, von denen zwei auf für den Eisenbahngüterverkehr konzipierte Wagons zum Transport von Sattelanhängern, Wechselbehältern und Containern basieren, unterscheiden sich im Wesentlichen durch das Umschlagprinzip. Während die Bewertung zeigt, dass der vertikale Umschlag grundsätzliche Nachteile mit sich bringt, unterscheiden sich die beiden den horizontalen Umschlag verfolgenden Systeme durch die Art der Lasteinleitung und folglich durch das Eigengewicht. Aus der Entwicklung der Lastaufnahmekonzepte folgt darüber hinaus, dass der Transport von Sattelanhängern bis 4m Eckhöhe eine Erweiterung des dem Transportfahrzeugs zugrunde gelegten Lichtraumprofils auf Basis der Grenzlinie G2 nach [EBO] erfordert.

Der Entwicklung der Antriebskonzepte liegt eine auf der Bestimmung der Fahrwiderstände basierende Berechnung zugrunde, die es erlaubt, die erforderliche Antriebsleistung unter den geforderten Randbedingungen wie Beschleunigung, Steigung, usw. in Abhängigkeit der konzeptspezifischen Nutz- und Totmasse zu ermitteln. Aus der Bewertung der vier entwickelten Antriebskonzepte folgt, dass ein Transportfahrzeug, dessen Antriebe unter Berücksichtigung der teilweise sehr geringen durchschnittlichen Auslastung des Ladevermögens der zu transportierenden Ladungsformen ausgelegt sind und das eine geringe Ladekapazität besitzt, die höchste technische Wertigkeit erreicht. Das Fahrwerkskonzept selbst bedarf keiner detaillierten Untersuchung, da die erforderlichen Komponenten aus dem Bereich der Fahrwerkstechnik bekannt und am Markt verfügbar sind.

Das der Untersuchung vorgegebene Streckenlayout sieht vor, dass die Transportfahrzeuge in fahrplanmäßig geregelten Verbänden im Tunnelsystem verkehren. Der Abstand der Fahrzeuge zueinander ist maßgeblich von der Wahl der Abstandsregelung abhängig. Während mechanisch gekoppelte Fahrzeuge die kürzeste „Zuglänge“ aufweisen, sind Systeme zur elektronischen Abstandsregelung mit einem höheren technischen und damit

auch Kostenaufwand verbunden. Da das zugrunde gelegte Streckennetz auf vier Punkt zu-Punkt Verbindungen zurückgeführt werden kann und die vom bautechnischen Projektpartner ermittelten Taktzeiten zur Bedienung dieser Verbindungen ausreichend gering realisierbar sind, erscheint eine aufwändige Abstandsregelung zunächst unnötig. Im Hinblick auf eine Erweiterung des Streckennetzes führt eine Verbindung der Fahrzeuge zu einem festen Fahrzeugverband zum Verlust der Flexibilität. Sinnvoll ist vor diesem Hintergrund eine Erstausrüstung der Fahrzeuge für den betrachteten Streckenverlauf mit mechanischer Kupplung unter Vorbereitung einer bei Erweiterung des Streckennetzes erforderlichen Umstellung auf ein abstandsgeregeltes System. Da innerhalb des Transportsystems bei der Entwicklung der Regelungs- und Steuerungstechnik nicht auf vorhandene Einrichtungen und Systeme geachtet werden muss, besteht die Chance, auf die Anwendung optimal zugeschnittene Steuerungskonzepte zu verfolgen. Kapitel 4.2.4 zeigt verschiedene teils erprobte teils sich in Entwicklung befindende Lösungsansätze für die zu erfüllenden Teilaufgaben Ortung, Kommunikation, usw. auf.

9 Literatur

- [16. BImSchV] *16. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung)*. 12. Juni 1990
- [DIN ISO 668] Norm DIN ISO 668 1999: *ISO-Container der Reihe 1*.
- [DIN EN 284] Norm DIN EN 284 1992: *Wechselbehälter der Klasse C – Maße und allgemeine Anforderungen*.
- [DIN EN 425] Norm DIN EN 425 1995: *Wechselbehälter der Klasse A – Maße und allgemeine Anforderungen*.
- [DIN ISO 15190] Norm DIN ISO 15190 1991: *Frachtbehälter – Binnencontainer*.
- [prEN 14067-5:2003] Normentwurf prEN 14067-5:2003: *Bahnanwendungen - Aerodynamik – Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel; deutsche Fassung*.
- [BMVBW2002] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVWB): *Verkehr in Zahlen 2002*. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH 2002
- [BMVBW2003/04] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVWB): *Verkehr in Zahlen 2003/2004*. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH 2004
- [BMVBW2000] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVWB): *Verkehrsbericht 2000*. Berlin: November 2000
- [BMVBW2001] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVWB): *Bericht des Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen zum kombinierten Verkehr*. Berlin: Juli 2001
- [CargoBeamer2002] Weidemann, Dr.-Ing. habil. H.-J.: *CargoBeamer™ – Innovationsvorschub für den kombinierten Verkehr*. Speyer: Oktober 2002
[http://www.cargobeamer.de/index_files/frame.htm]
- [CargoBeamer2003] Gramatke, K.-D.; Weidemann, H.-J.; *CargoBeamer®: Die europäische Lösung für den Güterverkehr von morgen*. Präsentation railtec, 2003
[http://www.railtec.de/files/ph_galerie/files/Weidem~1.pdf]
- [CargoCap2002] Stein, Prof. Dr.-Ing. & Partner: *Machbarkeitsstudie Containertransport durch unterirdische Rohrleitungen – Antrag*. Bochum: 2003

- [destatis2004] Reim, Dipl.-Volkswirt Uwe; Statistisches Bundesamt: *Kombinierter Verkehr 2002*. Wiesbaden: Auszug aus Wirtschaft und Statistik 01/2004
- [EBO] Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung: EBO; vom 8. Mai 1967 DS 300 / Deutsche Bundesbahn
- [Froböse1999] Froböse, Dr.: *CTU-Packrichtlinien - Richtlinien für das Packen von Ladung außer Schüttgut in oder auf Beförderungseinheiten (CTUs) bei Beförderung mit allen Verkehrsmitteln zu Wasser und zu Lande*. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag, Februar 99, Verkehrsblatt-Dokument Nr. B 8087
- [Gaillard1973] Gaillard, M. A.: *Zur Aerodynamik der Zugbegegnung im Tunnel und auf offener Strecke*. Zürich: eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation 1973, ISBN 3 260 03592 3
- [Hucho1973] Hucho, W.-H. (Hrsg.): *Aerodynamik des Automobils*. Berlin: Springer-Verlag 1999, 3. grundl. neu bearb. u. erw. Aufl.
- [IFEU2002] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU); Studiengesellschaft für den kombinierten Verkehr e.V. (SGKV); International Road Transport Union (IRU); Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung e.V. (BGL): *Vergleichende Analyse von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen im Straßengüterverkehr und Kombinierten Verkehr Straße/Schiene*. 2002 – IRU I-0021-1(d)
- [KBA2003] Kraftfahrt-Bundesamt: Statistische Mitteilungen – Reihe 8: Kraftverkehr. Güterkraftverkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge. Flensburg: Juli 2003
- [Kessel&Partner2002] Kessel & Partner: *Bestimmung des Marktpotentials für den Transport stapelbarer Wechselbehältern in der Binnenschifffahrt und Betriebsversuch*. Freiburg/Frankfurt: September 2002 – Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen FE-Nr. 30.0322/2001
- [LFU2003] Stroh, Dr. Katharina; Gerke, Dr. Michael: *AL 29: Lärm – Straße und Schiene*. Augsburg: Hrsg.: Bayrisches Landesamt für Umweltschutz (LFU) Oktober 2003
www.bayern.de/lfu/umwberat/laerm2_okt2003.pdf AL 29
- [Lichtenberger2003] Lichtenberger, Dr. Bernhard: *Handbuch Gleis*. Hamburg: Tetzlaff Verlag 2004, 2. Auflage

- [Maersk] Maersk Sealand: Maersk Equipment Guide - Containers for every need. Februar 2004
[http://www.maersksealand.com/msl/msl/Gauss/res/equip_container.pdf]
- [Modalohr2003] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE): New developments in the field of combined transport in UNECE member countries. Transmitted by Modalohr, France, Modalohr – The successful rail/road transport solution. Informal document No. 1, 2003
[<http://www.unece.org/trans/wp24/documents/inf-1e.pdf>]
- [Siemens2002] Runge, Dr. H. (Siemens – Pressereferat Corporate Technology): *Die Fahrstromschiene als Datenleitung*. München: Siemens – Pressereferat Corporate Technology 27.09.2003 – Informationsnummer: CT200207011 d
[http://www.siemens.com/index.jsp?sdc_rh=null&sdc_flags=null&sdc_sectionid=0&sdc_secnavid=0&sdc_3dnlvtid=&sdc_countryid=0&sdc_mpid=0&sdc_unitid=999&sdc_conttype=2&sdc_contentid=1028609&sdc_langid=0&] aufgerufen im Februar 2004
- [Signal+Draht2003] Suwe, K.-H.: *Automatische fahrerlose U-Bahn-Linie in Singapur in Betrieb*. In: Signal + Draht, Ausgabe 9/2003, Hamburg: Tetzlaff Verlag
- [Stadtverkehr2002] Riechers, D.: *Nürnberg erhält erste fahrerlose U-Bahn in Deutschland*. In: Stadtverkehr, 47. Jahrgang, Sonderdruck 05/2002, Freiburg: EK-Verlag
- [Star Container] Star Container; Februar 2004 [<http://www.star-container.de>]
- [UIRR2003] Internationale Vereinigung der Gesellschaften für den kombinierten Verkehr Schiene-Straße (UIRR): *CO₂-Reduzierung durch kombinierten Verkehr*. Brüssel: UIRR Juli 2003

10 Anhang

10.1 Anforderungsliste

	Merkmal	Wert	Einheit	Bemerkung
Externe	min. Kurvenradius	500	m	Stein & Partner
	max. Steigung	12,5	‰	Projektteam
	zul. Radsatzlast	22,5	t	Projektteam
	Spurweite	1435	mm	Projektteam
	Leistungsübertragung	Stromschiene	--	EELE
Interne	Gesamtlänge	22000	mm	
	Gesamtbreite	3290	mm	Erw. Grenzlinie G2
	Gesamthöhe	5000	mm	Erw. Grenzlinie G2
	zul. Gesamtgewicht	69	t	Antriebskonzept C
	Länge Laderaum	16000	mm	WB Klasse A
	Breite Laderaum	2600	mm	WB Klasse A
	Höhe Laderaum	4000	mm	Sattelaufleger
	max. Nutzlast	39	t	Sattelaufleger
	Beschleunigung	> 0,5	m/s ²	
	Seitenbeschleunigung	< 1	m/s ²	
	Geschwindigkeit	80	km/h	
	Verzögerung	> 0,5	m/s ²	
	cW - Wert	< 0,7	--	
	Antriebsleistung	600	kW	Antriebskonzept C
	Antriebsart	E-Motor	--	
	Kraftübertragung	Lauftrad/Schiene	--	
	Bauweise Fahrwerk	Drehgestell	--	
	Spurführung	Spurkränze	--	
Zugbildung	mechanisch	--		
Herstellkosten	232000	€		

10.2 Berechnungsgrundlage Antriebskonzepte

Zugrundeliegendes Konzept: autonome Transporteinheit - Konzept C

Eingangsgrößen

Fahrzeugeigenschaften

■ Abmessungen

Radradius ($d_{\text{Treibrad},185} = 1250 \text{ mm}$)

$$r_{\text{Rad}} = 625;$$

Lagerradius

$$r_{\text{Lager}} = 75;$$

■ aerodynamische Eigenschaften

Stirnfläche des Fahrzeugs ($A_{\text{Ladungsform, max}} + A_{\text{Fahrzeug}}$)

$$A_S = (2.6 * 4.0) + (2.6 * 0.68);$$

max. Stirnfläche des Fahrzeugs entspr. Lichtraumprofil

$$A_{S, \text{max}} = 3.29 * 5;$$

Widerstandsbeiwert c_W (nicht berücksichtigt: Verringerung bei Kolonnenfahrt)

$$c_W = 0.7;$$

Faktor für Tunnelfahrt (abhängig von Versperungsverhältnis $\phi = \frac{A_S}{A_{\text{Tunnel}}}$; Wert für Omnibus und $\phi=0.5$: $k=4.3$)

$$k = 4.3;$$

Strecke

minimaler Kurvenradius aus zul. Querbeschleunigung $\dot{v}_{Q, \text{max}} = 1 \text{ m/s}^2$

$$r_{\text{min}} = \frac{(v_{F, \text{max}} / 3.6)^2}{\dot{v}_{Q, \text{max}}};$$

$$r_{\text{min}} /. \{v_{F, \text{max}} \rightarrow 80, \dot{v}_{Q, \text{max}} \rightarrow 1\}$$

$$493.827$$

gewählter minimaler Kurvenradius

$$r_{\min, \text{gew}} = 500;$$

maximaler Steigungswinkel (maximale Steigung \rightarrow 12,5‰)

$$\alpha_{\max} = \text{ArcTan}[0.0125];$$

Fahrrohrquerschnittsfläche

$$A_{Q, \text{Fahrrohr}} = 5.31 * 6.197$$

$$32.9061$$

Versperrungsmaß

$$\phi = \frac{A_{S, \max}}{A_{Q, \text{Fahrrohr}}}$$

$$0.499908$$

Massen

Masse Fahrzeug (leer)

$$m_{Fz} = 30000;$$

maximale Zuladung Fahrzeug (maximal beladener Sattelaufleger)

$$m_{Fz, \text{Zul, max}} = 39000;$$

Gesamtmasse Fahrzeug

$$m_{\text{ges}} = m_{Fz} + m_{Fz, \text{Zul, max}}$$

$$69000$$

Weitere Beiwerte

Zuschlagsfaktor zur Berücksichtigung der rotierenden Massen bei Beschleunigung

$$\xi = 1.3;$$

■ Widerstandsbeiwerte (Rollreibung, Lagerreibung, Haftreibung)

Rollwiderstandsbeiwert nach Dubbel (S. B 17), Ernst, TU Wien [mm]

$$f_{R, \text{Dubbel}} = 0.5;$$

Rollwiderstandsbeiwert nach Niemann (Kap. 13.6) [mm]

$$f_{R,Niemann} = 0.013 * \sqrt{r_{Rad} * 2}$$
$$0.459619$$

Lagerreibungsbeiwert Wälzlager nach Niemann (Kap. 14.7), Ernst (Kap. 8.1.2), FAG Wälzlagerkatalog

$$\mu_{Lager} = 0.0015;$$

Haftreibungsbeiwert für Rad - Schiene nach Dubbel (S. U 26) aus DIN 15019 T1

$$\mu_{RS} = 0.14;$$

■ Wirkungsgrade Antriebsstrang

Wirkungsgrad Getriebe

$$\eta_G = 1;$$

Wirkungsgrad Achsantrieb

$$\eta_A = 1;$$

■ Sonstige

Luftdichte

$$\rho = 1.22;$$

Erdbeschleunigung

$$g = 9.81;$$

Bestimmung der Grenzen der Fahrdynamik aus Fahrwiderständen

Teilwiderstände

■ Steigungswiderstand W_S

$$W_S = m_{ges} * g * \sin [\alpha];$$

$$W_S / . \{ \alpha \rightarrow \alpha_{max} \}$$

$$8460.46$$

■ Beschleunigungswiderstand W_B

$$W_B = m_{\text{ges}} * \dot{v} * \xi;$$

$$W_B / . \{ \dot{v} \rightarrow 1 \}$$

89700.

■ Luftwiderstand bei Windstille W_L

$$W_L = \frac{\rho}{2} * (v_F / 3.6)^2 * k * c_W * A_{S, \text{max}};$$

$$W_L / . \{ v_F \rightarrow 80 \}$$

14915.5

■ Laufwiderstand

Laufwiderstand nach Niemann (Rollwiderstand Kap. 13.6 + Lagerreibungswiderstand Kap. 14.7)

$$W_{\text{Lauf}} = m_{\text{ges}} * g * \left(\frac{f_{R, \text{Niemann}}}{r_{\text{Rad}}} + \frac{r_{\text{Lager}}}{r_{\text{Rad}}} * \mu_{\text{Lager}} \right);$$

$$W_{\text{Lauf}}$$

619.619

■ Bogenwiderstand aus Kurvenfahrt W_{Bo}

DB nach Röckl für $r > 300\text{m}$

$$W_{Bo, DB} = \frac{m_{\text{ges}} * g}{1000} * \frac{650}{r_{\text{min, gew}} - 30};$$

$$W_{Bo, DB}$$

936.124

erforderliche Leistungsgrößen des Antriebs

■ erforderliche Zugkraft an den angetriebenen Rädern Z in [N]

$$Z = W_L + W_{\text{Lauf}} + W_S + W_B + W_{Bo, DB};$$

■ erforderliche Motorleistung zur Überwindung der Fahrwiderstände P_{mot} in [kW]

$$P_{\text{mot}} = \frac{Z * (v_F / 3.6) * 10^{-3}}{\eta_G * \eta_A};$$

Auswertung

■ Begrenzung der Fahrdynamik durch maximal übertragbare Zugkraft

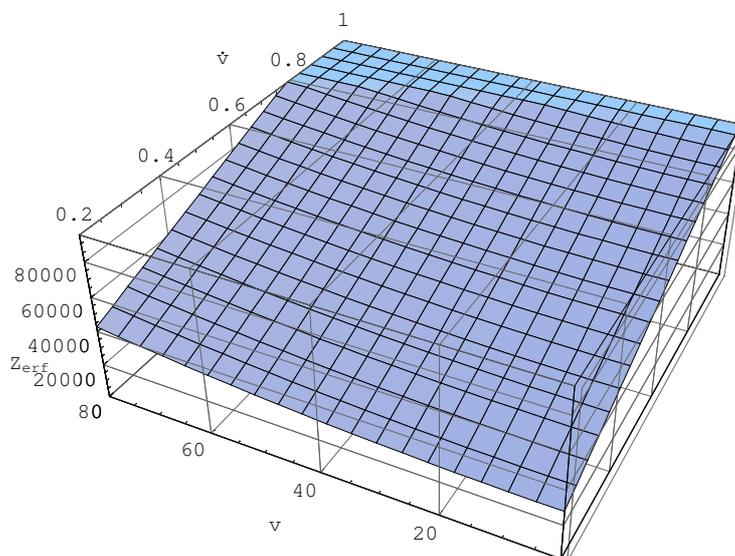
übertragbare Zugkraft bei minimaler Beladung des Tzf

$$Z_{\text{grenz}} = \mu_{\text{RS}} * m_{\text{ges}} * g$$

94764.6

Zugkraft auf Strecke maximaler Steigung in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Beschleunigung, vertikal begrenzt durch übertragbare Zugkraft

```
Plot3D[Evaluate[Z /. {v -> n, a -> 1 * a_max}, {n, 0.2, 1}, {v_F, 1, 80}],
  AxesLabel -> {"v", "v", "Z_eref"}, ViewPoint -> {-2, -1, 1.5}, FaceGrids -> All,
  PlotRange -> {{.2, 1}, {1, 80}, {0, Z_grenz}}, PlotPoints -> 20]
```

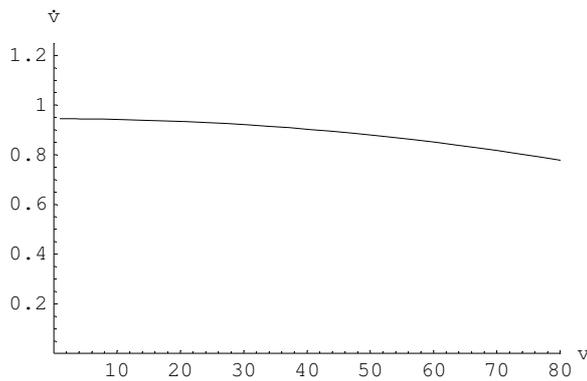


- SurfaceGraphics -

maximale geschwindigkeitsabhängige Beschleunigung bei maximaler Zugkraft auf Strecke maximaler Steigung

```
AvonV1 = Simplify[Solve[Z == Z_grenz /. {a -> 1 * a_max}, v]];
```

```
Plot[Evaluate[{\dot{v} /. AvonV1[[1]]}], {v_F, 1, 80},
  PlotRange -> {{0, 80}, {0, 1.25}}, AxesLabel -> {"v", "\dot{v}}]
```



- Graphics -

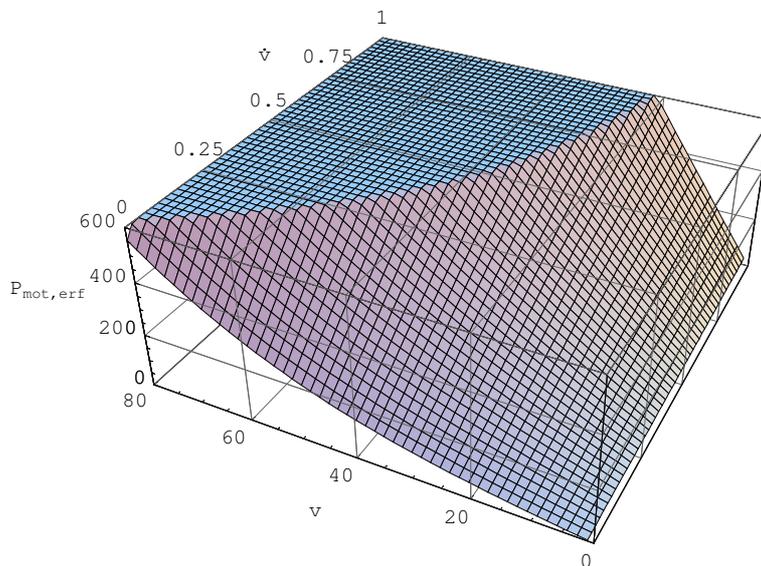
■ Begrenzung der Fahrdynamik durch gewählte Motorleistung

gewählte Leistung [kW]

$P_{\text{gew}} = 600;$

erforderliche Leistung auf Strecke maximaler Steigung in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Beschleunigung, vertikal begrenzt durch gewählte Leistung

```
Plot3D[Evaluate[P_{\text{mot}} /. {\dot{v} \to n, \alpha \to 1.0 * \alpha_{\text{max}}}], {n, 0, 1}, {v_F, 1, 80}],
  AxesLabel -> {"\dot{v}", "v", "P_{\text{mot, erf}}"}, ViewPoint -> {-2, -1, 1.5},
  FaceGrids -> All, PlotRange -> {{0, 1}, {0, 80}, {0, P_{\text{gew}}}}, PlotPoints -> 50]
```

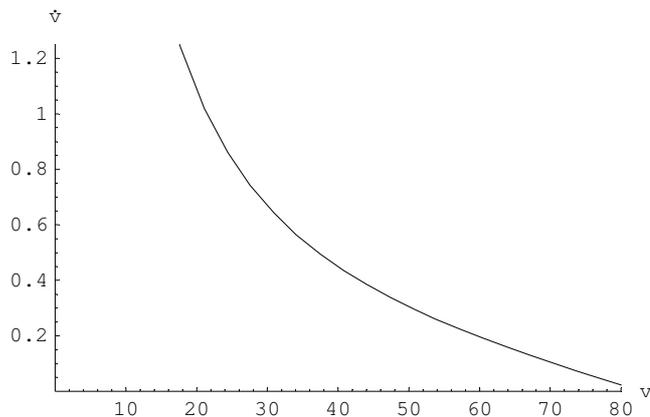


- SurfaceGraphics -

maximale geschwindigkeitsabhängige Beschleunigung bei gewählter Leistung auf Strecke maximaler Steigung

```
AvonV2 = Simplify[Solve[P_{\text{mot}} == P_{\text{gew}} /. {\alpha \to 1 * \alpha_{\text{max}}}, \dot{v}]];
```

```
Plot[Evaluate[{\dot{v} /. AvonV2[[1]]}], {v_F, 1, 80},
  PlotRange -> {{0, 80}, {0, 1.25}}, AxesLabel -> {"v", "\dot{v}}]
```

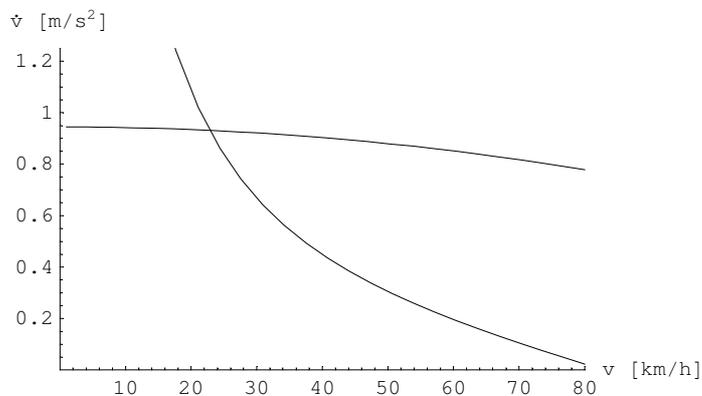


- Graphics -

■ mögliche Beschleunigung

maximale geschwindigkeitsabhängige Beschleunigung begrenzt durch maximale Zugkraft und gewählte Leistung auf Strecke maximaler Steigung

```
Plot[Evaluate[{\dot{v} /. AvonV2[[1]], \dot{v} /. AvonV1[[1]]}], {v_F, 1, 80},
  PlotRange -> {{0, 80}, {0, 1.25}}, AxesLabel -> {"v [km/h]", "\dot{v} [m/s^2]"}]
```



- Graphics -

mittlere geschwindigkeitsabhängige Beschleunigung bei maximaler Zugkraft und gewählter Leistung auf Strecke maximaler Steigung

```
SP = Solve[{\dot{v} /. AvonV1[[1]] == {\dot{v} /. AvonV2[[1]]}, v_F]
```

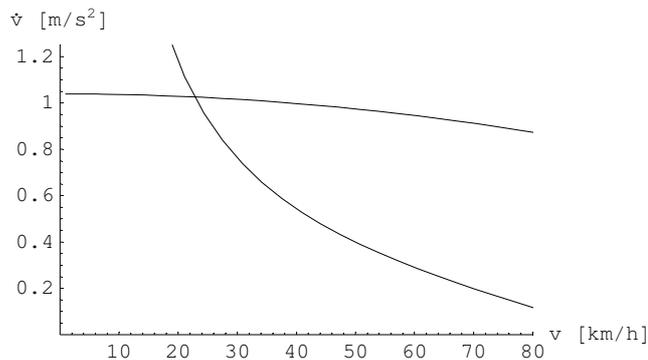
```
{ {v_F -> 22.7933} }
```

```
(Integrate[\dot{v} /. AvonV1[[1]], {v_F, 0, v_F /. SP[[1]]}] +
  Integrate[\dot{v} /. AvonV2[[1]], {v_F, v_F /. SP[[1]], 80}]) / 80
```

```
0.51184
```

maximale geschwindigkeitsabhängige Beschleunigung begrenzt durch maximale Zugkraft und gewählte Leistung auf ebener Strecke

```
AvonV3 = Simplify[Solve[Z == Z_grenz /. {α → 0 * α_max}, v̇]];
AvonV4 = Simplify[Solve[P_mot == P_gew /. {α → 0 * α_max}, v̇]];
Plot[Evaluate[{v̇ /. AvonV3[[1]], v̇ /. AvonV4[[1]]}], {v_F, 1, 80},
  PlotRange → {{0, 80}, {0, 1.25}}, AxesLabel → {"v [km/h]", "v̇ [m/s²]"}]
```



- Graphics -

mittlere geschwindigkeitsabhängige Beschleunigung bei maximaler Zugkraft und gewählter Leistung auf ebener Strecke

```
SP2 = Solve[{v̇ /. AvonV3[[1]] == (v̇ /. AvonV4[[1]]), v_F]
  {{v_F → 22.7933}}
(Integrate[v̇ /. AvonV3[[1]], {v_F, 0, v_F /. SP2[[1]]}] +
  Integrate[v̇ /. AvonV4[[1]], {v_F, v_F /. SP2[[1]], 80}]) / 80
0.60616
```

Berechnung des Bremsweges

maximal erreichbare Verzögerung am Gefälle bei maximaler Geschwindigkeit

$$a_{Br, grenz} = \frac{1}{m_{ges}} (Z_{grenz} - W_{Lauf, Niemann} - W_L + W_S);$$

$$a_{Br, grenz} /. \{v_F \rightarrow 80, \alpha \rightarrow \alpha_{max}\}$$

$$\frac{88309.6 - W_{Lauf, Niemann}}{69000}$$

$$a_{Br, gew} = 1.;$$

Bremsweg bei gewählter Verzögerung und vorgelagerter Signallaufzeit t_S

$$t_S = 11.;$$

$$s_{Br} = (v_F / 3.6) * t_S + \frac{1}{2} * \frac{(v_F / 3.6)^2}{a_{Br, gew}};$$

$$s_{Br} / \{v_F \rightarrow 80\}$$

491.358

Verzögerung bei vorgegebener Signallaufzeit t_S

mit Reaktionszeit Verzögerung

$$a_{Br,real} = \frac{1 (v_F / 3.6)^2}{2 * s_{Br}} ;$$

$$a_{Br,real} / \{v_F \rightarrow 80\}$$

0.502513