



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

DISSERTATION

ALL-ELECTRIC METRO

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg KARTNIG
E 307

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik

und

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Norbert OSTERMANN
E 230

Institut für Verkehrswissenschaften

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

DI Andreas Fertin
9706310

Große Stadtgutgasse 34/1/7
1020 Wien

Wien, am 19. August 2014

Danksagung

Ich bedanke mich bei den Mitarbeitern der Siemens AG Österreich für die Möglichkeit, dieses interessante Projekt zu bearbeiten. Insbesondere gilt mein Dank den Herren Herbert Giefing, Martin Kollmann, Alois Passenbrunner, Albin Sprengnagel vom Standort Wien Leberstraße und Martin Teichmann vom Standort Graz für die intensive und gute Zusammenarbeit in diesem Projekt.

Bei meinen beiden Betreuern Prof. Georg Kartnig und Prof. Norbert Ostermann bedanke ich mich herzlich für die fachliche und methodische Unterstützung.

Und schließlich gilt mein Dank meinen Kollegen am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, die mir stets gute Wegbegleiter waren. Vor allem bedanke ich mich bei Ilse Ladengruber für all ihre Unterstützung während meiner Zeit am Institut.

Kurzfassung

Das von der Technischen Universität Wien und der Siemens AG Österreich durchgeführte Forschungs- und Entwicklungsprojekt „All-electric Metro“ hatte zum Inhalt, ein Metrofahrzeug auf Basis der Siemens Inspiro Plattform mit SF 1000 Fahrwerken zu entwerfen, welches gänzlich auf Druckluft als Energiemedium verzichtet. Der dafür erforderliche Aufwand wurde ebenso eruiert wie die möglichen Einsparungen durch diese Entwicklung.

Nach Ermitteln der bisherigen Druckluftkomponenten wurden entweder taugliche Alternativen für diese aufgezeigt oder es wurde der notwendige Entwicklungsbedarf beschrieben, falls noch keine druckluftlosen Ersatzkomponenten aktuell verfügbar sind. Mehrere Lösungsmöglichkeiten wurden nach technischen Gesichtspunkten bewertet und die bestgeeigneten ausgewählt. Aus diesen wurde ein all-electric Fahrzeugkonzept entworfen.

Die Umstellung auf ein all-electric Konzept kann nicht mit den bestehenden SF 1000 Drehgestellen erfolgen, da eine Sekundärfederung, welche nicht aus Luftfederbälgen besteht, einen gänzlich anderen Bauraum benötigt. Es wäre dafür ein grundsätzlicher Umbau des Drehgestells notwendig, welcher mit einem hohen finanziellen Aufwand und Risiko verbunden ist. Aus diesem Grund wurde eine zweistufige Entwicklung vorgeschlagen. Im ersten Schritt werden die Luftfedern im Fahrzeug belassen, und es wird nur die Luftversorgung adaptiert. Im zweiten Entwicklungsschritt erfolgt die Umsetzung der all-electric Metro.

Die Auswirkungen des neuen Fahrzeugkonzepts auf Montage und Wartung wurden ebenso dargestellt wie mögliche zusätzliche Funktionen und Mehrwerte, die daraus generiert werden können. Es wurde eine Roadmap bis zum möglichen Baubeginn eines Prototypen erstellt und auch auf Marketingthemen eingegangen.

Abstract

The objective of the research and development project „All-electric Metro“, conducted by the Vienna University of Technology and Siemens AG Austria, was to design a metro car based on the Siemens Inspiro platform with SF 1000 bogies, which operates without a pneumatic system. The research paper also evaluated the scope of the technical modification and possible cost savings.

The current pneumatic systems were identified and possible alternatives were either demonstrated or, if in absence of alternatives, the necessary research and development analysed. Several alternatives were evaluated according to technological criteria and the most suitable selected. Based on these, a vehicle concept for an all-electric metro car was designed.

A key finding was that the conversion of the current SF 1000 bogie into an all-electric bogie is impossible, because the installation of an all-electric secondary suspension, which does not include a pneumatic suspension, requires a significantly different installation framework. A fundamental redesign of the bogie with considerable financial costs and risks would be necessary. Therefore a development in two steps was proposed. In the first step the pneumatic secondary suspension system remains in the car and only the supply with pressurised air is adapted. In the second step the adaption into an all-electric metro is realised.

The impact of the new concept on assembly and maintenance was also shown, as well as possible additional functions and benefits based on the all-electric concept. A research and development roadmap until the construction of a prototype car was evaluated, while marketing issues were also discussed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung -----	9
1.1	Vorstellung des Themas -----	9
1.2	Wissenschaftliche Fragestellungen der Arbeit -----	11
1.3	Literaturübersicht -----	12
2	Randbedingungen -----	14
2.1	Technische Randbedingungen -----	14
2.2	Wirtschaftliche Randbedingungen -----	18
3	Vorgehensweise, Methodik -----	19
4	Betroffene Komponenten -----	22
4.1	Bisherige Lösungen für einzelne Komponenten -----	23
4.1.1	Mechanische Bremse -----	23
4.1.2	Sekundärfederung -----	30
4.1.3	Niveauregulierung -----	32
4.1.4	Spaltüberbrückung -----	32
4.1.5	Dritte Schiene Stromabnehmer -----	33
4.1.6	Horn -----	34
4.1.7	Pantograf -----	34
4.1.8	Spurkranzschmierung -----	35
4.2	Vorhandene Fahrzeuge ohne Druckluft -----	37
5	Lösungsmöglichkeiten -----	39
5.1	Varianten der mechanischen Bremse -----	39
5.1.1	Elektrohydraulische Bremse von Siemens -----	40
5.1.2	Elektromechanische Bremse von Vienna Engineering -----	41
5.1.3	Flugzeugbremse von Messier-Bugatti-Dowty -----	42

5.1.4	Keilbremse vom DLR -----	44
5.1.5	Kugelrampenbremse von Continental Automotive -----	45
5.1.6	Bremse mit Verriegelung von Continental Teves -----	46
5.1.7	Bremse mit reversiblen Kraftspeicher von Continental Automotive ----	47
5.1.8	Parkbremse von Knorr-Bremse -----	48
5.2	Auswahl der mechanischen Bremse -----	49
5.3	Varianten der Sekundärfederung -----	53
5.3.1	Alternative bestehende Drehgestellvarianten (Siemens SF 300, SF 70, SF 40) 53	
5.3.2	Linearaktor -----	55
5.3.3	Elektrorheologische Dämpfer mit Schraubenfeder -----	56
5.3.4	Magnetorheologische Dämpfer mit Schraubenfeder -----	58
5.3.5	Hydropneumatische Federung -----	61
5.3.6	Hexapod -----	62
5.3.7	Geschützstabilisierung -----	63
5.3.8	Elektronische Luftfederung -----	63
5.3.9	Passiver Dämpfer mit Schraubenfeder -----	64
5.4	Auswahl der Sekundärfederung -----	65
5.5	Zweistufige Entwicklung der Sekundärfederung -----	68
5.5.1	Zentrale Kompressoren -----	70
5.5.2	Dezentrale Kompressoren -----	71
5.5.3	4-Punkt-Steuerung mit elektronischem Luftsteuerventil und weitere Steuerungsvarianten -----	73
5.5.4	All-electric Sekundärfederung -----	77
5.6	Niveauregulierung -----	78
5.6.1	Niveauregulierung mit zentralen oder dezentralen Kompressoren -----	78

5.6.2	All-electric Niveauregulierung	78
5.7	Spaltüberbrückung	79
5.8	Dritte Schiene Stromabnehmer	80
5.9	Horn	81
5.10	Pantograf	82
5.11	Spurkranzschmierung	82
5.12	Morphologischer Kasten aller Lösungsmöglichkeiten	83
6	Berechnungsgrundlagen für das wirtschaftliche Potenzial	84
6.1	Berechnungsgrundlagen der mechanischen Bremse	86
6.2	Berechnungsgrundlagen für Sekundärfederung und Niveauregulierung	87
6.2.1	Sekundärfederung und Niveauregulierung mit Kompressoren	87
6.2.2	All-electric Sekundärfederung	91
6.2.3	All-electric Niveauregulierung	93
6.3	Berechnungsgrundlagen der Spaltüberbrückung	95
6.4	Berechnungsgrundlagen des Dritte Schiene Stromabnehmers	95
6.5	Berechnungsgrundlagen des Horns	96
6.6	Berechnungsgrundlagen der Spurkranzschmierung	97
6.7	Berechnungsgrundlagen des Pantografen	97
7	Fahrzeugvarianten	98
8	Bewertung der Lösungsmöglichkeiten	100
8.1	Bewertung der neuen Fahrzeugvarianten	101
8.2	Vergleich der neuen Varianten mit dem aktuellen Siemens Inspiro	104
8.3	Morphologischer Kasten der all-electric Metro	106
9	Energieverbrauchsrechnung, Lebenszykluskosten	107
10	Auswirkungen des all-electric Konzepts auf die Montage	113
10.1	Verrohrung mit zentralen Kompressoren	113

10.2	Verrohrung mit dezentralen Kompressoren -----	114
10.3	Verrohrung des all-electric Fahrzeugs-----	115
11	Auswirkungen auf die Wartung -----	116
12	Zusätzliche Funktionen durch das all-electric Konzept-----	117
13	Mehrwerte durch das all-electric Konzept -----	119
13.1	Mehrwert für den Hersteller -----	119
13.2	Mehrwert für den Kunden -----	119
13.3	Mögliche Alleinstellungsmerkmale-----	120
14	Roadmap, Zeitabschätzungen-----	121
15	Marketingthemen -----	123
16	Zusammenfassung, Ergebnis und Ausblick -----	125
17	Abbildungsverzeichnis-----	130
18	Tabellenverzeichnis -----	132
19	Quellenverzeichnis -----	135

1 Einleitung

1.1 Vorstellung des Themas

Von Dezember 2010 bis November 2013 wurde von der Siemens AG Österreich und der Technischen Universität Wien das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „All-electric Metro“ durchgeführt. Das Ziel dieses Projektes war die Ermittlung des zeitlichen, finanziellen und technischen Aufwandes, ein Metrofahrzeug gänzlich ohne Druckluftkomponenten zu entwickeln. Das Projekt umfasste ursprünglich die folgenden Punkte:

- Ermitteln der betroffenen Komponenten
- Finden von alternativen Lösungen bzw. Eruiieren der notwendigen Entwicklungen
- wirtschaftliche Betrachtung der bestehenden und der neuen Lösung
- Erheben der zu erwartenden Energieeinsparungen und Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten
- Erstellen einer Roadmap zur Umsetzung
- Lebenszyklusanalyse des Gesamtkonzepts

Unter Verwendung wissenschaftlicher Methoden, Beurteilungs- und Auswahlverfahren wurden unter den vorhandenen Rahmenbedingungen die bestgeeigneten Lösungen ermittelt und technisch bewertet. Auf die dafür verwendete Methodik wird in Abschnitt 3 näher eingegangen.

Es ist bisher keine Literatur bekannt, welche das Thema einer all-electric Metro gesamtheitlich betrachtet. Sehr wohl wurden Alternativen für einzelne Komponenten geprüft, wie beispielsweise der Einbau magnetorheologischer Dämpfer in ein 70 t-Schienenfahrzeug, welcher in einer Studie [1] an der Texas A&M University im Jahr 2003 untersucht wurde. Ebenso finden sich druckluftlose Alternativen für andere Schienenfahrzeugkomponenten am Markt. Im Jahr 2012 hat sich das britische Rail Safety and Standards Board RSSB [2] unter ausschließlicher Betrachtung der aktu-

ellen Situation in Großbritannien mit der Umrüstung von Zügen auf elektrische Bremsen und in weiterer Folge mit dem Ersatz sämtlicher pneumatischer Systeme beschäftigt, worauf in Abschnitt 1.3 eingegangen wird. Trotzdem ist keine Untersuchung moderner Metro-Fahrzeuge bekannt, welche sich dem all-electric Thema in seiner Gesamtheit widmet. Diese Arbeit hat daher zum Ziel, sämtliche Druckluftkomponenten eines Metro-Fahrzeugs zu ersetzen und die daraus resultierenden Auswirkungen zu untersuchen.

Als Referenzfahrzeug wurde der Siemens Inspiro mit SF 1000 Fahrwerken ausgewählt. Mit Fortdauer des Projekts stellte sich heraus, dass eine vollständige Umstellung auf all-electric gleich im ersten Schritt technisch und wirtschaftlich zu riskant ist. In diesem Fall wäre nämlich eine zeitlich und finanziell sehr aufwändige Neuentwicklung des Drehgestells notwendig, weil eine Sekundärfederung ohne Luftbalg, welche dann notwendig wäre, einen gänzlich anderen Bauraum benötigt. Ins bestehende Drehgestell SF 1000 lässt sich eine all-electric Sekundärfederung nicht integrieren. Daher werden im ersten Schritt alle Druckluftsysteme bis auf Sekundärfederung und Niveauregulierung durch all-electric Systeme ersetzt, und zur Versorgung der Luftfederbälge werden entweder adaptierte, zentrale, große Kompressoren oder mehrere noch kleinere, dezentrale Einheiten verwendet. Wenn sich dieses System im Betrieb bewährt, werden dann im zweiten Schritt auch die verbliebenen Druckluftsysteme entfernt. Nach Umbau des Drehgestells kann dann das Metrofahrzeug vollständig als all-electric Zug ausgeführt werden.

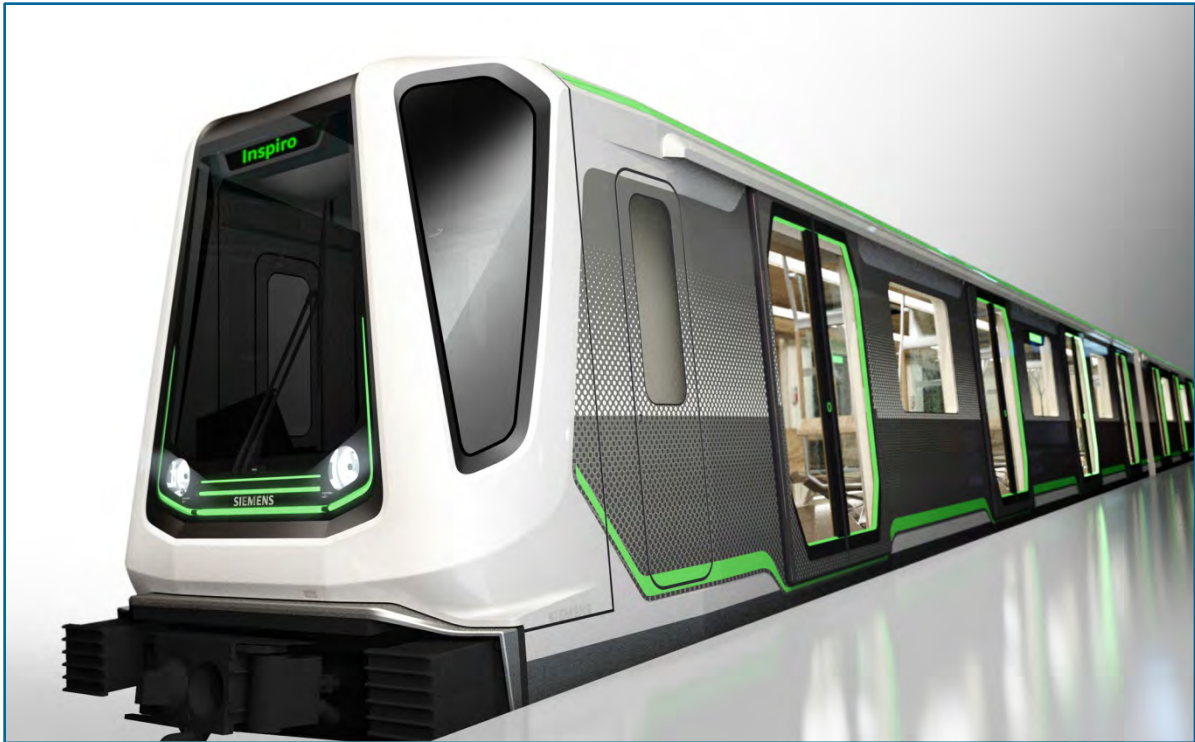


Abbildung 1.1 Siemens Inspiro, Designbild [3]

1.2 Wissenschaftliche Fragestellungen der Arbeit

Resultierend aus den aufgelisteten Punkten in Abschnitt 1.1 ergeben sich die folgenden wissenschaftlichen Fragestellungen, denen sich diese Arbeit widmet:

- Welche Komponenten sind vom neuen Fahrzeugkonzept betroffen?
- Sind alternative Lösungen serienreif am Markt verfügbar oder besteht Entwicklungsbedarf?
- Welche technischen Auswirkungen hat der Einbau jeder einzelnen alternativen Komponente?
- Welche wirtschaftlichen Auswirkungen hat der Einbau jeder einzelnen alternativen Komponente?
- Welche Auswirkungen hat jede Komponente auf den Energieverbrauch?
- Wie wirken sich die neuen Komponenten auf die Fertigung aus?
- Wie wirken sich die neuen Komponenten auf die Wartung aus?
- Wie wirken sich die neuen Komponenten auf die Lebenszykluskosten aus?

- Welche zusätzlichen Fahrzeugfunktionen und Mehrwerte können durch das all-electric Konzept generiert werden?
- In welchem zeitlichen Horizont ist das all-electric Konzept umsetzbar?

1.3 Literaturübersicht

Zum Thema der all-electric Metro ist keinerlei Literatur bekannt. Einzig das britische Rail Safety and Standards Board RSSB hat sich 2012 in dem Bericht „Benefits of all-electric braking“ [2] mit der Umrüstung von Zügen auf elektrische Bremsen und in weiterer Folge mit dem Ersatz sämtlicher pneumatischer Systeme beschäftigt. Es kommt dabei zu dem Schluss, dass die Umstellung auf all-electric Fahrzeuge bei der Bremsausrüstung eines 75 %-motorisierten 4-Teilers Kosteneinsparungen im Bereich von 33 % der Betriebskosten ermöglicht. Der Bericht bezieht sich auf die Situation bei Vollbahnen in Großbritannien, wo derzeit de facto keine elektrodynamischen Bremssysteme im Einsatz sind. Daraus ergibt sich ein besonders großes Einsparungspotential durch generatorisches Bremsen und durch den Einsatz von Wirbelstrombremsen.

Die pneumatischen Systeme werden in diesem Bericht als die wartungsintensivsten bezeichnet, auch die Wartungsintervalle könnten ohne pneumatische Systeme verlängert werden.

Die elektrisch betätigte, passive Reibungsbremse wird als die beste Lösung für die Parkbremse bezeichnet, weil sie fail-safe sowie relativ günstig ist und keine Stützbatterie benötigt.

Als Ersatz für die zentral versorgte Luftfederung wird eine gekapselte Luftfederung vorgeschlagen, siehe Abbildung 1.2. Dabei ist der Federbalg mit einem Zusatzbehälter mit variablem Volumen verbunden, um auf äußere Einflüsse wie Beladung und Temperaturunterschiede reagieren zu können. Dieses System weist zwar noch Entwicklungsbedarf auf, doch es wird darauf verwiesen, dass sämtliche notwendigen Komponenten bereits am Markt verfügbar sind. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf

diese gekapselte Luftfeder nicht weiter eingegangen, da dieses System einen wesentlich größeren Bauraum als das bisherige benötigt, und der Bauraum gerade bei leichten Schienenfahrzeugen einen kritischen Faktor darstellt.

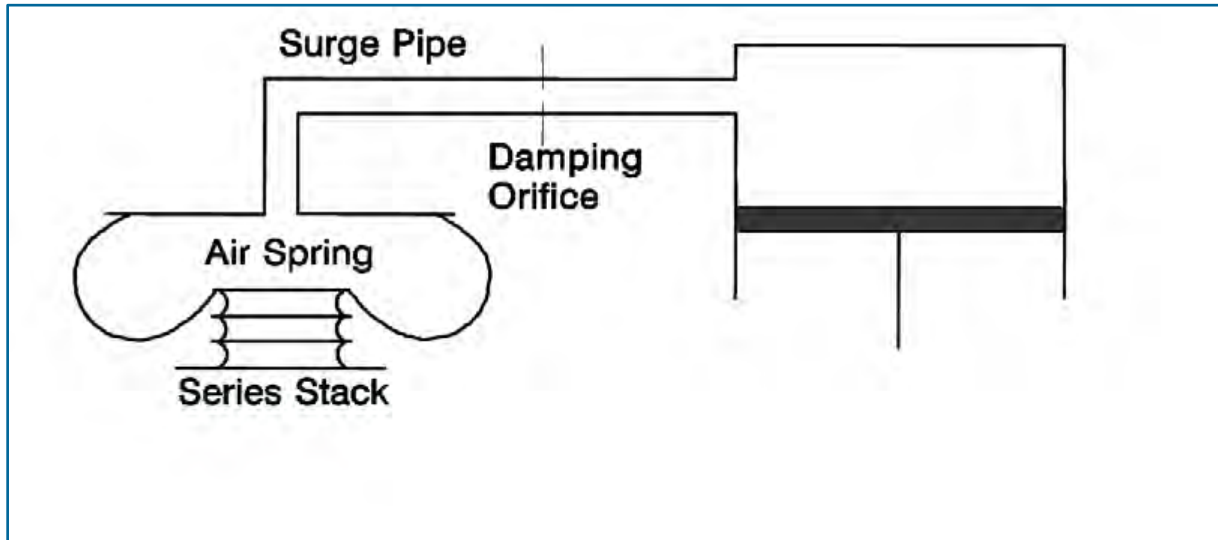


Abbildung 1.2 Gekapselte Luftfeder [2]

Es werden keine signifikanten Hürden gesehen, einen „all-electric brake“ Zug zu entwickeln, der keine zentrale Luftversorgung und keine Hauptluftbehälterleitung mehr hat.

2 Randbedingungen

2.1 Technische Randbedingungen

Die technischen Randbedingungen für die Studie wurden von Siemens vorgegeben. Als Referenzfahrzeug wurde ursprünglich die Metro-Plattform Inspiro mit Syntegra Fahrwerken ausgewählt. Das Syntegra Fahrwerk hat als Traktionsantrieb eine getriebelose, permanenterregte Synchronmaschine und besitzt keine vollwertige mechanische Bremse, sondern nur eine Klotzbremse zum Abstellen des Fahrzeugs. Da die permanenterregte Synchronmaschine bei gegebener externer Beschaltung ein inhärentes Bremsmoment erzeugt, stellt das Konzept eine sichere elektrische Bremse dar.

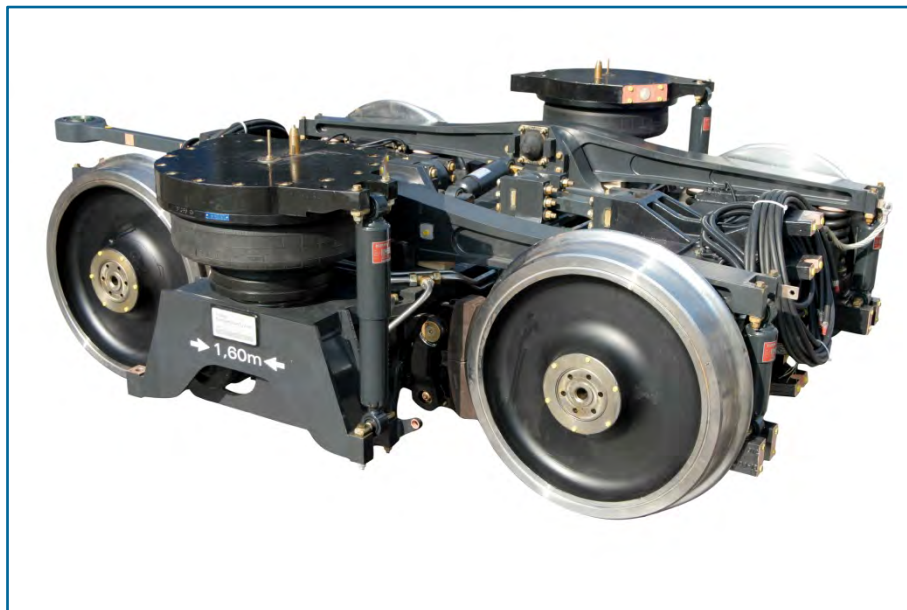


Abbildung 2.1 Drehgestell Syntegra [4]

Mit Fortdauer des Projekts wurde der Fokus jedoch auf das Fahrwerk SF 1000 gelegt, da dieses im Gegensatz zum Syntegra schon vielfach verbaut wurde. Das SF 1000 wird als Triebdrehgestell und als Laufdrehgestell ausgeführt. Das Triebdrehgestell ist mit zwei Asynchronmotoren mit Getriebe ausgerüstet und besitzt eine Wellenscheibenbremse pro Radsatz.



Abbildung 2.2 Drehgestell SF 1000 [5]

Der Siemens Inspiro ist ein Einzelwagenzug, der in der Basiskonfiguration als 6-Teiler mit jeweils zwei motorisierten Kopfwägen (Mc), motorisierten Mittelwägen (M) und nicht motorisierten Mittelwägen (T) ausgeführt ist. Es sind Varianten vom 3-Teiler bis zum 8-Teiler mit einem Motorisierungsgrad von 60 % bis 100 % vorgesehen. Die Basiskonfiguration ist:

Mc – T – M – M – T – Mc

Der Siemens Inspiro wurde für eine Maximalgeschwindigkeit von 90 km/h ausgelegt, im regulären Betrieb ist eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h vorgesehen.

Die Wagenkästen bestehen aus geschweißten Aluminiumprofilen und sind 2,77 m breit sowie 20,1 m (Kopfwagen) bzw. 19,4 m (Mittelwagen) lang. Die Fußbodenhöhe beträgt in der Basiskonfiguration 1130 mm. Varianten in der Breite sind von 2,63 m bis 3,0 m vorgesehen und bei der Fußbodenhöhe von 1100 mm bis 1150 mm. Weitere technische Daten zu Fahrzeug und Drehgestell sind in Tabelle 2.1 angeführt.



Abbildung 2.3 Siemens Inspiro, Ausführung Warschau [6]



Abbildung 2.4 Siemens Inspiro Aluminiumwagenkasten [7]

Technische Daten (<i>kursiv mögliche Varianten</i>)	
Zugkonfiguration	6-Teiler (<i>3- bis 8-Teiler</i>)
Motorisierung	66 % (<i>60 % bis 100 %</i>)
Antrieb	Asynchronmotor vollgefedert, Getriebe achsreitend
Antriebsleistung (je M-, Mc-Wagen)	4 x 140 kW
Stromversorgung	DC 750 V Dritte Schiene <i>DC 1.500 V Oberleitung</i>
Maximalgeschwindigkeit	80 km/h (<i>90 km/h</i>)
max. Beschleunigung	1,2 m/s ²
max. Verzögerung (Betrieb / Notbremsung)	1,1 m/s ² / 1,3 m/s ²
Hilfsbetriebe	3 AC 400 V / DC 110 V
Wagenkastenmaterial	Aluminium
Wagenlänge (über Kupplung)	20,1 m / 19,4 m (End-/Mittelwagen) <i>18,6 m bis 20,1 m</i>
Gesamtlänge 6-Teiler	117,8 m
Wagenbreite	<i>2,77 m (2,63 m bis 3,0 m)</i>
Fußbodenhöhe (über SOK)	1.130 mm (<i>1.100 mm bis 1.150 mm</i>)
Wagenhöhe (über SOK)	3.645 mm
Sitzplätze pro Zug	256
Passagierkapazität (6,67 Pers./m ²)	1.393
Passagierkapazität (8 Pers./m ²)	1.620
Spurweite	1.435 mm
Radsatzlast	13 t
Achsabstand	2.100 mm
Raddurchmesser neu / abgenutzt	850 mm / 770 mm
minimaler Bogenradius Betrieb / Depot	90 m / 70 m
Masse Triebdrehgestell / Laufdrehgestell	6,7 t / 5,0 t

Tabelle 2.1 Technische Daten Siemens Inspiro [8] [9] [5] [10]

2.2 Wirtschaftliche Randbedingungen

Die wirtschaftlichen Randbedingungen wurden derart vorgegeben, dass das all-electric Konzept für den Betreiber keine wirtschaftlich schlechtere Lösung als das bisherige darstellen darf. Die Betrachtung soll über den Produktlebensabschnitt von Herstellung und Betrieb stattfinden. Das Konzept muss nicht unter den aktuellen wirtschaftlichen Randbedingungen eine Verbesserung darstellen, sondern kann auch erst in mittlerer Zukunft (etwa 10 Jahre) bei sich ändernden Umweltbedingungen (wie z. B. Verschärfung von gesetzlichen Vorschriften) einen Vorteil bieten. Auch Verbesserungen durch zusätzliche Funktionen, die bisher nicht verfügbar waren, und die die technische oder wirtschaftliche Wertigkeit des all-electric Fahrzeugs steigern, fließen in die Beurteilung mit ein.

3 Vorgehensweise, Methodik

Am Beginn der Arbeit wurden alle Komponenten eruiert, die von einer Weiterentwicklung zum all-electric Fahrzeug betroffen sind. Im Anschluss folgte die Suche nach Alternativen, wobei sich einerseits herausstellte, dass für manche Komponenten fertige Lösungen verfügbar sind, andererseits manche Lösungen erst (fertig) entwickelt werden müssen, und dass manche Druckluftkomponenten wiederum nicht einfach durch elektrische ersetzt werden können. Letztere wurden in Bezug auf ihre Funktionen betrachtet, und es wurden Alternativen für diese Funktionen ermittelt. Bei den bereits bestehenden Lösungen werden manche im Schienenfahrzeugbau eingesetzt, andere hingegen (noch) nicht.

Da die Komplexität von Schienenfahrzeugen ständig zunimmt, ist die Zuhilfenahme von Experten, deren Fachwissen und Erfahrungen für die Bearbeitung eines derartigen Themas unerlässlich. Daher wurden für diese Studie in jeder Phase in Anlehnung an die Delphi-Methode zahlreiche Interviews mit Experten aus den jeweiligen Fachbereichen durchgeführt. Regelmäßige Treffen und Workshops mit diesen Experten haben auch eine Reflexion und Weiterentwicklung der gewonnenen Erkenntnisse ermöglicht, allerdings nicht in anonymer Form, wie es bei der Delphi-Befragung vorgesehen ist. Aufgrund der teilweise geringen Anzahl an Experten in den einzelnen Themengebieten und deren Firmennähe wäre die Aussagekraft eines vollständigen Delphi-Verfahrens ohnehin kritisch zu beurteilen gewesen. Daher wurde diese Methode nur in eingeschränktem Ausmaß angewandt.

Es kamen klassische Anwendungen aus der Produktentwicklung zum Einsatz wie diverse Auswahlmethoden (Anforderungs- und Auswahlliste, morphologischer Kasten, paarweiser Vergleich (Dual-Vergleich) nach VDI 2221 sowie Pahl/Beitz Konstruktionslehre [11]; Nutzwertanalyse nach VDI 2225-3). Die Auswahlmethode mit Anforderungs- und Auswahlliste war aufgrund der sehr unterschiedlichen Lösungsvarianten für die beiden wesentlichen Komponenten mechanische Bremse und Sekundärfederung die bestgeeignete Methode, um untaugliche und schlechter geeignete Lö-

sungen rasch ausscheiden zu können. In Anlehnung an die Nutzwertanalyse nach VDI 2225-3 wurde bei den ausgewählten Fahrzeugvarianten eine Beurteilung der technischen Wertigkeit vorgenommen, wobei diese mangels konkreter Daten und wegen noch nicht vorhandener Serienreife zum Teil auf Expertenschätzungen beruht. Aufgrund noch nicht vorhandener Lebenszyklusdaten und ebenso fehlender Kosten der Serienprodukte der neuen Komponenten war es nicht möglich, eine wirtschaftliche Wertigkeit zu bestimmen. Das Erstellen eines s-Diagramms nach VDI 2225-3, womit die gesamte „Stärke“ einer Lösung bestimmt werden kann, war daher nicht möglich. Allerdings konnten aufgrund der technischen Wertigkeit der einzelnen Lösungen paarweise Vergleiche (Dual-Vergleiche) durchgeführt werden. Durch die Gegenüberstellung der einzelnen Lösungen im paarweisen Vergleich konnte eindeutig die bestgeeignete ermittelt werden.

Gegen Ende des Projekts erfolgte die Erstellung einer Roadmap, mit der der zeitliche Horizont einer all-electric Entwicklung für ein Metrofahrzeug dargestellt wird. Die Lebenszyklusanalyse des neuen Fahrzeugkonzepts sollte den Abschluss der Studie bilden. Wie sich jedoch zeigen wird, kann aufgrund fehlender oder noch nicht vorhandener Daten nur eine sehr grobe zeitliche Abschätzung der weiteren Entwicklungsschritte und des zeitlichen Horizonts der Umsetzung eines Prototyps durchgeführt werden. Diese Abschätzung wurde mithilfe von Fachexperten durchgeführt. Eine exakte Berechnung oder Abschätzung von Herstellungs- oder Lebenszykluskosten war aus dem gleichen Grund nicht möglich.

In Abschnitt 12 werden verbesserte Funktionen oder auch mögliche zusätzliche Funktionen einzelner Komponenten aufgezeigt, die einen Mehrwert darstellen können, welcher derzeit nicht monetär bewertet werden kann. Es stellt sich als neue Frage, welchen Wert diese Funktionen darstellen. Die Ermittlung dieser Werte würde den Umfang dieser Arbeit sprengen, weshalb hierfür eine weitere Bearbeitung nötig ist.

Bei Lösungen, die noch keine Serienreife erreicht haben, wurde der Zeitraum bis zum Erreichen selbiger abgeschätzt. Dabei wurde im Zweifel sehr großzügig vorge-

gangen, da Zulassungsprozesse im Schienenfahrzeugbereich aufgrund der hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Sicherheit sehr aufwändig sind.

4 Betroffene Komponenten

Von der Umstellung auf ein all-electric Konzept sind sämtliche Komponenten des Fahrzeugs betroffen, die aktuell mit Druckluft betrieben werden:

- mechanische Bremse
- Sekundärfederung
- Niveauregulierung
- Spaltüberbrückung
- Dritte Schiene Stromabnehmer (falls vorhanden)
- Horn
- Pantograf (falls vorhanden)
- Spurkranzschmierung (falls vorhanden)



Abbildung 4.1 Betroffene Fahrzeugkomponenten [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18]

Sekundärfederung und Niveauregulierung werden beim Siemens Inspiro durch einen luftgefüllten Gummibalg ausgeführt. Der Füllgrad des Balgs bestimmt sowohl die Federeigenschaft als auch das Niveau des Wagenkastens. Eine getrennte Betrachtung der beiden Komponenten war daher nur eingeschränkt möglich. Erst bei einer Ausführung als all-electric Fahrzeug werden Sekundärfederung und Niveauregulierung tatsächlich durch zwei verschiedene Komponenten unabhängig voneinander ausgeführt. Bei der Zwischenvariante mit den Luftfederbälgen bleiben die beiden Komponenten grundsätzlich unverändert. Es ändert sich nur die Luftversorgung.

Alle anderen Komponenten sind Einzelkomponenten, die getrennt voneinander betrachtet werden können.

4.1 Bisherige Lösungen für einzelne Komponenten

4.1.1 Mechanische Bremse

In Schienenfahrzeugen werden unterschiedliche Arten der mechanischen Bremse verbaut. Diese werden ebenso wie einige Bremsungsarten hier erläutert.

4.1.1.1 Varianten von Schienenfahrzeugbremsen

Klotzbremse

Die Klotzbremse erzeugt die Bremskraft, indem der Bremsschuh mit dem Bremsbelag direkt auf die Lauffläche des Rades gedrückt wird. Diese Bremse wird hauptsächlich bei Güterwägen eingesetzt, könnte aber auch im Schienennahverkehr wieder an Bedeutung gewinnen, wenn sich durch die Weiterentwicklung des generatorischen Bremsens die mechanische Bremse auf die Feststell- und Haltebremsung beschränkt.



Abbildung 4.2 Klotzbremse (schwarz) [19]

Scheibenbremse mit Radbremsscheibe

Bei der Scheibenbremse mit Radbremsscheibe wirkt die Bremszange auf eine direkt am Rad montierte Scheibe.



Abbildung 4.3 Velaro Drehgestell mit Radbremsscheiben [20]

Scheibenbremse mit Wellenbremsscheibe

Bei der Scheibenbremse mit Wellenbremsscheibe wirkt die Bremszange auf Scheiben, welche auf der Radsatzwelle montiert sind. Im Hochgeschwindigkeitsverkehr werden bei Laufdrehgestellen bis zu vier Bremsscheiben auf einer Welle verbaut.



Abbildung 4.4 Drehgestell eines SBB Eurocity-Waggons mit Wellenbremsscheiben [21]

Magnetschienenbremse

Die Magnetschienenbremse gilt nicht als mechanische Bremse, obwohl die Bremswirkung mechanisch erzielt wird. Dabei wird die Bremskraft erzeugt, indem Schleifschuhe durch Elektromagneten an die Schienenoberfläche gezogen werden. Zusätzlich wirkt vor allem bei höheren Geschwindigkeiten durch Wirbelstrominduktion eine der Fahrtrichtung entgegengesetzte Kraft, wodurch eine zusätzliche Bremswirkung erreicht wird.

Die Magnetschienenbremse wird bei Metros üblicherweise nicht verbaut, da sie vor allem bei schlechten Schienenverhältnissen wie bei Laub oder im Mischverkehr mit dem Individualverkehr wie bei Straßenbahnen, wenn kurze Notbremswege gefordert sind, zum Einsatz kommt. Da Metros normalerweise

in abgeschlossenen, geschützten Systemen verkehren, sind sie diesen Umweltbedingungen meist nicht ausgesetzt.

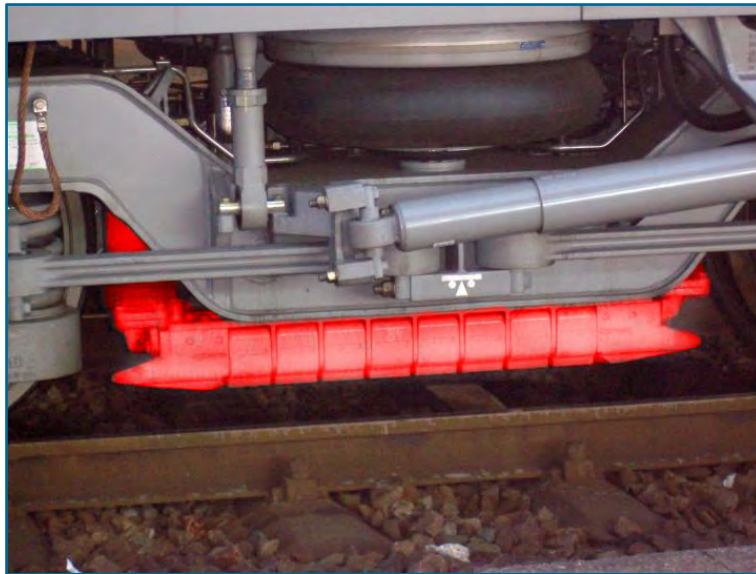


Abbildung 4.5 Magnetschienenbremse (rot) [22]

Wirbelstrombremse

Die Wirbelstrombremse ist keine mechanische Bremse und kommt im Hochgeschwindigkeitsverkehr zum Einsatz. Dabei erzeugen Elektromagnete, welche knapp über den Schienen montiert sind, ein Magnetfeld, welches aufgrund der Lenzschen Regel der Bewegungsrichtung der Magneten und damit des Zuges entgegenwirkt. Die Wirbelstrombremse hat den Vorteil, dass sie völlig unabhängig vom Rad-Schiene-Kontakt ist und damit bei allen Schienenverhältnissen gleich wirkt. Nachteilig ist die sehr starke Wärmeentwicklung, die vor allem die Schienen stark belastet und zu thermischen Beschädigungen der Schienenoberfläche führen kann. Da Wirbelstrombremsen bei Geschwindigkeiten über 50 km/h effizient arbeiten, kommen sie bei Metros nicht zum Einsatz.

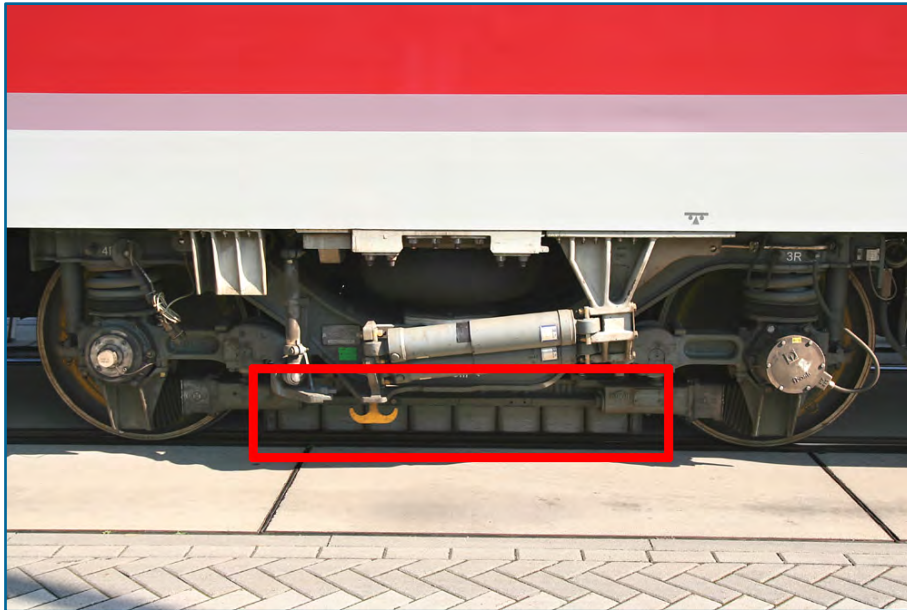


Abbildung 4.6 Wirbelstrombremse (rot umrandet) eines ICE S [23]

Der Siemens Inspiro ist mit zwei unterschiedlichen Bremssystemen ausgerüstet, nämlich mit einer elektrodynamischen Bremse an den Triebdrehgestellen (generatorisches Bremsen) sowie mit einer mechanischen Reibungsbremse an allen Achsen. Die mechanische Bremse wird beim Siemens Inspiro in Form von pneumatischen Kompaktbremszangen und Wellenbremsscheiben ausgeführt. Auf jeder Achse befindet sich eine Bremsscheibe mit einer Bremszange, siehe Abbildung 2.2.

4.1.1.2 Bremsungsarten

Bei Metros kommen je nach Situation unterschiedliche Bremsungsarten zum Einsatz. Diese sind unter anderem in der EN 13452-1 beschrieben. Die relevanten werden hier kurz erläutert. Die Anforderungen an das Leistungsvermögen der Bremsungsarten werden in der EN 13452-1 sowie in Abschnitt 5.1 angeführt.

Betriebsbremsung

Die Betriebsbremsung wird im normalen Betrieb zum Verzögern des Fahrzeugs verwendet. Beim Siemens Inspiro wird bis kurz vor dem Stillstand die elektrodynamische Bremse für die Betriebsbremsung eingesetzt. Die elektrodynamische Bremse arbeitet verschleißfrei und ist außerdem in der Lage, die

zurückgewonnene elektrische Energie ins Netz zurückzuspeisen, sofern dieses aufnahmefähig ist. Wenn die elektrodynamische Bremse nicht die geforderte Verzögerung erreicht, so kommt es zu einer Betriebsersatzbremsung durch die mechanische Reibungsbremse. Die mechanische Reibungsbremse übernimmt in diesem Fall teilweise oder vollständig die Bremsung. Die Gründe, warum es zu einer Betriebsersatzbremsung kommt, können an der Nichtaufnahmefähigkeit des elektrischen Netzes, in einem teilweisen oder vollständigen Ausfall der Motoren oder der Umrichter liegen oder auch an schlechten Schienenverhältnissen, denn es kann ja immer nur an den Triebdrehgestellen elektrodynamisch gebremst werden.

Haltebremsung (Teil der Betriebsbremsung)

System- und prinzipbedingt kann nicht bis zum absoluten Stillstand elektrodynamisch gebremst werden bzw. kann der Zug nicht im Stillstand elektrodynamisch festgehalten werden. Wenn bis zum Stillstand gebremst wird, kommt es etwa ab Schrittgeschwindigkeit zum Blending. Beim Blending wird die Bremskraft der elektrodynamischen Bremse durch die mechanische Bremse übernommen, um den Zug zum Stillstand zu bringen. Danach dient die mechanische Bremse als Festhaltebremse.

Abstellbremsung

Die Abstellbremsung eines Zuges wird immer passiv von einer Federspeicherbremse ausgeführt. Das bedeutet, dass diese energielos das Fahrzeug sicher festhält. Zum Aufheben der Abstellbremsung muss Energie aufgebracht werden. Die Abstellbremsung wird immer durch die mechanische Reibungsbremse ausgeführt.

Notbremsung

Die Notbremsung dient zum Anhalten des Zuges in Gefahrenfällen. Für die Notbremsung wird im Allgemeinen ausschließlich die mechanische Reibungsbremse verwendet, da diese Bremse im Gegensatz zur elektrodynamischen Bremse immer funktionieren muss, vor allem auch bei einem vollstän-

digen Ausfall des elektrischen Netzes oder des Bordnetzes. Die Notbremsung kann durch das Fahrpersonal oder durch die Zugsteuerung ausgelöst werden. Bei einer ungewollten Zugtrennung kommt es ebenfalls zu einer Notbremsung. Bei der Notbremsung können höhere Verzögerungswerte als bei der Betriebsbremsung gefordert werden.

Bei allen Bremsungsarten außer der Abstellbremsung ist immer der Gleitschutz aktiv, wodurch ein Blockieren der Räder verhindert wird. Flachstellen an den Rädern, welche eine Folge des Blockierens sind, haben immer korrektive Instandhaltungsmaßnahmen zur Folge und sind daher zu vermeiden. Flachstellen belasten nicht nur die Räder, sondern ebenso das gesamte Fahrwerk, Gleise und Unterbau. Zudem verringert sich auch der Fahrkomfort.

Das betrachtete Fahrzeug ist in der Basiskonfiguration mit vier Motorwagen und zwei Trailerwagen ausgestattet und daher zu 66 % angetrieben. Die elektrodynamische Bremse funktioniert durch Umschalten des Antriebs an den Triebdrehgestellen auf Generatorbetrieb und wird zur Betriebsbremsung verwendet. Dabei wird die gewonnene Energie ins Netz zurückgespeist, sofern dieses aufnahmefähig ist.

Die Bremsung mit der elektrodynamischen Bremse ist die Hauptbremsungsart während der Fahrt, um den Verschleiß der Reibungsbremse zu minimieren, und wird bis zum Stillstand verwendet. Sie kann jedoch nicht zum Festhalten des Zuges eingesetzt werden. Im unteren Geschwindigkeitsbereich (etwa Schrittgeschwindigkeit) wird die Bremskraft von der elektrodynamischen Bremse durch die Reibungsbremse übernommen. Zum Festhalten des Zuges im Stillstand kommt immer die mechanische Reibungsbremse zum Einsatz, ebenso im Falle einer Notbremsung, weiters bei einer Betriebsersatzbremsung, wenn die elektrodynamische Bremse außer Betrieb ist, beispielsweise bei einem Ausfall eines oder mehrerer Antriebe. Auch wenn die Bremskraft der elektrodynamischen Bremse nicht ausreicht, wird die mechanische Reibungsbremse unterstützend eingesetzt. Da die elektrodynamische Bremse nur an den Triebdrehgestellen wirkt, wird bei der rein generatorischen Bremsung in der Basiskonfiguration des Siemens Inspiro nur an 66 % der Achsen gebremst. Der

Übergang vom elektrodynamischen zum mechanischen Bremsen erfolgt durch Blending. Die Verteilung der Bremskraft der Reibungsbremse erfolgt thermisch optimiert und verschleißoptimiert, um eine gleichmäßige Abnutzung der mechanischen Bremsen zu erreichen und eine thermische Überlastung zu verhindern.

4.1.2 Sekundärfederung

Schienenfahrzeuge mit Drehgestellen besitzen immer zwei Federstufen. Die Primärfederung befindet sich zwischen den Rädern und dem Drehgestellrahmen. Die Sekundärfederung befindet sich zwischen dem Drehgestellrahmen und dem Wagenkasten. Falls die Sekundärfederung wie beim Siemens Inspiro durch Luftbälge ausgeführt ist, sind noch Notfedern integriert, welche bei einem Defekt des Luftfeder-systems zum Einsatz kommen, wie in Abbildung 4.7, Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9 gezeigt wird.

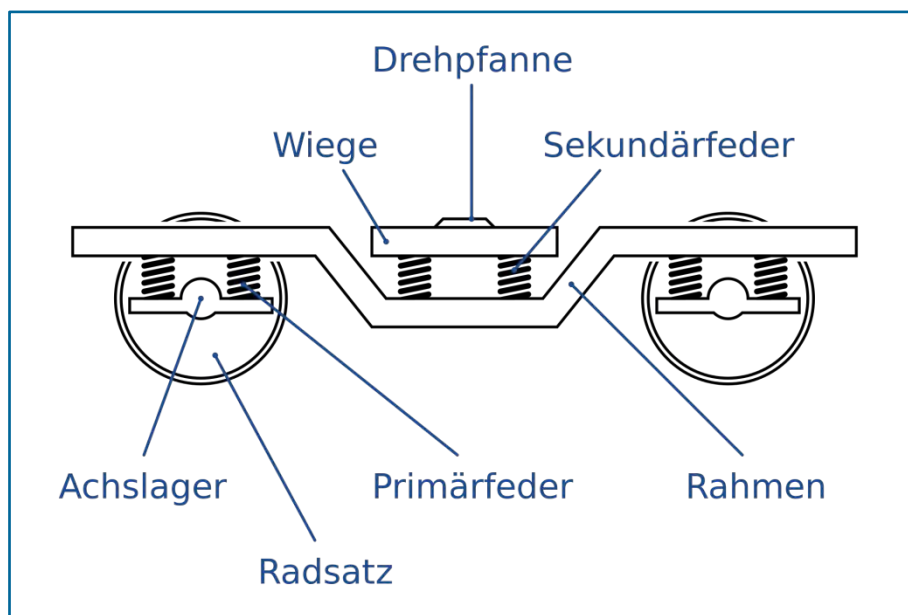


Abbildung 4.7 Schema eines Drehgestells [24]

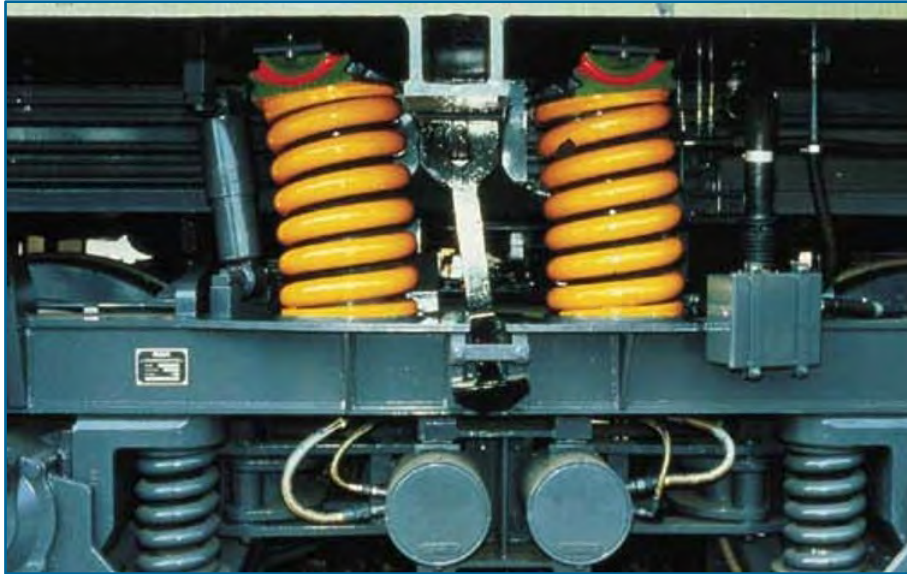


Abbildung 4.8 Vossloh Drehgestell mit Schraubenfedern als Primärfederung (blau) und Sekundärfederung (orange) [25]



Abbildung 4.9 Sekundärfederung mit Luftfederbalg und Notfeder (rot, innen) [15]

Die Sekundärfederung besteht aus zwei Luftbälgen pro Drehgestell, siehe Abbildung 2.2. Die Luftfeder kann je nach Auslegung der Federung mit einem Zusatzvolumen

versehen werden, um die Federeigenschaft wunschgemäß anzupassen. Beim betrachteten Fahrzeug ist kein Zusatzvolumen vorgesehen. Vorratsvolumina, welche zur Unterstützung der Luftversorgung bei hohem Luftverbrauch eingesetzt werden, werden bei leichten Metros üblicherweise nicht verbaut. Die Luftversorgung kommt aus der Hauptluftbehälterleitung und wird durch Luftfederventile geregelt.

4.1.3 Niveauregulierung

Die Niveauregulierung dient bei Metros dazu, das Fußbodenniveau des Wagenkastens auf einer konstanten Höhe zu halten. Idealerweise wird dadurch das gleiche Niveau wie der Bahnsteig in den Stationen oder zumindest eine möglichst geringe Stufe zwischen Bahnsteig und Fußboden des Fahrzeugs erreicht. In der Realität bezieht sich die Niveauregulierung derzeit auf das Niveau des Drehgestellrahmens und kann daher nicht auf die Primäreinfederung, die Abnutzung der Räder oder auf Setzungserscheinungen des Gleises reagieren.

Die Niveauregulierung wird durch Befüllen und Entlüften des Luftfederbalgs der Sekundärfederung realisiert. Über ein Gestänge werden die Luftfederventile geregelt, welche für den Füllgrad und daher das Wagenkastenniveau verantwortlich sind. Je nach Abnutzungsgrad der Räder muss das Gestänge im Depot nachgestellt bzw. durch Beilegescheiben das Wagenkastenniveau an den sich verringenden Rad-durchmesser angepasst werden.

Die Niveauregulierung ist immer aktiv und findet bei jeder Niveauänderung automatisch statt, sobald der Totweg des Gestänges überschritten wird.

4.1.4 Spaltüberbrückung

Die Spaltüberbrückung dient dazu, beim Passagierwechsel den Spalt zwischen Wagenkasten und Bahnsteigkante zu überbrücken. Dies soll verhindern, dass Personen, Kinderwägen, Rollstühle, Gehhilfen, Hunde etc. in diesen Spalt geraten können. Spaltüberbrückungen können nur bei einzelnen oder auch bei allen Türen eines Zu-

ges ausgeführt sein, sie können entweder automatisch oder manuell durch geschultes Personal betätigt werden.



Abbildung 4.10 Spaltüberbrückung [17]

Beim Siemens Inspiro wird die Überbrückung des Spalts zwischen Wagenkasten und Bahnsteigkante bei den geöffneten Türen durch einen Schiebetritt verwirklicht. Dieser wird durch Druckluftzylinder angetrieben, welche sowohl für das Aus- wie auch für das Einfahren verantwortlich sind. Die Luftversorgung kommt von der Hauptluftbehälterleitung.

4.1.5 Dritte Schiene Stromabnehmer

Die Energieversorgung des überwiegenden Teils der Metro-Fahrzeugen und auch des Siemens Inspiro erfolgt durch eine Stromschiene („Dritte Schiene“), die parallel zu den Fahrschienen verläuft. Dritte Schiene Stromabnehmer sind an den Drehgestellrahmen montiert, um den elektrischen Kontakt zum Fahrzeug herzustellen. Die Kontaktschuhe werden durch Federkraft an die Stromschiene gepresst und sind in der Lage, die Relativbewegungen des Fahrzeugs, die sich aus Schienenstößen, Auf- und Abläufen (Rampen) und sonstigen Distanzunterschieden ergeben, durch Schwingarme auszugleichen.

Das An-, Ablegen und Verriegeln des Dritte Schiene Stromabnehmers erfolgt fernbedient vom Führerstand durch einen druckluftbetriebenen Antrieb. Die Luftversorgung kommt von der Hauptluftbehälterleitung.



Abbildung 4.11 Dritte Schiene Stromabnehmer (rot) [16]

4.1.6 Horn

Zur akustischen Signalgebung durch das Fahrpersonal sind Metros mit akustischen Hörnern ausgestattet. Das Horn wird aus der Hauptluftbehälterleitung gespeist. In Abbildung 4.12 ist am Dach des Fahrzeuges das Horn zu erkennen.

4.1.7 Pantograf

Alternativ zu einer Stromschiene kann die Energieversorgung einer Metro auch durch eine Oberleitung erfolgen. In diesem Fall werden keine Dritte Schiene Stromabnehmer, sondern Pantografen (Dachstromabnehmer) eingesetzt. Falls ein Pantograf vorhanden ist, wird dieser pneumatisch oder elektrisch betrieben.



Abbildung 4.12 Pantograf [26]

4.1.8 Spurkranzschmierung

Die Spurkranzschmierung dient dazu, sowohl den Verschleiß der Räder an den Spurkränzen als auch der Schienenflanken zu reduzieren und das Fahrgeräusch in Form des Kurvenquietschens zu minimieren. Weiters kann sie die Wahrscheinlichkeit des Aufkletterns eines Rades, was zu einer Entgleisung führen könnte, verringern. Die Verhinderung des Aufkletterns auch ohne Spurkranzschmierung muss allerdings schon bei der Auslegung des Fahrzeugs berücksichtigt werden. Spurkranzschmier-systeme können sowohl fahrzeugseitig in Form von Sprühdüsen oder Schmierstiften als auch streckenseitig ausgeführt sein. Die fahrzeugseitige Spurkranzschmierung durch Sprühdüsen kann sowohl weg- als auch zeitabhängig erfolgen.



Abbildung 4.13 Fahrzeugseitige Spurkranzschmierung mit Schmierstift (rot)

[27]



Abbildung 4.14 Fahrzeugseitige Spurkranzschmierung mit Sprühdüse [28]



Abbildung 4.15 Streckenseitige Spurkranzschmierung [29]

Falls eine fahrzeugseitige Spurkranzschmierung mittels Sprühdüsen eingebaut ist, so wird diese meist pneumatisch betrieben.

4.2 Vorhandene Fahrzeuge ohne Druckluft

Straßenbahnen und Stadtbahnen sind fast immer ohne Druckluftausrüstung ausgeführt. Auch der Siemens Avanto/S70 ist ein niederfluriges Zweisystem-Stadtbahn- und Regionalbahnfahrzeug, welches für den Mischverkehr auf Vollbahnstrecken geeignet ist. Er ist in Frankreich und den USA im Einsatz. Konzeptbedingt konnten aufgrund des Niederflurkonzepts und des Vollbahneinsatzes keine brauchbaren Analogien zur Metro hergestellt werden. Dasselbe gilt für Straßenbahnen wie beispielsweise den ULF. Der ULF wurde mit dem Ziel einer sehr niedrigen Einstiegshöhe entwickelt und hat daher eine gänzlich andere Bauform (keine Drehgestelle, sondern Portalfahrwerke mit Einzelrädern).



Abbildung 4.16 Siemens Avanto/S70 [30]



Abbildung 4.17 Siemens ULF [31]

5 Lösungsmöglichkeiten

Im Folgenden werden Alternativen für sämtliche derzeit mit Druckluft betriebenen Komponenten aufgezeigt.

5.1 Varianten der mechanischen Bremse

In der EN 13452-1 finden sich die folgenden bremsrelevanten Daten und Leistungsanforderungen an die elektromechanische Bremse von U-Bahn-Fahrzeugen mit Stahlrädern. Diese Anforderungen an die Bremsen gelten als Mindest- bzw. Maximalanforderungen. Sie können vom Betreiber innerhalb der angegebenen Bereiche angepasst werden.

Die äquivalente Ansprechzeit bezeichnet die Zeitspanne vom Aktivieren der Bremsung bis zum Erreichen des Nennwerts der Verzögerung.

äquivalente Ansprechzeit	1,5 s
minimale Verzögerung	1,0 m/s ²
maximale Verzögerung	2,0 m/s ²
maximaler Ruck	1,5 m/s ³

Tabelle 5.1 Leistungsanforderungen für die Betriebsbremsung

äquivalente Ansprechzeit	1,0 s
minimale Verzögerung	1,0 m/s ²
maximale Verzögerung	2,5 m/s ²
maximaler Ruck	4,0 m/s ³

Tabelle 5.2 Leistungsanforderungen für die Notbremsung

Beladung	6 Fahrgäste je m ²
Strecken­neigung	4 %
Fest­hal­te­dauer	1 h

Tabelle 5.3 Leistungsanforderungen für die Haltebremsung

Beladung	betriebsbereiter Zug ohne Fahrgäste
Strecken­neigung	4 %
Fest­hal­te­dauer	unbegrenzte Zeit

Tabelle 5.4 Leistungsanforderungen für die Abstellbremsung

Es wurden mehrere Alternativen zur pneumatisch betriebenen, mechanischen Bremse aus den Bereichen der Schienenfahrzeuge, Automobile und Flugzeuge betrachtet. Diese werden im Folgenden beschrieben und die bestgeeigneten Lösungen ausgewählt.

5.1.1 Elektrohydraulische Bremse von Siemens

Die elektrohydraulische Bremse wurde von Siemens entwickelt. Sie ist grundsätzlich für die Vollbahn konzipiert, was bedeutet, dass für den Einsatz in Metros möglicherweise sogar eine vereinfachte Version genügen würde, da Metros beispielsweise keinen Interoperabilitätsanforderungen genügen müssen.

Die Steuerung der elektrohydraulischen Bremse erfolgt ausschließlich durch elektrische Signale, die Bremskraft wird hydraulisch aufgebracht. Bei den derzeitigen Reibungsbremsen erfolgt die Ansteuerung pneumatisch und ist daher durch die Trägheit des Systems mit einer gewissen Totzeit (bis zu 1 s) behaftet. Die Schnittstelle der elektrohydraulischen Bremse an die Bremssteuerung ist rein elektrisch. Die Übertragung der Signale erfolgt daher ohne Verzögerung. Es kann eine Momentregelung realisiert werden, welche eine Anpassung an den Reibwert zwischen Belag und Scheibe ermöglicht. Dadurch werden eine höhere Kraftschlussausnutzung und

eine gleichmäßige Abnutzung der Bremsbeläge erwartet. Bei unterschiedlichen Schienenverhältnissen über die Zuglängen können durch die Momentregelung Achsen mit niedrigem Rad/Schiene-Reibwert durch solche mit hohem Reibwert kompensiert werden. Durch die rein elektrische Ansteuerung und die Momentregelung ist eine deutlich höhere Reaktionsgeschwindigkeit, ein wesentlich effizienterer Gleitschutz und infolge dessen im Falle einer Notbremsung ein kürzerer Bremsweg zu erwarten. Die höhere Effizienz des Gleitschutzes trägt auch im regulären Betrieb zur Schonung von Rädern und Schienen bei.

Die elektrohydraulische Bremse von Siemens ist unter der Nummer WO 2008/031701 A1 und der Bezeichnung „Selbstverstärkende hydraulische Bremse“ patentiert. [32]

5.1.2 Elektromechanische Bremse von Vienna Engineering

Die elektromechanische Bremse wird von der VE Vienna Engineering Forschungs- und Entwicklungs GmbH in Wien entwickelt. Das Einsatzgebiet lag ursprünglich im Automobilbereich, wurde aber nach und nach auf Schienenfahrzeuge, Windräder und Aufzüge ausgeweitet.

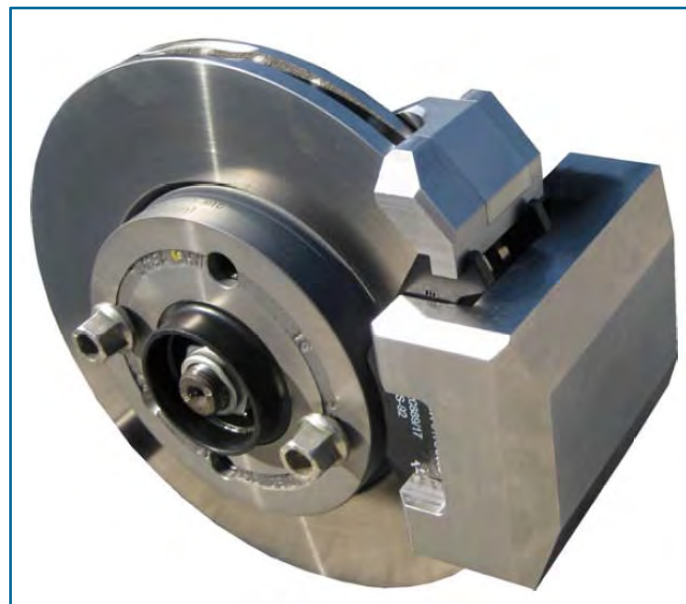


Abbildung 5.1 Vienna Engineering elektromechanische Bremse [33]

Bei der elektromechanischen Bremse wird die Bremszange durch Elektromotoren über Exzenter betätigt. Die Bremse kann sowohl aktiv als auch passiv ausgeführt werden und erreicht am Prüfstand und in Simulationen die benötigten Bremskräfte. Auch bei der elektromechanischen Bremse kann – wie bei der elektrohydraulischen Bremse von Siemens in Abschnitt 5.1.1 beschrieben – eine Momentregelung realisiert werden. Durch die elektrische Ansteuerung und die Momentregelung ist wie bei der elektrohydraulischen Bremse eine deutlich höhere Reaktionsgeschwindigkeit, ein wesentlich effizienterer Gleitschutz und infolge dessen im Falle einer Notbremsung ein kürzerer Bremsweg sowie eine größere Schonung von Rädern und Schienen zu erwarten.

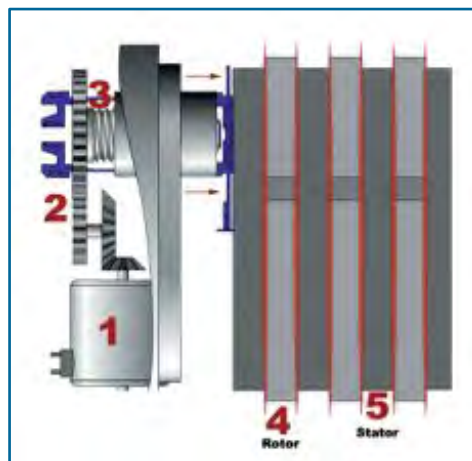
Die elektromechanische Bremse von Vienna Engineering ist unter der Nummer WO 2010/133463 A1 und der Bezeichnung „Reibungsbremse“ patentiert. [34]

5.1.3 Flugzeugbremse von Messier-Bugatti-Dowty

Messier-Bugatti-Dowty (ein Tochterunternehmen von Safran SA) hat eine Flugzeugbremse für ein all-electric Flugzeug entwickelt. Wie bei Flugzeugen üblich, handelt es sich um eine einseitig wirkende Bremse, was bedeutet, dass der Aktor nur von einer Seite auf die Bremsscheibe wirkt und nicht symmetrisch von beiden Seiten, wie z. B. bei Schienen- und Kraftfahrzeugen üblich. Sie besteht aus einem elektromagnetischen Aktor mit Spiralfederspeicher und Untersetzung. Sie ist nicht selbstverstärkend und kann durch eine Pufferbatterie fail-safe ausgeführt werden.



Abbildung 5.2 Messier Bugatti Dowty Flugzeugbremse [35]



- 1 Elektromotor
- 2 Reduktionsgetriebe
- 3 Kugelgewindetrieb
- 4 Rotorscheiben
- 5 Statorscheiben

Abbildung 5.3 Funktionsprinzip der Messier Bugatti Dowty Flugzeugbremse [35]

Die Messier-Bugatti-Dowty Flugzeugbremse ist unter der Nummer DE 60 2004 000 263 T2 und der Bezeichnung „Elektromagnetische Bremse mit einer Parkbremse“ patentiert. [36]

5.1.4 Keilbremse vom DLR

Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. DLR wurde für Automobile eine elektromechanische, selbstverstärkende Keilbremse entwickelt. Da die Bremse aus asymmetrischen Keilen aufgebaut ist, erreicht sie nur in eine Richtung ihre volle Wirkung. Sie ist daher für Schienenfahrzeuge, welche ja keine bevorzugte Fahrtrichtung haben, nicht geeignet. Laut Expertenmeinungen erreichen Keilbremsen bis heute nicht die gewünschte Zuverlässigkeit. Ob bei dieser Bremse eine Serienreife erreicht wurde, ist nicht bekannt.

In Abbildung 5.4 ist mit der Nummer 18 ein Keil bezeichnet, mit α und β die asymmetrischen Keilwinkel und mit ω die Bewegungsrichtung der Bremsscheibe.

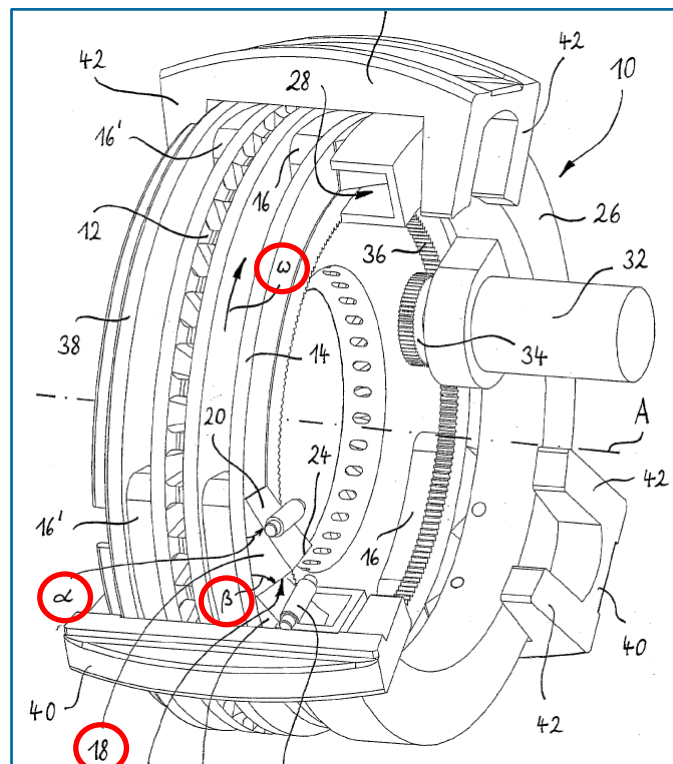


Abbildung 5.4 DLR Keilbremse [37]

Die DLR Keilbremse ist unter der Nummer DE 198 19 564 A1 und der Bezeichnung „Elektromechanische Bremse mit Selbstverstärkung“ patentiert. [37]

5.1.5 Kugelrampenbremse von Continental Automotive

Die Continental Automotive GmbH hat eine Fahrzeugbremse entwickelt, welche auf dem Prinzip der Keilbremse basiert. Dabei wird die Bremskraft mit Linearaktoren über Kugelrampen selbstverstärkend aufgebracht. Da die Kugelrampen eine symmetrische Geometrie aufweisen, ist diese Bremse grundsätzlich zweirichtungsfähig. Allerdings ist die Zuverlässigkeit der Bremse aufgrund des Keilbremsenprinzips nicht geklärt. Ob bei dieser Bremse eine Serienreife erreicht wurde, ist nicht bekannt.

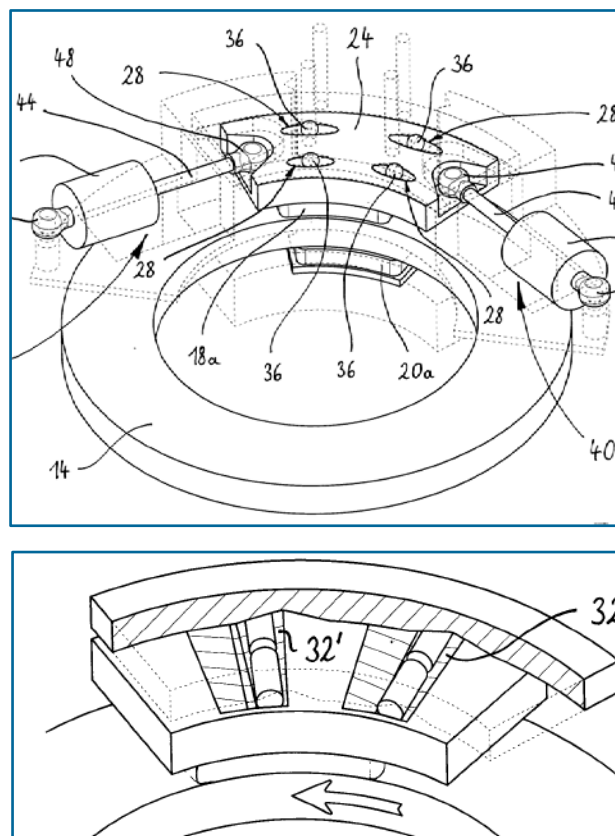


Abbildung 5.5 Continental Automotive Kugelrampenbremse [38]

Die Continental Automotive Kugelrampenbremse ist unter der Nummer DE 101 64 317 C1 und der Bezeichnung „Selbstverstärkende elektromechanische Teilbelagscheibenbremse mit verbesserter Reibbelagführung“ patentiert. [38]

5.1.6 Bremse mit Verriegelung von Continental Teves

Die Continental Teves AG & Co. oHG hat eine Bremse für den Automotive Bereich entwickelt, welche mit einem elektromotorisch über ein Untersetzungsgetriebe betätigten Linearaktor mit Verriegelung funktioniert. Die Bremse kann manuell notentriegelt werden, allerdings kann sie nur durch eine autonome Energieversorgung und Steuerung fail-safe ertüchtigt werden. Ob bei dieser Bremse eine Serienreife erreicht wurde, ist nicht bekannt. [39]

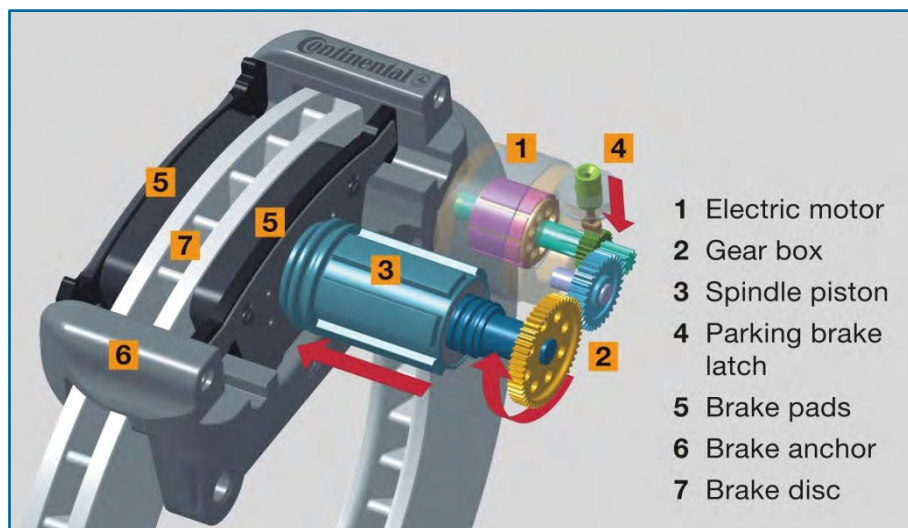


Abbildung 5.6 Continental Teves Bremse mit Verriegelung [40]

Die Continental Teves Bremse mit Verriegelung ist unter der Nummer WO 2010/094555 A1 und der Bezeichnung „Elektromechanisch betätigbare Bremse“ patentiert. [41]

5.1.7 Bremse mit reversiblen Kraftspeicher von Continental Automotive

Die Continental Automotive GmbH hat eine Fahrzeugbremse entwickelt, welche über einen elektrischen Aktor mit Kraftspeicher, exzentrische Drehachsen und Hebelwirkung betätigt wird. Es kann sowohl eine sichere Parkposition als auch eine Übertotpunktstellung in geöffnetem Zustand erreicht werden, um energielos offen halten zu können. Ob bei dieser Bremse eine Serienreife erreicht wurde, ist nicht bekannt.

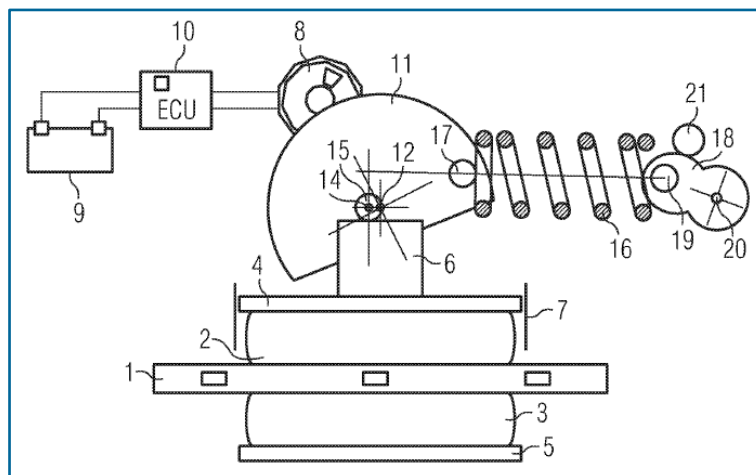
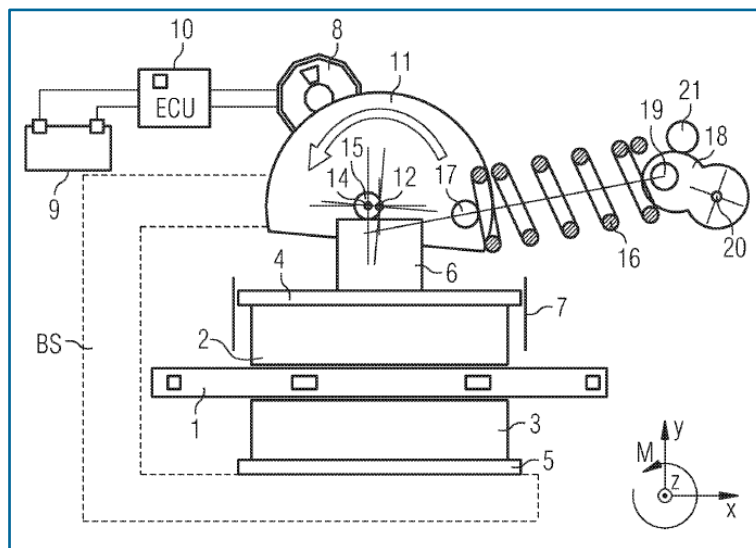


Abbildung 5.7 Continental Automotive Bremse mit reversiblen Kraftspeicher

[42]

Die Continental Automotive Bremse mit reversiblen Kraftspeicher ist unter der Nummer WO 2009/050086 A1 und der Bezeichnung „Bremse mit reversiblen Kraftspeicher“ patentiert.

5.1.8 Parkbremse von Knorr-Bremse

Die Knorr-Bremse AG hat eine Parkbremse für Nutzfahrzeuge entwickelt, welche die Bremskraft ausschließlich durch einen Federspeicher aufbringt. Das Lösen erfolgt elektrisch durch Exzenter- oder Hebelwirkung. Es ist sowohl eine sichere Parkposition, als auch eine Übertotpunktstellung zum energielosen Offenhalten möglich. Die Bremse kann fail-safe ausgeführt werden, wenn auf die Übertotpunktstellung verzichtet wird. Die Bremse ist in dieser Form ausschließlich als Parkbremse vorgesehen und serienreif.

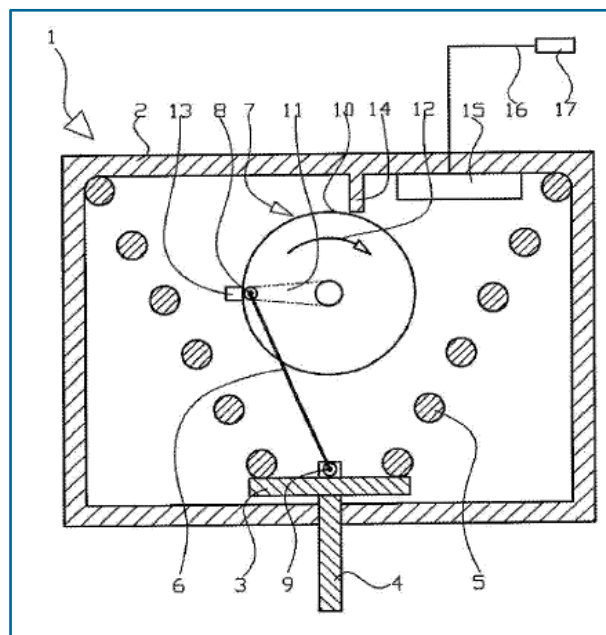


Abbildung 5.8 Knorr-Bremse Parkbremse mit Exzenter [43]

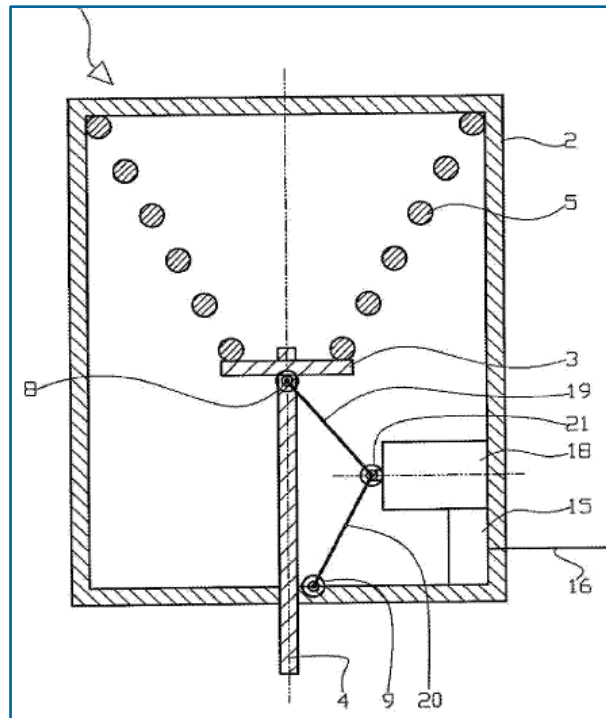


Abbildung 5.9 Knorr-Bremse Parkbremse mit Hebel [43]

Die Parkbremse von Knorr-Bremse ist unter der Nummer EP 2 093 110 A1 und der Bezeichnung „Parkbremse“ patentiert. [43]

5.2 Auswahl der mechanischen Bremse

Zur Auswahl der geeigneten Lösungsvarianten für die mechanische Bremse wurden eine Anforderungsliste und eine Auswahlliste nach Pahl/Beitz [11] erstellt. Da es sich um eine frühe Phase der Lösungsfindung handelt, weist die Anforderungsliste einen sehr niedrigen Detaillierungsgrad auf. Es wurden keine quantitativen Angaben gemacht, da die Werte einerseits variieren können und andererseits teilweise vom Wunsch des Betreibers abhängig sind.

Anforderungsliste		
Mechanische Bremse		
F = Forderung W = Wunsch	Hauptmerkmal	Anforderung
F	Geometrie	Einbauraum in Drehgestell SF 1000
F	Kinematik	zweiseitige Wirksamkeit auf Brems Scheibe
F	Kräfte	Bremskraft für Schienenfahrzeuge
F	Energie	elektrische Energieversorgung
F	Signal	elektrische Ansteuerung
F	Sicherheit	fail-safe bzw. fail-close
F	Kontrolle	EN 13452-2
F	Gebrauch	volle Funktionsfähigkeit unter wechselnden Umweltbedingungen (Steinschlag, Tropen, Regen, Schnee, Eis, Kälte), Geräuscharm
F	Instandhaltung	lange Wartungsintervalle
F	Recycling	Entsorgung, Wiederverwertbarkeit (W)
F	Termin	Serienreife in max. 5 Jahren

Tabelle 5.5 Anforderungsliste für die mechanische Bremse

Auswahlliste für Bremse									
Lösungsvariante (Lv) eintragen	Lösungsvarianten (Lv) nach <u>Auswahlkriterien</u> beurteilen: (+) ja (-) nein (?) Informationsmangel (!) Anforderungsliste überprüfen							Entscheidung: (+) Lösung weiter verfolgen (-) Lösung scheidet aus (?) Informationen beschaffen (!) Anforderungsliste auf Änderungen prüfen	
	Mit Aufgabenstellung verträglich								
	Forderungen der Anforderungsliste erfüllt								
	Grundsätzliche Realisierungschance gegeben								
	Zulässiger Aufwand zu erwarten								
	Unmittelbare Sicherheitstechnik gegeben								
	Im eigenen Bereich bevorzugt								
	Erkenntnisstand ausreichend								
Lv	A	B	C	D	E	F	G	Bemerkungen (Hinweise, Begründungen)	Entscheidung
1	+	+	+	+	+	-	+		+
2	+	+	+	+	+	-	+		+
3	+	-	-	-	+	-	+	einseitig wirksam	-
4	-	-	-	-	?	-	+	unidirektional	-
5	+	+	+	-	?	-	+	fail-safe nur mit autonomer Steuerung, Zuverlässigkeit	-
6	+	+	+	-	?	-	+	fail-safe nur mit autonomer Steuerung	-
7	+	+	+	?	+	-	+	Serienreife schon für Nutzfahrzeuge fraglich	-
8	-	-	+	?	+	-	+	reine Parkbremse	-

- 1 Siemens Elektrohydraulische Bremse
- 2 Vienna Engineering Elektromechanische Bremse
- 3 Messier-Bugatti-Dowty Flugzeugbremse
- 4 DLR Keilbremse
- 5 Continental Automotive Kugelrampenbremse
- 6 Continental Teves Bremse mit Verriegelung
- 7 Continental Automotive Bremse mit reversiblen Kraftspeicher
- 8 Knorr-Bremse Parkbremse

Tabelle 5.6 Auswahlliste für die mechanische Bremse

Nur zwei Systeme erfüllen mit hoher Wahrscheinlichkeit die Anforderungen und wurden in weiterer Folge als mögliche Alternativen ins Fahrzeugkonzept aufgenommen und in dieser Studie behandelt:

- Siemens Elektrohydraulische Bremse, siehe Abschnitt 5.1.1
- Vienna Engineering Elektromechanische Bremse, siehe Abschnitt 5.1.2

Beide Optionen sind noch nicht zugelassen und auch noch nicht serienreif. Die Serienreife beider Systeme wird in den nächsten drei bis fünf Jahren erwartet, da die elektrohydraulische Bremse genau für den geforderten Zweck konzipiert ist, und da Prototypen der elektromechanischen Bremse schon die geforderte Größenordnung erreicht haben.

Die übrigen Varianten der mechanischen Bremse wurden ausgeschieden, da sie die Anforderungen nur zum Teil erfüllen können. Die folgenden Gründe waren für das Ausscheiden der einzelnen Bremsen hauptverantwortlich.

Messier-Bugatti-Dowty Flugzeugbremse

- einseitige Wirksamkeit

DLR Keilbremse

- keine Zweirichtungsfähigkeit

Continental Automotive Kugelrampenbremse

- hoher Aufwand, um fail-safe Funktion zu erreichen (autonome Energieversorgung und Steuerung notwendig, sehr sicherheitskritisch), fragliche Zuverlässigkeit aufgrund des Keilbremsenprinzips

Continental Teves Bremse mit Verriegelung

- hoher Aufwand, um fail-safe Funktion zu erreichen (autonome Energieversorgung und Steuerung notwendig, sehr sicherheitskritisch), Serienreife unklar

Continental Automotive Bremse mit reversiblen Kraftspeicher

- Serienreife für Nutzfahrzeuge unklar, Anforderungen betreffend Ausfallsicherheit und fail-safe Funktionalität für Schienenfahrzeuge deutlich höher als für Nutzfahrzeuge

Knorr-Bremse Parkbremse

- reine Parkbremse

5.3 Varianten der Sekundärfederung

Es wurden sowohl bestehende Drehgestelle als auch mehrere Alternativen zur bestehenden Sekundärfederung betrachtet, welche auf Druckluft als Energiemedium verzichten. Die Varianten stammen aus den Bereichen der Schienenfahrzeuge, Kraftfahrzeuge, Flugsimulatoren und der Wehrtechnik. Sie werden im Folgenden beschrieben, und die bestgeeigneten Lösungen werden ausgewählt.

5.3.1 Alternative bestehende Drehgestellvarianten (Siemens SF 300, SF 70, SF 40)

Die Sekundärfederung des Lauffahrwerks für Reisezugwagen Siemens SF 300, welches mit Gleitplatte und Wiege ausgestattet ist, besteht aus vier Stahlflexicoilfedern. Diese Federn ermöglichen einen freien Querfederweg von +/- 60 mm. Die Auslenkung in Längsrichtung ist hier nicht bekannt, es ist bei diesem Drehgestell eine Längsentkopplung durch die Torsionsstangenanlenkung der Drehhemmung ermöglicht. Da dieses Drehgestell ein reines Laufdrehgestell ist, einen deutlich höheren Radsatzstand (2.500 mm statt 2.100 mm beim SF 1000), einen wesentlich größeren Bogenradius im Betrieb (150 m statt 90 m) sowie eine deutlich höhere Masse (7,1 t statt 5,0 t) [5] aufweist, ist es für einen Einsatz im Metrobereich ungeeignet.

Die 70 %-Niederflur-Stadtbahn Siemens Avanto/S70 ist mit Drehgestellen ohne Luftfedern ausgestattet. Beim Triebdrehgestell Siemens SF 70 sind eine Wiege und Reibplatten verbaut. Die Sekundärfederung zwischen Drehgestellrahmen und Wie-

genträger besteht aus vier Stahlschraubenfedern oder aus zwei hydropneumatischen Federbeinen. In letzterem Fall kommen vier Gummifedern als Notfedern zum Einsatz. Das Laufdrehgestell Siemens SF 40 ist innengelagert und verfügt über Einzelräder. Die Sekundärfederung ist gleich wie beim Fahrwerk SF 70 realisiert. Da diese Fahrwerke allerdings für deutlich niedrigere zulässige Radsatzlasten ausgelegt sind (10,5 t (SF 70) bzw. 11,5 t (SF 40) statt 13 t beim SF 1000) [5], ist ein Einsatz bei Metros ausgeschlossen.



Abbildung 5.10 Drehgestell Siemens SF 300 [5]

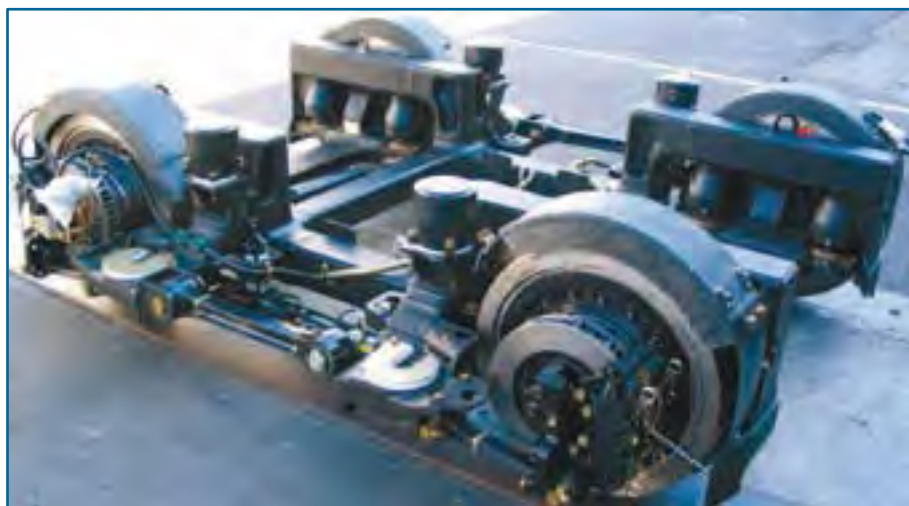


Abbildung 5.11 Drehgestell Siemens SF 40 [5]



Abbildung 5.12 Drehgestell Siemens SF 70 [5]

5.3.2 Linearaktor

Linearaktoren sind grundsätzlich wie Gleichstrom-Linearmotoren aufgebaut. Ein beweglicher innerer Kolben (Läufer) kann sich in einem ihn außen umgebenden Stator bewegen. Linearaktoren können im passiven Modus Schwingungen dämpfen und im aktiven Modus Axialbewegungen ausführen.

In Kombination mit Schraubenfedern ist der Einsatz in Schienenfahrzeugen denkbar, da ein Linearaktor fail-safe ausgeführt werden kann. In stromlosem Zustand verhält er sich dann aufgrund der Lenzschen Regel wie ein passiver Dämpfer.

Die Bose GmbH hat das Bose Suspension System [44] entwickelt, welches in einem PKW eingesetzt werden kann, allerdings hat sich dieses System nicht am Markt durchgesetzt.



Abbildung 5.13 Bose Suspension System [45]

Es ist bis jetzt nicht bekannt, dass Linearaktoren auch nur annähernd in Gewichtsklassen, wie sie bei einer Metro notwendig wären, eingesetzt wurden. Allerdings spricht technisch nichts gegen eine grundsätzliche Realisierung.

Eine Niveauregulierung ist bei diesem Konzept nicht integrierbar.

5.3.3 Elektrorheologische Dämpfer mit Schraubenfeder

Elektrorheologische Dämpfer sind wie klassische Dämpfer aufgebaut, bei denen ein Kolben in einem mit Dämpfungsflüssigkeit gefüllten Zylinder an einer Kolbenstange geführt wird. Sie sind mit einer Flüssigkeit gefüllt, in welcher polarisierbare Teilchen in einer elektrisch nicht leitenden Trägerflüssigkeit dispergiert sind. Ein externes elektrisches Feld induziert Dipole, wodurch Ketten entlang der Feldlinien gebildet werden. Diese Kettenbildung ist für die Fließeigenschaften und somit für die variable Dämpfercharakteristik verantwortlich. Die gewünschte Viskosität kann stufenlos eingestellt werden. Die Reaktion ist reversibel und symmetrisch. Bei einem Ausfall der Stromversorgung wird aus dem elektrorheologischen Dämpfer ein passiver Dämpfer mit einer fixen Dämpferkonstante, welche durch die Trägerflüssigkeit bestimmt ist.

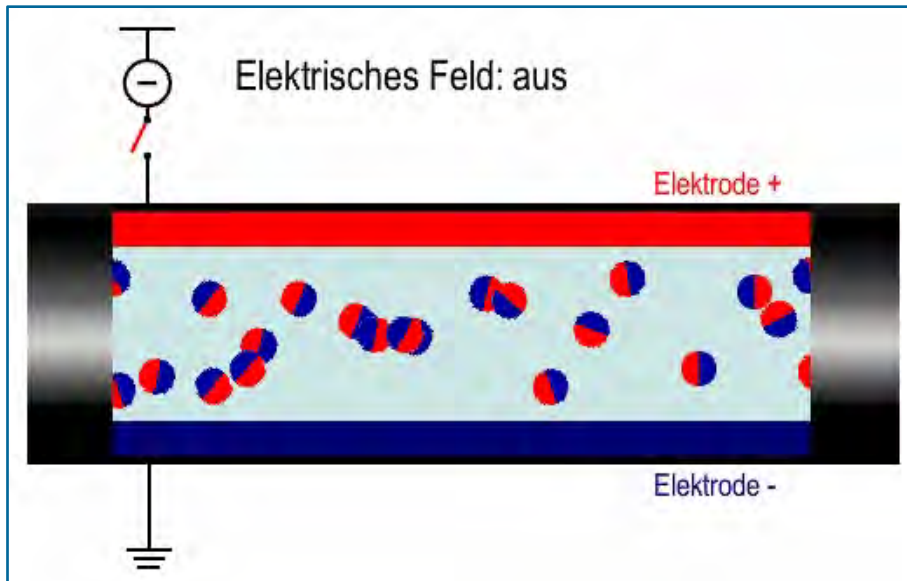


Abbildung 5.14 Elektrorheologische Flüssigkeit ohne angelegtes elektrisches Feld [46]

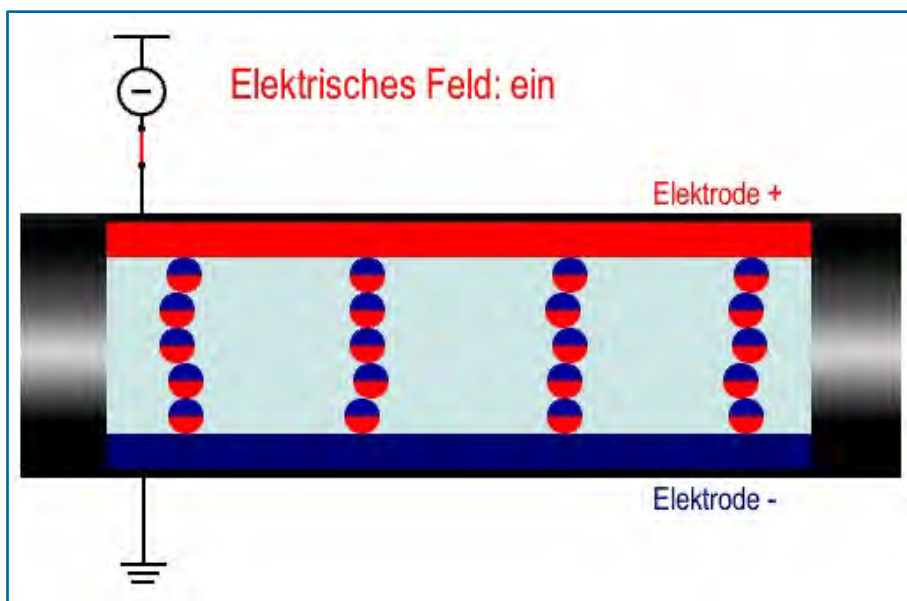


Abbildung 5.15 Elektrorheologische Flüssigkeit mit angelegtem elektrischen Feld [46]

Grundsätzlich ist es auch möglich, die Viskosität des elektrorheologischen Dämpfers so stark zu erhöhen, dass es einer Fesselung des Wagenkastens gleichkommt. Dieser Effekt kann beispielsweise während des Passagierwechsels in der Station genutzt werden.

Die Fludicon GmbH stellt unter der Bezeichnung „FLUDICON eRRide“ unter anderem elektrorheologische Dämpfer für schwere Nutzfahrzeuge her. [47] Ein Einsatz in Metros erscheint daher zweifellos möglich.



Abbildung 5.16 Fludicon elektrorheologische Dämpfer [47]

Eine Niveauregulierung ist bei diesem Konzept nicht unmittelbar integrierbar.

5.3.4 Magnetorheologische Dämpfer mit Schraubenfeder

Magnetorheologische Dämpfer sind gleich wie elektrorheologische wie klassische Dämpfer aufgebaut, bei denen ein Kolben in einem mit Dämpfungsflüssigkeit gefüllten Zylinder an einer Kolbenstange geführt wird. Sie sind mit einer Flüssigkeit gefüllt, welche eine Suspension von magnetisch polarisierbaren Partikeln in einer Trägerflüssigkeit darstellt. Als Trägerflüssigkeit können Mineralöle, synthetische Öle, Ethylenglykol und Wasser eingesetzt werden. Weiters werden zusätzliche Hilfsstoffe wie Stabilisatoren (zur Sicherstellung der gleichmäßigen Verteilung der Teilchen) und Viskositätsverbesserer beigemischt.

Sobald ein magnetisches Feld auf die Teilchen einwirkt, polarisieren die Partikel und bilden in Richtung der Feldlinien Ketten. Je höher die Feldstärke ansteigt, desto zäher wird die Suspension. Die Reaktionsgeschwindigkeit befindet sich im Bereich von Millisekunden, bei einem bereits anliegenden Magnetfeld erfolgen Viskositätsänderungen in einer Zeit von unter einer Millisekunde. [48] Die gewünschte Viskosität kann stufenlos eingestellt werden. Die Reaktion ist reversibel und symmetrisch. Um eine Fail-Safe-Funktion zu erreichen, kann, sofern die Grundviskosität der Dämpfungsflüssigkeit nicht geeignet ist, ein Permanentmagnet im Kolben verbaut werden, der bei Ausfall des elektromagnetischen Feldes eine Grundviskosität und somit eine bestimmte Dämpfungskonstante und sichere Dämpfung festlegt. Die Wirkung des Permanentmagneten kann durch die elektrische Spule abgeschwächt oder verstärkt werden. In stromlosem Zustand verhält sich der magnetorheologische Dämpfer wie ein herkömmlicher Hydraulikdämpfer. Im Falle einer Dämpferauslegung, bei der ein ständiges Magnetfeld notwendig ist, hat der Permanentmagnet den Vorteil, dass durch das Permanentmagnetfeld Energie gespart werden kann, da keine Grundmagnetisierung elektromagnetisch bereitgestellt werden muss.

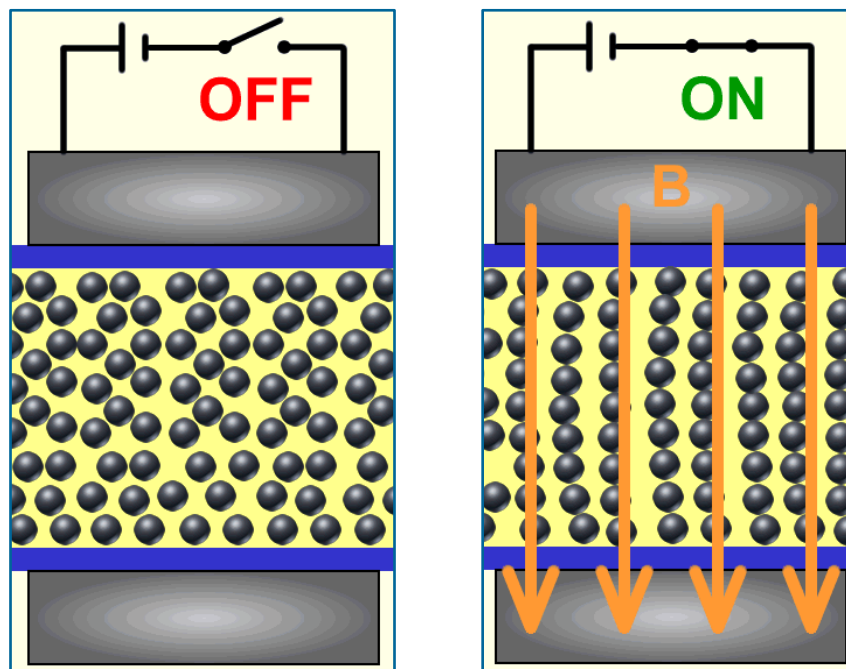


Abbildung 5.17 Magnetorheologisches Fluid [49]

Auch bei magnetorheologischen Dämpfern ist es möglich, die Viskosität so stark zu erhöhen, dass es einer Fesselung des Wagenkastens gleichkommt, sodass der Effekt während des Passagierwechsels in der Station genutzt werden kann.

Im gehobenen PKW-Bereich werden magnetorheologische Dämpfer serienmäßig eingesetzt. Delphi Automotive LLP hat unter der Bezeichnung MagneRide ein magnetorheologisches Dämpfungssystem entwickelt, welches in zahlreichen Fahrzeugen von GM, Ferrari, Audi, Acura und Range Rover verbaut wird. [50]



Abbildung 5.18 Delphi MagneRide [51]

Es ist bis jetzt nicht bekannt, dass magnetorheologische Dämpfer bei Schienenfahrzeugen verbaut wurden, allerdings wurde in einer Studie an der Texas A&M University im Jahr 2003 der Einbau magnetorheologischer Dämpfer in ein 70 t-Schienenfahrzeug mit 4 Dämpfern erfolgreich untersucht und modelliert. [1]

Eine Niveauregulierung ist bei diesem Konzept nicht unmittelbar integrierbar.

5.3.5 Hydropneumatische Federung

Die hydropneumatische Federung stellt durch die Verbindung von Hydraulik und Pneumatik ein Feder-Dämpfer-System dar, welches in Kraftfahrzeugen vielfach eingesetzt wird. In das System ist auch eine Niveauregulierung integrierbar, allerdings bietet es keine Notlaufeigenschaften. Um das System fail-safe zu machen, müsste es mit einer eigenen Notfederung ausgestattet werden. Einen weiteren Nachteil stellt das vorhandene Hydrauliköl dar, da aus Brandschutzgründen zusätzliche Vorkehrungen bei Schienenfahrzeugen getroffen werden müssen.

Citroen hat eine hydropneumatische Federung entwickelt und baut diese seit 1954 in PKWs ein. [52] [53]

Siemens besitzt ein Patent auf eine gasgeregelte hydropneumatische Feder. Dieses ist unter der Nummer DE 10 2005 024 189 A1 und der Bezeichnung „Gasgeregelte HP-Feder“ patentiert. [54]

Knorr-Bremse hat eine hydropneumatische Feder entwickelt und patentiert [55], welche in den Triebwagen der Type TW 2000 der Stadtbahn Hannover verbaut ist.



Abbildung 5.19 Drehgestell der Triebwagen TW 2000 der Stadtbahn Hannover mit hydropneumatischer Feder von Knorr-Bremse [56]

5.3.6 Hexapod

Ein Hexapod, auch unter der Bezeichnung Stewart-Plattform bekannt, wird unter anderem für Flugsimulatoren eingesetzt. Es bietet aufgrund seines Konzepts zwar eine hervorragende Beweglichkeit inklusive einer Niveauregulierung, kann aber nicht die erforderliche relativ geringe Baugröße bei den nötigen Lasten aufweisen. Auch ist die Arbeitsgeschwindigkeit eines Hexapods deutlich niedriger als fahrdynamisch bei einer Metro notwendig wäre. Desgleichen wäre die benötigte Energie für derartige Lasten sehr hoch. Ein Einsatz bei Schienenfahrzeugen als Sekundärfederung ist daher in absehbarer Zukunft nicht realistisch.

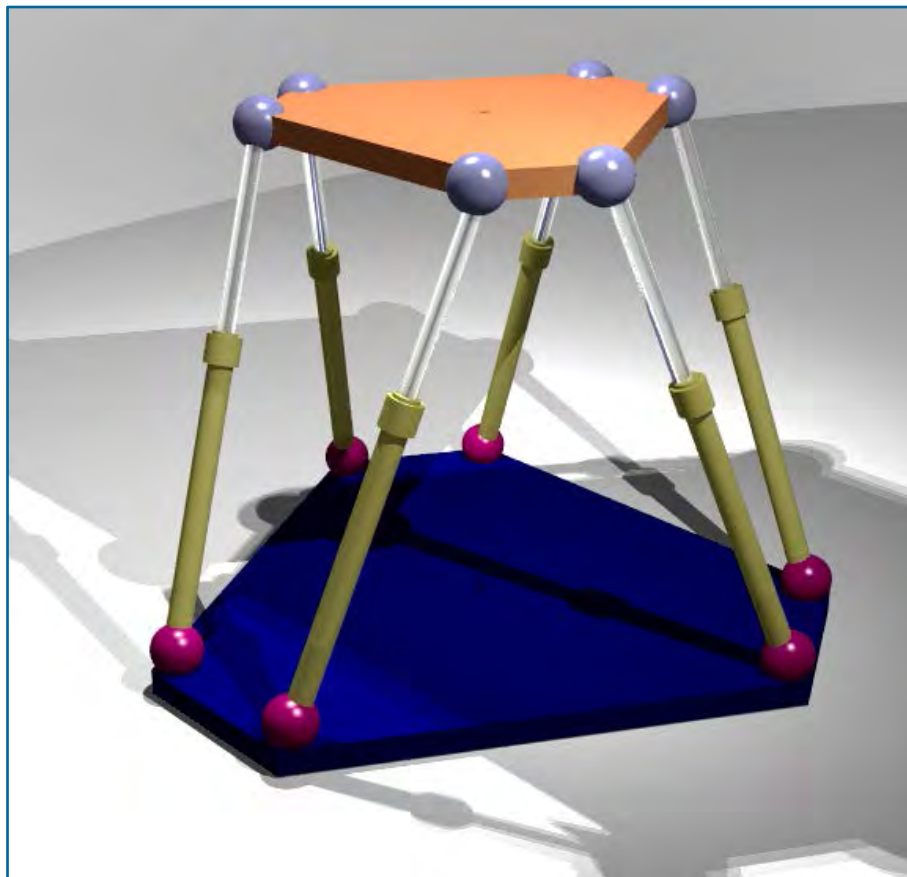


Abbildung 5.20 Hexapod [57]

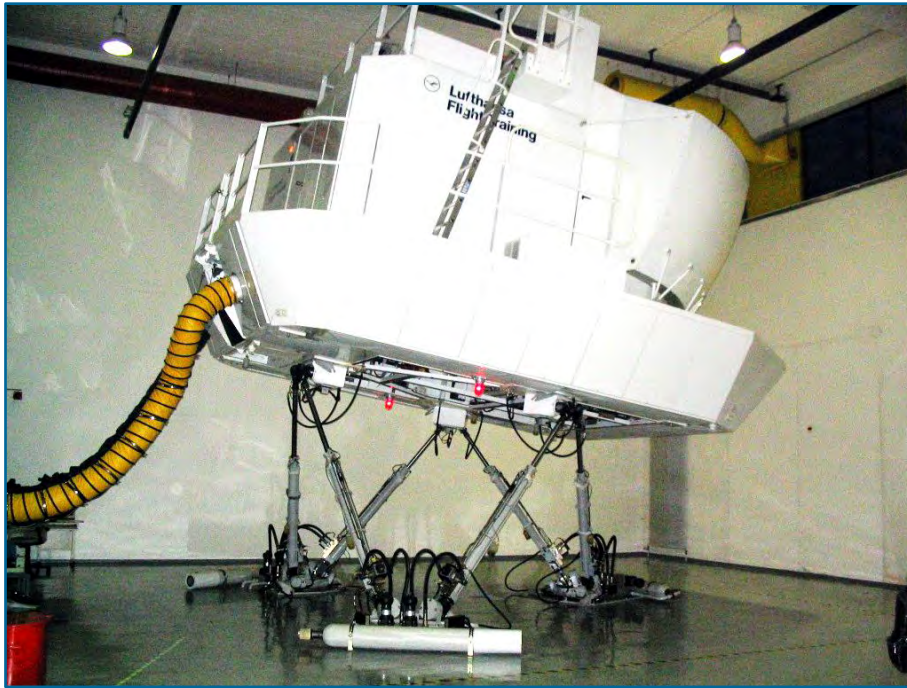


Abbildung 5.21 Flugsimulator [58]

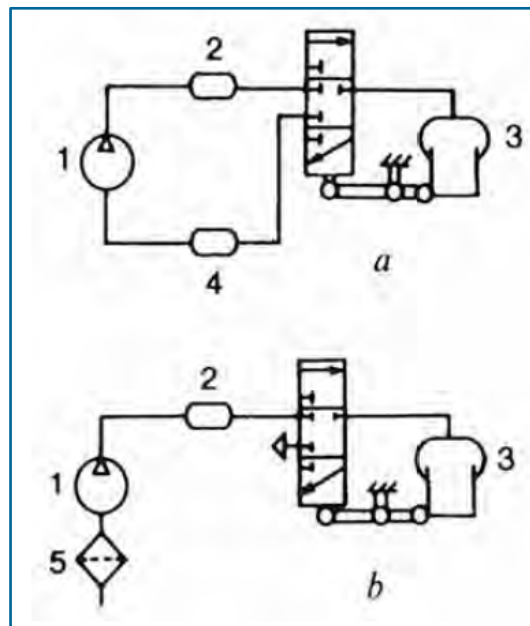
5.3.7 Geschützstabilisierung

Bei Kampfpanzern werden elektromechanische Systeme zur Geschützstabilisierung eingesetzt, um auch während der Fahrt auf unebenem Untergrund ein Ziel im Visier zu behalten. Es werden dabei allerdings nur rotatorische Bewegungen bei sehr niedrigen Frequenzen (0 – 4 Hz) ausgeglichen, weshalb ein Einsatz bei einer Sekundärfederung für Schienenfahrzeuge nicht realistisch erscheint. [59]

5.3.8 Elektronische Luftfederung

Auf Wunsch von Siemens wurde auch das Federungssystem untersucht, welches bei Bus-Rapid-Transit-Systemen eingesetzt wird. Bei diesen Metrobussystemen verkehren Busse zumeist ausschließlich auf baulich abgetrennten Busspuren, ähnlich wie Schienenfahrzeuge.

Die elektronische Luftfederung wird bei Autobussen und LKWs eingesetzt und stellt eine Fahrzeugfederung aus Luftfedern mit Magnetventilen und integrierter Niveauregulierung dar.



- 1 Kompressor
- 2 Druckspeicher
- 3 Luftfeder
- 4 Niederdruckbehälter
- 5 Druckablass

Abbildung 5.22 Prinzipbild geschlossener (a) und offener (b) Luftfedersysteme
[60]

Da jedoch druckluftlose Alternativen zur bestehenden Sekundärfederung gesucht werden, scheidet die elektronische Luftfederung als Alternative aus.

5.3.9 Passiver Dämpfer mit Schraubenfeder

Die Kombination von Schraubenfedern und passiven Lineardämpfern ist eine einfache Lösung, die seit Jahrzehnten erfolgreich in Schienenfahrzeugen zur Anwendung kommt. Auch für die Sekundärfederung der all-electric Metro erscheint diese Lösung absolut tauglich. Offen bleibt hierbei jedoch die technische Lösung für eine Niveau-regulierung.



Abbildung 5.23 Minden-Deutz MD 52 Drehgestell mit Schraubenfedern und passiven Dämpfern (mittig) [61]

5.4 Auswahl der Sekundärfederung

Zur Auswahl der geeigneten Lösungsmöglichkeiten für die Sekundärfederung wurden eine Anforderungsliste und eine Auswahlliste nach Pahl/Beitz [11] erstellt. Da es sich um eine frühe Phase der Lösungsfindung handelt, weist die Anforderungsliste einen sehr niedrigen Detaillierungsgrad auf.

Anforderungsliste		
Sekundärfederung		
F = Forderung W = Wunsch	Hauptmerkmal	Anforderung
F	Geometrie	Einbau in Drehgestell
F	Kinematik	Bewegung in vertikaler und lateraler Richtung, Komfortwerte
F	Kräfte	Aufnahme der Masse eines halben Wagenkastens (16 t pro Drehgestell)
F	Energie	elektrisch, falls vorhanden
F	Signal	elektrisch, falls vorhanden
F	Sicherheit	Notlaufeigenschaften, Entgleisungssicherheit nach EN 14363
F	Kontrolle	Fahrtechnische Prüfung nach EN 14363, Schwingungsprüfung nach EN 61373
F	Gebrauch	Geräuscharm
F	Instandhaltung	lange Wartungsintervalle
F	Recycling	Entsorgung, Wiederverwertbarkeit (W)
F	Termin	Serienreife in max. 5 Jahren

Tabelle 5.7 Anforderungsliste für die Sekundärfederung

Da elektrorheologische und magnetorheologische Dämpfer als gleichwertig gesehen werden, werden sie in weiterer Folge gemeinsam behandelt.

Auswahlliste für Sekundärfederung										
Lösungsvariante (Lv) eintragen	Lösungsvarianten (Lv) nach <u>Auswahlkriterien</u> beurteilen: (+) ja (-) nein (?) Informationsmangel (!) Anforderungsliste überprüfen								Entscheidung: (+) Lösung weiter verfolgen (-) Lösung scheidet aus (?) Informationen beschaffen (!) Anforderungsliste auf Änderungen prüfen	
	Mit Aufgabenstellung verträglich									
	Forderungen der Anforderungsliste erfüllt									
	Grundsätzliche Realisierungschance gegeben									
	Zulässiger Aufwand zu erwarten									
	Unmittelbare Sicherheitstechnik gegeben									
	Im eigenen Bereich bevorzugt									
	Erkenntnisstand ausreichend									
	Niveauregulierung integrierbar									
	Lv	A	B	C	D	E	F	G	H	Bemerkungen (Hinweise, Begründungen)
1	+	+	+	+	+	-	+	-	für benötigte Tragfähigkeit noch nicht realisiert	-
2	+	+	+	+	+	+	+	-		+
3	+	+	+	+	-	-	+	+	Notlaufeigenschaft nur mit Zusatzfeder	-
4	+	-	+	-	-	-	-	+	unverhältnismäßig hoher Aufwand erwartet	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	vom Konzept her ungeeignet	-
6	+	-	+	+	-	+	+	+	Notlaufeigenschaft nur mit Zusatzfeder	-
7	+	+	+	+	+	+	+	-		+

- 1 Linearaktor mit Schraubenfeder
- 2 Elektro-/magnetorheologischer Dämpfer mit Schraubenfeder
- 3 Hydropneumatische Federung
- 4 Hexapod mit aktiver Bewegungskompensation
- 5 Geschützstabilisierung
- 6 Elektronische Luftfeder
- 7 Passiver Dämpfer mit Schraubenfeder

Tabelle 5.8 Auswahlliste für die Sekundärfederung

Zwei Systeme erfüllen mit hoher Wahrscheinlichkeit die Anforderungen und wurden in weiterer Folge als mögliche Alternativen ins Fahrzeugkonzept aufgenommen und in dieser Studie behandelt:

- Passiver Dämpfer mit Schraubenfeder, siehe Abschnitt 5.3.9
- Elektro-/magnetorheologischer Dämpfer mit Schraubenfeder, siehe Abschnitte 5.3.3 und 5.3.4

Die übrigen Alternativen der Sekundärfederung wurden ausgeschieden, da sie die Anforderungen nur zum Teil erfüllen können. Die folgenden Gründe waren für das Ausscheiden der einzelnen Varianten hauptverantwortlich.

Linearaktor mit Schraubenfeder

- Das Konzept hat sich im PKW Bereich nicht durchgesetzt und wurde für die benötigten Lasten bei Metros noch nie annähernd verwirklicht.

Hydropneumatische Federung

- fail-safe nur mit eigener Zusatzfeder, Druckluftsystem

Hexapod

- Baugröße, hoher Steuerungsaufwand

Geschützstabilisierung

- Gesamtkonzept gänzlich ungeeignet

Elektronische Luftfederung

- Luftfederung widerspricht dem Ziel, die Druckluftsysteme zu eliminieren

5.5 Zweistufige Entwicklung der Sekundärfederung

In den Drehgestellen SF 1000 ist die alternative, druckluftlose Sekundärfederung nicht umsetzbar, weil dafür eine Um- bzw. Neukonstruktion des Drehgestells not-

wendig wäre. Es erscheint daher sinnvoll, die all-electric Sekundärfederung in zwei Entwicklungsstufen zu realisieren, um das wirtschaftliche und technische Risiko in Grenzen zu halten. Eine Um- oder Neukonstruktion eines Drehgestells stellt einen sehr hohen entwicklungstechnischen Aufwand dar, weshalb dieser Schritt als letztes geplant ist, nachdem sich die übrigen neuen, elektrischen Komponenten bewährt haben.

Als erste Entwicklungsstufe ist vorgesehen, dass die Luftfeder nicht ersetzt, sondern nur die Druckluftversorgung adaptiert wird. Bisher erfolgt die Luftversorgung durch die Hauptluftbehälterleitung des Zuges, die von den beiden zentralen Kompressoren in den Kopfwägen gespeist wird. Ein Ersatz der Sekundärfederung durch ein luftloses System benötigt einen gänzlich anderen Bauraum, da die bisherige Federung durch zwei Luftbälge pro Drehgestell erfolgt. Die Luftbälge haben eine sehr geringe Höhe, dafür benötigen sie Platz in der Breite. Als druckluftlose Alternative für Federung und Dämpfung erscheint eine Ausführung mit Schraubenfedern und Dämpfern bestgeeignet, da dieses Konzept ebenfalls sehr gute Komfortwerte erreicht, aufgrund jahrzehntelanger Erfahrung sehr ausgereift, und der Energieverbrauch sehr gering oder sogar null ist. Die Dämpfer können als herkömmliche Dämpfer energieelos oder elektro- bzw. magnetorheologisch ausgeführt werden, wie in Abschnitt 5.5.4 ausgeführt wird. Jedenfalls benötigt die Ausführung mit Schraubenfedern und Dämpfern im Gegensatz zum Luftbalg einen relativ hohen, schlanken Bauraum und zusätzlich noch ein Element, das die Ausdrehung gegenüber dem Wagenkasten ermöglicht (z. B. eine Wiege oder einen Drehkranz).

Als Zwischenschritt werden zwei Konzepte vorgeschlagen:

Beim Konzept 1 bleibt die Luftversorgung der Federbälge unverändert. Zwei zentrale Kompressoren sind über die Hauptluftbehälterleitung mit den Luftfedern verbunden. Da die Kompressoren allerdings nur noch die Luftfedern versorgen müssen, genügen kleinere Einheiten mit geringerer Baugröße und niedrigerer Leistung.

Beim Konzept 2 werden die Hauptluftbehälterleitung und die beiden zentralen Großkompressoren entfernt und durch kleine, dezentrale Kompressor-Einheiten ersetzt. Es ist vorgesehen, pro Drehgestell einen Kleinkompressor zu verbauen. Diese kleinen dezentralen Kompressoren sind dann nur noch jeweils für die Versorgung der zwei Luftfederbälge eines Drehgestells zuständig, sodass auch kein Luftnetzmanagement mehr vonnöten ist. Als Redundanz könnten die beiden Kompressoren eines Wagens durch eine Luftleitung miteinander verbunden werden, sodass es zwischen den einzelnen Wagen eines Zuges keine Druckluftverbindung mehr gibt. Da jedoch für den Fall des Versagens der Luftfederung eine Notfeder verbaut ist, die allen betrieblichen Anforderungen entspricht, unterliegt der Fahrbetrieb auf Notfedern keinen unmittelbaren betrieblichen Einschränkungen. Sofern es nicht von Betreiberseite gewünscht ist, kann auf diese Redundanz, die erst recht wieder eine pneumatische Verbindung durch den Wagen bedeuten würde, verzichtet werden, wie in Abschnitt 5.5.2 erläutert wird.

Wenn sich bei der Zwischenvariante die bereits ersetzten all-electric Komponenten technisch bewähren, wird im nächsten Schritt die all-electric Metro umgesetzt. Dafür ist eine Um- bzw. Neukonstruktion des Drehgestells erforderlich, um die all-electric Sekundärfederung sowie die all-electric Niveauregulierung zu integrieren. Hier gibt es gar keine Druckluftkomponenten mehr, und die bisherigen Druckluftsysteme sind gänzlich durch elektrische Systeme ersetzt. Dies hat auch zur Folge, dass die Funktionen der Sekundärfederung und der Niveauregulierung nunmehr von zwei getrennten Komponenten ausgeführt werden, denn bisher sind die Luftfederbälge für beide Funktionen verantwortlich.

5.5.1 Zentrale Kompressoren

Hier bleibt die Versorgung der Luftfederbälge durch zwei jeweils in den Kopfwägen angeordnete zentrale Kompressoren und die Hauptluftbehälterleitung unverändert. Da die Kompressoren dann nur noch ausschließlich die Luftfederbälge zu versorgen haben, werden kleinere Modelle verbaut, welche eine geringere Leistung, ein geringeres Gewicht und einen niedrigeren Energieverbrauch aufweisen. Die Druckluftver-

rohrung im gesamten Zug kann auf die Versorgung der Luftfederbälge durch die Hauptluftbehälterleitung reduziert werden. Dadurch kann auch die Hauptluftbehälterleitung selbst verkleinert werden.

5.5.2 Dezentrale Kompressoren

Bei diesem Konzept wird die Sekundärfederung ebenfalls unverändert belassen. Es ändert sich die Luftversorgung dahingehend, dass keine Hauptluftbehälterleitung und keine zentralen Kompressoren mehr vorhanden sind. Die Luftversorgung wird von dezentralen Kompressoren übernommen, die entweder in den Drehgestellen oder in unmittelbarer Nähe der Drehgestelle verbaut sind. Da der Einbauraum in den Drehgestellen üblicherweise sehr begrenzt ist, und sämtliche Komponenten aus betrieblichen Gründen höheren Belastungen ausgesetzt sind, erscheint der Einbau der dezentralen Kompressoren im Wagenkasten oberhalb der Drehgestelle als bestgeeignet. Dies hat auch den Vorteil, dass die Luftfeder dann von oben befüllt wird und keine Luftleitung durch die Notfeder verlaufen muss, welche unmittelbar unter dem Luftfederbalg verbaut ist. Die höhere Belastung in den Drehgestellen resultiert daraus, dass die dort verbauten Komponenten einerseits nur durch die Primärfederstufe von den dynamischen Belastungen im Betrieb entkoppelt werden und andererseits diversen Umweltbedingungen wie Steinschlag, Regen, Schnee, Eis unmittelbarer ausgesetzt sind.

Dieses Konzept reduziert die verbleibende Druckluftausrüstung auf ein Minimum, da nur noch Luftleitungen von den Luftfederbälgen zu den jeweils sich in unmittelbarer Nähe befindlichen Kleinkompressoren existieren. Es gibt keine Druckluftverbindungen zwischen den Drehgestellen und auch zwischen den einzelnen Wagen mehr, sodass auf eine Hauptluftbehälterleitung sowie bei den Wagenkupplungen auf Luftleitungen verzichtet werden kann.

Ein Kleinkompressor versorgt die beiden Luftfederbälge eines Drehgestells. Die Dimensionierung und die Auswahl des Kompressors erfolgen in Abschnitt 6.2.1. Bei diesem Konzept gibt es keine Redundanz der Luftversorgung mehr. Beim Konzept

mit zwei zentralen Großkompressoren versorgen beide Geräte über ein und dieselbe Hauptluftbehälterleitung alle Luftfedern. Bei Ausfall eines Kompressors muss der andere dessen Aufgaben übernehmen. Es ist immer nur einer der beiden Kompressoren, üblicherweise tageweise abwechselnd, im Einsatz.

Die fehlende Redundanz bei dezentralen Kompressoren wird von Experten als unkritisch gesehen, da bei einem Ausfall eines Kleinkompressors der Wagenkasten auf diesem Drehgestell auf die Notfeder absinkt. Bei modernen Metros unterliegt die Fahrt auf der Notfeder von Seiten des Herstellers keinen betrieblichen Einschränkungen und hat keine Fahrplanrelevanz, lediglich eine Reduktion des Fahrkomforts. Ein Fahrbetrieb auf der Notfeder bedingt durch den Ausfall eines Systems kann je nach Auslegung der Notfeder korrektive Instandhaltungsmaßnahmen nach sich ziehen, trotzdem kann der Betriebstag eines betroffenen Zuges jedenfalls ohne Einschränkungen zu Ende gefahren werden. Bei der Fahrt auf der Notfeder gibt es keine Möglichkeit der Niveauregulierung an diesem Drehgestell mehr, allerdings stellt eine Notfederfahrt ohnehin eine Ausnahmesituation dar. Da Notfederfahrten, welche auch bei Versagen des Luftfederbalgs oder der Luftfederventile vorkommen können, niemals den Regelfall im Betrieb darstellen, erscheint der erfahrungsgemäß selten zu erwartende Ausfall der Niveauregulierung an einem Drehgestell in einem derartigen Fall akzeptabel.

Ist trotzdem eine Redundanz bei Ausfall eines Kleinkompressors erwünscht oder gefordert, so müssen die beiden Kleinkompressoren eines Wagens durch eine Luftleitung miteinander verbunden werden. Dies bedingt allerdings wieder eine pneumatische Verbindung zwischen den Drehgestellen eines Wagens, was den Vorteil des Entfalls der Hauptluftbehälterleitung zum Teil wieder zunichtemacht. Es wären aber weiterhin keine Druckluftverbindungen zwischen den einzelnen Wagen mehr erforderlich und somit auch keine Luftleitungen bei den Wagenkupplungen.

Für die Luftfeder ist keine erforderliche Luftqualität definiert. Die im Luftfedersystem derzeit verwendeten Ventile erfordern eine Luftqualität 4-4-4 nach ISO 8573. Die Luftqualität ölfreier Kleinkompressoren genügt für die Luftfeder voraussichtlich, ob

sie auch für die Ventile genügt, muss bei der konkreten Umsetzung geklärt werden. Falls die Luftqualität nicht genügt, sind zusätzliche Luftaufbereitungskomponenten vorzusehen. Möglicherweise kann eine Wasserabscheidung oder eine Lufttrocknung im Luftfedersystem notwendig sein, da es durch Temperaturunterschiede zu Kondenswasserbildung im Federbalg kommen kann. Geringe Wassermengen stellen kein Problem für die Luftfeder dar, eine größere Wasseransammlung muss jedoch vermieden werden. Bei der Auswahl des Kompressors in Abschnitt 6.2.1 wird auf die Anwendung im Schienenfahrzeugbereich näher eingegangen.

5.5.3 4-Punkt-Steuerung mit elektronischem Luftsteuerventil und weitere Steuerungsvarianten

Der Siemens Inspiro kann mit einer 4-Punkt-Steuerung ausgerüstet werden. Der Unterschied zur bei Metros ebenfalls üblichen 2-Punkt-Steuerung ist, dass bei der 4-Punkt-Steuerung das Niveau des Wagenkastens nicht mehr nur an jedem Drehgestell für beide Luftfedern synchron geregelt wird (also an zwei Punkten des Wagens), da die beiden Luftfederbälge jeweils durch eine Luftleitung miteinander verbunden sind, sondern dass das Niveau bei jeder einzelnen Luftfeder, folglich an jedem Drehgestell links und rechts (also an vier Punkten des Wagens) geregelt wird.

Eine 4-Punkt-Steuerung bietet in Kombination mit einem elektronischen Luftsteuerventil auch die Möglichkeit, über die Programmierung der Kennlinie die Primäreinfederung zu kompensieren, sofern die Information über eben diese Einfederung dem Steuergerät bekannt ist. Da in Zukunft aller Voraussicht nach mit immer schärferen Bestimmungen die Höhendifferenz zwischen Bahnsteig und Wagenkasten betreffend zu rechnen ist, um mobilitätseingeschränkten Personen das Ein- und Aussteigen zu erleichtern, erscheint es sinnvoll, das tatsächliche Fußbodenniveau des Wagens durch die Fahrzeugsteuerung zu erfassen.

Im Zuge dessen kann die Niveauregulierung auch auf die Abnutzung der Räder reagieren und das Wagenkastenniveau entsprechend angleichen. Das Niveau kann naturgemäß nur innerhalb der Grenzen des Konzepts der Beilegescheiben von der Ni-

veauregulierung angepasst werden. Mit den Beilegescheiben wird die Abnutzung der Räder kompensiert, welche beim Fahrwerk SF 1000 eine Raddurchmesserdifférenz von max. 80 mm zwischen neuem und abgenutztem Rad ergeben kann.

Das Wagenkastenniveau wird mit herkömmlichen Luftfederventilen durch ein einfaches Gestänge geregelt, welches bei einer Niveauänderung, z. B. durch Passagierwechsel, zum Entlüften oder Befüllen des Luftfederbalgs führt. Diese Regelung ist immer in Betrieb und kann auch nicht unterbunden werden, da es eine rein mechanische Regelung ist, auf die nur bei Wartungsarbeiten im Depot zugegriffen werden kann.

Ein elektronisches Luftsteuerventil ist steuerbar, es kann nach Wunsch aktiviert oder deaktiviert werden. Herkömmliche Ventile sind immer aktiv und reagieren sowohl während der Fahrt auf Kuppen- und Wannenfahrten, wenn sich der Wagenkasten durch die Trägheitskraft hebt (Kuppe) oder senkt (Wanne), als auch in der Station während des Passagierwechsels. Ein elektronisches Luftsteuerventil kann während der Fahrt und beispielsweise auch während des Passagierwechsels deaktiviert werden. Es wird dann erst nach dem Passagierwechsel, also beim oder nach dem Schließen der Türen aktiv, sodass nur die tatsächliche Passagier- und somit Niveaudifferenz vor und nach der Station ausgeglichen werden muss. In diesem Fall ist aber einerseits noch zu klären, ob sich bei einer hohen Passagierwechselrate das Wagenkastenniveau nicht zu stark verändert und damit den Vorgaben zur Abweichung vom Bahnsteigniveau nicht mehr entspricht, was bedeutet, dass die Stufe zwischen Bahnsteig und Wagenniveau zu hoch wird. Eine mögliche Lösung wäre dann eine Fesselung des Wagenkastens in der Station und eine Freigabe erst nach dem Schließen der Türen. Andererseits ist zu bestimmen, ob die Niveauregulierung noch vor Abfahrt des Zuges aus der Station erfolgen muss oder ob die Regulierung auch während der Fahrt erfolgen kann. Hier wäre auch der Extremfall zu berücksichtigen, dass beispielsweise nach Großereignissen mit sehr hohem Passagieraufkommen, wie z. B. nach Veranstaltungen in Stadien, ein leerer Zug in der Station bereitsteht, und dieser Zug dann komplett beladen wird. Es dauert üblicherweise mehrere Minuten, bis ein Zug vollständig gefüllt und abfahrtsbereit ist. In dieser Zeit könnte die

Niveauregulierung schon freigegeben sein, obwohl der Passagierwechsel, der in so einem Fall ja eine reine Beladung darstellt, noch im Gange ist. Es wäre auch denkbar, dass das Fahrpersonal das Niveau schon vor dem Zusteigen der Fahrgäste anhebt, sodass die endgültige Absenkung des Wagenkastens geringer ausfällt als wenn vom Bahnsteigniveau ausgegangen wird. Hier wäre eine eigene Funktionsüberbrückung notwendig, die vom Fahrpersonal manuell aktiviert werden könnte.

Grundsätzlich wäre es auch denkbar, dass das erwartete Passagieraufkommen schon am Bahnsteig durch Kameras (welche ohnehin an jedem Bahnsteig einer Metro vorhanden sind), Sensoren im Boden oder andere geeignete Methoden automatisch vor Einfahrt des Zuges oder Öffnen der Türen erhoben wird, und diese Information die Vorab-Niveauregulierung automatisiert beeinflusst. Es ist jedoch noch kein derartiges System bekannt, und es bestünde dafür jedenfalls noch Entwicklungsbedarf.

In Fällen mit dermaßen starker Beladung, wie sie bei Großereignissen auftritt, wäre es theoretisch auch möglich, dass der Wagenkasten trotz intakter Sekundärfederung bis auf die Notfeder absinkt, falls die kleineren Kompressoren (sowohl beim zentralen als auch beim dezentralen Konzept) diese Absenkung nicht rechtzeitig vor der Abfahrt aus der Station wieder ausgleichen können. Ob in so einem Fall bis zum Erreichen des gewünschten Niveaus eine kurze Fahrt auf der Notfeder akzeptiert wird, ist mit dem Betreiber zu klären. Da die Fahrt auf Notfedern ohne betriebliche Einschränkung möglich ist, würde dieser Fall keinen Einfluss auf den Betrieb bedeuten. Der Fahrkomfort könnte zwar für kurze Zeit (längstens bis zur nächsten Station) etwas geringer sein (aber immer im Rahmen der betrieblichen Vorgaben), allerdings spielt das in einem maximal gefüllten oder überfüllten Wagen wohl keine große Rolle. Sollte dieses Szenario standardmäßig vorgesehen werden, ist die Notfeder jedenfalls so auszulegen, dass daraus keine unmittelbaren korrektive Maßnahmen erwachsen.

Aus den Formeln

$$v = \frac{s}{t}; \quad s = \frac{a \cdot t^2}{2}; \quad s = \frac{v^2}{2a}$$

ergibt sich bei einem Stationsabstand von 750 m, einer Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h, einer Beschleunigung von max. 1,2 m/s² und einer Verzögerung von max. 1,1 m/s² die kürzeste Fahrzeit von 53 s zwischen zwei Stationen, wie in Tabelle 5.9 und Abbildung 5.24 gezeigt wird. Diese Werte entsprechen typischen Leistungs- und Streckendaten eines Metrosystems.

Stationsabstand	750 m
Höchstgeschwindigkeit	80 km/h = 22,2 m/s
Beschleunigung	1,2 m/s ²
Verzögerung	1,1 m/s ²
Beschleunigungsstrecke	205,7 m
Beschleunigungsdauer	18,5 s
Fahrtstrecke mit Höchstgeschwindigkeit	319,8 m
Fahrdauer mit Höchstgeschwindigkeit	14,4 s
Verzögerungsstrecke	224,5 m
Verzögerungsdauer	20,2 s
Gesamtfahrzeit	53 s

Tabelle 5.9 Fahrzeit zwischen zwei Stationen

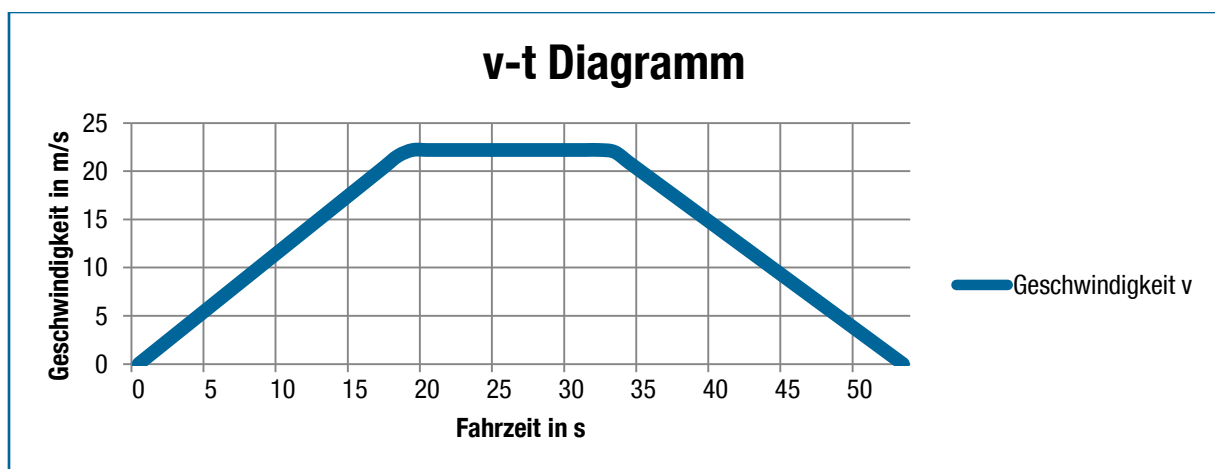


Abbildung 5.24 v-t Diagramm der Fahrt zwischen zwei Stationen

5.5.4 All-electric Sekundärfederung

Die Ausführung des Siemens Inspiro als all-electric Fahrzeug ist mit den bestehenden Drehgestellen SF 1000 nicht möglich. Der Grund liegt in der völlig anderen Bauform einer Sekundärfederung, welche aus Luftbälgen statt aus Schraubenfedern und Dämpfern besteht.

Typische Bauhöhen und Auslenkungen einer Luftfeder sind in Tabelle 5.10 angeführt.

Bauhöhen	188 bis 283 mm
laterale Auslenkungen	+/- 100 bis 120 mm
vertikale Auslenkungen	+/- 60 bis 100 mm

Tabelle 5.10 Typische Bauhöhen und Auslenkungen einer Luftfeder [62]

Eine bloße Federung mit Schraubenfedern und Dämpfern kann derartige laterale Auslenkungen ohne weitere Maßnahmen nicht erreichen. Daher müsste ein all-electric Drehgestell mit Gleitplatte und Wiege, siehe Abbildung 4.7 und Abbildung 5.25, ausgestattet werden, was das Gewicht des Drehgestells voraussichtlich um 1 – 1,5 Tonnen erhöhen würde. In der Fertigung sind dadurch auch erhebliche Mehrkosten durch den Verbau einer Gleitplatte und einer Wiege zu erwarten, siehe auch Tabelle 6.12.

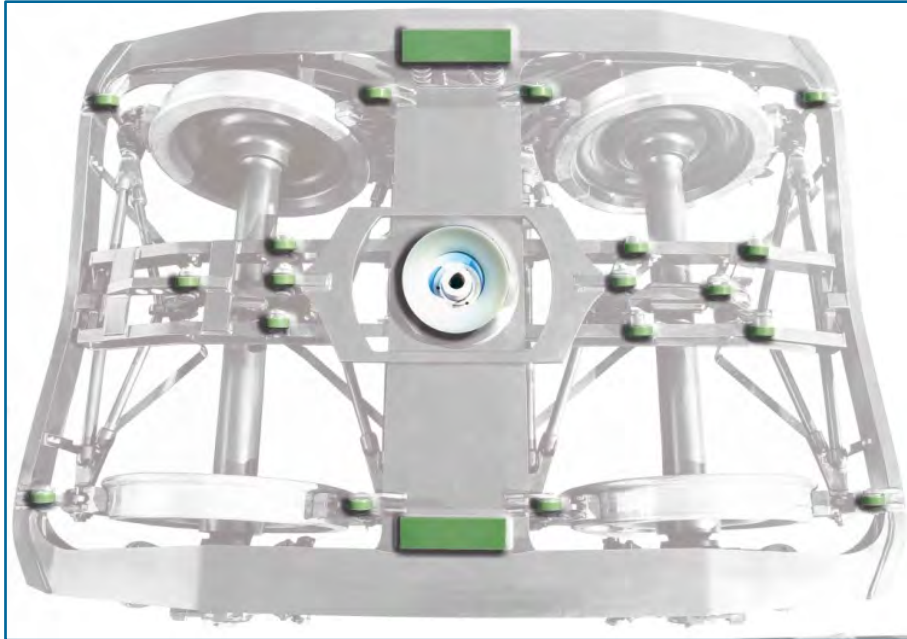


Abbildung 5.25 Drehgestell mit Gleitplatten (grün, rechteckig) [63]

In der Diplomarbeit „Untersuchung und Bewertung von innovativen Sekundärfederungskonzepten für Metrofahrzeuge“ von DI Georg Havlicek [64] wurden alternative, druckluftlose Varianten der Sekundärfederung untersucht und bewertet. Bei dieser Arbeit wurde eine Sekundärfederung aus Schraubenfedern und magnetorheologischen Dämpfern als die bestgeeignete Lösung ermittelt. Passive Dämpfer wurden in dieser Arbeit nicht behandelt.

5.6 Niveauregulierung

5.6.1 Niveauregulierung mit zentralen oder dezentralen Kompressoren

Die Funktion der Niveauregulierung wird beim Fahrzeugkonzept mit Luftfederung von derselben Komponente wie die Sekundärfederung ausgeführt und wird im Abschnitt 5.3 behandelt.

5.6.2 All-electric Niveauregulierung

Bei einem all-electric Fahrzeug kann in eine Sekundärfederung, welche aus Schraubenfedern und Dämpfern besteht, keine Niveauregulierung sinnvoll integriert wer-

den, da eine integrierte Niveauregulierung ständig gegen die Federn arbeiten müsste. Daher muss diese Funktion von einer eigenen, getrennten Komponente ausgeführt werden. Hier bieten sich Linearaktoren an, die seriell zur Federung verbaut werden. An welcher Position der Einbau erfolgt, ist bei der Neuentwicklung des Drehgestells zu entscheiden. Als mögliche Positionen gelten:

- Fußpunkt Primärfederung
- Kopfpunkt Primärfederung
- Fußpunkt Sekundärfederung
- Kopfpunkt Sekundärfederung

Bei der Positionierung der Niveauregulierung ist man natürlich bestrebt, sowohl aus fahrdynamischen Gründen, als auch um Strecke und Komponenten zu schonen, die ungefederten Massen möglichst gering zu halten.

Die Ermittlung der notwendigen Leistung der Niveauregulierung als eigenständige Komponente wird in Abschnitt 6.2.3 ausgeführt.

Sofern in der Station keine Fesselung des Wagenkastens stattfindet, wäre auch bei der all-electric Niveauregulierung eine Steuerung denkbar, welche auf die zu erwartende Niveauänderung bei sehr großen Beladungen vorab durch das Fahrpersonal oder durch eine automatisierte Steuerung, wie sie in Abschnitt 5.3 beschrieben wird, reagiert.

5.7 Spaltüberbrückung

Lineare Schiebetritte sind am Markt verfügbar. Sie werden durch eine elektrisch angetriebene Zahnstangeneinheit bewegt und erreichen bei 300 mm Auftritttiefe eine Ein- und Ausfahrzeit von 3 Sekunden pro Richtung. Die Pintsch Bamag Antriebs- und Verkehrstechnik GmbH, Dinslaken, Deutschland, bietet mit dem Zustiegssystem „STS 550 classic/advance“, Sachnummer 008 100 0XX-726, [65] einen linearen Schiebetritt an, der diese Verfahrszeiten und -wege erreicht.



Abbildung 5.26 Schiebetritt Pintsch Bamag STS 550 classic / advance [66]

Hub der Trittfläche	305 mm
Bauhöhe	80 mm
Ein-/Ausfahrzeit für 305 mm	3 s +/-20 %
Gewicht	125 kg

Tabelle 5.11 Schiebetritt Pintsch Bamag STS 550 classic / advance

5.8 Dritte Schiene Stromabnehmer

Ein Dritte Schiene Stromabnehmer mit elektrisch betätigter Verklüpfung ist am Markt verfügbar. Die Firma Stemmann-Technik GmbH, Schüttorf, Deutschland, hat einen derartigen Stromabnehmer entwickelt, welcher auf der InnoTrans 2012, Internationale Fachmesse für Verkehrstechnik, in Berlin präsentiert wurde, und bietet diesen am Markt an. Das An- und Ablegen des Schleifschuhs erfolgt in etwa 2 Sekunden durch einen integrierten Spindeltrieb, der in ähnlicher Ausführung für Dachstromabnehmer eingesetzt wird.

Im Falle eines Stromausfalls kann der Schleifschuh mittels einer aufsteckbaren Handkurbel von der Stromschiene abgelegt werden.

5.9 Horn

Es existieren elektrische Hörner von diversen Anbietern. Als druckluftlose Alternative wird das Modell KB-30 der Firma Kahlenberg Industries, Inc., Two Rivers, Wisconsin, USA, betrachtet.



Abbildung 5.27 Kahlenberg Horn KB-30 [67]

Frequenz	695 Hz
Schalldruckpegel	131 dB
Leistung	100 W
Schutzart	IP 67
Betriebstemperaturbereich	-50°C bis +200°C

Tabelle 5.12 Leistungsdaten Horn Kahlenberg KB-30 [67]

Die Frequenz der Signalhörner von Schienenfahrzeugen gemäß EN 15153-2 liegt bei 370 Hz und einer weiteren Frequenzlage. Die Anpassung der akustischen Eigenschaften stellt keine technische Hürde dar.

5.10 Pantograf

Bei Schienenfahrzeugen sind sowohl pneumatisch, als auch elektrisch betriebene Pantografen im Einsatz. Eine Umstellung auf elektrisch betriebene Pantografen hätte also keine Auswirkungen auf die Funktion.

5.11 Spurkranzschmierung

Sofern der Betreiber eine fahrzeugseitige Spurkranzschmierung mittels Sprühdüsen vorsieht, können reguläre, am Markt verfügbare, elektrisch betriebene Spurkranzschmiersysteme verwendet werden. Die Schmiermittelaufbringung erfolgt dabei durch eine elektromagnetische Verteilerpumpe.



Abbildung 5.28 SKF EasyRail Airless [68]

5.12 Morphologischer Kasten aller Lösungsmöglichkeiten

Mechanische Bremse	Siemens Elektrohydraulische Bremse	Vienna Engineering Elektromechanische Bremse	Messier-Bugatti-Dowty Flugzeugbremse	DLR Keilbremse	Continental Automotive Kugelrampenbremse	Continental Teves Bremse mit Verriegelung	Continental Automotive Bremse mit reversiblen Kraftspeicher	Knorr-Bremse Parkbremse
Sekundärfederung	Linearaktor	Elektrorheologischer Dämpfer mit Schraubenfeder	Magnetorheologischer Dämpfer mit Schraubenfeder	Hydropneumatische Federung	Hexapod	Geschützstabilisierung	Elektronische Luftfederung	Passiver Dämpfer mit Schraubenfeder
Niveauregulierung	integriert in Luftfederung	Linearaktor						
Spaltüberbrückung	Lösungen am Markt verfügbar							
Dritte Schiene Stromabnehmer	Stemmann-Technik							
Horn	Lösungen am Markt verfügbar							
Pantograf	Lösungen am Markt verfügbar							
Spurkranzschmierung	Lösungen am Markt verfügbar							

6 Berechnungsgrundlagen für das wirtschaftliche Potenzial

Das wirtschaftliche Potenzial der neuen Fahrzeugkonzepte wurde allein auf Basis des Energieverbrauchs erhoben. Dabei wurden die einzelnen Verbrauchswerte der neuen Komponenten mit dem kumulierten Verbrauch des bisherigen Systems verglichen. Für eine vollständige Ermittlung des gesamtwirtschaftlichen Potenzials wäre zusätzlich eine Gegenüberstellung der vollständigen Lebenszykluskosten sowie der Kosten der Serienprodukte der neuen Komponenten nötig gewesen. Da diese Kosten zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch nicht bekannt waren, musste die Berechnung des wirtschaftlichen Potenzials auf den Energieverbrauch eingeschränkt werden.

Für die bestehenden Komponenten, die mit Druckluft versorgt werden, war es nicht möglich, die jeweiligen individuellen Anteile am Luftverbrauch zu eruieren, da alle Komponenten von der Hauptluftbehälterleitung gespeist werden und keine Messungen bekannt sind, aus denen der Verbrauch der einzelnen Komponenten hervorgeht. Der Gesamtverbrauch der bisherigen zentralen Kompressoren ist jedoch bekannt, siehe Tabelle 9.1. Es besteht die einhellige Meinung unter Experten, dass die Niveauregulierung mit höchster Wahrscheinlichkeit der größte Luftverbraucher aller Komponenten ist.

Um den Energieverbrauch der neuen Komponenten abzuschätzen, wurden nach Absprache mit Siemens und dem Institut für Verkehrswissenschaften der Technischen Universität Wien folgende Annahmen getroffen:

aufgerüstete Zeit pro Jahr (inkl. Aufrüstzeit)	6.000 h
Fahrbetrieb pro Jahr	4.500 h
Fahrzeit	2.250 h
Stehzeit	2.250 h
Betriebstage	300
Stationsabstände	750 m
Stationshalte pro Tag	500
Fahrzeuglebensdauer	30 Jahre

Tabelle 6.1 Annahmen für Betriebszeiten

Im Zuge der Recherchen konnte nicht eindeutig ermittelt werden, warum Züge außerhalb des Fahrbetriebs etwa 1.500 h pro Jahr aufgerüstet stehen. Dieser Zeitraum entspricht über 5,1 Jahren bei einer 30-jährigen Fahrzeuglebensdauer. Unter Experten herrscht die Meinung vor, dass aufgrund der Aufrüstzeit von 8,5 bis 15 min, die die zentralen Kompressoren zum Druckaufbau in der Druckluftanlage benötigen, Züge aufgerüstet bereitgehalten werden, um sie schneller in den Fahrbetrieb nehmen zu können, wenn sie zwischen den Stoßzeiten abgestellt werden oder wenn sie bei Ausfall eines anderen Zuges spontan eingesetzt werden müssen.

Es wird davon ausgegangen, dass sich bei den Varianten mit zentralen oder dezentralen Kompressoren die Aufrüstzeit nicht wesentlich verändert, sodass die aufgerüstete Zeit weiterhin 6.000 h pro Jahr beträgt. Für die Energieverbrauchsberechnung der Bremsen bedeutet dies, dass diese ebenfalls 6.000 h pro Jahr aktiv sind.

Beim all-electric Konzept wird erwartet, dass sich die Aufrüstzeit stark verkürzt. Die Aktivierung der Systeme sollte in etwa 1 bis 2 min abgeschlossen sein, da der Druckaufbau in der Druckluftanlage entfällt. Dies bedeutet, dass abgestellte Züge deutlich rascher in Betrieb genommen werden können als bisher. Es wird davon ausgegangen, dass es infolgedessen nicht mehr notwendig ist, Züge 1.500 h pro Jahr vollständig aufgerüstet bereit zu halten. Die Klimatisierung der Züge kann getrennt von den übrigen Systemen erfolgen, falls dies bei der Bereithaltung ein Faktor

sein sollte. Da die Klimatisierung von Zügen keine Auswirkungen auf das all-electric Konzept hat, wird in dieser Arbeit nicht weiter darauf eingegangen. Für die Energieverbrauchsrechnung der Bremsen bedeutet dies, dass diese nur noch 4.500 h pro Jahr als aktiv angenommen werden.

Alle anderen Komponenten, die hier behandelt werden, bzw. deren Antriebe sind im aufgerüsteten Zustand außerhalb des Fahrbetriebs nicht aktiv.

6.1 Berechnungsgrundlagen der mechanischen Bremse

Die Leistungsaufnahme des elektrischen Aktors der elektrohydraulischen oder elektromechanischen Bremse kann nur abgeschätzt werden. Nach Rücksprache mit Bremsenexperten wird die notwendige Dauerleistung eines Aktors mit etwa 30 bis 50 W als Maximalwert angegeben. Es wird zur Leistungsberechnung ein Wert von 40 W herangezogen.

Anzahl Bremszangen pro 6-Teiler	24
angenommene Dauerleistung pro Bremszange	40 W
Fahrbetrieb pro Jahr	4.500 h
aufgerüstete Zeit pro Jahr	6.000 h
benötigte Energie pro Jahr bei 4.500 h	4.320 kWh
benötigte Energie pro Jahr bei 6.000 h	5.760 kWh

Tabelle 6.2 Leistung der mechanischen Bremse

Zu Entwicklungskosten, Bauraum und Gewicht können keine Aussagen oder Abschätzungen getroffen werden, wobei davon ausgegangen wird, dass eine elektrohydraulische oder elektromechanische Bremszange ein niedrigeres Gewicht als eine pneumatische aufweist.

Bei der elektromechanischen Bremse wird die Serienreife und Zulassungsfähigkeit in spätestens fünf Jahren erwartet. Die elektrohydraulische Bremse von Siemens wird

grundsätzlich für Schienenfahrzeuge entwickelt, weshalb bei dieser eine Serienreife in drei Jahren erwartet wird.

Entwicklungsdauer elektrohydraulische Bremse	3 Jahre
Entwicklungsdauer elektromechanische Bremse	5 Jahre

Tabelle 6.3 Entwicklungsdauer der mechanischen Bremse

6.2 Berechnungsgrundlagen für Sekundärfederung und Niveauregulierung

Bei der Berechnung des Luftbedarfs wird erfahrungsgemäß von einer durchschnittlichen Passagierwechselrate von 9 % ausgegangen, was auch für die Dimensionierung und Auswahl der Kompressoren maßgebend war. Der benötigte Zeitraum wurde mit 53 s angenommen, was der minimalen Fahrzeit zwischen zwei Stationen entspricht, wie in Tabelle 5.9 gezeigt wird.

Die Luftbedarfsberechnung erfolgt üblicherweise unter der Annahme, dass im System 4 bar Gegendruck herrschen.

6.2.1 Sekundärfederung und Niveauregulierung mit Kompressoren

Für den Luftbedarf wurden durch Experten abhängig von der Passagierwechselrate und von der Aufpumpzeit die folgenden Werte für eine Luftfeder mit 40 l Volumen ohne Zusatz- oder Vorratsvolumen ermittelt.

		Aufpumpzeit		
		12 s	53 s	94 s
Passagier- wechselrate	9 %	38,5	8,7	4,9
	20 %	85,5	19,4	10,9
	100 %	427,7	96,8	54,6
		Luftbedarf in l/min		

Tabelle 6.4 Luftbedarf pro Luftfeder

		Aufpumpzeit		
		12s	53 s	94 s
Passagier- wechselrate	9 %	924	209	118
	20 %	2.052	465	262
	100 %	10.265	2.324	1.310
		Luftbedarf in l/min		

**Tabelle 6.5 Luftbedarf pro 6-Teiler (24 Luftfederbälge) ohne Hauptluftbehälter-
leitung**

6.2.1.1 Konzept 1 mit zentralen Kompressoren

Beim Konzept 1 werden die beiden zentralen Kompressoren in den Kopfwägen belassen und in der Dimensionierung an die verringerten Leistungsanforderungen angepasst. Da ein Kompressor sämtliche Luftfederbälge eines Zuges füllen können muss, ist eine Förderleistung von 206 l/min noch nicht ausreichend, weil auch noch die Hauptluftbehälterleitung berücksichtigt werden muss. Eine rechnerische Abschätzung von Experten bei Siemens hat unter Berücksichtigung der Hauptluftbehälterleitung eine benötigte Förderleistung von 230 l/min für ein zentrales System ergeben. Es wurde durch Siemens ein Modell mit einer Förderleistung von 264 l/min bei 4 bar Gegendruck in Betracht gezogen, welches eine kleinere Version des derzeit verbauten zentralen Großkompressors darstellt. Die aktuell installierte Förderleistung der beiden Großkompressoren beim Inspiro Warschau liegt bei 585 l/min je Kompressor. [69]

Kompressor	ALMiG
Leistung	4.000 W
Förderleistung bei 4 bar Gegendruck	264 l/min
Anzahl Kompressoren pro 6-Teiler	2
Anzahl Stationen (Passagierwechsel) pro Tag	500
Betriebsdauer pro Passagierwechsel	26 s
benötigte Energie pro Jahr	8.667 kWh

Tabelle 6.6 Leistung der verkleinerten zentralen Kompressoren

Die beiden zentralen Kompressoren sind gemeinsam in der Lage, bei einer Passagierwechselrate von 9 % den Wagenkasten innerhalb von 26 s wieder auf das geforderte Niveau zu bringen. Da beide Kompressoren mit der Hauptluftbehälterleitung verbunden sind, besteht eine Redundanz. Wenn einer der beiden Kompressoren ausfällt, ist der verbleibende Kompressor in der Lage, das geforderte Niveau in 52 s, also innerhalb der Fahrzeit von 53 s zwischen zwei Stationen, zu erreichen.

6.2.1.2 Konzept 2 mit dezentralen Kompressoren

Beim Konzept 2 versorgt ein Kleinkompressor zwei Luftfedern. Die Firma Dürr GmbH+Co. KG, Bietigheim-Bissingen, Deutschland, stellt Kleinkompressoren her, die auch im Schienenfahrzeugbereich eingesetzt werden. Modelle in folgenden Leistungsklassen wurden in Betracht gezogen:

Lieferleistung bei 4 bar Gegendruck	Abmessungen in mm L x B x H	Gewicht
15 l/min	209 x 108 x 156	4,4 kg
36 l/min	245 x 133 x 190	6,9 kg
57 l/min	311 x 154 x 218	14,0 kg
83 l/min	368 x 176 x 292	20,5 kg

Tabelle 6.7 Kleinkompressoren Varianten [70]

Bei einer Passagierwechselrate von 9 % genügt ein Kompressor mit einer Lieferleistung von 36 l/min, da er in der Lage ist, zwei Luftfedern in 26 s zu füllen. Bei einer Fahrzeit von 53 s zwischen zwei Stationen hat der Wagenkasten bis zur nächsten Station wieder das geforderte Niveau erreicht. Der folgende Kompressor wird für die weitere Berechnung ausgewählt:

Kompressor	Dürr KK15 Typ D-061
Leistung	400 W
Förderleistung bei 4 bar Gegendruck	36 l/min
max. Stromaufnahme	3,7 A
Spannung	DC 110 V
Gewicht	6,9 kg
Anzahl Kompressoren pro 6-Teiler	12
Anzahl Stationen (Passagierwechsel) pro Tag	500
Betriebsdauer pro Passagierwechsel	26 s
benötigte Energie pro Jahr	5.200 kWh

Tabelle 6.8 Leistung des Kleinkompressors [71]

Diese Kompressorbauart wird von Dürr Technik bei Schienenfahrzeugen aktuell in folgenden Anwendungsgebieten eingesetzt [72]:

- Pantograf
- Besandungsanlagen
- Spurkranzschmierung
- Toilettentürsteuerung
- Signalhorn
- Federspeicherbremsen

Die Kompressoren sind ölfrei, auf den Einsatz in Schienenfahrzeugen abgestimmt und können, falls erforderlich, mit Adsorptions- oder Membrantrocknern ausgestattet werden.

Auch für den Fall, dass die Variante gewählt wird, die beiden Kleinkompressoren eines Wagens mit einer Druckluftleitung miteinander zu verbinden, um eine Redundanz zu ermöglichen, ist ein einziger derartiger Kleinkompressor in der Lage, alle vier Luftfederbälge eines Wagens innerhalb von 52 s, also innerhalb der Fahrzeit zwischen zwei Stationen, zu füllen. Das kurze Stück der redundanten Luftleitung wird bei dieser Rechnung vernachlässigt, da dieses Szenario eine Ausnahmesituation darstellt.

Die Entwicklungsdauer einer dezentralen Luftversorgung wird mit etwa 3 Jahren abgeschätzt.

Entwicklungsdauer dezentrale Luftversorgung	3 Jahre
---	---------

Tabelle 6.9 Entwicklungsdauer der dezentralen Luftversorgung

6.2.2 All-electric Sekundärfederung

Die all-electric Sekundärfederung besteht aus Schraubenfedern und Dämpfern; dabei werden zwei Varianten unterschieden.

Bei der Variante 1 werden herkömmliche passive Lineardämpfer eingesetzt, die keinen Energieverbrauch haben.

Leistung passiver Lineardämpfer	0 W
benötigte Energie pro Jahr	0 kWh

Tabelle 6.10 Leistung des passiven Dämpfers

Bei der Variante 2 werden elektro- oder magnetorheologische Dämpfer eingesetzt. Für den Energieverbrauch elektrorheologischer Dämpfer wurden die nachfolgenden Annahmen getroffen. Als Basis dient ein Experteninterview mit einem Mitarbeiter der Firma Fludicon GmbH, Darmstadt. [73] Wie in Abschnitt 5.3.3 erläutert, stellt Fludicon unter der Bezeichnung „FLUDICON eRRide“ unter anderem elektrorheologische Dämpfer für schwere Nutzfahrzeuge her. Die maximale Leistungsaufnahme eines derartigen elektrorheologischen Dämpfers, der zum Beispiel in Schwerlastwägen eingesetzt wird, beträgt 40 bis 50 W, als durchschnittliche Dauerleistung während des Betriebs wurden 5 bis 10 W ermittelt. [73] Für die Leistungsberechnung wurden jeweils die höchsten Werte herangezogen.

max. Leistungsaufnahme	50 W
Dauerleistung	10 W
Anzahl Dämpfer pro 6-Teiler	24
Fahrzeit (Aktivität) pro Jahr	2.250 h
benötigte Energie pro Jahr	540 kWh

Tabelle 6.11 Leistung des elektrorheologischen Dämpfers

Für die Leistung magnetorheologischer Dämpfer gibt es in der Größenordnung von Schienenfahrzeugen zwar noch keine Praxiserfahrungen, allerdings wurden in einer Studie im Jahr 2003 magnetorheologische Dämpfer für ein 70 t-Schienenfahrzeug mit 4 Dämpfern untersucht, modelliert und durch Simulation ermittelt. Die benötigte Maximalleistung wird dabei mit 18 W angegeben. [1] Es wird daher davon ausgegangen, dass magnetorheologische Dämpfer eine ähnliche oder sogar niedrigere Leistung als elektrorheologische benötigen.

Die Entwicklungsdauer der all-electric Sekundärfederung wird auf etwa 2 Jahre geschätzt. Wenn passive Dämpfer ausgewählt werden, wird eine noch kürzere Entwicklungszeit erwartet.

Wie schon in Abschnitt 5.5.4 beschrieben, wirkt sich das Konzept des all-electric Drehgestells mit Schraubenfedern und Dämpfern auf das Gewicht aus, siehe Tabelle 6.12. Es ist auch mit Mehrkosten in der Fertigung zu rechnen.

Entwicklungsdauer all-electric Sekundärfederung	2 Jahre
Mehrgewicht pro Drehgestell	1.000 – 1.500 kg

Tabelle 6.12 Entwicklungsdauer und Mehrgewicht für Wiege, Schraubenfeder und Dämpfer des all-electric Drehgestells

6.2.3 All-electric Niveauregulierung

Da das zukünftige Konstruktionskonzept eines all-electric Drehgestells noch gar nicht bekannt ist, wurde die benötigte Leistung einer Niveauregulierung nur im Hinblick auf den grundsätzlichen Leistungsbedarfs eines Linearantriebs betrachtet.

$$P = \frac{m * g * s}{t}$$

Gesamtmasse Zug vollbeladen	265 t
Masse Drehgestelle	8 * 6,7 t + 4 * 5,0 t = 73,6 t
maximal zu hebende Masse m	265 – 73,6 = 191,4 t
Gesamthubweg pro Stunde s	300 mm
Betätigungszeit t	2 s
Wirkungsgrad	30 %
benötigte Hubleistung P	94 kW
benötigte Energie pro Jahr	2.346 kWh

Tabelle 6.13 Leistung der all-electric Niveauregulierung

Die angenommenen Werte wurden mit Experten abgeschätzt und stellen einen Richtwert dar. Ein Vergleich mit der derzeitigen Leistung einer Niveauregulierung ist

nicht möglich, da die benötigte Energie dieser Einzelkomponente (also der tatsächliche Luftverbrauch) nicht unabhängig von den anderen Druckluftkomponenten bestehender Systeme ermittelt werden kann. Der Wirkungsgrad von 30 % für das gesamte System wurde eher ungünstig angenommen. Effizientere Niveauregulierungsantriebe führen demnach zu einer Leistungsreduktion und Energieoptimierung.

Diese ermittelte Gesamtleistung von 94 kW gilt für das Heben eines vollbesetzten Siemens Inspiro mit sechs Wagen unter den beschriebenen Randbedingungen. Eine Verdoppelung der Hubgeschwindigkeit würde auch eine Verdoppelung der notwendigen Leistung bedeuten. Analog dazu ergäbe eine Halbierung der Hubgeschwindigkeit auch eine Halbierung der benötigten Leistung.

Bei einer Fesselung des Wagenkastens gegenüber dem Fahrwerksrahmen während des Stationsaufenthalts kann davon ausgegangen werden, dass die Niveauänderung zwischen Wagenkasten und Bahnsteig sehr gering ausfällt, da nur die Änderung durch die Primärfederung wirksam ist. In diesem Fall könnte die Niveauänderung auch während der Fahrt, also sehr langsam erfolgen. Hier würde eine Betätigungszeit von 53 s bei Haltestellenabständen von 750 m auch genügen, wie in Tabelle 5.9 gezeigt wird, was die benötigte Leistung grundsätzlich deutlich reduzieren würde. Allerdings ist dann zu beachten, dass der Hubantrieb während der Fahrt arbeiten müsste und daher fahrdynamische Einflüsse, wie Stöße und Wannenfahrten, auf ihn einwirkten.

Zum Senken des Zuges muss grundsätzlich nur die Selbsthemmung des Antriebs überwunden werden. Falls ein Niveauregulierungskonzept ohne Selbsthemmung erarbeitet wird, wäre sogar ein kleiner Energiegewinn beim Senken denkbar, sofern man diese Energie nicht verloren gehen lassen möchte. Das Thema der Energierückgewinnung bei der Niveauregulierung wird hier nicht behandelt.

Die Entwicklungsdauer der all-electric Niveauregulierung wird mit etwa 2 Jahren abgeschätzt.

Entwicklungsdauer	2 Jahre
-------------------	---------

Tabelle 6.14 Entwicklungsdauer der all-electric Niveauregulierung

6.3 Berechnungsgrundlagen der Spaltüberbrückung

Die Leistungsdaten des Schiebetritts wurden anhand des Modells Pintsch Bamag Zustiegssystem „STS 550 classic/advance“, Sachnummer 008 100 0XX-726, [65] welcher schon in Abschnitt 5.7 beschrieben wurde, ermittelt.

Leistung pro Schiebetritt	70 W
Anzahl aktiver Schiebetritte bei Stationshalt	2
Anzahl Stationshalte pro Tag	500
Verfahrzeit	1,5 s
benötigte Energie pro Jahr	17,5 kWh

Tabelle 6.15 Leistung des Schiebetritts

Bei der Spaltüberbrückung ist kein Entwicklungsbedarf mehr notwendig, da diese Komponente serienreif ist.

6.4 Berechnungsgrundlagen des Dritte Schiene Stromabnehmers

Für die Leistungsberechnung des Dritte Schiene Stromabnehmers wurde das Modell mit elektrischer Verklüftung von Stemmann Technik herangezogen. Die Leistung des Antriebs wurde auf der InnoTrans 2012, Internationale Fachmesse für Verkehrstechnik, mit rund 250 W angegeben.

Leistung Antrieb	250 W
Anzahl Stromabnehmer pro 6-Teiler	16
Betätigungen pro Tag	2
An-/Ablegezeit	2 s
benötigte Energie pro Jahr	1,3 kWh

Tabelle 6.16 Leistung des Dritte Schiene Stromabnehmers

Der Stückpreis eines Dritte Schiene Stromabnehmers mit elektrischer Verklüftung wird etwa 50 % höher als der eines pneumatisch betriebenen geschätzt, da diese Komponente neu am Markt ist und mit einem eigenen Antrieb ausgestattet ist. Bei größerer Verbreitung am Markt wird sich längerfristig wahrscheinlich ein ähnlicher Preis einstellen.

Für den Dritte Schiene Stromabnehmer ist kein Entwicklungsbedarf mehr notwendig, da diese Komponente serienreif ist.

6.5 Berechnungsgrundlagen des Horns

Hier wurde das elektrische Horn KB-30 der Firma Kahlenberg Industries, Inc., WI, USA, mit einer Leistung von 100 W betrachtet, welches in Abschnitt 5.9 beschrieben wurde. [67]

Leistung	100 W
Betätigung pro Fahrstunde	1 s
benötigte Energie pro Jahr	0,6 kWh

Tabelle 6.17 Leistung des Horns

Beim Horn ist kein Entwicklungsbedarf mehr notwendig, da diese Komponente serienreif ist.

6.6 Berechnungsgrundlagen der Spurkranzschmierung

Fahrzeugseitige Spurkranzschmierungen werden nur auf Wunsch des Betreibers eingebaut. Die Berechnung erfolgte anhand der Spurkranzschmierung SKF EasyRail Airless mit elektromagnetischer Pumpe der Firma SKF Lubrication Systems Germany AG, Berlin. [74] Die Einsatzzeit wurde auf Basis der Metro Nürnberg ermittelt, bei der diese erhoben wurde.

Leistung Pumpe	125 W
Anzahl Pumpen	2
Schmierzyklen pro Tag	5
Sprühdauer pro Zyklus	5 s
benötigte Energie pro Jahr	13,5 kWh

Tabelle 6.18 Leistung der Spurkranzschmierung

Bei der Spurkranzschmierung ist kein Entwicklungsbedarf mehr notwendig, da diese Komponente serienreif ist.

6.7 Berechnungsgrundlagen des Pantografen

Der alternative Einbau von Pantografen wurde nicht in die Energieberechnung aufgenommen, da die meisten Metros mit Dritte Schiene Stromabnehmern ausgerüstet sind.

7 Fahrzeugvarianten

Es wurden drei grundsätzliche Konzepte betrachtet, welche dann weiters nach der mechanischen Bremse (elektrohydraulisch oder elektromechanisch) unterschieden wurden. Beim all-electric Konzept wurde zusätzlich noch differenziert, ob herkömmliche passive oder elektro- bzw. magnetorheologische (ER/MR) Dämpfer verwendet werden.

Konzept 1

- Fahrzeug mit 2 zentralen Kompressoren, Luftfedern und all-electric Komponenten
- 2 Fahrzeugvarianten (A, B)
 - elektrohydraulische Bremse (Variante A)
 - elektromechanische Bremse (Variante B)
- aufgerüstete Zeit pro Jahr: 6.000 h
- Fahrbetrieb pro Jahr: 4.500 h

Konzept 2

- Fahrzeug mit 12 dezentralen Kleinkompressoren, Luftfedern und all-electric Komponenten
- 2 Fahrzeugvarianten (C, D)
 - elektrohydraulische Bremse (Variante C)
 - elektromechanische Bremse (Variante D)
- aufgerüstete Zeit pro Jahr: 6.000 h
- Fahrbetrieb pro Jahr: 4.500 h

Konzept 3

- all-electric Fahrzeug
- 4 Fahrzeugvarianten (E, F, G, H)
 - elektrohydraulische Bremse, passive Dämpfer (E)
 - elektromechanische Bremse, passive Dämpfer (F)
 - elektrohydraulische Bremse, ER/MR Dämpfer (G)
 - elektromechanische Bremse, ER/MR Dämpfer (H)
- aufgerüstete Zeit pro Jahr: 4.500 h
- Fahrbetrieb pro Jahr: 4.500 h

In Tabelle 7.1 ist geordnet dargestellt, welche Fahrzeugvariante mit welchen Komponenten ausgestattet ist.

		Konzepte 1, 2				Konzept 3	
		elektrohydraulische Bremse	elektromechanische Bremse	zentrale Kompresso- ren	dezentrale Kompres- soren	passive Dämpfer	ER/MR Dämpfer
Luftfedern	Variante A	X		X		-	-
	Variante B		X	X		-	-
	Variante C	X			X	-	-
	Variante D		X		X	-	-
all-electric	Variante E	X		-	-	X	
	Variante F		X	-	-	X	
	Variante G	X		-	-		X
	Variante H		X	-	-		X

Tabelle 7.1 Fahrzeugvarianten

8 Bewertung der Lösungsmöglichkeiten

Alle acht Fahrzeugvarianten A-H nach Tabelle 7.1 stellen taugliche Lösungen dar, keine Lösung wird aufgrund Nichterfüllens der Anforderungen ausgeschieden. Wie bereits in den Abschnitten 3 und 6 ausgeführt wurde, konnte keine umfassende wirtschaftliche Bewertung vorgenommen werden, da keine LCC-Daten und keine Kosten der Serienprodukte der neuen Komponenten verfügbar sind. Da die in Abschnitt 9 ermittelte Ersparnis beim Energieverbrauch der kleineren Kompressoren und der all-electric Komponenten im Vergleich zur Traktionsenergie sehr gering ist, fließt der Energiebedarf daher nicht in die Beurteilung ein. Wie in Abbildung 9.1 zu erkennen ist, weisen die Fahrzeugvarianten C und D (dezentrale Kompressoren) den geringsten Energieverbrauch beim Konzept mit Luftfederung auf, und die Fahrzeugvarianten E und F (passive Dämpfer) beim all-electric Konzept. Die Bewertung der Varianten wird ausschließlich als technische Bewertung durchgeführt.

In Tabelle 8.1, Tabelle 8.2 und Tabelle 8.3 wurden die jeweils vier Fahrzeugvarianten mit Luftfederung sowie all-electric paarweise verglichen, um vom technischen Standpunkt die bestgeeignete Lösung zu eruieren. Beim paarweisen Vergleich (Dual-Vergleich) wird jede einzelne Fahrzeugvariante jeder anderen gegenüber gestellt und danach beurteilt, ob die Variante besser (1) oder schlechter (0) ist. Die Tabelle wird so gelesen: „Die Variante in der Spalte (obere Zeile) ist besser/schlechter als die Variante in der Zeile (linke Spalte).“ Anschließend werden die Punkte in jeder Spalte addiert und damit die Gesamtpunkte und somit die Rangfolge jeder Fahrzeugvariante ermittelt.

Danach wurden in Tabelle 8.5 die ausgewählten Fahrzeugvarianten mit dem aktuellen Siemens Inspiro paarweise verglichen, um zu eruieren, ob das neue Fahrzeugkonzept überhaupt eine Verbesserung der bestehenden Situation darstellt.

8.1 Bewertung der neuen Fahrzeugvarianten

Nach folgenden Gesichtspunkten wurden die Entscheidungen bei den neuen Fahrzeugvarianten getroffen:

elektrohydraulische Bremse besser als elektromechanische Bremse

Von der Leistungsfähigkeit werden beide Bremsen gleichwertig gesehen. Da die elektrohydraulische Bremse jedoch für die Vollbahn konzipiert ist und daher die Eignung für Metros außer Zweifel steht, wird sie als das bevorzugte System gesehen. Bei der elektromechanischen Bremse besteht wahrscheinlich noch höherer Entwicklungsbedarf, da die Zulassung und die sicherheitstechnischen Nachweise einer Bremse für Schienenfahrzeuge einen sehr großen Aufwand bedeuten.

zentrale und dezentrale Kompressoren

Da das Fahrzeugkonzept mit Luftfedern und all-electric Komponenten eine Übergangslösung am Weg zur all-electric Metro darstellt und im bestehenden Siemens Inspiro umgesetzt werden soll, erscheinen verkleinerte zentrale Kompressoren und eine Druckluftverrohrung durch den Zug, die nur noch die Luftfederbälge versorgt, als die einfachere Lösung. Das bestehende System muss dafür nur verkleinert und vereinfacht werden, und es sind für die Sekundärfederung und die Niveauregulierung keinerlei neue Systeme ins Fahrzeug zu integrieren. Der Nachteil des höheren Energieverbrauchs der zentralen Kompressoren wird in Relation zur Traktionsenergie als unerheblich gesehen.

Sollte jedoch ein neues Fahrzeug mit all-electric Komponenten entwickelt werden, welches z. B. auf Wunsch des Betreibers weiterhin eine Luftfederung aufweist, so wird den dezentralen Kompressoren der Vorzug gegeben, da diese einen niedrigeren Energieverbrauch sowie voraussichtlich geringeren Raumbedarf aufweisen und die flexiblere Lösung darstellen. Die entfallende Druckluftausrüstung im Unterflurbereich und die einfacheren Kupplungen ohne Luftleitungen werden eindeutig vorteilhaft bewertet. Da die technischen Randbedingungen dieser Studie, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, jedoch eine Umsetzung des Konzepts im Siemens Inspiro

Plattform-Fahrzeug vorsehen, wird bei der Bewertung eine zentrale Luftversorgung bevorzugt.

passive Dämpfer besser als elektrorheologische

Da passive Dämpfer ausgezeichnete Komfortwerte erreichen, keinerlei Energieversorgung benötigen und seit sehr langer Zeit im Eisenbahnbereich erfolgreich verwendet werden, werden diese als die bevorzugte Lösung gesehen. Elektro- oder magnetorheologische Dämpfer können zwar den Fahrkomfort noch ein wenig verbessern, allerdings ist das System deutlich aufwändiger, es benötigt eine eigene Ansteuerung und Energieversorgung, und es gibt damit bei Schienenfahrzeugen noch keinerlei Erfahrungswerte aus der Praxis.

		Variante			
		A	B	C	D
im Vergleich zu Variante	A	-	0	0	0
	B	1	-	1	0
	C	1	0	-	0
	D	1	1	1	-
	Summe	3	1	2	0
	Rang	1.	3.	2.	4.

Tabelle 8.1 Paarweiser Vergleich der Fahrzeugvarianten mit Luftfederung für Siemens Inspiro Plattform-Fahrzeug

		Variante			
		A	B	C	D
im Vergleich zu Variante	A	-	0	1	0
	B	1	-	1	1
	C	0	0	-	0
	D	1	0	1	-
	Summe	2	0	3	1
Rang	2.	4.	1.	3.	

Tabelle 8.2 Paarweiser Vergleich der Fahrzeugvarianten mit Luftfederung für Neuentwicklung

		Variante			
		E	F	G	H
im Vergleich zu Variante	E	-	0	0	0
	F	1	-	0	0
	G	1	1	-	0
	H	1	1	1	-
	Summe	3	2	1	0
Rang	1.	2.	3.	4.	

Tabelle 8.3 Paarweiser Vergleich der all-electric Fahrzeugvarianten

Daraus ergeben sich die folgenden optimalen Fahrzeugvarianten:

Für den Siemens Inspiro mit SF 1000 Fahrwerken wurde als bestgeeignetes Fahrzeugkonzept mit Luftfedern und all-electric Komponenten die Variante A mit elektrohydraulischer Bremse und verkleinerten zentralen Kompressoren mit Hauptluftbehälterleitung ausgewählt.

Für eine Neuentwicklung des Fahrzeugs mit Luftfedern und all-electric Komponenten wurde als bestgeeignetes Fahrzeugkonzept die Variante C mit elektrohydraulischer Bremse und dezentralen Kompressoren bei jedem Drehgestell ohne Redundanz durch Luftleitungen zwischen den Drehgestellen ausgewählt.

Für ein all-electric Fahrzeug wurde als bestgeeignetes Fahrzeugkonzept die Variante E mit elektrohydraulischer Bremse und passiven Dämpfern ausgewählt.

Siemens Inspiro mit SF 1000	Variante A: Elektrohydraulische Bremse, zentrale Kompressoren
Neufahrzeug mit Luftfederung	Variante C: Elektrohydraulische Bremse, dezentrale Kompressoren
All-electric Metro	Variante E: Elektrohydraulische Bremse, passive Dämpfer

Tabelle 8.4 Technisch bestgeeignete Fahrzeugvarianten

8.2 Vergleich der neuen Varianten mit dem aktuellen Siemens Inspiro

Die in Tabelle 8.4 ermittelten Fahrzeugvarianten werden mit dem mit allen Druckluftkomponenten ausgestatteten Siemens Inspiro nach folgenden Gesichtspunkten verglichen:

elektrische Reibungsbremse besser als pneumatische

Wegen der wesentlich kürzeren Reaktionszeit der elektrischen Reibungsbremse sowie wegen des deutlich effizienteren Gleitschutzes werden die Varianten mit elektrischer Reibungsbremse bevorzugt.

Wartung der Druckluftsysteme

Da Druckluftsysteme als sehr aufwändig in der Konstruktion, sehr wartungsintensiv und hauptverantwortlich für die Kürze der Wartungsintervalle gelten, werden Systeme

me mit weniger Druckluftausrüstung bevorzugt, siehe Abschnitte 10 und 11. Die all-electric Metro (Variante E) besitzt keine Druckluftausrüstung, die Variante C mit dezentralen Kompressoren hat am zweitwenigsten Druckluftsysteme, die Variante A mit zentralen Kompressoren besitzt die zweitmeiste Ausrüstung und der aktuelle Siemens Inspiro hat die umfangreichste Druckluftausrüstung.

Fahrzeugintelligenz

Weitere Systemvorteile aller neuen Varianten wären eine genauere Niveauregulierung und eine höhere Fahrzeugintelligenz, siehe Abschnitt 12. Je weniger Druckluftsysteme installiert werden, desto höher ist die Fahrzeugintelligenz, die erreicht werden kann. Der Energieverbrauch fließt nicht in die Bemessung ein, da er im Vergleich zur Traktionsenergie unerheblich ist, siehe Abschnitt 9.

		Variante				
		A	C	E	Inspiro alt	
im Vergleich zu Variante	A	-	1	1	0	
	C	0	-	1	0	
	E	0	0	-	0	
	Inspiro alt	1	1	1	-	
	Summe	1	2	3	0	
		Rang	3.	2.	1.	4.

Tabelle 8.5 Vergleich der ausgewählten Fahrzeugvarianten mit aktuellem Siemens Inspiro mit allen Druckluftkomponenten

Wie in Tabelle 8.5 zu sehen ist, steigt die technische Wertigkeit eines Fahrzeugs umgekehrt proportional zur installierten Druckluftausrüstung. Die all-electric Metro weist die höchste technische Wertigkeit auf.

8.3 Morphologischer Kasten der all-electric Metro

Mechanische Bremse	Siemens Elektrohydraulische Bremse	Vienna Engineering Elektromechanische Bremse	Messier-Bugatti-Dowty Flugzeugbremse	DLR Keilbremse	Continental Automotive Kugelrampenbremse	Continental Teves Bremse mit Verriegelung	Continental Automotive Bremse mit reversiblen Kraftspeicher	Knorr-Bremse Parkbremse
Sekundärfederung	Linearaktor	Elektrorheologischer Dämpfer mit Schraubenfeder	Magnetorheologischer Dämpfer mit Schraubenfeder	Hydropneumatische Federung	Hexapod	Geschützstabilisierung	Elektronische Luftfederung	Passiver Dämpfer mit Schraubenfeder
Niveauregulierung	integriert in Luftfederung	Linearaktor						
Spaltüberbrückung	Lösungen am Markt verfügbar							
Dritte Schiene Stromabnehmer	Stemmann-Technik							
Horn	Lösungen am Markt verfügbar							
Pantograf	Lösungen am Markt verfügbar							
Spurkranzschiemierung	Lösungen am Markt verfügbar							

9 Energieverbrauchsberechnung, Lebenszykluskosten

Anhand der Abschätzungen des Energieverbrauchs der einzelnen Komponenten in Abschnitt 6 kann der Vergleich zum Energieverbrauch des bestehenden Systems mit zwei zentralen Kompressoren gezogen werden. Verbrauchswerte von Komponenten, die schon im bestehenden Konzept nicht mit Druckluft versorgt werden, werden auch hier nicht in die Rechnung einbezogen. Im Zuge dieser Studie war es nicht möglich, Prognosen der erwarteten Lebenszykluskosten (LCC) zu erstellen, da noch keinerlei LCC-Daten für die neuen Komponenten vorhanden sind.

Gemäß Kompressor-Management und Leistungsmessungen wurde folgender Energieverbrauch der beiden zentralen Kompressoren des aktuellen Siemens Inspiro ermittelt:

Kompressorlaufzeit pro Jahr	1.440 h pro Kompressor
Anzahl der Kompressoren	2
Gesamtlaufzeit der Kompressoren pro Jahr	2.880 h
Nennleistung eines Kompressors	7,5 kW
reelle Leistungsaufnahme eines Kompressors	7,42 kW
Gesamt-Energieverbrauch pro Jahr	21.370 kWh

Tabelle 9.1 Jahresenergieverbrauch des bestehenden Druckluftsystems

Der Jahresenergieverbrauch von Spaltüberbrückung (17,5 kWh), Dritte Schiene Stromabnehmer (1,3 kWh) und Horn (0,6 kWh) wird addiert und gerundet als „Klein-komponenten“ mit 19 kWh angegeben.

Die für jedes Fahrzeugkonzept ermittelten, kumulierten Energieverbräuche stellen sich folgendermaßen dar:

elektrohydraulische Bremse	5.760 kWh
2 zentrale Kompressoren	8.667 kWh
Kleinkomponenten	19 kWh
Gesamt-Jahresenergieverbrauch	14.446 kWh

Tabelle 9.2 Jahresenergieverbrauch Variante A: 2 zentrale Kompressoren, elektrohydraulische Bremse

elektromechanische Bremse	5.760 kWh
2 zentrale Kompressoren	8.667 kWh
Kleinkomponenten	19 kWh
Gesamt-Jahresenergieverbrauch	14.446 kWh

Tabelle 9.3 Jahresenergieverbrauch Variante B: 2 zentrale Kompressoren, elektromechanische Bremse

elektrohydraulische Bremse	5.760 kWh
12 dezentrale Kompressoren	5.200 kWh
Kleinkomponenten	19 kWh
Gesamt-Jahresenergieverbrauch	10.979 kWh

Tabelle 9.4 Jahresenergieverbrauch Variante C: 12 dezentrale Kompressoren, elektrohydraulische Bremse

elektromechanische Bremse	5.760 kWh
12 dezentrale Kompressoren	5.200 kWh
Kleinkomponenten	19 kWh
Gesamt-Jahresenergieverbrauch	10.979 kWh

Tabelle 9.5 Jahresenergieverbrauch Variante D: 12 dezentrale Kompressoren, elektromechanische Bremse

elektrohydraulische Bremse	4.320 kWh
passive Dämpfer	0 kWh
all-electric Niveauregulierung	2.346 kWh
Kleinkomponenten	19 kWh
Gesamt-Jahresenergieverbrauch	6.685 kWh

Tabelle 9.6 Jahresenergieverbrauch Variante E: all-electric, elektrohydraulische Bremse, passive Dämpfer

elektromechanische Bremse	4.320 kWh
passive Dämpfer	0 kWh
all-electric Niveauregulierung	2.346 kWh
Kleinkomponenten	19 kWh
Gesamt-Jahresenergieverbrauch	6.685 kWh

Tabelle 9.7 Jahresenergieverbrauch Variante F: all-electric, elektromechanische Bremse, passive Dämpfer

elektrohydraulische Bremse	4.320 kWh
elektro-/magnetorheologische Dämpfer	540 kWh
all-electric Niveauregulierung	2.346 kWh
Kleinkomponenten	19 kWh
Gesamt-Jahresenergieverbrauch	7.225 kWh

Tabelle 9.8 Jahresenergieverbrauch Variante G: all-electric, elektrohydraulische Bremse, elektro-/magnetorheologische Dämpfer

elektromechanische Bremse	4.320 kWh
elektro-/magnetorheologische Dämpfer	540 kWh
all-electric Niveauregulierung	2.346 kWh
Kleinkomponenten	19 kWh
Gesamt-Jahresenergieverbrauch	7.225 kWh

Tabelle 9.9 Jahresenergieverbrauch Variante H: all-electric, elektromechanische Bremse, elektro-/magnetorheologische Dämpfer

Der Vergleich der acht Fahrzeugvarianten mit dem bisherigen Verbrauch der zwei zentralen Kompressoren von 21.370 kWh wird in Tabelle 9.10 dargestellt.

Variante	Verbrauch neu	Verbrauch alt	Differenz abs.	Differenz rel.
A	14.446 kWh	21.370 kWh	6.942 kWh	-32 %
B	14.446 kWh		6.924 kWh	-32 %
C	10.979 kWh		10.391 kWh	-49 %
D	10.979 kWh		10.391 kWh	-49 %
E	6.685 kWh		14.685 kWh	-69 %
F	6.685 kWh		14.685 kWh	-69 %
G	7.225 kWh		14.145 kWh	-66 %
H	7.225 kWh		14.145 kWh	-66 %

Tabelle 9.10 Verbrauchsvergleich Fahrzeugvarianten

In Abbildung 9.1 werden die in Abschnitt 8.1 ausgewählten Fahrzeugvarianten mit dem bisherigen Energieverbrauch verglichen.

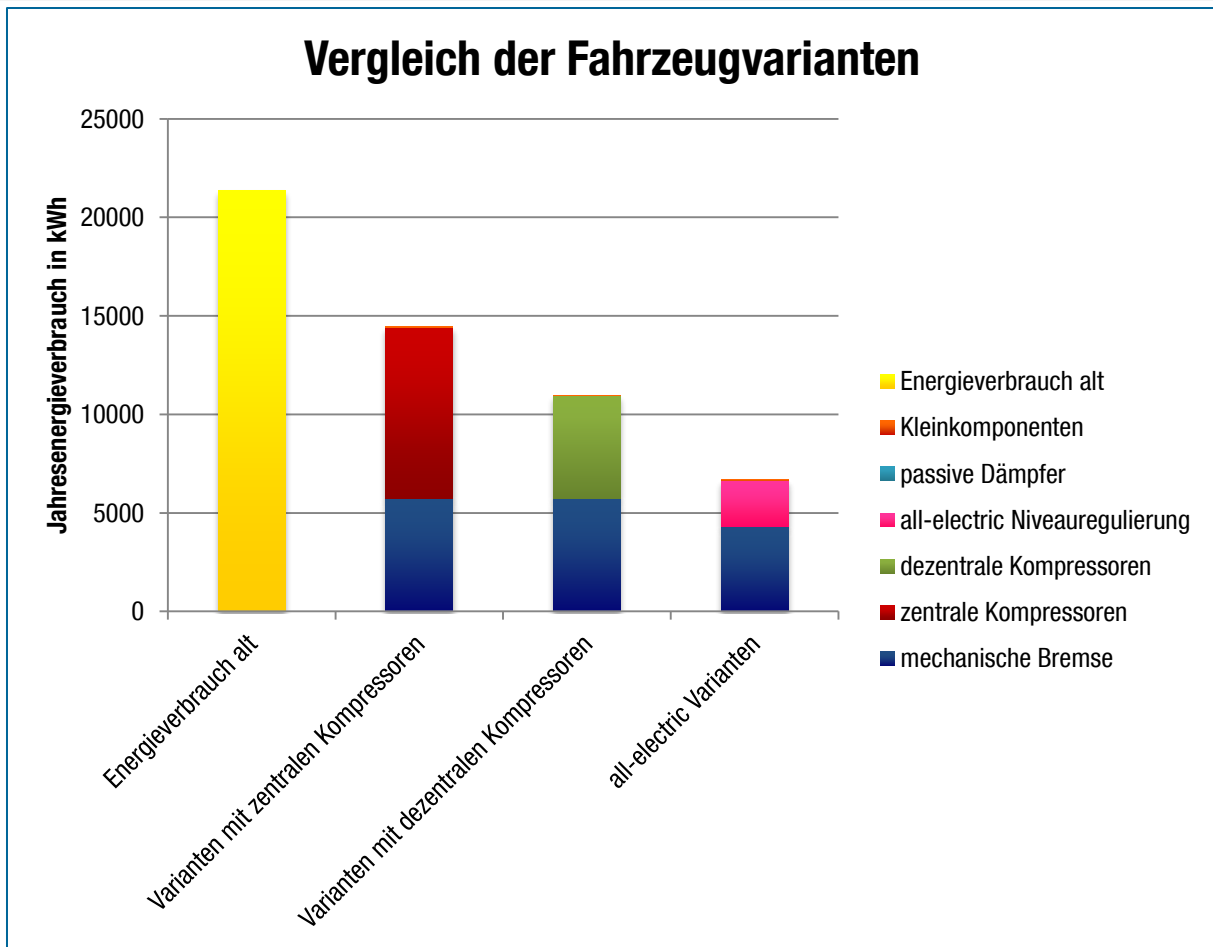


Abbildung 9.1 Vergleich der Fahrzeugvarianten

Die Traktionsenergie wird von Experten folgendermaßen abgeschätzt:

Traktionsenergie pro Tag im Jahresmittel	6.000 kWh
Rückspeisung	50 %
Energieverbrauch pro Tag im Jahresmittel	3.000 kWh
Jahresenergieverbrauch Traktion (300 Betriebstage)	900.000 kWh

Tabelle 9.11 Abschätzung der Traktionsenergie

Die Energieersparnis durch die all-electric Komponenten befindet sich im Vergleich zur jährlichen Traktionsenergie eines Metrofahrzeugs im Bereich von 0,8 – 1,6 %, ist also sehr gering. Die Traktionsenergie beträgt etwa 6.000 kWh pro Tag, wovon rund 50 % rückgespeist werden. Erfahrungswerte bei Metro-Betreibern haben gezeigt,

dass sogar zwischen der Hälfte und zwei Drittel der Traktionsenergie wieder rückge-
speist werden.

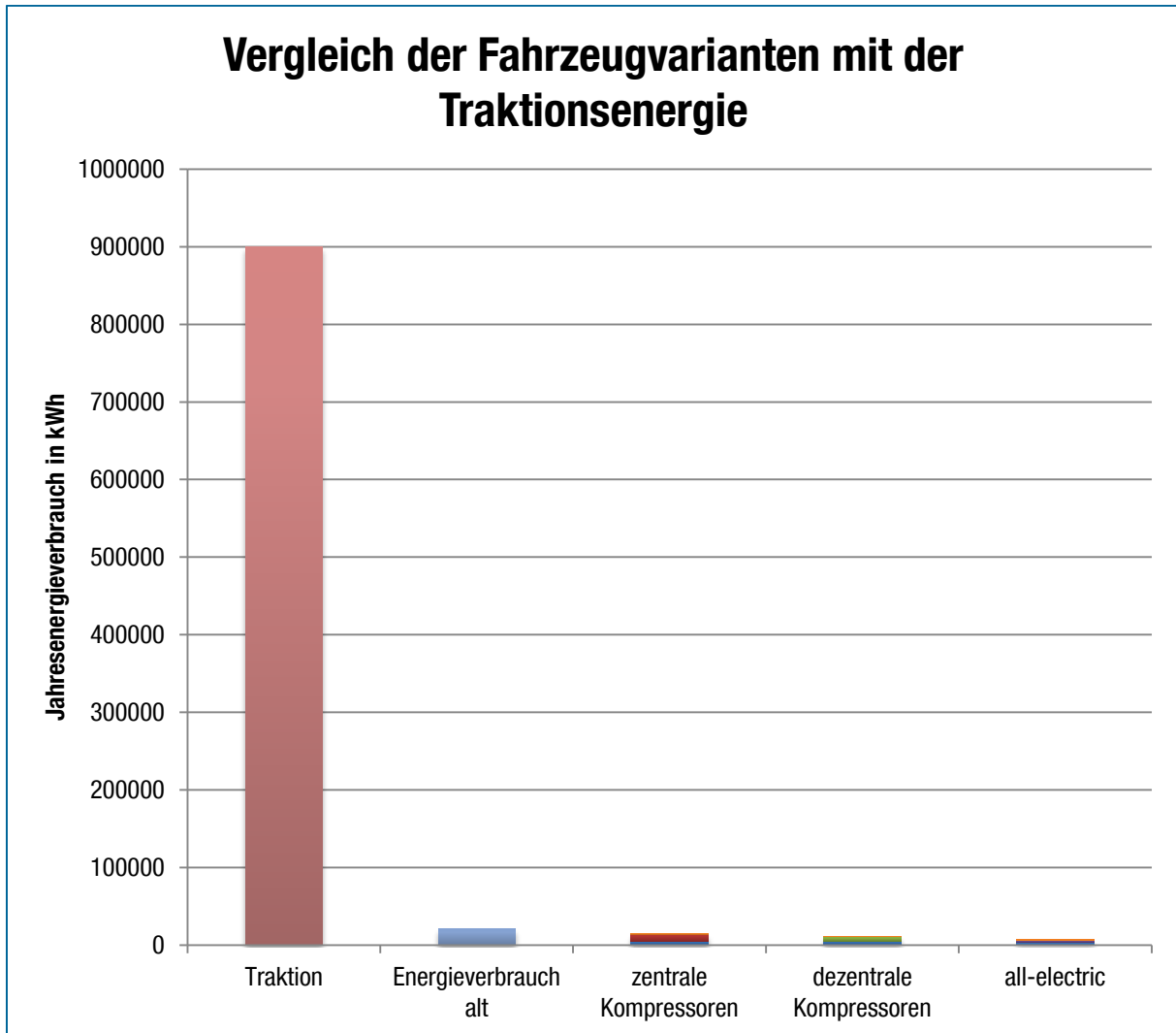


Abbildung 9.2 Vergleich der Fahrzeugvarianten mit der Traktionsenergie

Umgelegt auf einen täglichen Traktionsenergieverbrauch von 3.000 kWh könnte man je nach gewähltem Fahrzeugkonzept zwischen 2,3 und 4,9 Tagen Traktionsenergie pro Jahr bzw. zwischen 69 und 147 Tagen in 30 Jahren (typische Fahrzeuglebensdauer) einsparen.

10 Auswirkungen des all-electric Konzepts auf die Montage

Durch den teilweisen oder vollständigen Wegfall der Druckluftelemente wird im Unterflurbereich erheblicher Bauraum frei. Schon bei den Fahrzeugvarianten mit Luftfederung ergeben sich ein deutlich verringerter Aufwand bei der Verrohrung und ein Bauraumgewinn unterflur.

Statt der entfallenden Verrohrung müssen zusätzliche Verkabelungen für die aufgelisteten Komponenten berücksichtigt werden. Verkabelungen im Drehgestell werden ebenfalls verrohrt ausgeführt, um sie vor äußeren Einflüssen wie Eis, Steinschlag etc. zu schützen. Nur bei der Variante mit Schraubenfedern und passiven Dämpfern entfällt der Verrohrungsaufwand für die Sekundärfederung ersatzlos. Jedenfalls ist der Montageaufwand der Druckluftverrohrung (z. B. Biegen, Dichtverschraubungen) mit Sicherheit höher als der Aufwand für die zusätzlichen elektrischen Verbindungen. Die Durchlaufzeit in der Montage wird sich in jedem Fall verkürzen.

10.1 Verrohrung mit zentralen Kompressoren

Bei den Fahrzeugvarianten, bei denen die Luftfedern im Fahrzeug belassen und diese mit zentralen Kompressoren versorgt werden, entfallen die folgenden Aufwände für die Druckluftverrohrung in Konstruktion und Montage (Material und Arbeit):

- mechanische Bremse
- Schiebetritt
- Dritte Schiene Stromabnehmer bzw. Pantograf
- Horn
- Spurkranzschmierung (falls vorhanden)

Die Verrohrung folgender Komponenten bleibt bestehen:

- zentrale Kompressoren
- Hauptluftbehälterleitung
- Sekundärfederung
- Druckluftübergänge bei den Wagenkupplungen

10.2 Verrohrung mit dezentralen Kompressoren

Bei den Fahrzeugvarianten, bei denen die Luftfedern im Fahrzeug belassen und diese mit dezentralen Kompressoren versorgt werden, entfallen die folgenden Aufwände für die Druckluftverrohrung in Konstruktion und Montage (Material und Arbeit):

- zentrale Kompressoren
- Hauptluftbehälterleitung
- mechanische Bremse
- Schiebetritt
- Dritte Schiene Stromabnehmer bzw. Pantograf
- Horn
- Spurkranzschmierung (falls vorhanden)
- Druckluftübergänge bei den Wagenkupplungen

Die Verrohrung folgender Komponenten bleibt bestehen bzw. kommt hinzu:

- dezentrale Kompressoren
- Sekundärfederung
- Verbindung der beiden Kompressoren eines Wagens (nur wenn eine Redundanz erwünscht ist)

10.3 Verrohrung des all-electric Fahrzeugs

Bei den all-electric Fahrzeugvarianten entfallen sämtliche Druckluftverrohrungen im Fahrzeug. Konstruktions-, Montage- und Materialaufwand für die Druckluftverrohrung dieser Komponenten entfallen:

- zentrale Kompressoren
- Hauptluftbehälterleitung
- mechanische Bremse
- Sekundärfederung
- Schiebetritt
- Dritte Schiene Stromabnehmer bzw. Pantograf
- Horn
- Spurkranzschmierung (falls vorhanden)
- Druckluftübergänge bei den Wagenkupplungen

11 Auswirkungen auf die Wartung

Die Druckluftsysteme eines Schienenfahrzeugs gelten als sehr wartungsintensiv. Sie sind auch für die derzeitige Länge der Wartungsintervalle verantwortlich, welche sich an der Komponente mit dem kürzesten Intervall orientieren. Diese einhellige Meinung herrscht sowohl unter Experten, als auch in Studien vor. [2] Durch den Wegfall dieser Systeme wird erwartet, dass sich die Wartungsintervalle verlängern und der Wartungsaufwand verringert; es können allerdings Zeit- und Distanzgewinn zum derzeitigen Zeitpunkt nicht angegeben werden. Da auch bei den Fahrzeugkonzepten mit Luftfederung und all-electric Komponenten eine wesentlich einfachere Luftversorgung verbaut ist, wird auch hier erwartet, dass sich der Wartungsaufwand deutlich verringert. Bei der Variante mit zentralen Kompressoren werden sich die Wartungsintervalle zwar noch nicht verlängern, aber durch den Wegfall der meisten Druckluftkomponenten kann auf jeden Fall von einem geringeren Wartungsaufwand ausgegangen werden. Bei der Fahrzeugvariante mit dezentralen Kompressoren kann keine Auswirkung auf die Intervalle prognostiziert werden, allerdings ist auch hier eine Verringerung des Aufwands zu erwarten. Zusätzlich wird die höhere Fahrzeugintelligenz durch die all-electric Komponenten eine zustandsorientierte Wartung erleichtern.

12 Zusätzliche Funktionen durch das all-electric Konzept

Eine 4-Punkt-Steuerung mit elektronischen Luftfederventilen ermöglicht in Kombination mit einer gesteigerten Fahrzeugintelligenz die folgenden Verbesserungen.

Kompensation der Primäreinfederung und Raddurchmesseranpassung

Wenn der Fahrzeugsteuerung die wirkliche Wagenkastenhöhe bekannt ist, kann das Niveau des Wagenkastens tatsächlich auf gewünschte, absolute Werte eingeregelt werden. Dabei werden sowohl die Einfederung der Primärfederstufe als auch die Abnutzung der Raddurchmesser berücksichtigt, was bei bisherigen Systemen nicht der Fall ist, da diese nur auf die Niveauänderung in Bezug zum Drehgestellrahmen reagieren. Dies kann bei jedem Rad erfolgen, sodass auch der Radverschleiß in Echtzeit erhoben werden könnte. Das Wissen um den Abnutzungsgrad der Räder und dessen zeitlicher Verlauf kann in die Planung der Wartungsaktivitäten einbezogen werden, was auch Auswirkungen auf das Konzept der Beilegescheiben zur Kompensation der Verringerung der Raddurchmesser durch Verschleiß haben kann. Gesteigerte Genauigkeitsanforderungen an die Niveauregulierung, welche in Zukunft erwartet werden, um mobilitätseingeschränkten Personen das selbstständige Ein- und Aussteigen zu erleichtern, können so ebenfalls besser erfüllt werden.

Verbesserung des Wankverhaltens

Durch eine höhere Intelligenz der Regelung kann das Wankverhalten des Wagenkastens während der Fahrt verbessert und somit der Fahrkomfort erhöht werden.

Effizienzsteigerung der Druckluftversorgung

Bei Fahrzeugen mit Luftfedern und 4-Punkt-Steuerung kann die Druckluft voraussichtlich effizienter eingesetzt werden, da jeder Federbalg einzeln angesteuert wird. Wenn zusätzlich die Luftversorgung der Luftfedern während der Fahrt deaktiviert wird, reagiert die Steuerung nicht mehr auf Kuppen- und Wannenfahrten, bei denen unnötig Luft und Energie verbraucht werden.

Bestimmung der Beladung

Sofern es gewünscht ist, kann durch Ermitteln des Luftfederdrucks die Beladung (Anzahl der Passagiere) und somit das aktuelle Fahrzeuggewicht mit einer wesentlich verbesserten Genauigkeit bestimmt werden als es aktuell der Fall ist.

13 Mehrwerte durch das all-electric Konzept

13.1 Mehrwert für den Hersteller

Für den Hersteller werden erhebliche positive Auswirkungen auf Fertigung und Montage erwartet, wie unter anderem in Abschnitt 10 erläutert wird.

Schon beim Fahrzeugkonzept mit Luftfedern verringert sich die bisherige Druckluftausrüstung deutlich, wodurch sich in der Fertigung Einsparungen ergeben. Allerdings müssen diese durch den erhöhten Aufwand bei den elektrischen Systemen wettgemacht werden. Auf jeden Fall sind ein deutlich geringerer Bauraumbedarf unterflur sowie eine kürzere Durchlaufzeit in der Montage zu erwarten, da der Montageaufwand für die Druckluftausrüstung aufwändiger gesehen wird als der Aufwand für die elektrische Ausrüstung.

Beim all-electric Fahrzeugkonzept entfällt die Druckluftversorgung völlig. Dadurch entfallen auch jegliche Planungs-, Konstruktions- und Fertigungsaufwände die Druckluft betreffend. Der zusätzliche Planungs-, Konstruktions- und Fertigungsbedarf bei den elektrischen Systemen ist nämlich mit Sicherheit geringer als der gesamte bisherige Aufwand für die Druckluftsysteme. Durch den Wegfall der Druckluftsysteme sind in der Montage kürzere Durchlaufzeiten zu erwarten, und auch im Bauraum unterflur wird durch den Entfall der Druckluftsysteme und Verrohrungen einiges an Platz freigegeben.

Durch die höhere Fahrzeugintelligenz ist auch ein höherer Wissensstand um die Fahrzeuge möglich, was in deren Weiterentwicklung entscheidend einfließen kann.

13.2 Mehrwert für den Kunden

Für den Kunden werden positive Auswirkungen auf die Wartung der Fahrzeuge erwartet, da durch den höheren Intelligenzgrad der Fahrzeuge eine zustandsorientierte Wartung ermöglicht wird oder zumindest die Wartungsintervalle entschieden verlän-

gert werden können. Bei einer Verringerung oder einem Entfall der Druckluftausrüstung wird auf jeden Fall eine Reduktion der Wartungskosten erwartet. [2]

Die all-electric Komponenten weisen eine höhere Energieeffizienz auf, wie in Abschnitt 9 gezeigt wurde. Beim all-electric Konzept wird sich die Aufrüstzeit der Fahrzeuge deutlich verringern, wodurch Auswirkungen auf das Abstellen der Fahrzeuge erwartet werden. Daraus kann wiederum eine längere Lebensdauer der Bordsysteme resultieren, weil Metro-Fahrzeuge derzeit etwa ein Viertel der Betriebszeit voll aufgerüstet abgestellt werden. Diese kumulierte Zeit von 45.000 Stunden (das entspricht etwa 5,1 Jahren) in 30 Jahren, siehe Tabelle 6.1, kann voraussichtlich weitestgehend entfallen.

Verkürzte Notbremswege durch deutlich schnellere Reaktionszeiten der elektrischen Reibungsbremsen und ein wesentlich effizienterer Gleitschutz, der Räder und Schienen schont, sowie eine exaktere Niveauregulierung stellen weitere Mehrwerte für den Kunden dar.

13.3 Mögliche Alleinstellungsmerkmale

Folgende Eigenschaften werden als Alleinstellungsmerkmale gesehen, die ein all-electric Konzept derzeit bieten kann:

- verkürzte Notbremswege durch deutlich kürzere Reaktionszeiten aufgrund der elektrischen Ansteuerung sowie ein effizienterer Gleitschutz der elektrischen Reibungsbremse
- genauere Niveauregulierung durch eine präzisere Steuerung und durch Berücksichtigung von Primäreinfederung und Radverschleiß
- wesentlich längere Wartungsintervalle durch Entfall der Druckluftausrüstung
- wesentlich kürzere Aufrüstzeiten durch Entfall der Druckluftausrüstung

14 Roadmap, Zeitabschätzungen

Die Roadmap kann aufgrund teilweise sehr vager Angaben nur im Ansatz erstellt werden. Es gibt allerdings für den zeitlichen Horizont bei allen Komponenten grobe Abschätzungen, sodass eine ungefähre Prognose erstellt werden kann.

elektrohydraulische Bremse	3 Jahre
elektromechanische Bremse	5 Jahre
dezentrale Kompressoren	3 Jahre
all-electric Dämpfer (passiv bzw. elektrorheologisch)	2 Jahre
all-electric Niveauregulierung	2 Jahre
Spaltüberbrückung	kein Entwicklungsbedarf
Dritte Schiene Stromabnehmer	kein Entwicklungsbedarf
Horn	kein Entwicklungsbedarf
Spurkranzschmierung	kein Entwicklungsbedarf
Pantograf	kein Entwicklungsbedarf

Tabelle 14.1 Geschätzte Entwicklungsdauer der Komponenten

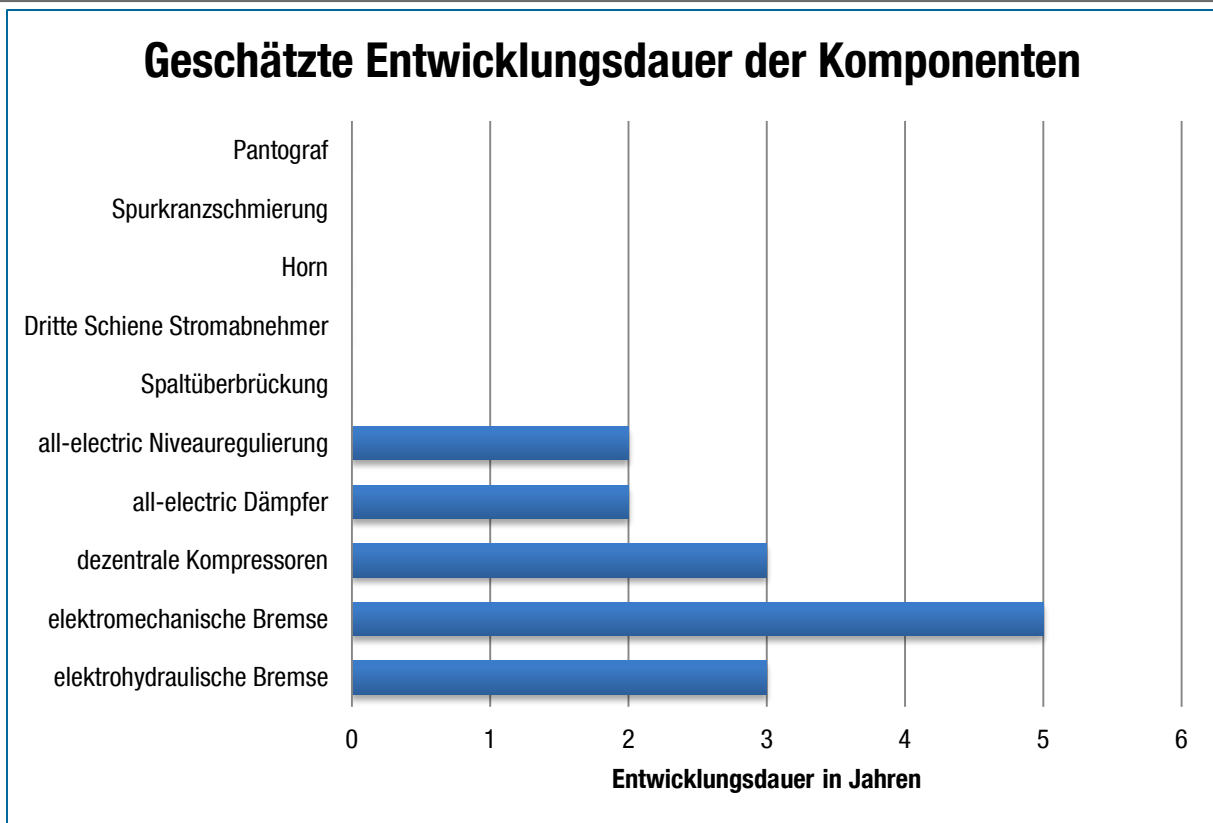


Abbildung 14.1 Geschätzte Entwicklungsdauer der Komponenten

Die Entwicklung eines Prototyps kann jederzeit begonnen, in 3 Jahren kann voraussichtlich die Fertigung eines Prototyps gestartet werden.

15 Marketingthemen

Schienenfahrzeugbetreiber legen aus unterschiedlichen, nachvollziehbaren Gründen sehr viel Wert auf eine hohe Zuverlässigkeit der Fahrzeuge und deren Komponenten. Oft wird in Ausschreibungen verlangt, dass nur bewährte Systeme, welche schon bei einer bestimmten Mindestanzahl anderer Betreiber im Einsatz sind, installiert werden dürfen. Mitunter werden in Ausschreibungen ausdrücklich Druckluftsysteme verlangt. Die all-electric Metro betritt Neuland durch den Einsatz von Systemen, die bisher noch keine Anwendung im Bereich der Schienenfahrzeuge in dieser Form gefunden haben. Um die all-electric Metro wortwörtlich auf Schiene zu bringen, ist ein erfolgreicher Prototyp notwendig, der sich bei einem innovationsfreudigen Betreiber im Betrieb bewähren und so allfällige Vorbehalte ausräumen kann. Die Vorteile der all-electric Metro liegen in der Wartung, im intelligenteren Fahrzeugmanagement, im größeren Wissen um den Zustand der Fahrzeuge, im niedrigeren Energieverbrauch während des Betriebs und während der abgestellten Zeit, da erwartet wird, dass der überwiegende Teil der aufgerüsteten Zeit außerhalb des Fahrbetriebs wegfällt. Ob der Anschaffungspreis geringer als bei einem herkömmlichen Fahrzeug ist, kann nicht prognostiziert werden, aus heutiger Sicht ist es nicht zu erwarten. Der Vorteil der all-electric Metro liegt in den laufenden Kosten während des Betriebs und in der Fahrzeugintelligenz.

Aus politischen Gründen wurde in der Vergangenheit bei Ausschreibungen meist sehr großes Augenmerk auf die Anschaffungskosten gelegt. Dies liegt darin begründet, dass unter anderem Anschaffung und Erhaltung eines Fuhrparks aus unterschiedlichen Budgettöpfen beglichen wurden. Teilweise wurden bei Ausschreibungen nur die präventiven Instandhaltungskosten in Betracht gezogen, aber keine korrektiven. Auch in den Medien wurden Neuanschaffungen in der Vergangenheit oft nur im Hinblick auf die Anschaffungskosten, aber selten auf die laufenden Betriebskosten diskutiert. In Zukunft wird jedoch erwartet, dass bei Ausschreibungen von allen Beteiligten ein größeres Augenmerk auf die Energieeffizienz und auf alle laufenden Kosten und die Lebenszykluskosten gelegt wird, was einem all-electric Kon-

zept zugutekommt. Der Vorteil der verkürzten Notbremswege, wie in den Abschnitten 5.1 und 13.2 erläutert, stellt auch für den Fahrgast einen Sicherheitsgewinn dar. Hier sind das Produktmanagement und die Marketingabteilung des Herstellers gefordert, diesem Fahrzeugkonzept den Weg zu bereiten.

16 Zusammenfassung, Ergebnis und Ausblick

Das ursprüngliche Ziel des dreijährigen Forschungs- und Entwicklungsprojekts „All-electric Metro“ war die Erstellung einer Studie zu einem neuen Fahrzeugkonzept auf Basis des Siemens Inspiro Plattform-Fahrzeugs mit Syntegra Fahrwerken, welches gänzlich auf Druckluft als Energiemedium verzichtet. Dies sollte nach einer Einarbeitungsphase ins Fahrzeug das Finden von Lösungen für die betroffenen Komponenten, das Erheben der zu erwartenden Energieeinsparungen im Lebenszyklus, die Erstellung eines neuen Fahrzeugkonzepts, die Roadmap zur Realisierung, sowie eine Lebenszyklusanalyse dieses neuen Fahrzeugkonzepts umfassen. Die betroffenen Komponenten sind:

- mechanische Bremse
- Sekundärfederung
- Niveauregulierung
- Spaltüberbrückung
- Dritte Schiene Stromabnehmer (falls vorhanden)
- Horn
- Pantograf (falls vorhanden)
- Spurkranzschmierung (falls vorhanden)

Mit Fortdauer des Projekts änderten sich jedoch die Rahmenbedingungen. Der Fokus wurde auf SF 1000 statt auf Syntegra Fahrwerke gelegt, da diese im Gegensatz zum Syntegra schon vielfach verbaut wurden. In weiterer Folge wurde entschieden, zunächst eine Zwischenstufe zu einer all-electric Metro zu konzipieren, da der Entfall und der Ersatz der Luftfedern in einem SF 1000 Fahrwerk ohne tiefgreifende Konstruktionsänderungen nicht möglich sind. Um das entwicklungstechnische Risiko zu verringern, wurde beschlossen, vor einem notwendigen, teuren Umbau bzw. einer Neukonstruktion des Drehgestells, eine Variante zu planen, bei der die meisten all-electric Komponenten umgesetzt werden können, diese aber trotzdem mit den SF 1000 Fahrwerken realisiert werden kann.

In der ersten Entwicklungsstufe werden die Luftfederbälge, welche für Sekundärfederung und Niveauregulierung zuständig sind, im Fahrzeug belassen, und es wird nur die Druckluftversorgung der Luftfedern adaptiert. Alle anderen betroffenen Komponenten werden durch all-electric Bauteile ersetzt. Wenn sich in weiterer Folge dieses Fahrzeug vor allem in Hinblick auf die all-electric Komponenten bewährt, kann die vollständige Umsetzung der all-electric Metro gestartet werden. Eine Um- bzw. Neukonstruktion der Drehgestelle ist die Folge.

Es wurden für Spaltüberbrückung, Dritte Schiene Stromabnehmer, Pantograf und Spurkranzschmierung Lösungen gefunden, die am Markt serienreif verfügbar sind. Für das Horn wurde eine geeignete, verfügbare Lösung ermittelt, die noch angepasst werden muss, was jedoch mit geringem Aufwand möglich ist. Die Lösungen für die mechanische Bremse, die Sekundärfederung und die Niveauregulierung sind noch in der Entwicklungsphase. Für diese Phase ist noch ein finanzieller und zeitlicher Aufwand nötig, um serienreife Lösungen verfügbar zu machen. Mehrere Varianten wurden für diese drei Komponenten vorgeschlagen und die vom derzeitigen Standpunkt jeweils bestgeeigneten ausgewählt.

Weitere Änderungen des ursprünglich geplanten Projektinhalts waren die Tatsachen, dass eine Roadmap nur im Ansatz erstellt, und dass keine Lebenszyklusanalyse durchgeführt werden konnten. Der Grund liegt darin, dass die noch notwendigen Entwicklungszeiten nur abgeschätzt werden konnten, und dass von keiner einzigen neuen Komponente Daten über deren Lebenszykluskosten vorhanden sind.

Es konnten gute Abschätzungen über die zu erwartenden Energieeinsparungen durch das all-electric Konzept getroffen werden. Allerdings liegen diese in Relation zur Traktionsenergie im Bereich von 0,8 – 1,6 %, sind daher verschwindend gering und nicht von wirtschaftlicher Relevanz.

Acht Fahrzeugkonzepte wurden entwickelt und drei davon als besonders geeignet ausgewählt. Den ausgewählten Konzepten gemein sind eine elektrohydraulische

Bremse, welche von Siemens entwickelt wird und voraussichtlich in etwa drei Jahren serienreif ist, eine elektrisch betriebene Spaltüberbrückung, ein elektrisch betriebener Dritte Schiene Stromabnehmer (oder Pantograf), ein elektrisch betriebenes Horn und, falls gewünscht, eine elektrisch betriebene Spurkranzschmierung. Die drei Fahrzeugkonzepte unterscheiden sich durch die Ausführung von Sekundärfederung und Niveauregulierung.

Das erste Konzept stellt eine Zwischenstufe zur all-electric Metro bei einem Siemens Inspiro mit SF 1000 Fahrwerken und daher mit Luftfedern dar. Bei der bestgeeigneten Variante werden die Luftfedern wie bisher durch zwei zentrale Kompressoren in den Kopfwägen versorgt. Da die beiden Kompressoren nur noch die Luftfedern befüllen müssen, können diese verkleinert und die Druckluftverrohrung im Zug verringert werden.

Das zweite Konzept stellt ebenfalls eine Zwischenstufe zur all-electric Metro dar, allerdings bei einem neu zu entwickelnden Fahrzeug oder wenn der Kunde bei einer Neuentwicklung auf einer Luftfederung besteht. In diesem Fall werden die Luftfedern bei jedem einzelnen Drehgestell von kleinen dezentralen Kompressoreinheiten versorgt. Diese Kompressoren sind nicht miteinander verbunden und die Druckluftverrohrung im Fahrzeug reduziert sich auf ein Minimum; es sind auch keine Druckluftübergänge bei den Wagenkupplungen mehr notwendig.

Das dritte Konzept stellt die all-electric Metro dar. Dabei wird die Sekundärfederung durch Schraubenfedern mit passiven Lineardämpfern ausgeführt. Die Niveauregulierung wird in Form eines Linearantriebs realisiert, der bei der Konstruktion des Drehgestells entworfen werden muss.

Siemens Inspiro mit SF 1000	elektrohydraulische Bremse Luftfederung mit zentralen Kompressoren
Neufahrzeug mit Luftfederung	elektrohydraulische Bremse Luftfederung mit dezentralen Kompressoren
All-electric Metro	elektrohydraulische Bremse Schraubenfedern und passive Dämpfer

Tabelle 16.1 Zusammenfassung der Fahrzeugkonzepte

Da die Druckluftsysteme als äußerst wartungsintensive Komponenten an einem Fahrzeug gelten, werden aufgrund der Verminderung bzw. des Wegfalls dieser Systeme eine Verringerung des Wartungsaufwands sowie längere Wartungsintervalle erwartet. Der höhere Intelligenzgrad der all-electric Systeme kann auch die Umstellung auf eine zustandsorientierte Wartung ermöglichen.

Die Umstellung auf elektrische Reibungsbremsen ermöglicht kürzere Notbremswege, da die Ansprechzeit durch die elektrische Ansteuerung stark verkürzt wird und der Gleitschutz wesentlich effizienter arbeiten kann. Der effizientere Gleitschutz trägt zusätzlich zur Schonung von Rädern und Schienen bei.

Die Realisierung einer 4-Punkt-Steuerung mit elektronischen Luftfederventilen ermöglicht eine Kompensation der Primäreinfederung, eine größere Genauigkeit der Niveauregulierung, eine Verbesserung des Wankverhaltens sowie eine Anpassung an den Radverschleiß.

Durch die Verringerung bzw. den Entfall der Druckluftausrüstung werden kürzere Durchlaufzeiten in der Konstruktion, in der Montage und ein geringerer Platzbedarf unterflur erwartet.

Durch die höhere Fahrzeugintelligenz kann auch der Wissensstand um den Zustand der Fahrzeuge, deren Systeme und Komponenten sowie deren Betrieb ansteigen, was sowohl dem Hersteller als auch dem Betreiber zugute kommt.

Die all-electric Metro stellt das technisch höchstwertige Fahrzeugkonzept unter den in dieser Studie betrachteten Gesichtspunkten dar.

Vom derzeitigen Entwicklungsstand aus erscheint es möglich, sofort mit der Entwicklung eines Prototypen zu beginnen und voraussichtlich in 3 Jahren mit dessen Fertigung.

17 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Siemens Inspiro, Designbild [3]	11
Abbildung 1.2 Gekapselte Luftfeder [2]	13
Abbildung 2.1 Drehgestell Syntegra [4]	14
Abbildung 2.2 Drehgestell SF 1000 [5]	15
Abbildung 2.3 Siemens Inspiro, Ausführung Warschau [6]	16
Abbildung 2.4 Siemens Inspiro Aluminiumwagenkasten [7]	16
Abbildung 4.1 Betroffene Fahrzeugkomponenten [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18]	22
Abbildung 4.2 Klotzbremse (schwarz) [19]	24
Abbildung 4.3 Velaro Drehgestell mit Radbremsscheiben [20]	24
Abbildung 4.4 Drehgestell eines SBB Eurocity-Waggons mit Wellenbremsscheiben [21]	25
Abbildung 4.5 Magnetschienenbremse (rot) [22]	26
Abbildung 4.6 Wirbelstrombremse (rot umrandet) eines ICE S [23]	27
Abbildung 4.7 Schema eines Drehgestells [24]	30
Abbildung 4.8 Vossloh Drehgestell mit Schraubenfedern als Primärfederung (blau) und Sekundärfederung (orange) [25]	31
Abbildung 4.9 Sekundärfederung mit Luftfederbalg und Notfeder (rot, innen) [15]	31
Abbildung 4.10 Spaltüberbrückung [17]	33
Abbildung 4.11 Dritte Schiene Stromabnehmer (rot) [16]	34
Abbildung 4.12 Pantograf [26]	35
Abbildung 4.13 Fahrzeugseitige Spurkranzschmierung mit Schmierstift (rot) [27]	36
Abbildung 4.14 Fahrzeugseitige Spurkranzschmierung mit Sprühdüse [28]	36
Abbildung 4.15 Streckenseitige Spurkranzschmierung [29]	37
Abbildung 4.16 Siemens Avanto/S70 [30]	38
Abbildung 4.17 Siemens ULF [31]	38
Abbildung 5.1 Vienna Engineering elektromechanische Bremse [33]	41
Abbildung 5.2 Messier Bugatti Dowty Flugzeugbremse [35]	43
Abbildung 5.3 Funktionsprinzip der Messier Bugatti Dowty Flugzeugbremse [35]	43
Abbildung 5.4 DLR Keilbremse [37]	44

Abbildung 5.5 Continental Automotive Kugelrampenbremse [38]	-----45
Abbildung 5.6 Continental Teves Bremse mit Verriegelung [40]	-----46
Abbildung 5.7 Continental Automotive Bremse mit reversiblen Kraftspeicher [42]	-47
Abbildung 5.8 Knorr-Bremse Parkbremse mit Exzenter [43]	-----48
Abbildung 5.9 Knorr-Bremse Parkbremse mit Hebel [43]	-----49
Abbildung 5.10 Drehgestell Siemens SF 300 [5]	-----54
Abbildung 5.11 Drehgestell Siemens SF 40 [5]	-----54
Abbildung 5.12 Drehgestell Siemens SF 70 [5]	-----55
Abbildung 5.13 Bose Suspension System [45]	-----56
Abbildung 5.14 Elektrorheologische Flüssigkeit ohne angelegtes elektrisches Feld [46]	-----57
Abbildung 5.15 Elektrorheologische Flüssigkeit mit angelegtem elektrischen Feld [46]	-----57
Abbildung 5.16 Fludicon elektrorheologische Dämpfer [47]	-----58
Abbildung 5.17 Magnetorheologisches Fluid [49]	-----59
Abbildung 5.18 Delphi MagneRide [51]	-----60
Abbildung 5.19 Drehgestell der Triebwagen TW 2000 der Stadtbahn Hannover mit hydropneumatischer Feder von Knorr-Bremse [56]	-----61
Abbildung 5.20 Hexapod [57]	-----62
Abbildung 5.21 Flugsimulator [58]	-----63
Abbildung 5.22 Prinzipbild geschlossener (a) und offener (b) Luftfedersysteme [60]	64
Abbildung 5.23 Minden-Deutz MD 52 Drehgestell mit Schraubenfedern und passiven Dämpfern (mittig) [61]	-----65
Abbildung 5.24 v-t Diagramm der Fahrt zwischen zwei Stationen	-----76
Abbildung 5.25 Drehgestell mit Gleitplatten (grün, rechteckig) [63]	-----78
Abbildung 5.26 Schiebetritt Pintsch Bamag STS 550 classic / advance [66]	-----80
Abbildung 5.27 Kahlenberg Horn KB-30 [67]	-----81
Abbildung 5.28 SKF EasyRail Airless [68]	-----82
Abbildung 9.1 Vergleich der Fahrzeugvarianten	----- 111
Abbildung 9.2 Vergleich der Fahrzeugvarianten mit der Traktionsenergie	----- 112
Abbildung 14.1 Geschätzte Entwicklungsdauer der Komponenten	----- 122

18 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Technische Daten Siemens Inspiro [8] [9] [5] [10]	17
Tabelle 5.1 Leistungsanforderungen für die Betriebsbremsung	39
Tabelle 5.2 Leistungsanforderungen für die Notbremsung	39
Tabelle 5.3 Leistungsanforderungen für die Haltebremsung	40
Tabelle 5.4 Leistungsanforderungen für die Abstellbremsung	40
Tabelle 5.5 Anforderungsliste für die mechanische Bremse	50
Tabelle 5.6 Auswahlliste für die mechanische Bremse	51
Tabelle 5.7 Anforderungsliste für die Sekundärfederung	66
Tabelle 5.8 Auswahlliste für die Sekundärfederung	67
Tabelle 5.9 Fahrzeit zwischen zwei Stationen	76
Tabelle 5.10 Typische Bauhöhen und Auslenkungen einer Luftfeder [62]	77
Tabelle 5.11 Schiebetritt Pintsch Bamag STS 550 classic / advance	80
Tabelle 5.12 Leistungsdaten Horn Kahlenberg KB-30 [67]	81
Tabelle 6.1 Annahmen für Betriebszeiten	85
Tabelle 6.2 Leistung der mechanischen Bremse	86
Tabelle 6.3 Entwicklungsdauer der mechanischen Bremse	87
Tabelle 6.4 Luftbedarf pro Luftfeder	88
Tabelle 6.5 Luftbedarf pro 6-Teiler (24 Luftfederbälge) ohne Hauptluftbehälterleitung	88
Tabelle 6.6 Leistung der verkleinerten zentralen Kompressoren	89
Tabelle 6.7 Kleinkompressoren Varianten [70]	89
Tabelle 6.8 Leistung des Kleinkompressors [71]	90
Tabelle 6.9 Entwicklungsdauer der dezentralen Luftversorgung	91
Tabelle 6.10 Leistung des passiven Dämpfers	91
Tabelle 6.11 Leistung des elektrorheologischen Dämpfers	92
Tabelle 6.12 Entwicklungsdauer und Mehrgewicht für Wiege, Schraubenfeder und Dämpfer des all-electric Drehgestells	93
Tabelle 6.13 Leistung der all-electric Niveauregulierung	93
Tabelle 6.14 Entwicklungsdauer der all-electric Niveauregulierung	95

Tabelle 6.15 Leistung des Schiebetritts-----	95
Tabelle 6.16 Leistung des Dritte Schiene Stromabnehmers-----	96
Tabelle 6.17 Leistung des Horns -----	96
Tabelle 6.18 Leistung der Spurkranzschmierung-----	97
Tabelle 7.1 Fahrzeugvarianten -----	99
Tabelle 8.1 Paarweiser Vergleich der Fahrzeugvarianten mit Luftfederung für Siemens Inspiro Plattform-Fahrzeug -----	102
Tabelle 8.2 Paarweiser Vergleich der Fahrzeugvarianten mit Luftfederung für Neuentwicklung -----	103
Tabelle 8.3 Paarweiser Vergleich der all-electric Fahrzeugvarianten -----	103
Tabelle 8.4 Technisch bestgeeignete Fahrzeugvarianten-----	104
Tabelle 8.5 Vergleich der ausgewählten Fahrzeugvarianten mit aktuellem Siemens Inspiro mit allen Druckluftkomponenten -----	105
Tabelle 9.1 Jahresenergieverbrauch des bestehenden Druckluftsystems -----	107
Tabelle 9.2 Jahresenergieverbrauch Variante A: 2 zentrale Kompressoren, elektrohydraulische Bremse-----	108
Tabelle 9.3 Jahresenergieverbrauch Variante B: 2 zentrale Kompressoren, elektromechanische Bremse -----	108
Tabelle 9.4 Jahresenergieverbrauch Variante C: 12 dezentrale Kompressoren, elektrohydraulische Bremse-----	108
Tabelle 9.5 Jahresenergieverbrauch Variante D: 12 dezentrale Kompressoren, elektromechanische Bremse-----	108
Tabelle 9.6 Jahresenergieverbrauch Variante E: all-electric, elektrohydraulische Bremse, passive Dämpfer -----	109
Tabelle 9.7 Jahresenergieverbrauch Variante F: all-electric, elektromechanische Bremse, passive Dämpfer -----	109
Tabelle 9.8 Jahresenergieverbrauch Variante G: all-electric, elektrohydraulische Bremse, elektro-/magnetorheologische Dämpfer -----	109
Tabelle 9.9 Jahresenergieverbrauch Variante H: all-electric, elektromechanische Bremse, elektro-/magnetorheologische Dämpfer -----	110
Tabelle 9.10 Verbrauchsvergleich Fahrzeugvarianten-----	110
Tabelle 9.11 Abschätzung der Traktionsenergie -----	111

Tabelle 14.1 Geschätzte Entwicklungsdauer der Komponenten -----	121
Tabelle 16.1 Zusammenfassung der Fahrzeugkonzepte -----	128

19 Quellenverzeichnis

- [1] V. S. Atray und P. N. Roschke, „Design, Fabrication, Testing, and Fuzzy Modeling of a Large Magnetorheological Damper for Vibration Control in a Railcar,“ in *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Rail Conference*, Chicago, Illinois, 2003.
- [2] Rail Safety and Standards Board Ltd., November 2012. [Online]. Available: www.rssb.co.uk/sitecollectiondocuments/pdf/reports/research/T860-rpt-final.pdf. [Zugriff am 18. November 2013].
- [3] Siemens AG, „SOIMO201104-02_300dpi.jpg (JPEG-Grafik, 2126 × 1318 Pixel),“ [Online]. Available: http://www.siemens.com/press/pool/de/pressebilder/2011/mobility/2011-02-UITP/300dpi/SOIMO201104-02_300dpi.jpg. [Zugriff am 07. Februar 2014].
- [4] Siemens AG, „Pressebilder - Siemens Global Website,“ [Online]. Available: http://www.siemens.com/press/pool/de/pp_ts/2007/sc_upload_file_sots200709_01_300dpi_1451317.jpg. [Zugriff am 25. November 2013].
- [5] Siemens Transportation Systems, „FW_bro_siem_D_08_E4.qxd:FW_bro_siem_D_08 - bogies-catalog-de.pdf,“ August 2008. [Online]. Available: <http://w1.siemens.ch/mobility/ch/SiteCollectionDocuments/de/rail-solutions/components-and-systems/bogies-catalog-de.pdf>. [Zugriff am 18. November 2013].
- [6] Siemens AG, „icrl201310001-04_300dpi.jpg (JPEG-Grafik, 4724 × 2505 Pixel),“ [Online]. Available: http://www.siemens.com/press/pool/de/pressebilder/2013/infrastructure-cities/rail-systems/icrl201310001/300dpi/icrl201310001-04_300dpi.jpg. [Zugriff am 07. Februar 2014].
- [7] Siemens AG, „SOICRL201208-09_300dpi.jpg (JPEG-Grafik, 1535 × 2126 Pixel),“ [Online]. Available:

- http://www.siemens.com/press/pool/de/pressebilder/2012/infrastructure-cities/rail-systems/300dpi/SOICRL201208-09_300dpi.jpg. [Zugriff am 07. Februar 2014].
- [8] Siemens AG, „Inspiro-Plattform-DE.pdf,“ [Online]. Available: <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/de/rail-solutions/metros/inspiration-citylife-inspiro/Inspiro-Plattform-DE.pdf>. [Zugriff am 07. Februar 2014].
- [9] Siemens AG, „Inspiro-Warschau-DE.pdf,“ [Online]. Available: <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/de/rail-solutions/metros/inspiration-citylife-inspiro/Inspiro-Warschau-DE.pdf>. [Zugriff am 07. Februar 2014].
- [10] Wikipedia, „Siemens Inspiro – Wikipedia,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Inspiro>. [Zugriff am 07. Februar 2014].
- [11] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen und K.-H. Grote, in *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*, Berlin Heidelberg New York, Springer, 2007, pp. 162-182, 213-230.
- [12] zwomp, „Grischa Guzinski und Metrowind,“ [Online]. Available: <http://www.zwomp.de/2013/02/28/grischa-guzinski-und-metrowind/>. [Zugriff am 22. April 2014].
- [13] Knorr-Bremse AG, „Knorr-Bremse - Drehgestellausrüstung,“ [Online]. Available: <http://www.knorr-bremse.at/de/railvehicles/products/brakingsystems/bogieequipment/be.jsp>. [Zugriff am 22. April 2014].
- [14] SKF, „Spurkranzschmierung für Schienenfahrzeuge | Evolution Online,“ [Online]. Available: <http://evolution.skf.com/de/spurkranzschmierung-fur-schienenfahrzeuge/>. [Zugriff am 22. April 2014].
- [15] ContiTech AG, „Sekundärfederung - Schienenfahrzeuge - Luftfedersysteme - ContiTech AG,“ [Online]. Available: http://www.contitech.de/pages/produkte/luftfedersysteme/schienenfahrzeuge/sekundaerfederung_de.html. [Zugriff am 11. Februar 2014].

- [16] Wikimedia, „Stromabnehmer_U-Bahn-Detail.JPG (JPEG-Grafik, 2816 × 2112 Pixel),“ [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/16/Stromabnehmer_U-Bahn-Detail.JPG. [Zugriff am 25. Februar 2014].
- [17] Knorr-Bremse AG, „iFE Doors - Knorr-Bremse Group - Spaltüberbrückungen,“ [Online]. Available: <http://www.ife-doors.com/de/products/accessdevices/gapbridges/gapbridges.jsp>. [Zugriff am 25. Februar 2014].
- [18] Wikimedia, „File:Pantograaf lichtrail.jpg - Wikimedia Commons,“ [Online]. Available: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pantograaf_lichtrail.jpg. [Zugriff am 22. April 2014].
- [19] F. Vincentz, „File:Knappenrode - Energiefabrik - Bahnhof 20 ies.jpg – Wikimedia Commons,“ 03. April 2010. [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/Knappenrode_-_Energiefabrik_-_Bahnhof_20_ies.jpg. [Zugriff am 11. Februar 2014].
- [20] Wikimedia, „Velaro_E_bogie.jpg (JPEG-Grafik, 1000 × 667 Pixel),“ [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7c/Velaro_E_bogie.jpg. [Zugriff am 11. Februar 2014].
- [21] D. Gubler, „Drehgestell_SBB_EC_Waggon.jpg (JPEG-Grafik, 2800 × 1584 Pixel),“ [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fe/Drehgestell_SBB_EC_Waggon.jpg. [Zugriff am 11. Februar 2014].
- [22] M. Flath, „Magnetschienenbremse_WEB.jpg (JPEG-Grafik, 720 × 540 Pixel),“ [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/2/27/Magnetschienenbremse_WEB.jpg. [Zugriff am 11. Februar 2014].
- [23] S. Terfloth, „WB_ICE-S.jpg (JPEG-Grafik, 1000 × 667 Pixel),“ [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/WB_ICE-S.jpg. [Zugriff am 11. Februar 2014].

- [24] Wikimedia, „unbenannt,“ [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f2/Schema_Drehgestell.svg. [Zugriff am 11. Februar 2014].
- [25] Vossloh Locomotives GmbH, „vossloh-locomotives.com - Produkte und Services - Komponenten - Drehgestelle - Komponenten - Drehgestelle,“ [Online]. Available: http://www.vossloh-locomotives.com/de/products_and_services/components/bogies/bogies.html. [Zugriff am 11. Februar 2014].
- [26] Bahnbilder.de, „bei-jedem-winter-immer-wieder-471944.jpg (JPEG-Grafik, 1024 × 768 Pixel),“ [Online]. Available: <http://www.bahnbilder.de/1024/bei-jedem-winter-immer-wieder-471944.jpg>. [Zugriff am 25. Februar 2014].
- [27] Wikimedia, „BLS-Ce6-6-Nr121-Drehgestell_1092999.JPG (JPEG-Grafik, 3024 × 4032 Pixel),“ [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/BLS-Ce6-6-Nr121-Drehgestell_1092999.JPG. [Zugriff am 11. Februar 2014].
- [28] Wikimedia, „Duese_sprurkranzschmierung.jpg (JPEG-Grafik, 2112 × 2816 Pixel),“ [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6a/Duese_sprurkranzschmierung.jpg. [Zugriff am 11. Februar 2014].
- [29] S. Weinberger, „Spurkranzschmierung_Strab.jpg (JPEG-Grafik, 715 × 625 Pixel),“ 02. Dezember 2006. [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/f/fa/Spurkranzschmierung_Strab.jpg. [Zugriff am 11. Februar 2014].
- [30] Siemens AG, „sots200802-01_300dpi.jpg (JPEG-Grafik, 2126 × 1535 Pixel),“ [Online]. Available: http://www.siemens.com/press/pool/de/pressebilder/mobility/sots200802-01_300dpi.jpg. [Zugriff am 25. Februar 2014].
- [31] Siemens AG, „sots200801-12_300dpi.jpg (JPEG-Grafik, 2126 × 1594 Pixel),“ [Online]. Available: http://www.siemens.com/press/pool/de/pp_ts/2008/sots200801-12_300dpi.jpg. [Zugriff am 25. Februar 2014].

- [32] C. Stammen und T. Schiffers, „Selbstverstärkende hydraulische Bremse“. Patent WO 2008/031701 A1, 20. März 2008.
- [33] VE Vienna Engineering Forschungs- und Entwicklungs GmbH, „Downloads,“ [Online]. Available: http://www.vienna-engineering.com/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=49&lang=en. [Zugriff am 23. Jänner 2014].
- [34] M. Putz und D. Auer, „Reibungsbremse“. Patent WO 2010/133463 A1, 25. November 2010.
- [35] Messier-Bugatti-Dowty, „Messier-Bugatti-Dowty,“ [Online]. Available: <http://www.safranmbd.com/wheels-and-brakes-176/electric-brake/?lang=en>. [Zugriff am 23. Januar 2014].
- [36] D. Guaraldo, „Elektromagnetische Bremse mit einer Parkbremse“. Patent DE 60 2004 000 263 T2, 11. August 2004.
- [37] J. Dietrich, B. Gombert und M. Grebenstein, „Elektromechanische Bremse mit Selbstverstärkung“. Patent DE 198 19 564 A1, 30. April 1998.
- [38] M. Schautt, A. Pascucci und H. Hartmann, „Selbstverstärkende elektromechanische Teilbelagscheibenbremse mit verbesserter Reibebelagführung“. Patent DE 101 64 317 C1, 09. Oktober 2003.
- [39] Continental AG, „Continental-Konzern - Continental intensiviert Entwicklungsarbeiten für elektromechanische Bremsen,“ [Online]. Available: http://www.continental-corporation.com/www/presseportal_com_de/themen/pressemitteilungen/3_automotive_group/chassis_safety/press_releases/elektro_bremsen_18_03_2008_de.html. [Zugriff am 08. Februar 2014].
- [40] Continental AG, „Continental Media Center,“ [Online]. Available: http://mediacenter.continental.com/internet/generator/MAM/index,templateId=Folder_2FrenderDefault.jsp.html?method=show&action=/details.do&oid=2139510&cmspath=/MAM/daten/presse_automotive/cas_daten/electronic_brake_safety_systems/img_2008_03_18_emb_en#. [Zugriff am 08. Februar 2014].

-
- [41] A. Heise, „Elektromechanisch betätigbare Bremse“. Patent WO 2010/094555 A1, 26. August 2010.
- [42] A. Semsey, „Bremse mit reversiblen Kraftspeicher“. Patent WO 2009/050086 A1, 23. April 2009.
- [43] M. Stöhr, „Parkbremse“. Patent EP 2 093 110 A1, 26. August 2009.
- [44] Bose GmbH, „Automotive Systems | Innovations | Suspension system,“ [Online]. Available: <http://www.bose.de/DE/de/automotive/innovations/suspension-system/>. [Zugriff am 24. Jänner 2014].
- [45] Bose GmbH, „Automotive Systems | Bose Suspension System | The System,“ [Online]. Available: <http://www.bose.de/DE/de/automotive/innovations/suspension-system/>. [Zugriff am 24. Jänner 2014].
- [46] Fludicon GmbH, „Technologie, Verstelldämpfer, Elektrorheologische Fluide, ERF - FLUDICON,“ [Online]. Available: <http://www.fludicon.de/technologie/>. [Zugriff am 15. April 2014].
- [47] Fludicon GmbH, „Automotive Anwendungen - FLUDICON,“ [Online]. Available: <http://www.fludicon.de/automotive/>. [Zugriff am 24. Jänner 2014].
- [48] „Magnetorheologische Flüssigkeit,“ 04. April 2013. [Online]. Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetorheologische_Fl%C3%BCssigkeit. [Zugriff am 18. November 2013].
- [49] Inventus Engineering GmbH, „MRF-Effekt.gif (GIF-Grafik, 1000 × 800 Pixel),“ [Online]. Available: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2e/MRF-Effekt.gif>. [Zugriff am 15. April 2014].
- [50] „MagneRide - Wikipedia, the free encyclopedia,“ [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/MagneRide>. [Zugriff am 24. Jänner 2014].
- [51] SoftNews NET, „how-magneto-rheological-suspension-works-8947_1.jpg (JPEG-Grafik, 1024 × 682 Pixel),“ [Online]. Available: <http://s1.cdn.autoevolution.com/images/news/how-magneto-rheological->

- suspension-works-8947_1.jpg. [Zugriff am 24. Jänner 2014].
- [52] „Hydropneumatik – Wikipedia,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Hydropneumatik>. [Zugriff am 24. Jänner 2014].
- [53] „Citroën Traction Avant – Wikipedia,“ [Online]. Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Traction_Avant. [Zugriff am 24. Jänner 2014].
- [54] M. Teichmann und H. Waltensdorfer, „Gasgeregelte HP-Feder“. Patent DE 10 2005 024 189 A1, 12. Juli 2007.
- [55] B. Kazmeier, C. Courth, S. Hölzel und W. Hommen, „Hydropneumatische Federungseinheit sowie hydropneumatisches Federungssystem“. Patent DE 100 56 929 A1, 29. Mai 2002.
- [56] S. Herzfeld, „srh00857.jpg (JPEG-Grafik, 768 × 512 Pixel),“ [Online]. Available: <http://www.svenherzfeld.de/bahnen/tw2000/srh00857.jpg>. [Zugriff am 24. Jänner 2014].
- [57] „Hexapod0a.png (PNG-Grafik, 578 × 556 Pixel),“ [Online]. Available: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0d/Hexapod0a.png>. [Zugriff am 24. Jänner 2014].
- [58] „Simulator-flight-compartment.jpeg (JPEG-Grafik, 1024 × 768 Pixel),“ [Online]. Available: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/38/Simulator-flight-compartment.jpeg>. [Zugriff am 24. Jänner 2014].
- [59] S. Kotsch, „Das Panzerdetail - Waffenstabilisatoren und Waffennachführanlagen,“ [Online]. Available: <http://www.kotsch88.de/stabilisator.htm>. [Zugriff am 24. Jänner 2014].
- [60] B. Heißing, M. Ersoy und S. Gies, in *Fahrwerkhandbuch*, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011, p. 279.
- [61] „Drehscheibe Online Foren :: 06 - Modellbahn-Forum :: Fenster, MD52, Y0270 ... (mB vV),“ [Online]. Available: <http://www.drehscheibeforen.de/foren/read.php?10,5439715,5440547>. [Zugriff am 24. Jänner 2014].
- [62] ContiTech AG, „Schienenfahrzeuge - Produktprogramm Sekundärfederung -

- ContiTech AG,“ [Online]. Available:
http://www.contitech.de/pages/produkte/luftfedersysteme/schienenfahrzeuge/sekundaer_produktpogramm_de.html. [Zugriff am 07. Februar 2014].
- [63] Wirtschaftszeit, „1_Drehgestellkl.jpg (JPEG-Grafik, 1026 × 719 Pixel),“ [Online]. Available:
http://www.wirtschaftszeit.at/uploads/pics/1_Drehgestellkl.jpg. [Zugriff am 11. Februar 2014].
- [64] D. G. Havlicek, Untersuchung und Bewertung von innovativen Sekundärfederungskonzepten für Metrofahrzeuge, Wien: TU Wien, Diplomarbeit, 2012.
- [65] Pintsch Bamag GmbH, „Zustiegssysteme: STS 550 classic / advance,“ 2013. [Online]. Available:
<http://pintschbamag.de/produkte/uebersicht/tursysteme/zustiegssysteme/sts-550-classic-advance>. [Zugriff am 18. November 2013].
- [66] Pintsch Bamag Antriebs- und Verkehrstechnik GmbH, „Zustiegssysteme_STS 550 classic advance_DE - Zustiegssysteme_STS-550-classic-advance_DE.pdf,“ [Online]. Available:
http://pintschbamag.de/wp-content/uploads/2011/11/Zustiegssysteme_STS-550-classic-advance_DE.pdf. [Zugriff am 16. April 2014].
- [67] Kahlenberg Industries, Inc., „Model KB-30A Electric Horn | Kahlenberg,“ [Online]. Available: <http://www.kahlenberg.com/products/marine-signaling/commercial-military/model-kb-30a-electric-horn>. [Zugriff am 16. April 2014].
- [68] SKF, „SKF EasyRail Airless,“ [Online]. Available:
<http://www.skf.com/at/products/lubrication-solutions/lubrication-systems/lubrication-systems-for-special-applications/skf-easyrail/skf-easyrail-airless/index.html>. [Zugriff am 16. April 2014].
- [69] ALMiG Kompressoren GmbH, „ALMiG Kompressoren GmbH: Referenzen,“ [Online]. Available:
<http://www.almig.de/de/info/produkte/trackair/referenzen.html>. [Zugriff am

14. April 2014].

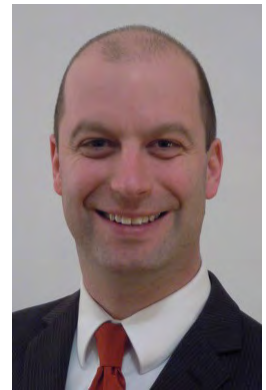
- [70] Dürr Technik GmbH & Co. KG, „Baureihenvergleich - Ölfreie kleine Kompressoren und ölfreie Vakuumpumpen von Dürr Technik,“ [Online]. Available: <http://www.duerr-technik.eu/index.php/kompressor-aggregate-vergleich.html>. [Zugriff am 28. Jänner 2014].
- [71] Dürr Technik GmbH & Co. KG, „KK15 - Ölfreie kleine Kompressoren und ölfreie Vakuumpumpen von Dürr Technik,“ [Online]. Available: <http://www.duerr-technik.eu/index.php/oelfreie-kompressoren-kk15.html>. [Zugriff am 28. Jänner 2014].
- [72] Dürr Technik GmbH & Co. KG, „Schienenverkehr - Ölfreie kleine Kompressoren und ölfreie Vakuumpumpen von Dürr Technik,“ [Online]. Available: <http://www.duerr-technik.eu/index.php/oelfreie-kompressoren-schienenverkehr.html>. [Zugriff am 18. November 2013].
- [73] Johnston, Interviewee, [Interview]. 31. August 2012.
- [74] SKF Lubrication Systems Germany AG, „SKF EasyRail Airless - SKF.at/Produkte,“ Oktober 2013. [Online]. Available: <http://www.skf.com/binary/41-74853/1-8097-DE.pdf>. [Zugriff am 18. November 2013].

DI Andreas Fertin

Lebenslauf

geboren am 26. Februar 1977 in Wien
Staatsangehörigkeit Österreich

Große Stadtgutgasse 34/1/7
1020 Wien
0650 742 47 42
andreas.fertin@gmail.com



Ausbildung

- 1999 – 2006 **Technische Universität Wien**
Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau
Abschluss mit Auszeichnung
Diplomarbeit am Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen
- 1997 – 1999 **Universität Wien**
Physik
- 1996 – 1997 **Grundwehrdienst**
- 1987 – 1996 **Schottengymnasium, Wien**
neusprachliche Ausbildung, Matura

Berufserfahrung

- seit 2013 **Österreichisches Produktivitäts- und Wirtschaftlichkeits-Zentrum, Wien**
Schulungsleiter
- Technische Zeichnungen Lesen und Verstehen
- seit 2009 **Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, Technische Universität Wien**
Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik
Assistent
- Dissertationsprojekt All-electric Metro
 - Projektleitung
 - Leitung des Forschungsschwerpunkts Schienenfahrzeugbau
 - Lehrtätigkeit Technisches Zeichnen / CAD
- 2007 – 2008 **Diamond Aircraft Industries, Wiener Neustadt**
Entwicklungs- und Zulassungsingenieur
- Zulassungstests von Luftfahrtmotoren
 - Luftfahrtbehördentätigkeit national und international
 - Erstellung von Nachweisdokumenten
 - Leitung der Prüfstandsabteilung

- 2007 **Bombardier Transportation, Wien**
 Projekt-Ingenieur
- Erstellung der Einreichungs- und Zulassungsdokumente für ein Straßenbahnprojekt in Palermo, Italien
 - Plausibilitätsprüfung
 - zweisprachige Redaktion (italienisch) und Übersetzung (englisch)
- 2006 **Böhler-Uddeholm, Wien**
 Projektmitarbeiter
- Erstellung einer grundsätzlichen weltweiten Intranet-Implementierungsstrategie für Böhler-Uddeholm im Rahmen einer Projektarbeit an der TU Wien
- 2003 – 2006 **Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, Technische Universität Wien**
 Projektmitarbeiter „Laserzündung für Ottomotoren“
- Inbetriebnahme und Überwachung eines Motorenprüfstands
 - Durchführen und Entwickeln von Messungen

Praktika

- 2005 **OMV, Gänserndorf**
 Abteilung HR Management & Consulting Trainees
- Schulung und Betreuung von Lehrlingen
 - Vortragstätigkeiten
- 2004 **Magna Steyr, Engineering Center Steyr, Wien**
 Abteilung Motor-Engineering
- Patentrecherche
 - Patentdatenbankerstellung
- 2003 **Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, Technische Universität Wien**
 Entwicklungsprojekt „Laserzündung für Ottomotoren“
- Inbetriebnahme und Überwachung eines Motorenprüfstands
 - Durchführen von Messungen

Sprachkenntnisse

Deutsch	Muttersprache
Englisch	Fließend
Russisch	Fortgeschritten
Spanisch	Fortgeschritten

EDV-Kenntnisse und Weiterbildung

Erst-Helfer gemäß § 26 ASchG und § 40 ASchG
 MS Office, MS Project, CATIA V5, EASA CS-E

Freizeitinteressen

Klassische Musik, Theater, Reisen (Russland, Nord- und Südamerika, Asien), Sport (Skitouren, Wandern, Radfahren)