

Karlsruher Schriftenreihe
Fahrzeugsystemtechnik

Steffen Kölling

Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation von Stromabnehmern

Steffen Kölling

**Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation
von Stromabnehmern**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 36**

Herausgeber

FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den eigenständigen Lehrstühlen für Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation von Stromabnehmern

von
Steffen Kölling

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Maschinenbau, 2014

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 1869-6058

ISBN 978-3-7315-0387-3

DOI: 10.5445/KSP/1000047155

Vorwort des Herausgebers

Elektrische Traktion bildet heute schon das Rückgrat des Schienenverkehrs in Europa und wird an der weiterhin wachsenden Mobilität von Personen und Gütern partizipieren. Der Erfolg liegt ganz wesentlich darin begründet, dass die Traktionsenergie dem Triebfahrzeug kontinuierlich längs der Schiene zugeführt wird. Zentrales Bauelement dabei ist der Stromabnehmer, der die Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Oberleitungsinfrastruktur bildet.

Zur zuverlässigen Energieversorgung ist die Abstimmung der Eigenschaften des Stromabnehmers auf das Fahrleitungssystem unerlässlich.

Da das europäische Bahnnetz länderspezifisch gewachsen ist, sind Spurweiten, Zugsicherungssysteme, Stromsysteme und auch Stromabnehmerprofile häufig im Detail unterschiedlich realisiert. Im grenzüberschreitenden Verkehr führt dies zu erheblichem fahrzeugseitigen Aufwand, um die Anforderungen der zu befahrenden Länder zu erfüllen. Betrachtet man die Stromabnehmerprofile, bedeutet dies konkret, dass teilweise mehrere Stromabnehmer mit unterschiedlichen Wippenprofilen mitgeführt werden müssen. Zudem benötigen Stromabnehmer auf Neigetechnikfahrzeugen eine Einrichtung, die die gleismittige Lage sicherstellt. Aktuelle Lösungen am Markt verwenden hierzu eine Kompensationseinrichtung, die den Stromabnehmer entgegen der Neigerichtung des Wagenkastens neigt. Jedoch wird hierfür zusätzlicher Bauraum benötigt, der wiederum den Passagierraum einschränkt.

Diese zwei auf den ersten Blick unabhängigen Teilprobleme verbinden sich, wenn man ein schmaleres Wippenprofil mittels mechatronischer lateraler Nachführung im Netz mit einer breiteren Wippe andenkt. So können die notwendigen Bewegungen der Neigekompensation relativ zum Fahrzeugdach auch für die Umsetzung der Interoperabilität genutzt werden. Um die Realisierbar-

keit dieses Ansatzes abzusichern, wurde in dieser Arbeit zunächst eine Machbarkeitsstudie erstellt. Hierbei stellt sich als entscheidende Fahrsituation die Weichenfahrt heraus, an der zu erkennen ist, dass ohne wesentliche Änderungen an der vorhandenen Infrastruktur eine nachgeführte schmalere Wippe diese nicht unter Einhaltung aller Anforderungen befahren kann.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt daher auf der konzeptionellen Untersuchung zur Neigekompensation von Stromabnehmern. Die hierbei entwickelte Systematik ermöglicht es, den Lösungsraum breit abzusuchen, um geeignete Lösungen zu finden. Vierundsechzig theoretische Ansätze wurden bis auf vier kondensiert und schließlich an der Kontaktinteraktion mit einer repräsentativen Oberleitung bei relevanten Fahrszenarien bewertet. Die systematische Untersuchung und Bewertung der Konzepte bietet eine solide Basis und liefert interessante Impulse zur industriellen Weiterentwicklung der Stromabnehmer.

Karlsruhe, im März 2015

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation von Stromabnehmern

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Steffen Kölling

Tag der mündlichen Prüfung: 10.12.2014

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Lehrstuhl für Bahnsystemtechnik des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dem Lehrstuhlinhaber und Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld, danke ich besonders für die Anregung zu dieser Arbeit, die wissenschaftliche Förderung, die stets vorhandene Diskussionsbereitschaft, sowie für die Übernahme des Hauptreferates.

Für die freundliche Übernahme des Korreferats gebührt mein ganz besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers vom Institut für Produktentwicklung, Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Elsner danke ich für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen danke ich für die angenehme Zusammenarbeit. Hierbei möchte ich besonders die „gute Seele des Lehrstuhls“ Frau Ivana Kramer hervorheben, die durch ihre positive und fröhliche Art ansteckend wirkte. Auch möchte ich mich bei der DFS-Gang bedanken, die die Mittagspausen immer kurzweilig machten. Ohne Dr.-Ing. Yunfan Wei wären meine rudimentären Chinesischkenntnisse noch rudimentärer, und Dipl.-Wi.-Ing Christoph Kühn - mit seinen beeindruckenden rhetorischen Fähigkeiten - hat durch sein immerwährendes Interesse an exotischen Urlaubsdestinationen sicherlich zur Steigerung meiner Geographiekennnisse beigetragen.

Meinen Eltern, Doris und Peter Kölling, die mich stets unterstützten, danke ich von tiefstem Herzen, ebenso gilt der Dank meinen beiden Brüdern Sebastian und Christian.

Kurzfassung

Stromabnehmer stellen für die Energieversorgung elektrischer Schienenfahrzeuge eine zentrale Komponente dar. Die Arbeit greift in diesem Zusammenhang zwei Aspekte heraus, die sich durch eine gezielte Verschiebung des Stromabnehmers bzw. dessen Komponenten relativ zum Wagenkasten ergeben. Die Interoperabilität von Stromabnehmern wird durch unterschiedliche Wippenprofile eingeschränkt. Es wird in diesem Zusammenhang untersucht, ob durch eine gezielte Bewegung des Stromabnehmers bzw. Komponenten dessen, ein schmaleres Profil auch in einem Netz mit einer originär breiteren Wippe verwendet werden kann. Hierzu werden relevante Fahrsituationen des Stromabnehmers untersucht und die Realisierbarkeit bewertet.

Zum anderen steht die technische Realisierung von Einrichtungen zur Kompensation der Neigebewegung des Wagenkastens für Stromabnehmer auf Neigetechnikfahrzeugen im Fokus der Arbeit. Die aktuell am Markt verbreitete Lösung reduziert, aufgrund der Bauhöhe, den Passagierraum unterhalb des Stromabnehmers. Mit dem Ziel Konzepte mit niedriger Bauhöhe zu finden, wird der Lösungsraum systematisch abgesucht und bewertet.

Hierzu wurde ein Referenzmodell eines Neigezuges, inkl. der notwendigen Regelstruktur, sowie ein Referenzmodell eines Stromabnehmers in der MKS-Software SIMPACK erstellt. Da die dynamische Interaktion zwischen Stromabnehmer und Oberleitung für die Bewertung der Konzepte unabdingbar ist, wurde hierzu eine Simulationsumgebung aufgebaut und validiert. Diese realisiert die gekoppelte dynamische Berechnung der Oberleitung mittels FEM und des Stromabnehmers via MKS. Die aussichtsreichsten Konzepte werden so an relevanten Fahrsituationen simulativ bewertet. Als Ergebnis wird ein kondensiert Satz aus technisch realisierbaren und vorteilhaften Ansätze zur Reduzierung der Bauhöhe der Neigekompensation erzeugt.

Abstract

Pantographs play a key role in modern energy supply of rail vehicles. Two aspects are being researched in this thesis, which are derived from the specific displacement of the pantograph or its components relatively to the car body. Interoperability of pantographs is being limited by different pantograph head profiles in the European rail networks. In this regard, the researched aspect leads to the question if a smaller pantograph head can be used in a network with ordinary wider head widths. Different situations of pantograph-catenary interaction will be studied and the feasibility of this approach will be judged, therefore.

The other part is focused on the technical realisation of the swing compensation for pantographs mounted on tilting trains. Current market-leading solution causes a reduction of passenger space below pantographs due to its headroom. Aiming to find conceptual solutions to the design of swing compensation, solution space is being searched and judged methodically.

As a prerequisite to judge different concepts, reference models of a tilting train including controlling sequence, and a pantograph were built in the multibody simulation software SIMPACK. Since the dynamic interaction of pantograph and catenary plays a key role in the assessment of the concepts, a simulation environment to couple both pantograph and catenary was built and validated. The simulation provides the coupled dynamic simulation of the catenary with FEM and pantograph with MBS. The most promising concepts will be simulatively assessed using typical driving situations of tilting trains. As a result, a condensed set of feasible and favourable approaches to reduce headroom of the swing compensation will be presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Aufgabenstellung	1
1.1	Stromversorgung elektrischer Schienenfahrzeuge	1
1.2	Aufgabenstellung	3
1.2.1	Interoperabilität der Stromabnehmerwippe	3
1.2.2	Kinematik der Neigekompensation	4
2	Machbarkeitsstudie: Interoperabilität	5
2.1	Weichenbespannung	7
2.2	Zusammenfassung und Bewertung	12
3	Aufbau und Gliederung der Arbeit	13
4	Modellierung des Neigetechnikfahrzeuges	17
4.1	Arten von Neigetechnikfahrzeugen	19
4.1.1	Passive Neigetechnik	20
4.1.2	Aktive Neigetechnik	21
4.2	Modelliertes Neigetechnikfahrzeug	24
4.2.1	Regelung des Neigezuges	26
5	Modellierung des Stromabnehmers	31
5.1	Historische Entwicklung	31
5.2	Aufbau des Einholmstromabnehmers	33
5.3	Modellierung und dynamische Eigenschaften	35
6	Modellierung der Infrastruktur	47
6.1	Allgemeiner Aufbau von Kettenoberleitungen	47
6.2	Modellierung der Oberleitung vom Typ Re 200	51
6.2.1	Fahrdraht Höhenlagen	55
6.2.2	Statische Elastizität	56
7	Simulation der Stromabnehmer-Oberleitung-Dynamik	59
7.1	Modellierung und Simulation der Oberleitung	60
7.1.1	Modellierung der Seile/Drähte	61

7.1.2	Numerische Berechnung von Modellen mit verteilten Parametern	63
7.2	Modellierung der dynamischen Interaktion zwischen Stromabnehmer und Oberleitung	68
7.2.1	Kopplung von Simulationsprogrammen	68
7.2.2	Co-Simulation mittels ANSYS-SIMPACK	69
7.2.3	Kontaktmodellierung	73
7.2.4	Ermittlung der Kontaktkraft und Aufprägung auf die Oberleitung	75
7.3	Verifikation der Vorgehensweise	77
7.3.1	Wanderkraft	77
7.3.2	Wandermasse	81
7.3.3	Testfall nach EN 50318	86
7.4	Zusammenfassung.	88
8	Ansätze zur Neigekompensation	91
8.1	Entwicklungsmethodiken in der Konzeptphase	91
8.1.1	Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung.	91
8.1.2	Variantenbildung	96
8.2	Neigekompensation der Stromabnehmer.	97
8.2.1	Stand der Technik - Technologierecherche.	97
8.3	Methodische Erzeugung und Auswahl	99
8.3.1	Kriterien für die Neigekompensation.	99
8.3.2	Funktionszerlegung und Prinziplösungen	101
8.3.3	Bewertung und Auswahl	109
8.3.4	Einfluss der Stromabnehmer-Begrenzungslinie	119
8.3.5	Zusammenfassung aus kinematischer Sicht	120
8.3.6	Einfluss auf Vertikaldynamik	121
8.3.7	Simulationen der dynamischen Interaktion mit der Re 200	126
8.3.8	Zusammenfassung aus dynamischer Sicht	146
8.3.9	Realisierbarkeit und Abschätzung der Bauhöhe.	147
8.4	Zusammenfassung und Bewertung der Konzepte	148

8.5 Weiterführende Möglichkeit	151
9 Zusammenfassung	153
A Anhang.	157
A.1 Parameter Neigetechnikfahrzeug	157
A.2 Parameter Stromabnehmer	158
A.3 Parameter der Oberleitung Re 200	160
A.4 Wanderkraft: Skript in ANSYS APDL	161
A.5 Neigekompensation	165
A.5.1 Patentrecherche zur Neigekompensation.	165
A.5.2 Fusspunktanregung bei fixem Momentanpol	176
A.5.3 Regelwerk	177

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

AC	Alternating current - Wechselstrom
DC	Direct current - Gleichstrom
DB	Deutsche Bahn AG
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBB	Euler-Bernoulli-Balken
EN	Europäische Normen
SA	Stromabnehmer
SBB	Schweizerische Bundesbahn
SE	Systems Engineering
SJ	Statens Järnvägar - schwedisches Bahnunternehmen
SOK	Schienenoberkante
TSI	Technische Spezifikationen für die Interoperabilität

A	Querschnittsfläche
a_i	Beschleunigung in Richtung der i -ten kartesischen Koordinate
α_k	gewichtete Amplitude der statischen Steifigkeit für die Kosinusfunktion
A_s	schubkorrigierte Querschnittsfläche
$b_{2,1}$	Horizontaler Abstand der Lenkerstangenlagerung
b_5	Horizontaler Abstand der Lenkerstangenenden
$b_{7,1}$	Horizontaler Abstand der Schleifleistenfederung
b_o	Breite der oberen Grundseite des Viergelenks
b_{ps}	Abstand der Primärfederung zur Gleismitte
b_r	nutzbare Dachbreite des Stromabnehmers
b_{ss}	Abstand der Sekundärfederung zur Gleismitte
b_u	Breite der unteren Grundseite des Viergelenks
c	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit

c_k	Kontaktsteifigkeit
$c_{l,67}$	Laterale Federsteifigkeit der Schleifleisten
C	Steifigkeitsmatrix
c_{ps}	Steifigkeit der Primärfederung
$c_{ss,\alpha}$	sekundäre Rollsteifigkeit
c_{ss,y_1}	Laterale Sekundärsteifigkeit
c_{ss,y_2}	Endsteifigkeit des lateralen Sekundärdämpfers
c_{ss,z_1}	Flächensteifigkeit der Sekundärfederung
c_{ss,z_2}	Primärvolumensteifigkeit der Sekundärfederung
c_{ss,z_3}	Sekundärvolumensteifigkeit der Sekundärfederung
$c_{tr,1}$	Steifigkeit des Traktionsgestänges
$c_{tr,2}$	Endsteifigkeit der Dämpfung des Traktionsgestänges
c_z	Steifigkeit der Schleifleistenfederung in z_7 -Richtung
$c_z(z_7)$	projizierte Gesamtsteifigkeit der Schleifleistenfederung in vertikaler Richtung in Abhängigkeit der Einfederung z_7
D	Gleisüberhöhung
d_{02}	viskose Dämpfung der Unterarmlagerung
d_{23}	viskose Dämpfung der Oberarmlagerung am Unterarm
d_{34}	viskose Dämpfung zwischen den zweit Teilen des Oberarms
d_{67}	angenommener Dämpfungskoeffizient der Schleifleistenfederung
d_c	Viskoser Dämpfungskoeffizient des Senkdämpfers
δ	Gleisüberhöhungswinkel
$\delta(x - vt)$	Dirac-Distribution mit der Geschwindigkeit v wanderndem Angriffspunkt in x -Richtung
δ_f	Fehlstellungswinkel einer Stromabnehmerkomponente
Δh_s	Änderung der Stromabnehmerhöhe von der Unterarmlagerung zur Schleifleistenmitte
Δ_i	Translation der i -ten Komponente des Stromabnehmers
δ_i	Rotation der i -ten Komponente des Stromabnehmers
Δl_7	Längenänderung der Schleifleistenfederung aus der Ruhelage
$d_{l,67}$	Laterale viskose Dämpfung der Schleifleisten

D	Dämpfungsmatrix
d_{ps}	Viskoser Dämpfungskoeffizient der Primärfederung
$d_{ss,\alpha}$	viskoser sekundärer Rolldämpfungskoeffizient
$d_{ss,y2}$	viskoser lateraler Sekundärdämpfungskoeffizient
$d_{ss,z3}$	Sekundärvolumendämpfung der Sekundärfederung
$d_{tr,2}$	viskoser Dämpfungskoeffizient des Traktionsgestänges
d_z	viskoser Dämpfungskoeffizient der Schleifleistenfederung in z_7 -Richtung
$d_z(z_7)$	projizierte Gesamtdämpfung der Schleifleistenfederung in vertikaler Richtung in Abhängigkeit der Einfederung z_7
E	Elastizitätsmodul
\mathbf{e}_i	i -ter Einheitsvektor
\bar{e}	arithmetisches Mittel der statischen Elastizität über ein Feld
$e_{min/max}$	minimale/maximale statische Elastizität der Oberleitung
$\eta, \dot{\eta}$	Wagenkasten­neigewinkel und -rollgeschwindigkeit
\mathbf{f}	Kraftvektor
F_i	Kraft in Richtung der i -ten kartesischen Koordinate
$F_{anh.}$	statische Anhubkraft des Stromabnehmers
$F_{auftr.}$	aerodynamische Auftriebskraft
F_{err}	mittlerer Fehler
f_{err}	relativer Fehler
F_k	Kontaktkraft
\hat{f}_k	Kraftamplitude bei der Bestimmung des Scheinmassenverlaufs
$F_{k,stat}$	statischer Anhubskraft zur Bestimmung der statischen Elastizität
$F_l(0)$	Vorspannkraft einer Schleifleistenfeder bei $z_7 = 0$
\hat{F}	maximale Kontaktkraft des betrachteten Ausschnitts
\check{F}	minimale Kontaktkraft des betrachteten Ausschnitts
\bar{F}	arithmetisches Mittel der Kontaktkraft des betrachteten Ausschnitts
F_σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit der Kontaktkraft des betrachteten Ausschnitts

$F_z(z_7)$	projizierte Gesamtfederkraft der Schleifleistenfederung in vertikaler Richtung in Abhängigkeit der Einfederung z_7
G	Schubmodul
g	Gravitationsbeschleunigung
G_{SM}	Verstärkungsfunktion bzw. Scheinmassenverlauf
$h_{2,1}$	Senkrechter Abstand der Lenkerstangenlagerung zur Unterarmmittellinie
$h_{6,1}$	Horizontaler Abstand des Scheitelrohrs zur Lenkerstangenlagerung
h_{6s}	Vertikaler Abstand der Scheitelrohrschwerpunkts
$h_{7,1}$	Vertikaler Abstand vom Scheitelrohr zur Schleifleistenlagerung
h_{7s}	Vertikaler Abstand vom Scheitelrohr zum Schleifleistenschwerpunkt
h_a	Vertikaler Abstand zwischen Unterarm- und Koppelstangenlagerung am Trägerrahmen
h_b	Höhe des Drehgestellschwerpunkts
h_{bol}	Höhe des Trägerrahmens
h_c	Vertikaler Abstand zwischen Unterarmlagerung und Senkdämpferhalterung am Trägerrahmen
h_{cb}	Höhe des Wagenkastenschwerpunkts
$h_{d,appr.}$	genäherte Funktion der Dachhöhe vom Wankpol in Abhängigkeit des Neigewinkels
h_{eff}	effektive Arbeitshöhe des Stromabnehmers (rel. zu SOK)
h_m	Höhe des Momentanpols bei $\eta = 0$
$h_{P,o}$	Höhe der oberen Grundseite des Viergelenks bei $\eta = 0$
h_{ps}	Höhe der Primärfederung
h_r	Höhe des Monagepunktes des Stromabnehmers
$H(s)$	Übertragungsfunktion des verwendeten Tiefpassfilters
h_s	Stromabnehmerhöhe von der Unterarmlagerung zur Schleifleistenmitte
h_{ss}	Höhe der Sekundärfederung

h_t	Abstand von dem Fahrzeugdach zur Unterarmlagerung des Stromabnehmers
$h_{w,appr.}$	genäherte Funktion der Wankpolhöhe in Abhängigkeit des Neigewinkels
h_{ws}	Höhe des Radsatzschwerpunktes
I	Flächenträgheitsmoment 2. Grades
$i(z_7)$	Übersetzung zwischen Federlänge l_7 und Einfedertiefe z_7 der Schleifleistefederung
I_{zul}	maximal zulässiger Überhöhungsfehlbetrag
J_1	Hauptträgheitsmomente der Rohre der Stützpunkte
J_{1s}	Massenträgheitsmoment der Koppelstange um den Schwerpunkt
J_{2s}	Massenträgheitsmoment des Unterarms um den Schwerpunkt
J_{3s}	Massenträgheitsmoment des unteren Teils des Oberarms um den Schwerpunkt
J_{4s}	Massenträgheitsmoment des oberen Teils des Oberarms um den Schwerpunkt
J_{5s}	Massenträgheitsmoment der Lenkerstange um den Schwerpunkt
J_{6s}	Massenträgheitsmoment des Scheitelrohrs um den Schwerpunkt
J_{7s}	Massenträgheitsmoment der Schleifleisten um den Schwerpunkt
J_{bog}	Massenträgheitsmoment des Drehgestells
J_{bol}	Massenträgheitsmoment des Trägerrahmens
J_{cb}	Massenträgheitsmoment des Wagenkastens
K	Steifigkeitsmatrix
K	Kompensationsfaktor der Querbeschleunigung
k_0	Mittelwert der statischen Steifigkeit für die Kosinusfunktion
k_{max}	maximale statische Steifigkeit
k_{min}	minimale statische Steifigkeit
L	Laufkreisabstand

l	Länge der Saite bzw. des Balkens im Fall der Wanderkraft resp. Wandermasse
l_1	Länge der Koppelstange
l_{1s}	Länge der Koppelstange zum Schwerpunkt
l_2	Länge des Unterarms
$l_{2,1}$	Abstand der Lenkerstangenlagerung zur Oberarmlagerung parallel zur Unterarmmittellinie
l_{2s}	Länge des Unterarms zum Schwerpunkt
$l_{3,0}$	Abstand zwischen Unterarm- und Koppelstangenlagerung am Oberarm
$l_{3,1}$	Länge des unteren Teils des Oberarms
l_{3s}	Länge des unteren Teils des Oberarms zum Schwerpunkt
l_4	Länge des oberen Teils des Oberarms
l_{4s}	Länge des oberen Teils des Oberarms zum Schwerpunkt
l_{5s}^*	Länge der Lenkerstange zum Schwerpunkt
l_{5s}^*	Länge der Lenkerstange
l_6	Horizontaler Abstand der Schleifleistenfederung im Scheitelrohr
l_7	Länge der Schleifleistenfederung
$l_{7,1}$	Horizontaler Abstand vom Scheitelrohr zur Schleifleistenlagerung
$l_{7,2}$	Horizontaler Abstand der Schleifstücke zum Scheitelrohr
l_a	Horizontaler Abstand zwischen Unterarm- und Koppelstangenlagerung am Trägerrahmen
λ_i	i -ter Eigenwert
l_b	Horizontaler Abstand zwischen Unterarm- und Koppelstangenlagerung am Trägerrahmen
l_c	Horizontaler Abstand zwischen Unterarmlagerung und Senkdämpferhalterung am Trägerrahmen
l_{max}	maximale Spannlänge einer Oberleitung
l_p	Lenkerlänge des Neigemechanismus
l_{ps}	Abstand der Primärsteifigkeit von der Drehgestellmitte

η	Wagenkasten­neigewinkel
m	Masse
m_1	Masse der Koppelstange
m_2	Masse des Unterarms
m_3	Masse des unteren Teils des Oberarms
m_4	Masse des oberen Teils des Oberarms
m_5	Masse der Lenkerstange
m_6	Masse des Scheitelrohrs
m_7	Masse der Schleifleisten
m_b	relevanter Massenanteil der Anhubeinheit des Stromabnehmers
m_{bog}	Masse des Drehgestells
m_{bol}	Masse des Trägerrahmens
m_{cb}	Masse des Wagenkastens
M	Massenmatrix
NQ	Zeitanteil der Lichtbogenbildung
Ω_n	n -te Erregerkreisfrequenz
ω_n	n -te Eigenkreisfrequenz
φ_1	Unterarmwinkels des Stromabnehmers
φ_3	Knickwinkel des Oberarms
φ_c	Winkel zwischen Unterarmmittellinie und Senkdämpferlagerung am Unterarm
$\Psi(x, t)$	Winkel der Querschnittsnormale beim Schub- bzw. Timoshenko-Balken
$q(x, t)$	Streckenlast
R	Bogenradius
$r_b(\varphi_1)$	Radius des Kraftangriffs der Anhubeinheit an den Unterarm in Abhängigkeit des Unterarmwinkels φ_1
r_c	Hebelarm der Senkdämpferlagerung am Unterarm
ρ	Dichte
ρA	Massenbelage des Seils/Balkens bestehend aus der Querschnittsfläche A und der Dichte des Materials ρ

\mathbf{r}_i	Ortsvektor des i -ten diskreten Knotenpunktes der Oberleitung im Stromabnehmerkoordinatensystem
\mathbf{r}_{ij}^k	Abstandsvektor von i nach j ausgedrückt im k -ten Koordinatensystem
$\mathbf{r}_{k,FD}$	interpolierter Ortsvektor des StromabnehmerFahrdrah-Kontaktes im Stromabnehmerkoordinatensystem
\mathbf{r}_{SL}	Ortsvektor der Schleifleistenmitte im Stromabnehmerkoordinatensystem
$\mathbf{r}_{k,SL/FD}$	interpolierter Ortsvektor des Kontaktpunktes auf Seite der Schleifleiste/des Fahrdrahts im Stromabnehmerkoordinatensystem
s	Translation des Stromabnehmers in der Ebene des Fahrzeugquerschnitts, siehe Abb. 4.1
s	Fahrweg
$s_b(\varphi_1)$	Translation der Anhubeinheit in Abhängigkeit des Unterarmwinkels φ_1
T	Zugkraft im Seil/Balken
t_{arc}	Zeit mit Lichtbogen
\mathbf{T}_{ij}	Transformationsmatrix mit dazugehöriger Transformationsvorschrift
$T_{t,i}$	Totzeit des i -ten Wagens
t_{total}	Gesamtzeit
T_Y	Kräfte im Y-Beiseil
$T_{Y,a}$	Kräfte im Y-Beiseil des angelenkten Stützpunktes
$T_{Y,u}$	Kräfte im Y-Beiseil des umgelenkten Stützpunktes
u	Ungleichförmigkeitsgrad der statischen Elastizität einer Oberleitung
v	Geschwindigkeit
w_{stat}	statischer Anhub des Fahrdrahtes unter der Kraft $F_{k,stat}$
Δx	Abstand der Ortsdiskretisierung
y'	laterale Achse des gleisfesten Koordinatensystem

y''	laterale Achse des wagenkastenfesten Koordinatensystem
$\mathbf{z}, \dot{\mathbf{z}}, \ddot{\mathbf{z}}$	Positions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor
z'	vertikale Achse des gleisfesten Koordinatensystem
z''	vertikale Achse des wagenkastenfesten Koordinatensystem
z'_r	vertikaler Abstand der Dachmitte zur SOK
z_γ	vertikaler Freiheitsgrad der Schleifleifleisten
z_{FD}	Vordurchhang des Fahrdrahtes
z''_{komp}	vertikaler Höhenlage der Neigekompensationseinrichtung in Abhängigkeit von η

1 Einführung und Aufgabenstellung

1.1 Stromversorgung elektrischer Schienenfahrzeuge

Die elektrische Traktion der Eisenbahn reicht bis in das späte 19. Jahrhundert zurück und ist heute so aktuell wie damals. Im Jahr 2009 betrug der Elektrifizierungsgrad der Eisenbahnstrecken der EU-27-Länder 52.2% oder 110948 km, das deutsche Streckennetz kommt auf einen Elektrifizierungsgrad von 58.4% [Eur11]. Gleichwohl wurde im Jahr 2010 83% der Verkehrsleistung im Personennahverkehr, 98% im Personenfernverkehr und 96.4% des Güterverkehrs der DB AG durch elektrische Traktion - jeweils mit steigender Tendenz - erbracht [KD⁺11]. Daraus ist die Wichtigkeit und die hohe Verbreitung der elektrischen Traktion im Bereich der Schienenfahrzeuge ersichtlich.

Um die Energie für die elektrischen Fahrmotoren bereitzustellen, bieten sich im Grund zwei Ansätze an: Zum einen kann, wie beispielsweise bei der Dieseltraktion, die Energie auf dem Fahrzeug mitgeführt werden. Am Beispiel der Dieseltraktion geschieht das in Form von chemischer Energie - dem Dieselmotorkraftstoff - in Tanks. Möchte man reine elektrische Traktion, so muss die Energie elektrochemisch im Akkumulator gespeichert werden. Die hohen Anforderungen an die Energiedichte werden von den Akkumulatoren allerdings nicht erfüllt, sodass die Reichweite der Fahrzeuge keine marktkonformen Werte erreichen.

Entsprechend geht die elektrische Traktion der Schienenfahrzeuge einen anderen Weg, bei dem die Energie über die Infrastruktur auf das Fahrzeug kontinuierlich übertragen wird. Die Schnittstelle des Fahrzeuges mit der Infrastruktur wird über Stromabnehmer realisiert, die über schleifende Kontakte mit der Infrastruktur in Verbindung stehen.

Um im intermodalen Wettbewerb bestehen zu können, wurde in den vergangenen Jahrzehnten durch moderne Antriebskonzepte, verbesserte Streckennetze

und betriebliche Planung eine kontinuierliche Steigerung der Reisegeschwindigkeit realisiert. Dadurch konnte die Reisezeit im Fernverkehr beachtlich reduziert werden [Fre12]. Außerdem wurden technische Innovation wie die Neigetechnik eingeführt und erfolgreich am Markt etabliert, die durch eine gezielte Wankbewegung des Wagenkastens in Richtung Bogeninnenseite das Befahren des Gleisbogens mit erhöhter Geschwindigkeit ermöglicht. Vor allem auf bogenreichen Strecken mit besonderen topografischen Bedingungen stellt die Neigetechnik ein geeignetes Mittel zur Reduzierung der Reisezeit dar.

Es ist erkennbar, dass die Eisenbahn den intermodalen Wettbewerb angenommen hat und versucht, durch stetige Adaption und Innovation ihre Attraktivität beizubehalten und weiter auszubauen.

Zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Eisenbahn gegenüber anderen Moden muss zudem auf eine Homogenisierung des europäischen Schienenverkehrs hingearbeitet werden. Die Globalisierung der Weltwirtschaft macht flexible und ganzheitliche Transport und Logistiklösungen notwendig, die durch Zuverlässigkeit, attraktive Kostenstrukturen und zeitliche Konkurrenzfähigkeit bestechen. Hierbei stellt der grenzüberschreitende Schienenverkehr eine Hürde dar, die durch die eigenständige Entwicklung der Eisenbahnen der europäischen Ländern entstanden ist. Der Stromabnehmer-Oberleitung-Kontakt stellt dabei keine Ausnahme dar: Die Unterschiede der Detaillösungen der unterschiedlichen Ländern bzw. teilweise auch regionale Unterschiede der Gestaltung der Oberleitung und des Stromabnehmers führen heute dazu, dass grenzüberschreitende Schienenfahrzeuge mit jeweils für das Land bzw. die Strecke passenden Stromabnehmern ausgerüstet werden müssen.

Die Idee der Homogenisierung des europäischen Streckennetzes wurde von der Europäischen Union aufgegriffen und durch entsprechende Verordnungen angegangen. Jedoch muss auch die wirtschaftliche Realisierbarkeit berücksichtigt werden, sodass auch in Zukunft keine vollständige Einheitlichkeit des Streckennetzes zu erwarten ist.

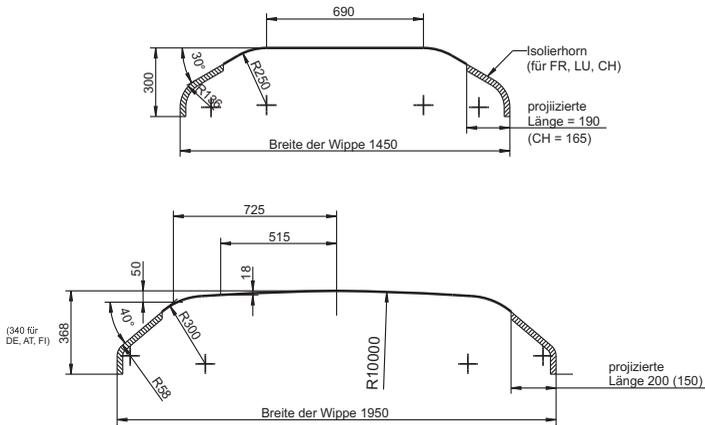


Abb. 1.1.: Vergleich unterschiedlicher Stromabnehmerwippenprofile: Wippenprofil für die Schweiz mit einer Breite von 1450 mm (oben) und Deutschland mit einer Breite von 1950 mm (unten), modifiziert aus [EN12].

1.2 Aufgabenstellung

Die Arbeit untersucht die Möglichkeiten, die sich durch die gezielte Bewegung des Stromabnehmers in lateraler Richtung ergeben. Die dabei entstandenen Themengebiete umfassen zwei Bereiche.

1.2.1 Interoperabilität der Stromabnehmerwippe

Wie schon in Kap. 1.1 erwähnt, wurde das europäische Eisenbahnnetz weitestgehend unabhängig voneinander entwickelt. Im Bereich des Stromabnehmer-Oberleitung-Kontaktes haben sich dabei diverse Detaillösungen entwickelt, die dem ungehinderten grenzüberschreitenden Verkehr entgegenstehen. In dieser Arbeit sollen die unterschiedlichen Breiten der Stromabnehmerwippen (siehe Abb. 1.1) adressiert werden. Die hierbei verfolgte Idee bezieht sich auf die Nachführung einer kleineren Stromabnehmerwippe im Netz einer originär breiteren Wippe am Beispiel von Deutschland und der Schweiz. Es ist zu untersuchen, ob und unter welchen Bedingungen die Nachführung des Stromabnehmers zur Realisierung der Interoperabilität im genannten Einsatzfall möglich ist.

1.2.2 Kinematik der Neigekompensation

Wie schon erwähnt, führen Neigetechnikfahrzeuge eine Wankbewegung aus, durch die eine Steigerung der Bogengeschwindigkeit realisiert werden kann. Die Neigung des Wagenkastens kompensiert hierbei einen Teil der lateralen Kräfte. Da die Oberleitung ortsfest ist, muss der Stromabnehmer aufgrund der Wagenkastenneigung mit einer Einrichtung verbunden sein, die diese Wankbewegung kompensiert. Aktuelle Lösungen schaffen die Neigekompensation nur unter einem erhöhten Bedarf an vertikalem Bauraum.

Der zusätzliche vertikale Bauraum, der von der Neigekompensation eingenommen wird, schränkt den Fahrgastraum von Triebzügen ein. Wie in Abb. 1.2 erkennbar, wird dieser im Bereich der Stromabnehmer markant reduziert.

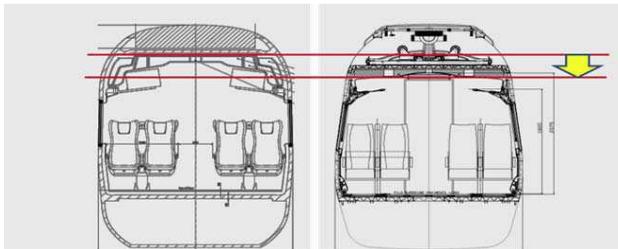


Abb. 1.2.: Vergleich der Querschnitte eines konventionellen (l) und eines Neigetechnikfahrzeuges (r); [Sch11].

Ziel ist es, methodisch einen Konzeptansatz zu erarbeiten, dessen Lösung den notwendigen vertikalen Bauraum im abgesenkter Stellung reduziert, und im besten Fall annähernd auf das Niveau konventioneller Stromabnehmer bringt. Es sind hierbei auf konzeptioneller Ebene Ansätze zu erarbeiten, die diese Reduzierung unter den sonstigen Vorgaben, die ein Stromabnehmer einhalten muss, erreichen können.

2 Machbarkeitsstudie: Interoperabilität durch laterale Nachführung

Bei der initialen Aufgabenstellung gab es die Überlegung, dass die notwendige Translation der Neigekompensation genutzt werden könnte, um das Befahren eines Oberleitungs-Systems mit einem zu schmalen Wippenprofil durch eine aktive laterale Nachführung des Stromabnehmernehmers zu realisieren. Dies würde eine Synergie zwischen der Neigekompensation und der Interoperabilität schaffen.

Neben der Breite der Wippe ist bzgl. der Interoperabilität auch das Stromsystem von Interesse, da für unterschiedliche Stromarten (AC/DC) häufig unterschiedliche Schleifleistenmaterialien (Stromfestigkeit) eingesetzt werden und auch die geforderten mittleren Kontaktkräfte verschieden sind. Abb. 2.1 zeigt die verwendeten Wippenprofile und die zugehörigen Stromsysteme samt Größe des elektrifizierten Streckennetzes. Die Konsistenz des Stromsystems und der Wippenprofile ist teilweise nicht einmal innerhalb eines Landes gewährleistet. Das tschechische Bahnstromnetz besteht beispielsweise aus einem Wechselstrombereich mit einer Effektivspannung von 25 kV bei einer Netzfrequenz von 50 Hz im Süden des Landes und einem 3 kV Gleichstromnetz im Norden. In Spanien und Finnland besteht für die Interoperabilität zudem noch die Problematik der unterschiedlichen Spurweiten..

Wie in der Einleitung schon erwähnt, hat auch die Europäische Union die Notwendigkeit der Homogenisierung des Streckennetzes erkannt und standardisierte Wippenprofile erstellt, die auf interoperablen Strecken Verwendung finden. Im Hochgeschwindigkeitsbereich handelt es sich dabei um eine Wippe der Breite 1600 mm [Kom08] und im konventionellen Betrieb unter 200 km/h neben der 1600 mm-Wippe auch noch die u.a. in Deutschland eingesetzte 1950 mm breite Wippe [Kom11].

2. Machbarkeitsstudie: Interoperabilität

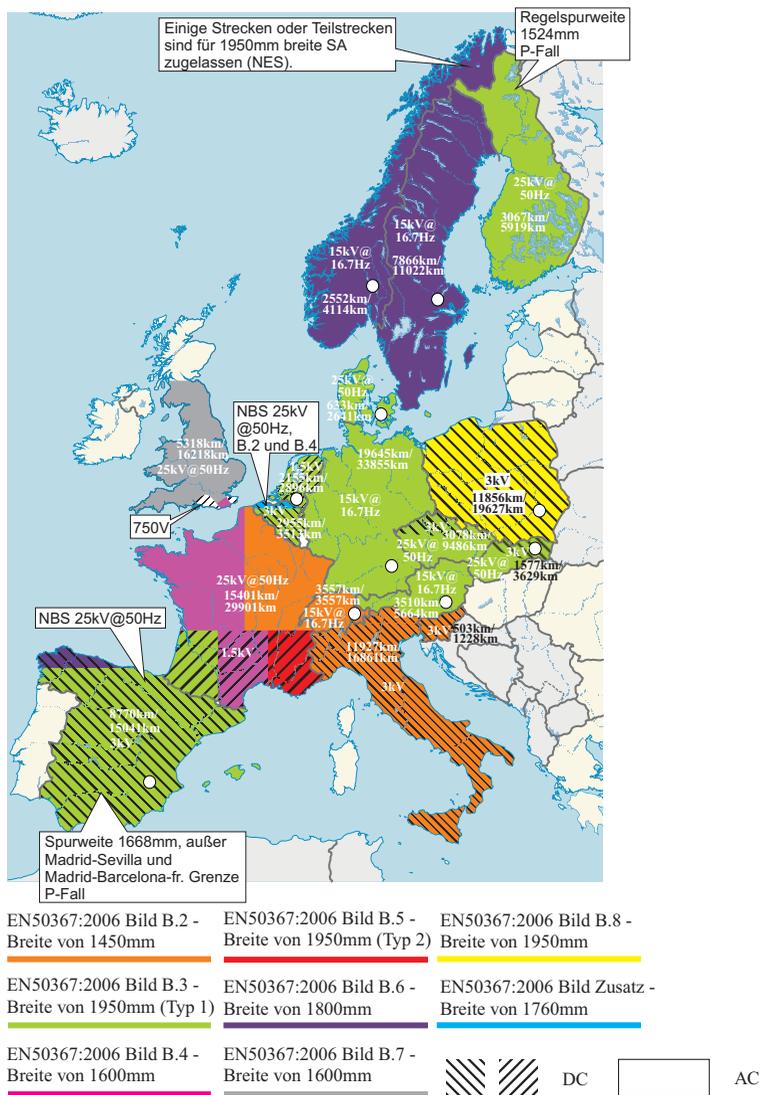


Abb. 2.1.: Stromabnehmerprofile, Stromsysteme und Anteil elektrifizierter Bahnstrecken in europäischen Ländern (Hauptbahnbereich). Karte: Alexrk2; Inhalt: [Kom11], [Eur11], [EN09], [EN12].

Da die europaweite Änderung der Infrastruktur eine kostenintensive Aufgabe ist, wurden in den relevanten technischen Spezifikationen Ausnahmeregelungen für Länder, bei denen die Anpassung unter wirtschaftlichen Aspekten für Bestandsanlagen nicht vertretbar ist, erteilt. Die Notwendigkeit der interoperablen Ausführung der Oberleitungsinfrastruktur wird mit dieser Genehmigung auf Neubaustrecken beschränkt. Länder mit einer solchen Ausnahmegenehmigung sind in Abb. 2.1 mit einem Kreis (O) gekennzeichnet.

Bei dem in dieser Arbeit betrachteten Fall eines Grenzübergangs zwischen Deutschland und der Schweiz besteht der Unterschied auf Stromabnehmerseite bei den verwendeten Profilen. Ein grenzüberschreitendes Schienenfahrzeug muss aufgrund der unterschiedlichen Profile mit zwei verschiedenen Stromabnehmern ausgerüstet werden.

Bei den Untersuchungen zu dieser Teilaufgabe hat sich allerdings herausgestellt, dass selbst mit einer aktiven lateralen Nachführung nicht alle betrieblichen Anforderungen an den Stromabnehmer erfüllt werden können. Konkret geht es dabei um das Befahren von Weichen, bei denen ein Übergang der Fahrdrähte zum Stromabnehmer realisiert werden muss. Im Folgenden wird daher die Weichenbespannung vorgestellt, um die dahinterliegende Logik zur Übergabe des Fahrdrahtes vom Stammgleis auf das Zweiggleis bzw. umgekehrt zu erklären.

2.1 Weichenbespannung

Die Bespannung der Weichen wird durch zwei unterschiedliche Ausführungen realisiert. Bei der *kreuzenden Weichenbespannung* (siehe Abb. 2.3), die u.a. bei der DB Verwendung findet, kreuzen sich am Kreuzungspunkt (KP) die zwei Kettenwerke und bedienen zum einen das Stammgleis und zum anderen das Zweiggleis. Der Auf- bzw. Ablauf des Fahrdrahtes auf die Schleifleisten des Stromabnehmers wird hierbei durch ein seitliches Heranführen des Fahrdrahtes realisiert. Für die seitliche Aufnahme eines herannahenden Fahrdrahtes besitzen Stromabnehmer Auf- oder Endhörner, die das Unterlaufen der Schleifleisten verhindern. Die Hörner bestehen dazu aus einem abgeschrägten

Bereich, der im Fall des in Abb. 2.2 dargestellten Wippenprofils der SBB 30° entspricht. Um einen Toleranzbereich von 65mm nach innen vom Schnittpunkt der Erweiterung des horizontalen und schrägen Bereichs und 75mm nach außen wird der sog. klemmenfreie Raum definiert [KPS⁺09]. Dieser Raum ist geometriespezifisch und wird im Weichenbereich von der Gleismitte über die Oberleitungsbespannung gelegt, siehe Abb. 2.3. Wie der Name schon andeutet, dürfen gewisse Klemmenarten in diesem Raum nicht an der Oberleitung vorkommen, da hier der abgeschrägte Bereich der Stromabnehmerwippe befahren wird. Diese Vorschrift wurde aufgrund empirischer Erfahrungen aufgestellt. Entsprechend muss das Auf- oder Ablaufen der Fahrdrähte in diesem Bereich geschehen, da nur in diesem Bereich relevante Klemmen nicht verbaut werden.

Neben dem klemmenfreien Raum gibt es eine weitere Anforderung, um die Übergabe des Fahrdrahtes problemfrei zu realisieren: Die Auflaufbedingung stellt sicher, dass die Schleifleisten vom befahrenen Fahrdraht (○) in Richtung des herannahenden Fahrdrahtes (●) geneigt werden. Um dies sicher auszuführen, werden die Fahrdrähte im Bezug zur Gleismitte auf der Innenseite der Abzweigung gehalten, sodass die Fahrdrähte den Stromabnehmer auf der gleichen Hälfte kontaktieren. Im Beispiel der Abb. 2.3 befindet sich der Stammgleisfahrdraht oberhalb der Gleismitte und der Zweiggleisfahrdraht unterhalb der Gleismitte, entsprechend erfüllt die Bespannung die Auflaufbedingung.

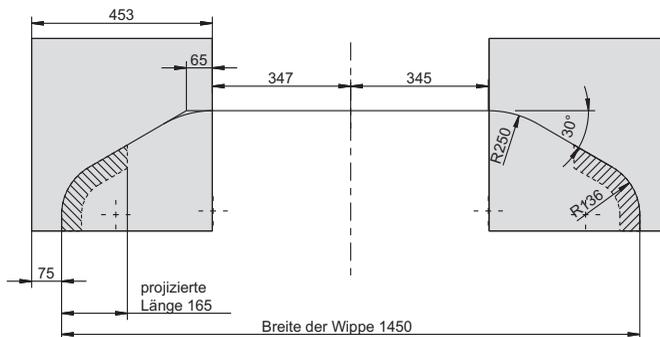


Abb. 2.2.: CH-Wippenprofil erweitert um den klemmenfreien Raum (grau), modifiziert aus [EN12]

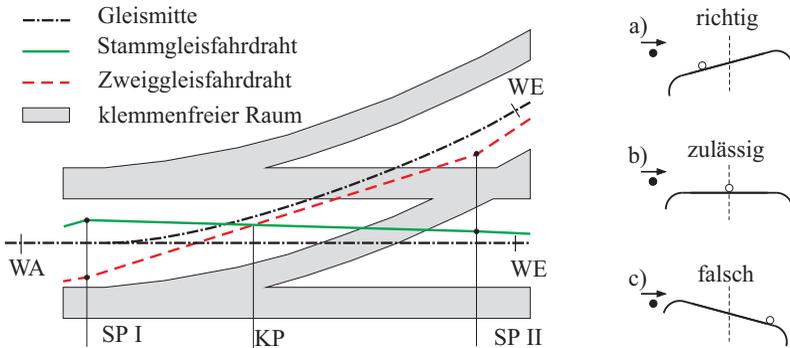


Abb. 2.3.: Kreuzende Weichenbespannung (links) und Auflaufbedingung (rechts) mit drei unterschiedlichen Varianten des Auflaufens, modifiziert aus [KPS⁺09].

Nun da die Grundlagen zur Befahrung der Oberleitung im Bereich der Weichen definiert sind, werden die unüberwindbaren Hürden in der Kombination der zwei einzuhaltenden Regeln des klemmenfreien Raums und der Auflaufbedingung aufgezeigt. Hierzu wird der in Abb. 2.4 dargestellte Weichenbereich verwendet.

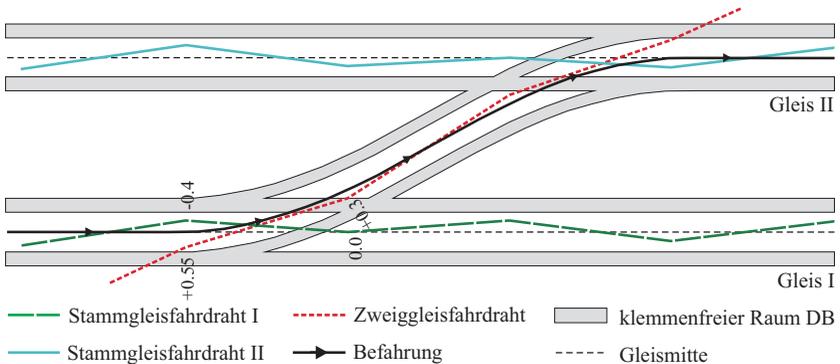


Abb. 2.4.: Befahrene Weichen mit beispielhafter Bespannung, modifiziert aus [KPS⁺09].

Dieser besteht aus zwei parallelen Gleisen, die über zwei Weichen miteinander verbunden sind. Möchte man von Gleis I auf II wechseln, muss hierzu über die Weichen das Zweigggleis befahren werden. Die Fahrdrahtlage im windstillen Zustand wird hierzu für die beiden Stammgleise und das Zweigggleis darge-

stellt. Die hier dargestellte seitliche Lage an den Stützpunkten ist oberleitungs- und standortspezifisch, muss aber generell die Anlaufbedingungen unter allen Windzuständen einhalten. Der Stammgleisfahrdrabt I wird hierbei von +0.4 m seitlicher Lage im nächsten Stützpunkt auf 0.0 m geführt. Der Zweigggleisfahrdrabt wird seitlich -0.55 m mit einer Höhe von 150 mm gegenüber dem Stammgleisfahrdrabt I hereingeführt und im Zweigggleis bei -0.3 m seitlich geführt. Die Ausfahrt mit der zweiten Weiche wird symmetrisch zur ersten erstellt.

Aus der Sicht des Stromabnehmers bei der Befahrung entlang der in Abb. 2.4 eingezeichneten Strecke ergibt sich die Lage der Fahrdrähte nach Abb. 2.5. Eingezeichnet ist der klemmenfreie Raum für das Netz der DB-Standardwippe und der abgeschrägte Bereich der SBB-Wippe (exklusive des Zuschlages von 65 bzw. 75 mm). Um den Ablauf des Stammgleisfahrdrabtes I im klemmenfreien Raum zu realisieren, ist die Wippe in der Weiche zur Einfahrt in das Zweigggleis nach rechts zu bewegen. Das Ablaufen des Stammgleisfahrdrabtes I (Detail A) erfolgt hierbei regelkonform. Bei der nächsten Weiche in der Einfahrt zu Stammgleis II ist die Wippe nach links zu bewegen, um das Auflaufen des Stammgleisfahrdrabtes II im klemmenfreien Raum zu realisieren (Detail B). Man erkennt hier eine Verletzung des Regelwerkes, da sich der Zweigggleisfahrdrabt (rot) rechts von der Wippenmitte (blau, gestrichelt) befindet. Dies widerspricht der Auflaufbedingung in Abb. 2.3. Die Kombination aus der Forderung zur Einhaltung des klemmenfreien Raum und der Auflaufbedingung führt dazu, dass eine zu schmale Wippe nicht bei Netzbetreibern mit beiden Bedingungen im Regelwerk eingesetzt werden kann. Ein wippenspezifischer klemmenfreier Raum wird in Deutschland, Österreich, Schweiz, Norwegen, Spanien und Russland [KPS⁺09] verwendet.

Neben der kreuzenden Weichenbespannung sei der Vollständigkeit halber noch erwähnt, dass es auch noch die von der SNCF verwendete *tangentiale Weichenbespannung* gibt. Hierbei wird das Heranführen eines neuen Fahrdrabtes nicht von der Seite, sondern von oben realisiert. Im Hochgeschwindigkeitsbereich werden hierfür drei Fahrdrähte verwendet [KPS⁺09].

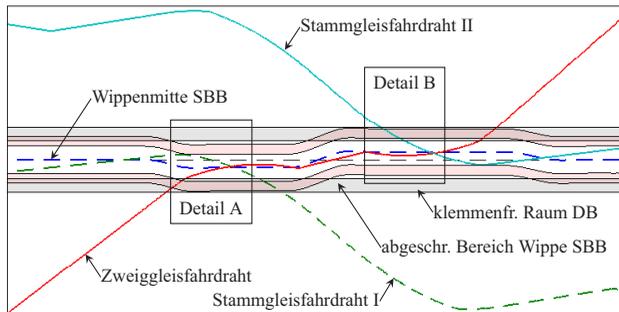


Abb. 2.5.: Befahrung einer Weiche mit klemmenfreiem Raum für die DB-Wippe mit einer schmaleren SBB-Stromabnehmerwippe und lateraler Nachführung.

Abb. 2.6 zeigt beispielhaft eine tangentielle Weichenbespannung. Der zusätzliche Führungsfahrdraht hat die Aufgabe den Stromabnehmer bis zum Übergang auf den Zweiggleis- respektive Stammgleisfahrdraht zu führen. Danach wird er nach oben weggeführt und der Stammgleis respektive Zweiggleisfahrdraht übernimmt die Kontaktierung mit dem Stromabnehmer. Durch die Heranführung der Fahrdrähte von oben, entfällt das seitliche Auflaufen mit der Auflaufbedingung. Kleinere Stromabnehmerwippen können somit prinzipiell verwendet werden.

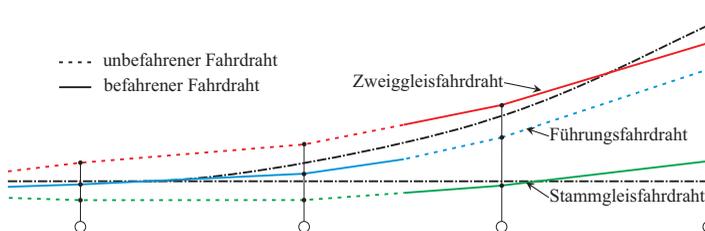


Abb. 2.6.: Tangentielle Weichenbespannung, modifiziert aus [Lup82].

2.2 Zusammenfassung und Bewertung

In diesem Kapitel wurde die Hürde der unterschiedlichen Wippenbreite im europäischen Schienennetz für die ungehinderte Interoperabilität zwischen Deutschland und der Schweiz aufgegriffen. Es wurde herausgestrichen, dass neben dem Profil auch die Stromart relevant ist. Als Übersicht über die Diversität des Oberleitungsnetz wurde eine Grafik mit den Eigenschaften der jeweiligen Länder erstellt. Zudem wurde für die kreuzende Weichenbespannung herausgearbeitet, dass, aufgrund der Kombination der Auflaufbedingung und des klemmenfreien Raums, eine aktive laterale Nachführung einer schmaleren Wippe keine Möglichkeit zur Realisierung der Interoperabilität darstellt.

Ein interessanterer Ansatz zur Realisierung der Interoperabilität bei unterschiedlichen Wippenprofilen ist die Anpassung der Profillbreite. Hierzu werden in [Tes10] verstellbare Auflaufhörner vorgestellt, die sich beim Grenzübergang auf ein breiteres oder schmaleres Wippenprofil umschalten lassen. Nicht eingegangen wird hier auf die Tatsache, dass sich neben der Breite des Profils auch der sog. Arbeitsbereich und der maximal zulässige Arbeitsbereich der Wippenprofile unterscheiden. Um diese Bereiche bei den unterschiedlichen Wippenprofilen in Kongruenz zu bringen, müsste ggf. die Fahrzeugneigung begrenzt werden.

3 Aufbau und Gliederung der Arbeit

Nachdem sich die Interoperabilität durch laterale Nachführung als nicht realisierbar herausgestellt hat, fokussiert sich die restliche Arbeit auf die Aufgabenstellung nach Kap. 1.2.2.

Wenn man Stromabnehmer auf Systemebene betrachtet, ist erkennbar, dass Stromabnehmer Schnittstellenbauteile sind, die in Interaktion mit den angrenzenden Systembereichen stehen. Das Gesamtsystemverhalten wird durch die kombinierten Eigenschaften der Subsysteme bestimmt, eine Komponentenbetrachtung ist dementsprechend nicht ausreichend. In dieser Arbeit wird ein systemischer Ansatz verfolgt, um Realisierungsmöglichkeiten der Neigekompensation zu untersuchen. Abb. 3.1 zeigt die Systemstruktur, die für die Auslegung und Realisierung mit der zentralen Komponente Stromabnehmer betrachtet werden muss. Die Subsysteme stehen untereinander in uni- und bidirektionalen Wechselwirkungen zueinander, können aber auch die Wechselwirkungen zwischen anderen Subsystemen beeinflussen. Entsprechend der Hauptkomponenten werden die Kapitel dieser Arbeit gestaltet. Hauptkomponenten sind

- das *Fahrzeug*, im betrachteten Fall handelt es sich um ein Fahrzeug mit Neigetechnik,
- der *Stromabnehmer*, inklusive der notwendigen *Kompensationseinrichtung* zur Kompensation der Wagenkastenneigung,
- die *Infrastruktur*, mit den Schnittstellen zu Fahrzeug und Stromabnehmer, sowie deren *Interaktion*,
- das zugrundeliegende *Regelwerk*, welches die Grenzen und Anforderungen an die Subsysteme aufstellt, um die technische Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems sicherzustellen
- und abschließend die *Umweltrandbedingungen*.

Anhand des Diagramms aus Abb. 3.1 lassen sich auch die Hauptkapitel dieser Arbeit strukturieren. Die fahrzeugseitige Modellierung wird in Kap. 4 vorgestellt. Unterschiedliche Arten der Neigetechnik werden gegenübergestellt, abschließend wird die verwendete Neigekinematik und die Reglerstruktur vorgestellt. Aus dem erstellten Fahrzeugmodell wird die Fußpunktanregung für die weitere Arbeit extrahiert. Kap. 5 skizziert den Aufbau aktueller Stromabnehmer und stellt das verwendete Modell vor. Infrastrukturseitig wird in Kap. 6 der verwendete Fahrweg, sowie die Oberleitungsmodellierung vorgestellt und betrachtete Fälle des Fahrleitungszustandes aufgezeigt. Da es sich in dieser Arbeit um einen rein simulativen Ansatz handelt, wird in Kap. 7 die erstellte Methodik zur Simulation der dynamischen Interaktion zwischen Stromabnehmer und Oberleitung, sowie deren Verifikation anhand der Norm [EN03] vorgestellt. Die Grundlagen werden mit einer kurzen Übersicht über relevante Regelwerke in Kap. A.5.3 abgerundet, welche den Lösungsraum im Bereich der Neigekompensation einschränken und somit auf die Bewertung und Auswahl der Konzepte entscheidenden Einfluss haben.

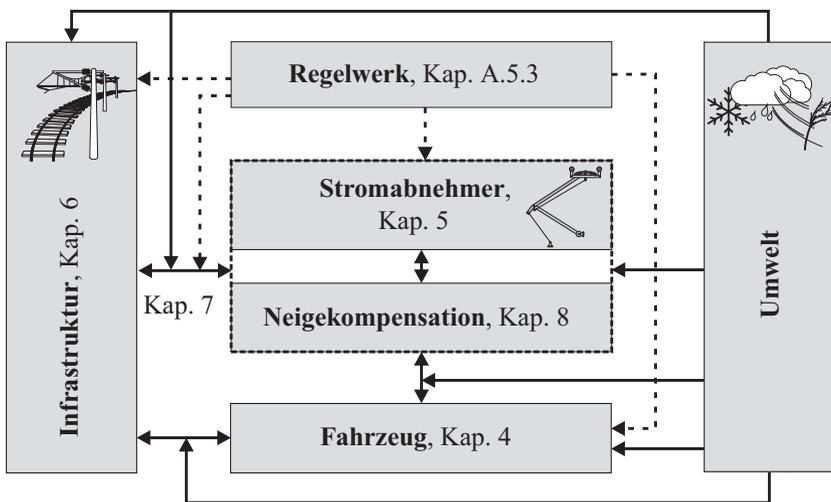


Abb. 3.1.: Systemische Betrachtung des Subsystems Stromabnehmer mit den angrenzenden Bereichen. Strukturierung der Arbeit.

Aufbauend auf den vorigen Kapiteln wird in Kap. 8 die gewählte deduktive Vorgehensweise zur Konzepterstellung dargelegt, sowie die daraus extrahierten Konzepte vorgestellt und eine objektive Bewertung vorgenommen. Ein kondensierter Lösungssatz wird abschließend detaillierter untersucht, um tatsächliche Potentiale zur Reduzierung des Bauraums zu identifizieren, sowie die Beeinflussung des Kontaktverhaltens mit der Oberleitung bewerten zu können. Abschließend werden in Kap. 9 die Ergebnisse aus den vorigen Kapiteln zusammengefasst, um eine Aussage über Realisierungsmöglichkeiten und Entwicklungsfelder im Bereich der Neigekompensation von Stromabnehmern zu treffen.

4 Modellierung des Neigetechnikfahrzeuges

Ein wichtiger Aspekt der modalen Wettbewerbsfähigkeit des Schienenverkehrs ist die Reisezeit. Für den Hochgeschwindigkeitsverkehr muss neben dem Fahrzeug auch der Fahrweg und dessen Topologie für diese Geschwindigkeiten ausgelegt sein, sodass oftmals der Fahrweg der limitierende Faktor bei der Reisezeit ist.

Zur Verkürzung der Reisezeit gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten:

- *infrastrukturseitig*: Anpassung oder Neubau der Fahrwege durch Ausbau- oder Neubaustrecken,
- *fahrzeugseitig*: Erhöhung der realisierbaren Geschwindigkeit auf den Geraden und/oder im Bogen.

Eine fahrzeugseitige Erhöhung der Geschwindigkeit auf der Geraden ist in der Regel nicht möglich, da die Fahrzeuge ohnehin schon die maximal zulässige Geschwindigkeit der jeweilige Infrastruktur erreichen. Die Fahrzeuggeschwindigkeit im Bogen wird hingegen u.a. limitiert durch die auf die Fahrgäste wirkende quasi-statische Querbeschleunigung im Bogen, die den Komfort der Fahrgäste einschränkt.

Der Kraftvektor eines Schienenfahrzeuges mit Neigetechnik im Gleisbogen lässt sich nach Abb. 4.1 darstellen. Durch die Rotationsmatrizen um die x -Achse können die resultierenden Kräfte in den gedrehten Koordinatensystemen berechnet werden. Im gleisfesten ($y' - z'$)-Koordinatensystem ergibt sich die Reduzierung der lateralen Kräfte nach (4.2) mit der Tangentialgeschwindigkeit v , dem Gleisbogenradius R , dem Gleisneigungswinkel δ der Überhöhung D und der Gravitationsbeschleunigung g .

sigen lateralen Beschleunigung die Tangentialgeschwindigkeit des Fahrzeuges erhöht werden kann. Hervorzuheben ist, dass die Reduzierung der Fahrzeit ohne Neubau einer Strecke erreicht werden kann, wodurch die Konkurrenzfähigkeit des Systems Bahn auf bogenreichen Strecken erhöht wird. Es sei aber anzumerken, dass der Einsatz von Fahrzeugen mit Neigetechnik nicht gänzlich ohne Investitionen in die Infrastruktur auskommt [ILK07], ganz abgesehen von den höheren Investitionskosten in das Rollmaterial.

Die zulässige Bogengeschwindigkeit im kreisförmigen Bogensegment lässt sich über

$$v_{zul} = \sqrt{\frac{R \cdot g \cdot (D + I_{zul})}{L}}, \quad (4.4)$$

berechnen, mit der Gleisüberhöhung D , dem zulässigen Überhöhungsfehlbetrag I_{zul} und dem Laufkreisabstand L .

Das Verhältnis der Bogengeschwindigkeit eines Fahrzeuges mit Neigetechnik zur Bogengeschwindigkeit eines konventionellen Fahrzeugs ergibt sich somit zu

$$\frac{v_{n,zul}}{v_{k,zul}} = \sqrt{\frac{D + I_{n,zul}}{D + I_{k,zul}}}, \quad (4.5)$$

mit den Indizes k für ein konventionelles Fahrzeug und n für ein Fahrzeug mit Neigetechnik. Je nach nationalen bzw. infrastrukturspezifischen Vorschriften bewegt sich der Geschwindigkeitsvorteil der Neigetechnik im kreisförmigen Bogensegment im Bereich von 11% bis 22% [Per07].

4.1 Arten von Neigetechnikfahrzeugen

Untergliedert werden können die bestehenden Systeme in passive und aktive Neigetechnik. Die passive Neigetechnik nutzt das Pendelprinzip, indem der Schwerpunkt des Wagenkastens in z'' - Richtung konstruktiv weit unterhalb des Momentanpols des Fahrzeuges angeordnet ist. Die angreifenden Fliehkräfte induzieren über den Hebel somit ein Drehmoment auf den Wagenkasten und

neigen ihn gegen das Rückstellmoment der Federn. Aktive Neigetechnik hingegen verwendet mechatronische Komponenten zur Neigung des Wagenkastens. Maximal darf ein Wankwinkel von 8° erreicht werden, weshalb die Fahrzeitverkürzung im Fokus dieser Systeme liegt.

4.1.1 Passive Neigetechnik

Die Anfänge der Neigetechnik liegen in passiven Systemen, die die Zentrifugalkräfte nutzen, um die Wankbewegung des Wagenkastens zu realisieren. Dieser einfache Ansatz wird bis in die heutige Zeit verwendet. Abb. 4.2 zeigt schematisch das Prinzip der Firma Talgo.

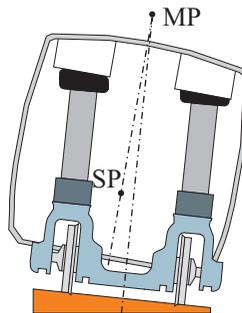


Abb. 4.2.: Passive Neigetechnik des Herstellers Talgo, modifiziert von [Tal14].

Die Sekundärfederung wird über dem Schwerpunkt angeordnet, sodass sich der Momentenpol des Wagenkastens oberhalb des Wagendaches befindet. Durch die Auslegung der Federung wird ein maximaler Neigewinkel von 3.5° erreicht, wodurch der Zeitgewinn gegenüber der aktiven Neigetechnik eher gering ist. Die Deutsche Bahn AG setzt Talgo-Neigezüge als DB Nachtzug ein, wobei die Bogengeschwindigkeit nicht gesteigert wird, sondern die Komfortsteigerung genutzt wird [ILK07].

Vorteil der passiven Neigetechnik ist die Einfachheit des Systems, was zudem eine sehr hohe Zuverlässigkeit zur Folge hat. Des Weiteren wird keine Hilfsenergie für die Neigung benötigt. Einhergehend mit dem Pendelaufbau wird der Schwerpunkt des Wagenkastens allerdings in Richtung der bogenäußeren

Räder ausgelenkt, sodass sich ungünstigere Hebelverhältnisse für die Kippsicherheit des Fahrzeuges ergeben.

4.1.2 Aktive Neigetechnik

Die technische Realisierung der aktiven Neigetechnik wird durch unterschiedliche Konzepte erreicht, die im Folgenden skizziert werden. Die Ansätze der Kinematiken können nach [Goo97, PGS09] unterteilt werden durch den Standort des Neigemechanismus:

- *unterhalb* der Sekundärfederung
- *durch* die Sekundärfederung
- *oberhalb* der Sekundärfederung

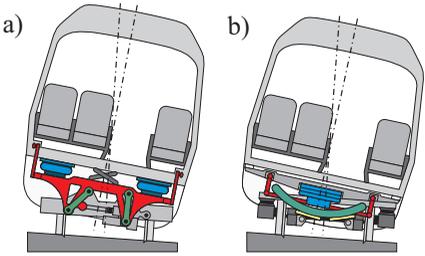
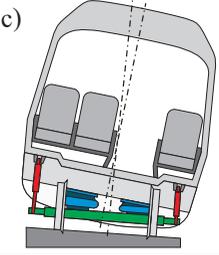
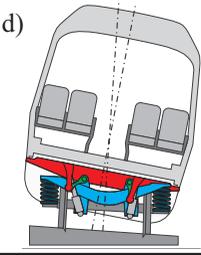
Tab. 4.1 stellt schematisch technische Realisierungsmöglichkeiten nach dem genannten Ordnungsschema vor. Hierbei werden zwei Möglichkeiten zur Realisierung der Neigung unterhalb der Sekundärfederung dargestellt. Auf der linken Seite zeigt a) das Strukturbild eines Fahrzeuges mit einem viergliedrigen Koppelgetriebe. Die zwei Lenkerstangen werden am Drehgestellrahmen befestigt und greifen am Trägerrahmen an. Zwischen Trägerrahmen und Drehgestellrahmen wird ein Aktor zwischengeschaltet, der die notwendige Energie für die Wankbewegung bereitstellt. Der Wagenkasten stützt sich am Trägerrahmen über die Sekundärfederung ab. Die Stellung der Lenker gibt die Momentanpolbahn der Wagenkastenbewegung vor. Realisiert wurde eine solche Topologie bspw. im Bombardier X2000 [PGS09], der von der SJ eingesetzt wird.

Im Vergleich dazu besitzt b) anstelle des Koppelgetriebes eine kreisförmige Führung des Wagenkastens. Der Momentanpol der Wagenkastenbewegung befindet sich infolgedessen im Kreismittelpunkt.

Generell werden durch die Neigekinetik unterhalb der Sekundärfederung die erhöhten Fliehkräfte nicht auf die Sekundärfederung übertragen. Eine laterale Versteifung der Federung oder aktive Querzentrierung ist gegenüber einem Fahrzeug ohne Neigetechnik nicht notwendig.

4. Modellierung des Neigetechnikfahrzeuges

Tab. 4.1.: Darstellung der aktiven Neigemechanismen nach ihren Einbauorten:
a) Vierecken-Mechanismus; b) Kreissegmentlagerung; c) aktiven Wankstabilisation,
Abbildungen jeweils modifiziert von [PGS09]; d) Neigekinematik oberhalb der
Sekundärfederung, modifiziert von [Eic07]

Standort des Neigemechanismus	Darstellung
<i>unterhalb</i> der Sekundärfederung	
<i>durch</i> die Sekundärfederung	
<i>oberhalb</i> der Sekundärfederung	

Bei der Neigung durch die Sekundärfederung existieren, gemäß [PGS09], zwei grundlegende Konzepte. Zum einen kann die Wankbewegung durch die Aktuierung der Luftfederbalge realisiert werden. Luft wird hierbei gezielt zwischen den Federbalgen hin- und hergeschoben, sodass sich der gewünschte Wankwinkel einstellt.

Als weitere technische Lösung stellt [DLJ94] eine aktive Wankstabilisation vor, durch die die Wankbewegung realisiert wird (siehe Tab. 4.1 c)). Der Wagenkasten stützt sich über die Sekundärfederung am Fahrgestell ab, parallel dazu greift die Wankstabilisation an und neigt den Wagenkasten durch Längenänderung der Aktoren in die gewünschte Richtung. Bei Neigekinematiken oberhalb der Sekundärfederung, wie beispielhaft in Tab. 4.1 d) dargestellt, befindet sich der Neigemechanismus zwischen Sekundärfederung und Wagenkasten. Der dargestellte Neigemechanismus auf der Basis des ETR470 löst die Neigee Aufgabe ebenfalls über einen Viergelenkmechanismus, wie dies auch beim ICE TD der DB der Fall ist. Der Momentanpol wandert somit in Abhängigkeit des Wankwinkels. Zudem erfährt die Sekundärfederung die gesteigerte laterale Beschleunigung, wodurch das Querspiel des Wagenkastens in Kurven erhöht werden würde. Dies kann, wie schon erwähnt, entweder durch eine steifere Querfederung, oder durch eine aktive Rezentriereinrichtung vermieden werden, wobei letzterer Ansatz die gängige Vorgehensweise darstellt.

Die erstellte Übersicht zeigt, wie unterschiedlich die technischen Lösungen zur Realisierung der Neigebewegung des Wagenkastens sind. Aus der Sicht der Neigekompensation des Stromabnehmers ist vor allem die Momentanpolbahn und somit die Bewegung des Fußpunktes interessant. Es wird im Folgenden von einer Neigekinematik mittels Viergelenk-Mechanismus unterhalb der Sekundärfederung ausgegangen, da diese Lösung eine weite Verbreitung gefunden hat. Bei wichtigen Ergebnissen wird im Anhang auch noch die Lösung für ein Fahrzeug mit fixem Momentanpol im Schwerpunkt berücksichtigt.

4.2 Modelliertes Neigetechnikfahrzeug

Um die Fußpunktanregung des Stromabnehmers durch die Neigung im Bogen zu ermitteln, wurde ein dreidimensionales Schienenfahrzeugmodell nach obigen Kriterien in SIMPACK aufgebaut. Das erstellte Fahrzeug ist in Abb. 4.3 skizziert.

Die Lenkerlängen und die Länge der oberen und unteren Grundseite des Trapezes der Neigekinematik wurde so gewählt, dass sich der Schwerpunkt während der Neigung des Wagenkastens nur wenig bewegt und sich in der Nulllage leicht unterhalb des Momentanpols befindet. Aufgrund der geringen Bewegung des Schwerpunktes von seiner Nulllage ergeben sich im Bogen keine ungünstigen Momentenverhältnisse, die die Sicherheit ungünstig beeinflussen könnten. Zudem bewirkt der kleine Hebelarm vom Momentanpol zum Schwerpunkt niedrige notwendige Aktorkräfte zur Neigung des Wagenkastens. Da auf keine Daten eines Neigetechnikfahrzeuges zurückgegriffen werden konnte, basieren die verwendeten Parameter auf Literaturdaten. Die Hebelarme wurden abgeschätzt durch [Lan02b], die weiteren Parameter des Fahrzeuges wurden an [Zol02] angelehnt. Die verwendeten Parameter sind in Anhang A.1 aufgelistet. Abb. 4.4 zeigt die Pendelstellungen bei 0° und -8° Auslenkung.

Der Schnittpunkt der erweiterten Lenkerachsen liefert den Momentanpol der Kinematik, welche sich in einer annähernd kreisförmigen Bahn bewegt. In Nullstellung befindet sich der Schwerpunkt dabei leicht unterhalb des Momentanpols. Der Schwerpunkt verändert seine Position während der Neigung des Wagenkastens nur geringfügig.

Durch den wandernden Momentanpol wird die Dachmitte als Referenzpunkt des Stromabnehmerflansches nicht in einem Kreisbogen nach unten geführt, wie dies bei einem starren Momentanpol der Fall wäre, sondern erfährt einen annähernd parabelförmigen Anhub (in der gewählten Konfiguration um max. ca. 15 mm).

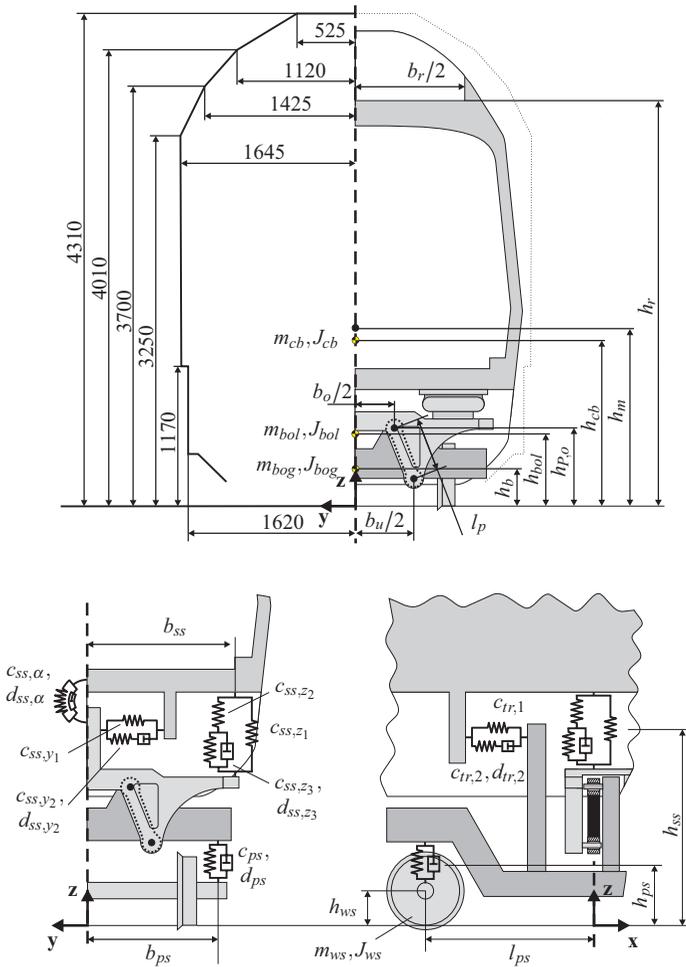


Abb. 4.3.: Eigenschaften des verwendeten Modells und Bezugslinie der kinematischen Begrenzungslinie G1 nach [EN09].

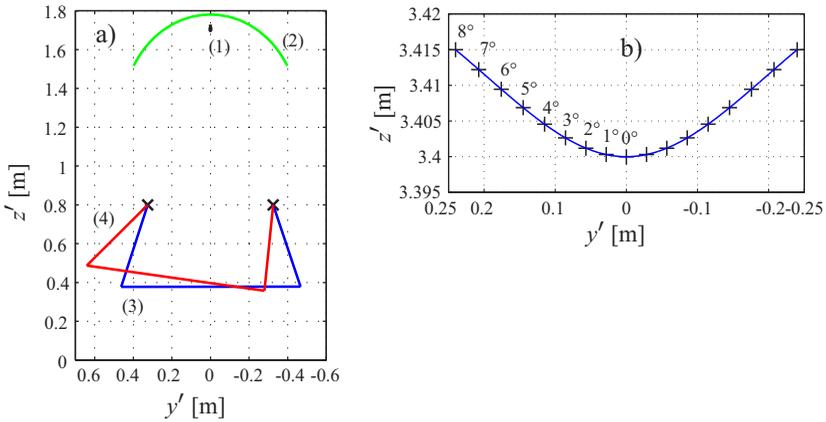


Abb. 4.4.: a) Kinematik des Viergelenks der Neigetechnik. b) Resultierende Bewegung der Dachmitte als Referenz für die Stromabnehmermontage. (1) Schwerpunktbahn; (2) Momentanpolbahn; (3) Viergelenk 0° ; (4) Viergelenk -8° .

Die Hubkurve lässt sich approximieren durch

$$z'_r(\eta) = a_0 + a_1 \eta^2 + a_2 \eta^4 \quad (4.6)$$

$$a_0 = 3400 \text{ [mm]} \quad a_1 = 985.21 \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{rad}^2} \right] \quad a_2 = -1.1185 \cdot 10^4 \left[\frac{\text{mm}^4}{\text{rad}^4} \right].$$

Daraus lassen sich wiederum für Abb. 8.6 winkelabhängige Größen von $h_d(\eta)$ und $h_w(\eta)$ ermitteln. Für die gleisbogenabhängige Neigung des Wagenkastens muss eine Reglerstruktur aufgebaut werden, die im Folgenden vorgestellt wird.

4.2.1 Regelung des Neigezuges

Um die Fußpunkterregung während der Fahrt zu untersuchen, wurde ein zwei-teiliger Zug aus gleichartigen Fahrzeugen erstellt. Die Regelung des Wagenkasten-neigewinkels wurde mit einer Struktur, basierend auf [Zol02] realisiert. Hierbei wird die laterale Querbeschleunigung auf Höhe des ersten Drehgestells des ersten Wagens skaliert als Führungsgröße des Neigewinkels an den zweiten Wagen mit einer wagenspezifischen Totzeit weitergeleitet.

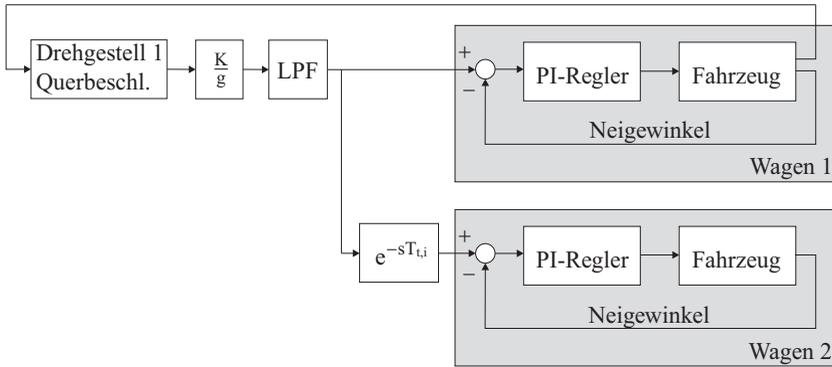


Abb. 4.5.: Prinzipielle Struktur der realisierten Regelung nach [Zol02].

Aus dem lateralen Anteil von (4.3) ergibt sich mit einer Linearisierung um die Nulllage ($\delta = 0, \eta$ klein)

$$a_{y''} = a_{y'} \cdot \cos \eta + a_{z'} \cdot \sin \eta \approx a_{y'} - g \eta \quad (4.7)$$

Mit der Skalierung der gemessenen Querbeschleunigung im gleisfesten Koordinatensystem $a_{y'}$ kann durch $\eta = \frac{K}{g} a_{y'}$ die resultierende Kompensation der Querbeschleunigung im wagenkastenfesten Koordinatensystem $a_{y''}$ beeinflusst werden:

$$a_{y''} \approx a_{y'} (1 - K). \quad (4.8)$$

Von einer vollständigen Kompensation der Querbeschleunigung ist man aufgrund der Motion Sickness, die einige Passagiere durch die Neigung des Wagenkastens erfahren, abgerückt. Werte des Kompensationsfaktors liegen etwa im Bereich von 55 – 70% [FAL98]. Im Folgenden wird von einer Kompensation von $K = 0.75$ bei einem Bogenradius von 900m, einer Überhöhung von 0.1m und einem klothoidalen Übergangsbogen mit einer Länge von 50 bzw. 100m ausgegangen.

Um für die Regelung den Frequenzinhalt des Signals zu reduzieren, wird die gemessene Querbeschleunigung mit einem Tiefpassfilter (LPF) einer Grenzfrequenz von 0.5Hz gefiltert. Die notwendige Totzeit für den i -ten Wagenkasten wird errechnet aus

$$T_{t,i} = T_{cb,i} - \sum_j T_{u,j}, \quad (4.9)$$

der Differenz des geschwindigkeitsabhängigen zeitlichen Abstandes des i -ten Wagenkastens zum Referenzwagenkasten $T_{cb,i}$ und der durch die System- und Filtereigenschaften induzierten Verzugszeiten $T_{u,j}$ des Signals und ggf. Regelstrategien hinsichtlich der Reduzierung des Motion-Sickness-Effektes. Die geometrische induzierte Totzeit wird berechnet aus

$$t = \int \frac{1}{v(s)} ds. \quad (4.10)$$

Bei dem hier betrachteten konstanten Geschwindigkeitsprofil wird die notwendige Zeit zum Zurücklegen der Distanz s reduziert auf $t = s/v$.

Die stationäre Genauigkeit des Führungsverhaltens wird durch ein PI-Glied realisiert, dessen Parameter empirisch ausgelegt wurden. Das damit erzielte Führungsverhalten ist in Abb. 4.6 und 4.7 dargestellt. Als Stellelement für die Neigung dient ein Aktor, dessen dynamisches Verhalten allerdings nicht modelliert wurde und somit ein idealisiertes Einheits-Übertragungsverhalten besitzt. Die Beschriftung der Abszisse im Bereich von -590m bis 701m stellt die Lage der Stützpunkte der Oberleitung im weiteren Verlauf der Arbeit dar. Die erstellte Regelstruktur liefert für das betrachtete Führungsverhalten für eine Strecke ohne Gleislagefehler eine hinreichende Qualität, sodass dieser Abschnitt hiermit abgeschlossen ist. Aus der simulierten Bogenfahrt lässt sich nun die Fußpunktbewegung der Stromabnehmermontagepunkte von Wagens 2 aus Abb. 4.5 ermitteln. Hierfür wurden die Punkte über dem ersten und dem zweiten Drehgestell betrachtet.

Im Vergleich zur statischen Betrachtung nach Abb. 4.4 ergibt sich in Abb. 4.8 eine Verschiebung der Kurve in Richtung kleinerer lateraler Auslenkun-

gen, was sich über die am Wagenkasten angreifenden Fliehkräfte erklären lässt. Für den kürzeren Übergangsbogen ergeben sich geringfügig niedrigere Abweichung von der kinematischen Bahnkurve. Für die weitere Arbeit wird die Anregung durch die Simulationsfahrt mit einem Übergangsbogen von 100m verwendet.

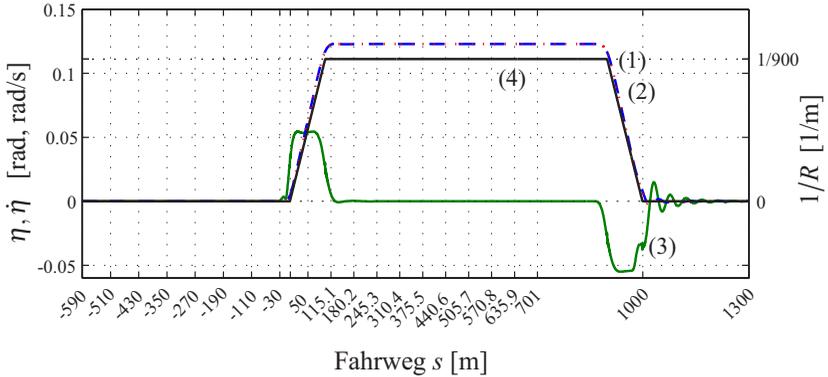


Abb. 4.6.: Führungsgröße (1, blau), Regelgröße Wagenkastenneigewinkel zur SOK (2, rot), Rollgeschwindigkeit (3, grün) und Gleiskrümmung (4, schwarz) als beispielhaftes Ergebnis der Regelung einer Bogenein- und -ausfahrt mit einem Übergangsbogen von 100m Länge ohne Gleislagefehler bei einer konstanten Geschwindigkeit von 160km/h.

4. Modellierung des Neigetechnikfahrzeuges

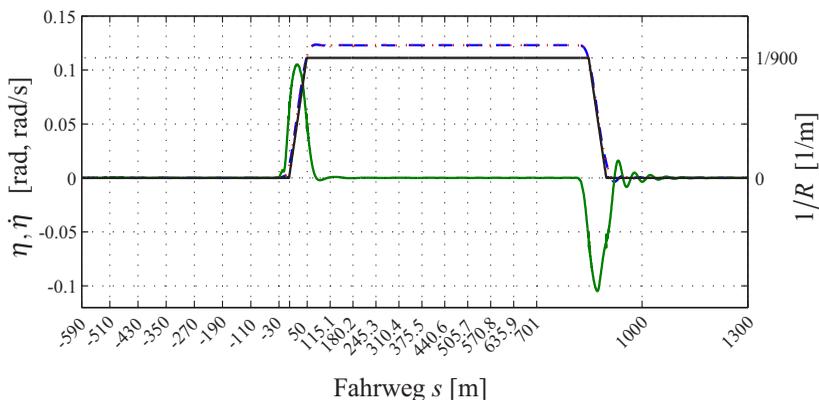


Abb. 4.7.: Führungsgröße (1, blau), Regelgröße Wagenkasten­neigewinkel zur SOK (2, rot), Rollgeschwindigkeit (3, grün) und Gleiskrümmung (4, schwarz) als beispielhaftes Ergebnis der Regelung einer Bogenein- und -ausfahrt mit einem Übergangsbogen von 50 m Länge ohne Gleislagefehler bei einer konstanten Geschwindigkeit von 160 km/h.

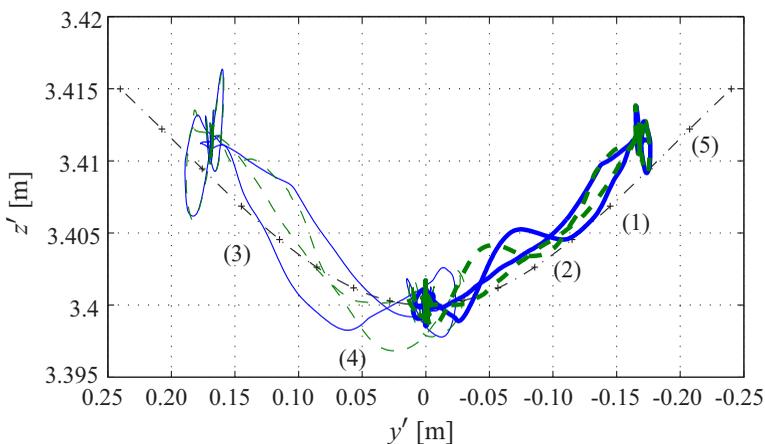


Abb. 4.8.: Bahn des Stromabnehmerfußpunktes oberhalb des ersten Drehgestells (1) und zweiten Drehgestells (2) von Wagen 2 bei einer maximalen Rollgeschwindigkeit von ca. $0.054 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ und (3), (4) bei einer maximalen Rollgeschwindigkeit von ca. $0.1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ und an der Ordinate gespiegelten Werten. Vergleichend hierzu die kinematische Betrachtung der Fußpunktbewegung (5) aus Abb. 4.4.

5 Modellierung des Stromabnehmers

5.1 Historische Entwicklung

Die Energieversorgung elektrische Schienenfahrzeuge über Stromabnehmer geht bis in das späte 19. Jahrhundert zurück [Ste06]. Das grundlegende Prinzip ist dabei das selbe geblieben: Ein Stromabnehmer steht im mechanischen Kontakt mit einer zum Gleisniveau potentialbehafteten Oberleitung und schließt über die Gleise (oder andere Rückleitungen) den elektrischen Kreis.

Auf der Seite der Stromabnehmer hat es im Laufe der Verwendung diverse Weiterentwicklungen gegeben, die vor allem bedingt durch die steigenden Anforderungen an die Stromabnehmer notwendig wurden. Abb. 5.1 versucht die zeitliche Entwicklung qualitativ darzustellen. Der Stangenstromabnehmer auf der linken Seite der Abbildung, bei dem der Fahrdrabt in einer Rolle geführt wird, war nach [Ste06] die erste „funktionsfähige Lösung“ der mechanischen Stromabnahme.

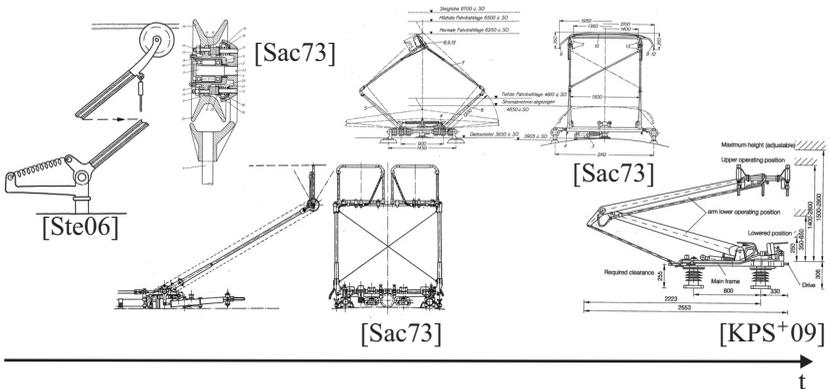


Abb. 5.1.: Qualitative grafische Darstellung der Evolution der mechanischen Stromabnahme an Oberleitungen durch Stromabnehmer.

Um die Wahrscheinlichkeit des „Entgleisen“ des Fahrdrabtes von der Rolle zu verringern, ist der Fahrdrabt möglichst knickfrei zu verlegen.

Der nächste Technologiesprung wurde durch die Lyra- oder Bügelstromabnehmer eingeläutet. Die Zwangsbedingung der lateralen Führung des Fahrdrabtes in der Rolle wurde durch einen Bügel, an dem sich der Fahrdrabt lateral frei bewegen kann, obsolet. Das Problem des „Engleisens“ konnte so behoben werden.

Die Richtungsunabhängigkeit und bessere dynamische Eigenschaften wurde durch die Entwicklung des Scherenstromabnehmer erreicht, wie in der Mitte oben dargestellt. Die Lagerung der Schleifstücke an der Hubeinheit wurde entweder fest, mittels vertikaler Federung oder mit drehbar gefederten Wippen realisiert [Sac73].

Die stetig gestiegenen Geschwindigkeiten brachten das Konzept an seine Grenzen, sodass die Masse und damit die dynamischen Eigenschaften für den Einsatz im Hochgeschwindigkeitsbereich angepasst werden musste. Aus dieser Anpassung entstammt der Halbscheren- oder Einholmstromabnehmer (rechts). Die symmetrische Hubkinematik wurde quasi halbiert und durch eine asymmetrische Version mit ähnlichen Anhubeingenschaften ersetzt. Im breiten Einsatz stellt diese Lösungen aktuell den Stand der Technik dar und wird auch weltweit in dieser Form eingesetzt.

Möchte man einen Blick in die Zukunft wagen, sind sicherlich aktiv geregelte Stromabnehmer auf Basis der Einholmstromabnehmer - falls das Kosten-Nutzen-Verhältnis dies zulässt - ein möglicher Ersatz bzw. Ergänzung zum heutigen Stand. Die DB hat in diesem Zusammenhang in Zusammenarbeit mit der Industrie den geregelten Stromabnehmer „ASP“ [BKK05] entwickelt, der auch in ein verkaufsfähiges Produkt [Str08] mündete. Die Regelung ist hierbei zweistufig ausgeführt: Der ventilgesteuerte Federbalg zum Anheben des Stromabnehmers erzeugt mit der gemessenen Kontaktkraft den ersten Regelkreis, welcher im Stande ist, Kraftänderungen im Bereich bis 0.5 Hz zu regeln. Die federnde Lagerung der Wippe des Stromabnehmer ist zudem mit pneumatischen Aktoren ausgestattet, wodurch Kontaktkräfte bis 10 Hz geregelt werden können. Durch diese Maßnahmen ist es möglich, die Standard-

abweichung der Kontaktkräfte um bis zu 20% im Vergleich zu einem rein passiven Hochgeschwindigkeits-Stromabnehmer vom Typ DSA350SEK bei gleicher Geschwindigkeit von 200 km/h zu reduzieren [BKK05], oder aber die zulässige Geschwindigkeit bei dieser Kombination aus Oberleitung und Stromabnehmer zu erhöhen. Letzterer Ansatz ist sicherlich im Hinblick auf die hohen Investitionskosten für den Oberleitungsneubau eine interessante Erweiterung der Möglichkeiten.

Inventionen im Bereich der konstruktiven Ausführung der Stromabnehmer wurden in [Vei01] andiskutiert, in dieser Arbeit wird daher auf einer abstrakten Ebene gearbeitet, sodass die Ansätze unabhängig von der konstruktiven Ausgestaltung sind.

5.2 Aufbau des Einholmstromabnehmers

Es gibt unterschiedliche Bauweisen des Einholmstromabnehmers (siehe Abb. 5.2). Die in Europa vielleicht gängigste Variante realisiert den Anhub über ein Viergelenk-Koppelgetriebe, welches so auf der rechten Seite abgebildet ist. Der Stromabnehmer auf der linken Seite führt den Anhub des Oberarms dagegen durch eine Kette im Inneren des Unterarms durch, welche mit dem Oberarm verbunden ist.

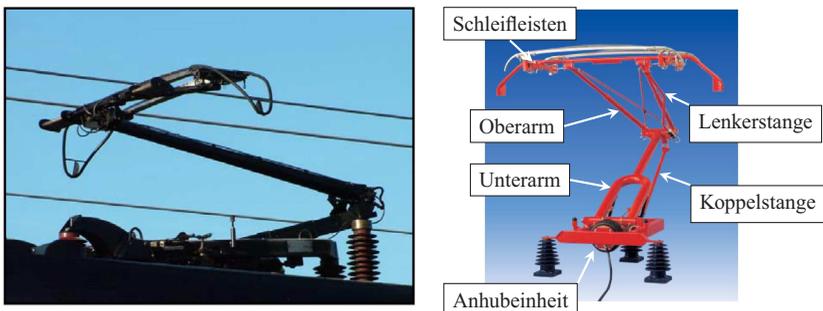


Abb. 5.2.: Brecknell Willis Stromabnehmer (links) [KPC08] und Schunk Stromabnehmer WBL (rechts), um Beschriftungen erweitert [Sch00].

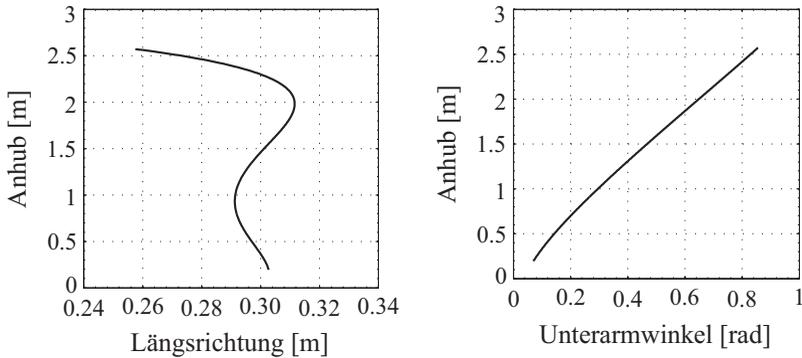


Abb. 5.3.: Hubkurve des Scheitelrohrs.

Die horizontale Ausrichtung der Schleifleisten erfolgt bei beiden Systemen über eine Lenker- oder Führungsstange. Das Koppelgetriebe realisiert eine nahezu rein vertikale Bewegung der Schleifleisten. Beispielhaft ist dies für das in dieser Arbeit verwendete Modell in Abb. 5.3 dargestellt. Dies ist insofern wichtig, da die Positionierung des Stromabnehmers in Längsrichtung auf dem Schienenfahrzeug auch von der geometrischen lateralen Ausragung des Wagenkastens im Gleisbogen bestimmt wird.

Stromabnehmer besitzen meist zwei Schleifleisten, die entweder direkt verbunden (siehe Abb. 5.2, links) sind oder - insbesondere im Hochgeschwindigkeitsbereich - unabhängig gefedert und dann über einen Rahmen verbunden werden (siehe Abb. 5.2, rechts). Durch die unabhängige elastische Lagerung werden die ungefederten Massen reduziert, was das dynamische Verhalten der Schleifleisten verbessert. Egal, ob die Schleifleisten direkt, oder nach der Federung verbunden werden, der verbindende Rahmen besitzt stets einen Nick-Freiheitsgrad im Längsrichtung des Stromabnehmer. Diese Wippenkonstruktion führt dazu, dass wenn eine Schleifleiste aufgrund eines Kontaktkraft-Peaks nach unten gedrückt wird, die andere Schleifleiste über das entstehende Drehmoment entsprechend stärker an die Oberleitung angepresst wird. Als Resultat davon steigt die Kontaktqualität und die unerwünschte Lichtbogenbildung wird reduziert.

5.3 Modellierung und dynamische Eigenschaften

Stromabnehmer besitzen Nichtlinearitäten aus der Geometrie und den physikalischen Eigenschaften der verbauten Komponenten. Nichtsdestotrotz wurden in der Vergangenheit häufig lineare Modelle verwendet, die über Mehrmassen-Modelle aufgebaut wurden. Dieser Abschnitt stellt im ersten Schritt den Aufbau der Mehrmassen-Modelle vor und leitet anhand dieser Modelle relevante dynamische Eigenschaften von Stromabnehmern ab. Der zweite Teil dieses Abschnittes befasst sich mit der gewählten Modellierung des in dieser Arbeit verwendeten und in SIMPACK implementierten Modells.

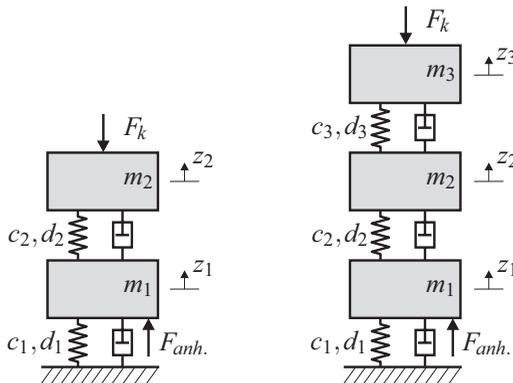


Abb. 5.4.: Zwei- und Dreimassenmodell eines Stromabnehmers.

Die Dynamik eines linearen Modells lässt sich über die Bewegungsgleichung

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{z}} + \mathbf{C}\mathbf{z} = \mathbf{f} \quad (5.1)$$

mit der Massenmatrix $\mathbf{M} = \text{diag}(m_1, \dots, m_n)$ und den Tridiagonalmatrizen der Steifigkeit und Dämpfung, die sich für $n \geq 2$ aus der Addition der Matrizen

$$\begin{aligned}
 \mathbf{C}_1 &= \text{diag}(d_1, \dots, d_n) \\
 \mathbf{C}_2 : C_{i+1,i} &= C_{i,i+1} = -d_{i+1} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n-1 \\
 \mathbf{C}_3 : C_{i,i} &= c_{i+1} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n-1 \\
 \mathbf{C} &= \sum_{j=1}^3 \mathbf{C}_j \tag{5.2}
 \end{aligned}$$

bzw.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{D}_1 &= \text{diag}(d_1, \dots, d_n) \\
 \mathbf{D}_2 : D_{i+1,i} &= D_{i,i+1} = -d_{i+1} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n-1 \\
 \mathbf{D}_3 : D_{i,i} &= d_{i+1} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n-1 \\
 \mathbf{D} &= \sum_{j=1}^3 \mathbf{D}_j \tag{5.3}
 \end{aligned}$$

berechnen lassen. Die rechte Seite kann durch

$$\mathbf{f} = [F_{anh}, 0, \dots, 0, -F_k]^T \tag{5.4}$$

bestimmt werden.

Im Falle des Zweimassenmodells aus Abb. 5.4 ergibt sich das Gleichungssystem zu

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 + d_2 & -d_2 \\ -d_2 & d_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{anh} \\ -F_k \end{bmatrix}. \tag{5.5}$$

Die Eigenwerte λ_i eines solchen gedämpften Systems lassen sich mit dem Exponentialansatz $\mathbf{z} = \hat{\mathbf{z}}e^{\lambda t}$ über die Determinante

$$\det(\mathbf{M}\lambda^2 + \lambda\mathbf{D} + \mathbf{C}) = 0 \quad (5.6)$$

eindeutig lösen.

Die DIN EN 50318 definiert eine Vorgehensweise zur Validierung von Simulationsmethoden der Stromabnehmer-Oberleitung-Interaktion, auf die im späteren Verlauf der Arbeit zugegriffen wird. Hierzu wird auch als Referenz ein Stromabnehmermodell definiert, dessen Parameter in Tab. A.2 des Anhangs aufgeführt werden.

Die Eigenwerte des Modells errechnen sich zu

$$\lambda_1 = -0.66 \quad (5.7)$$

$$\lambda_2 = -3.42 \quad (5.8)$$

$$\lambda_{3,4} = -1.99 \pm 29.20i. \quad (5.9)$$

Die dynamischen Eigenschaften eines Stromabnehmers werden häufig über die Scheinmasse, also die inverse Verstärkungsfunktion der Vertikalbeschleunigung der Schleifleistenmasse ($i = n$) aufgrund einer harmonischen Kraftanregung selbiger beschrieben. Hierfür wird die Laplace-Transformation von (5.1) für unausgelenkte und ruhende Massen ($\dot{\mathbf{z}}(0) = \mathbf{z}(0) = \mathbf{0}$)

$$s^2\mathbf{M}\mathbf{z}(s) + s\mathbf{D}\mathbf{z}(s) + \mathbf{C}\mathbf{z}(s) = \mathbf{F}(s) \quad (5.10)$$

in allgemeiner Form aufgestellt.

Aufgrund der Ruhelage verschwindet auch die statische Anhubkraft F_{stat} , sodass im Falle des Zweimassenmodells die Übertragungsfunktion

$$\frac{F_k(s)}{z_{pp,2}(s)} = \frac{F_k(s)}{s^2 z_2(s)} = \frac{As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + c_1 c_2}{m_1 s^4 + (d_1 + d_2)s^3 + (c_1 + c_2)s^2} \quad (5.11)$$

$$A = m_1 m_2 \qquad B = m_1 d_2 + (d_1 + d_2)m_2$$

$$C = m_1 c_2 + d_1 d_2 + (c_1 + c_2)m_2 \quad D = d_1 c_2 + c_1 d_2$$

aufgestellt wird. Die Verstärkungsfunktion und damit der Scheinmassenverlauf kann entsprechend durch

$$G_{SM}(\omega) = \left| \frac{F_k(j\omega)}{z_{pp,n}(j\omega)} \right| \quad (5.12)$$

ermittelt werden.

Der so ermittelte Frequenzgang ist für das hier verwendete Beispiel in Abb. 5.5 unter (3) dargestellt. Der schwingungsfähige Eigenwert aus (5.9) bei 4.65 Hz liegt beim Minimum der Scheinmasse, durch Nullsetzung des Dividenden der Übertragungsfunktion $\frac{z_n(s)}{F_k(s)}$ können entsprechende Tilgerfrequenzen ermittelt werden. Für das verwendete Beispiel des Zweimassenmodells liegt diese bei 2.6 Hz.

Abb. 5.5 zeigt die Scheinmassen unterschiedlicher Zwei- und Dreimassenmodelle und vergleichend dazu Messungen aus der Literatur.

Erkennbar ist, dass die einfachen Modelle die grundlegende Dynamik im Vergleich zum gemessenen Modell relativ gut abbilden, falls die Scheinmassen des Stromabnehmers einen „einfachen“ Verlauf besitzt. Dies ist beispielsweise beim DSA350S der Fall. Hingegen sind die Verläufe des Modells für den SBS 65 doch recht stark abweichend zu den gemessenen Werten.

Die zu bestimmenden Parameter des linearen Mehrmassen-Modells besitzen bis auf die Schleifleistenfederung keinen direkten Zusammenhang zu den Parametern des Stromabnehmers. Vielmehr müssen die Parameter auf Basis der dynamischen Eigenschaften des Modells berechnet werden.

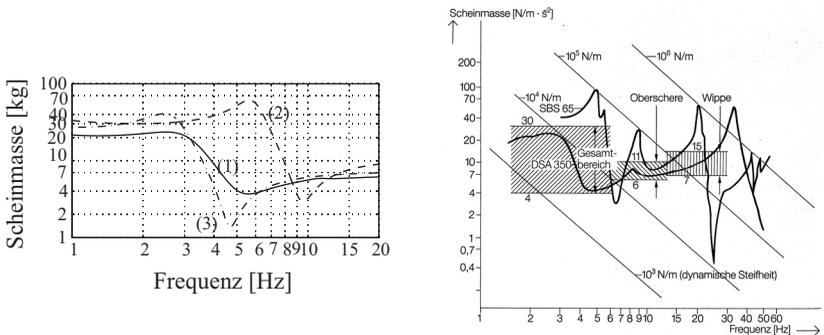


Abb. 5.5.: Scheinmassenverläufe (links): DSA350S 3-Massen-Modell (1) [Pet96]; SBS 65 3-Massen-Modell (2) [LN85]; EN 50318 2-Massen-Modell (3). Scheinmassenverläufe (rechts): Gemessene Verläufe aus [HKS88] für den DSA350 und SBS65.

Die Linearität der Modelle führt dazu, dass sie nur mit einem bestimmten Bereich des realen Systems gut übereinstimmen. Andere Werte, etwa der statischen Kontaktkraft und somit Einfederung der progressiven Schleifleistenfederung oder unterschiedlichen Arbeitshöhen der nichtlinearen Hubkinematik, führen zu veränderten Linearisierungspunkten und somit zu veränderten Parametern des Modells.

Durch den Einsatz von Mehrkörpersimulationstools ist es heutzutage möglich, komplexe nichtlineare Modelle einfach und komfortabel aufzubauen und numerisch zu lösen. Hierdurch kann die nichtlineare Struktur des Stromabnehmers ohne große Abstriche modelliert werden. Im Folgenden wurde daher ein Modell eines nichtlinearen Einholmstromabnehmer im MKS-System SIMPACK aufgebaut. Das Modell besteht aus insgesamt 8 starren Körpern, die in der verwendeten Modellierung zusammen fünf Freiheitsgrade besitzen. Die Körper des Modells sind:

1. Koppelstange
2. Unterarm
3. Oberarm - unterer Teil
4. Oberarm - oberer Teil

5. Lenkerstange
6. Wippe
7. Schleifleistenpaket
8. relevante Teil der Anhubeinheit.

Die fünf unabhängigen Freiheitsgrade des Modells sind:

- Unterarmrotation,
- Rotation des oberen Teils des Oberarms um die Lagerstelle,
- Rollen der Schleifleisten,
- Vertikale Bewegung der Schleifleisten,
- Laterale Bewegung der Schleifleisten.

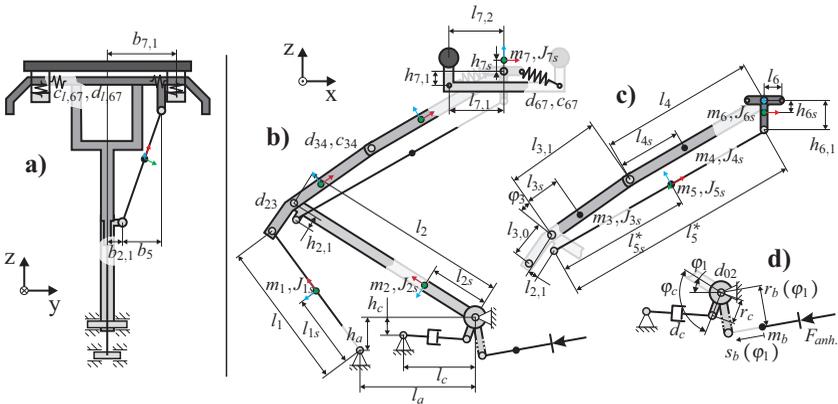


Abb. 5.6.: Parameter des verwendeten Stromabnehmermodells, angelehnt an [Pet96].
 a) Vorderansicht; b) Seitenansicht; c) Detail Oberarm; d) Detail Unterarmlagerung.
 Lokale Koordinatensysteme für die Massenträgheitsmomente um den Schwerpunkt
 (rot = lokale x' -Achse, grün = lokale y' -Achse, blau = lokale z' -Achse).

Eine Skizze des verwendeten Modell ist Abb. 5.6 zu entnehmen. Der Oberarm wurde, um die erste Biegemode des Oberarm zu modellieren, in zwei Teile geteilt. Anhand einer FE-Berechnung des Oberarms wurde die 1.Biegemode des

Oberarms ohne die Massen der Wippe bei einer Frequenz von 18 Hz identifiziert. Analog zu [Pet96] kann durch Forderung gleicher Verschiebungen und Verdrehungen des Scheitelrohres die Länge des oberen Oberarmkörpers und die rotatorische Federsteifigkeit bestimmt werden. Tab. 5.1 listet die ermittelten Werte auf. Es wurden hierzu vier unterschiedliche Kraftbeträge verwendet um eine Mittelwertbildung durchführen zu können.

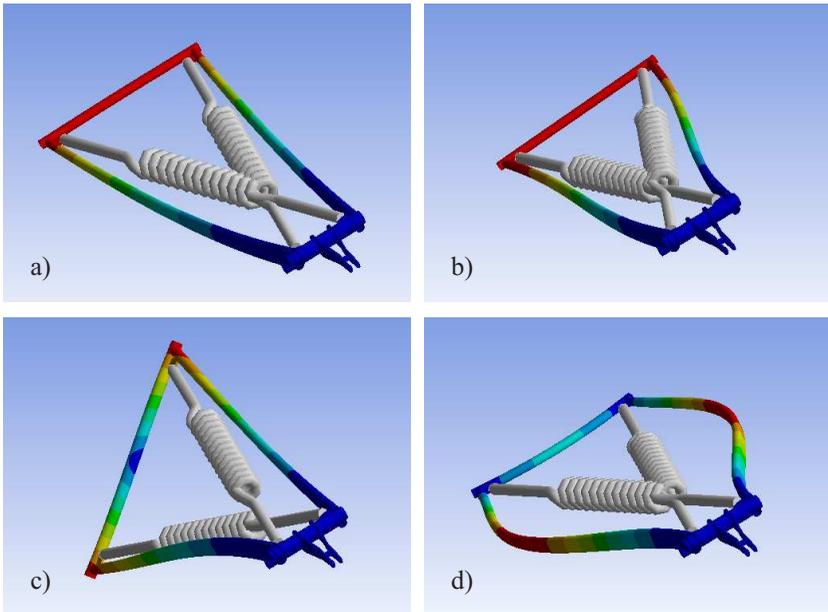


Abb. 5.7.: Moden des Oberarms aus ANSYS: a) 1. Mode bei 18 Hz: Vertikalbiegung; b) 2. Mode bei 24.7 Hz: Lateralbiegung; c) 3. Mode bei 35.3 Hz: Torsionsmode; d) 4. Mode bei 56.8 Hz: Lateralbiegung.

Die finale Länge des oberen Oberarms wurde aus dem arithmetischen Mittel der ersten drei Werte berechnet und zu $l_4 = 0.976$ m gesetzt. Die Federsteifigkeit wurde aus dem arithmetischen Mittel der vier Werte gebildet zu $c_{34} = 24426 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$. Die Masse von Körper 4 wurde in die Mitte des Körper gelegt $l_{4s} = l_4/2$ und mit der statischen Verschiebung aufgrund der Gravitationseinwirkung mit der FE-Approximation von 0.83 mm auf den Oberarm bestimmt zu $m_4 = 4.357$ kg.

5. Modellierung des Stromabnehmers

Tab. 5.1.: Mittels FE ermittelte Verschiebungen und Verdrehungen des Oberarms am Scheitelrohr bei variiert vertikaler Krafteinwirkung und daraus berechnete Größen der Oberarmlänge und der Federsteifigkeit.

Kraft [N]	100	300	500	1000
Verschiebung [mm]	3.85	11.71	19.57	39.33
Verdrehung [deg]	0.23	0.69	1.15	2.38
Länge l_4 [m]	0.974	0.976	0.977	0.947
Federsteifigkeit c_{34} [Nm/rad]	24741	24402	24336	24223

Die restlichen dynamischen Parameter des Oberarms wurden unter der Prämisse identischer Masse und dynamischer Eigenschaft des Modells mit dem realen Oberarm bestimmt. Die verwendeten Parameter des Modells sind komplett in Anhang A.3 aufgelistet.

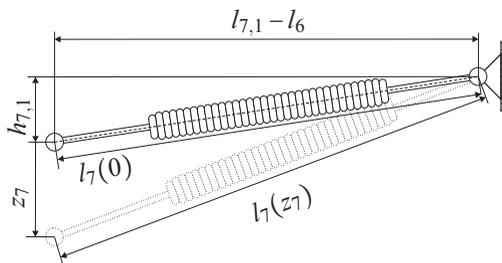


Abb. 5.8.: Detail der Schleifleistenfederung.

Ein weiterer interessanter Aspekt des Stromabnehmers ist die Federung der Schleifleisten an der Wippe. Hierbei wird eine progressive Kennlinie der Federsteifigkeit durch die Kinematik der Lagerstellen realisiert. Abb. 5.8 zeigt die federnde Lagerung der Schleifleisten an der Wippe.

Aus der Längenänderung und der Ausrichtung der Feder zur Horizontalen erfolgt die progressive Versteifung.

Die Längenänderung aufgrund einer Bewegung in z_7 -Richtung ergibt sich zu

$$l_7(z_7) = \sqrt{(l_{7,1} - l_6)^2 + (z_7 + h_{7,1})^2} \quad (5.13)$$

$$\Delta l_7(z_7) = l_7(z_7) - l_7(0). \quad (5.14)$$

Durch das Einführen der Übersetzung

$$i(z_7) = \frac{d}{dz_7} l_7(z_7) = \frac{z_7 + h_{7,1}}{l_7(z_7)}, \quad (5.15)$$

kann die vertikale Gesamtfederkraft der vier Federn und somit die Steifigkeit selbiger ermittelt werden:

$$F_z(z_7) = 4 \{ F_{l_7}(0) + c_{67} \Delta l_7(z) \} i(z_7) \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned} c_z(z_7) &= \frac{d}{dz_7} F_z(z_7) \\ &= \frac{4}{l_7(z)} \left\{ c_{67} i(z_7) (z_7 + h_{7,1}) + F_l(0) + c_{67} \Delta l(z_7) \right. \\ &\quad \left. - [F_l(0) + c_{67} \Delta l(z_7)] (i(z_7))^2 \right\}. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Analog dazu kann auch der vertikale Dämpfungskoeffizient

$$d_z(z_7) = 4i^2(z_7) d_{67} \quad (5.18)$$

bestimmt werden. Mit den gewählten Parametern ergeben sich die in Abb. 5.10 dargestellten parabolischen Verläufe der Federung und Dämpfung.

Der Hebelarm $r_b(\varphi_1)$ des Kraftangriffspunktes wurde so berechnet, dass der Stromabnehmer unter einer statischen Anpresskraft von 70 N und der entgegenwirkenden Anhubkraft $F_{anh.} = 11500 \text{ N}$ unabhängig vom Unterarmwinkel im Gleichgewicht zueinander steht. Abb. 5.9 zeigt die resultierende Hebelarmkurve in Abhängigkeit des Unterarmwinkels. Es wurde zudem ein relevanter Teil der Anhubeinheit m_b eingearbeitet, um auch diesen im dynamischen System abzubilden. In SIMPACK wurde hierfür $s_b(\varphi_1)$ eingearbeitet.

Die Dynamik der Anhubeinheit wurde hierbei allerdings als idealisiert betrachtet. [Pet96] hat eine zusätzliche Steifigkeit eingefügt, um die Kompression der Luft beim Niederdrücken des Stromabnehmer zu modellieren. [Vei01] hat den Luftbalg physikalisch modelliert um diesen Effekt genauer zu implementieren.

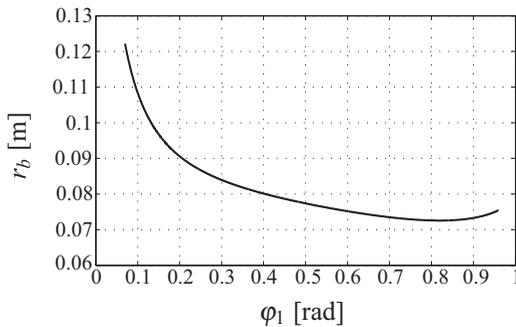


Abb. 5.9.: Hebelarm r_b der Anhubeinheit in Abhängigkeit des Unterarmwinkels φ_1 .

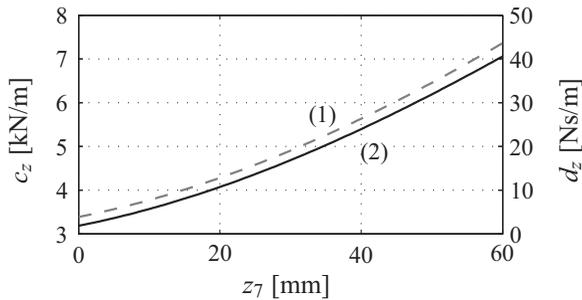


Abb. 5.10.: Resultierende vertikale Dämpfung (1) und Steifigkeit (2) der Schleifleisten aufgrund der Geometrie.

Stromabnehmer sind durch ihre exponierte Lage und die hohen Geschwindigkeiten aerodynamischen Effekten ausgesetzt. Hierbei erfährt der Stromabnehmer einen zusätzlichen Auftrieb, der zur Steigerung der Kontaktkraft führt. Für den Stromabnehmer wurde der aerodynamische Aufschlag angenommen als

$$F_{auftr.} = 0.0125712 \left[\frac{\text{Ns}^2}{\text{m}^2} \right] v^2. \quad (5.19)$$

Es entsteht somit bei $v = 160 \text{ km/h}$ ein aerodynamischer Kontaktkraftanteil von $F_{auftr.} = 24.83 \text{ N}$ und bei $v = 200 \text{ km/h}$ einen Aufschlag von $F_{auftr.} = 38.8 \text{ N}$. Die Kräfte werden direkt auf das Scheitelrohr aufgeprägt.

Für ein nichtlineares System kann keine analytische Lösung des Übertragungsverhalten für die Bestimmung der Scheinmasse aufgestellt werden. Es wird daher der Quotient aus Kraftamplitude der Schleifleistenanregung und der Beschleunigungsamplitude der Schleifleistenmasse über der Anregungsfrequenz dargestellt. Der Scheinmassenverlauf des erstellten Modells wurde numerisch mit SIMPACK erzeugt, das Ergebnis hiervon ist in Abb. 5.11 dargestellt.

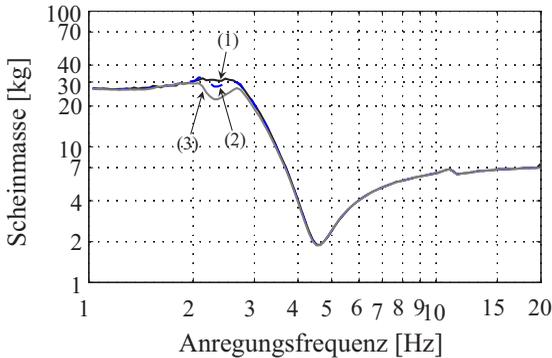


Abb. 5.11.: Scheinmassenverlauf des verwendeten Stromabnehmermodells bei unterschiedlichen Kraftamplituden: (1) $\hat{f}_k = 10\text{ N}$, (2) $\hat{f}_k = 20\text{ N}$, (3) $\hat{f}_k = 40\text{ N}$.

Hierbei wurden Anregeamplituden von 10 N, 20 N und 40 N gewählt. Für die unterschiedlichen Kräfte gibt es im Bereich der Tilgung bei 2 – 3 Hz unterschiedliche Verläufe. Ansonsten ist der Verlauf im Bereich bis 20 Hz unabhängig von der Kraftamplitude. Der niederfrequente Bereich wird hierbei dominiert von dem nicht schwingungsfähigen Rahmeneigenwerten. Bei steigender Frequenz sinkt der Widerstand gegen die Bewegung durch die Eigenwerte der Schleifleisteneinfederung. Diese liegt im Bereich von etwa 4.7 Hz. Oberhalb kommen die Eigenwerte der Oberarmbewegung, bei einer Frequenz von ca. 11 Hz, zur Geltung. Die Werte wurden ermittelt bei einer statischen Kontaktkraft von 70 N und einem Unterarmwinkel von $\varphi_1 = 0.5\text{ rad}$, was einer Scheitelrohrhöhe von 1.58 m entspricht. Abb. 5.12 zeigt die aus einer Linearisierung um die jeweiligen Arbeitspunkte ermittelten Eigenwerte bei variierten Werten des Unterarmwinkels und der Schleifleisteneinfederung. Insbesondere die Oberarmeigenfrequenz reagiert sensitiv auf die Arbeitshöhe. Die Eigenwerte

der Schleifleistenfederung werden hingegen durch unterschiedliche Eintauchtiefen nicht sonderlich verändert. Das hiermit definierte Stromabnehmermodell wird als Referenz für die weitere Untersuchung verwendet.

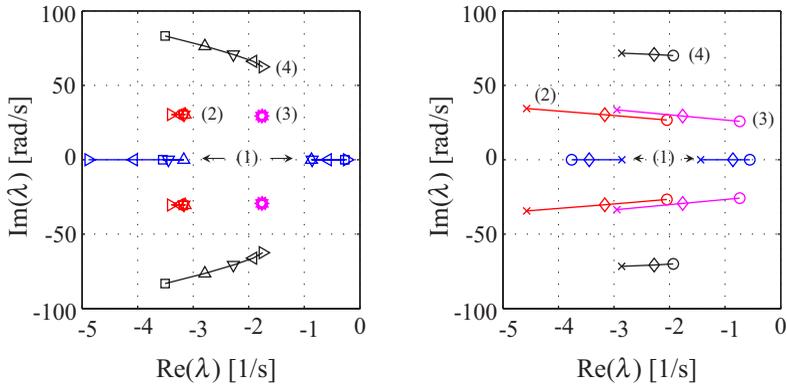


Abb. 5.12.: Verlauf relevanter Eigenwerte für die Vertikaldynamik ((1): Rahmen; (2): Einfedern der Schleifleisten; (4): Rollen der SL; (3): Oberarmbiegung) in Abhängigkeit des Unterarmwinkels und der Schleifleisteneinfederung (\square : $\varphi_1 = 0.3 \text{ rad}$; \triangle : $\varphi_1 = 0.4 \text{ rad}$; ∇ : $\varphi_1 = 0.5 \text{ rad}$; \triangleleft : $\varphi_1 = 0.6 \text{ rad}$; \triangleright : $\varphi_1 = 0.7 \text{ rad}$; \diamond : $z_7 = 0.01 \text{ m}$; \circ : $z_7 = 0.03 \text{ m}$; \times : $z_7 = 0.05 \text{ m}$).

6 Modellierung der Infrastruktur

Die Entwicklung der elektrischen Infrastruktur hat unterschiedliche Lösungsansätze hervorgebracht, die sich gemäß Abb. 6.1 grob in Oberleitungen und Stromschienen einteilen lassen.

Im Hauptbahnbereich, in dem sich auch diese Arbeit bewegt, werden Kettenoberleitungen eingesetzt, die aus einem Kettenwerk gespannter Seile und Drähte unterschiedlicher Materialien und Querschnitte besteht.

6.1 Allgemeiner Aufbau von Kettenoberleitungen

Grundsätzlich besteht ein solche Kettenoberleitung aus

- Tragseil,
- Fahrdraht,
- Stützpunkte zur lateralen und vertikalen Lagerung der Oberleitung,
- Hänger zwischen Fahrdraht und Tragseil,
- ggf. Y-Beseilen und
- Klemmelemente zur Verbindung.

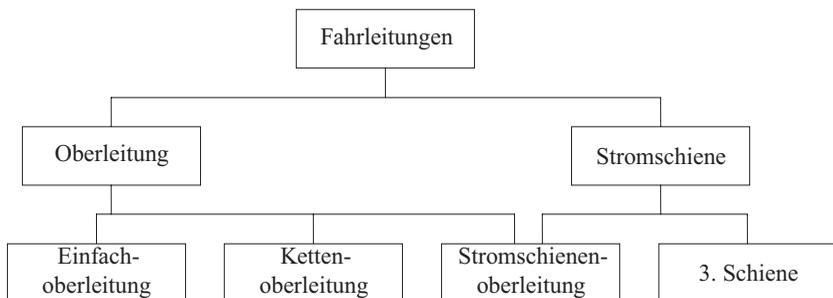


Abb. 6.1.: Gliederung der Fahrleitungsarten nach [Fen07].

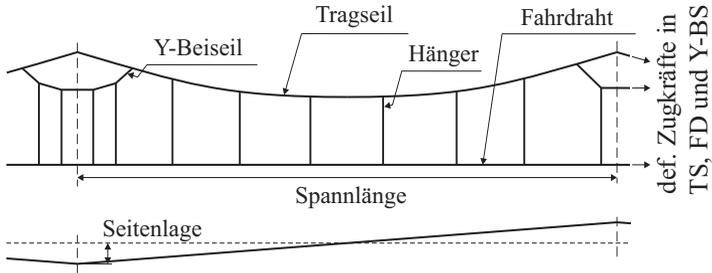


Abb. 6.2.: Beispielhafter Oberleitungsaufbau.

Abb. 6.2 zeigt beispielhaft den Aufbau einer Kettenoberleitung mit asymmetrischen Y-Beiseilen. Fahrdraht und Tragseil des Kettenwerks werden an den Enden jeweils über Gewichte an sogenannten Radspannern nachgespannt, so dass eine definierte Zugkraft vorhanden ist.

Im direkten Kontakt mit dem Stromabnehmer steht der Fahrdraht. Er besteht aus Kupfer- oder Kupferlegierungen mit Querschnitten unterschiedlicher Fläche (im AC-Netz typischerweise im Bereich von $80 - 150 \text{ mm}^2$ im unverschlissenen Zustand [KPS⁺09]). Durch seitliche Rillen wird der Fahrdraht über Klemmen mit den Hängern befestigt, welche wiederum am Tragseil befestigt werden. Dadurch wird der Fahrdraht an diskreten Stellen durch Hänger vom Tragseil getragen. Die Anzahl der Hänger in einem Feld und der Abstand der Hänger zueinander ist unterschiedlich. Das Tragseil erfährt an den Stützpunkten eine steife vertikale Lagerung, wodurch die Elastizität des Tragseils lokal stark reduziert. Damit diese Versteifung nicht über die Hänger auf den Fahrdraht übertragen wird, werden - je nach Oberleitungstyp - Y-Beiseile im Bereich der Maste zwischen Tragseil und Hänger eingefügt. Die Elastizität des Fahrdrahtes am Stützpunkt wird hierbei durch die Wahl der Beiseillänge und Beiseilzugkraft beeinflusst. Längere Beiseile steigern die Elastizität, wohingegen steigende Zugkräfte diese wieder reduzieren [BKS89]. Der Fahrdraht wird am Stützpunkt über Seitenhalter geführt, die die seitliche Lage definieren. Um den Verschleiß der Stromabnehmer-Schleifleiste homogen über die Breite der Schleifleiste zu verteilen, wird die seitliche Lage des Fahrdrahtes in einem sog.

Zickzack geführt. Bei Regelseitenlage wird hierbei das Vorzeichen der seitlichen Lage von einem zum nächsten Stützpunkt umgekehrt.

Die unterschiedlichen Befahrgeschwindigkeiten der Oberleitungen führte zu unterschiedlichen Designs des Kettenwerks, entsprechend vielfältig ist das Oberleitungsnetz. Für die Auslegung der Oberleitung muss die

- maximale Befahrgeschwindigkeit und das Kontaktkraftverhalten mit dem Stromabnehmer, sowie die
- Fahrdrahtlage unter variierenden Witterungsbedingungen

berücksichtigt werden.

Für Oberleitungen wurden allgemeine Kennwerte zur qualitativen Auslegung definiert. Als statisches Kriterium dient der prozentuale Ungleichförmigkeitsgrad der Oberleitungselastizität

$$u = \frac{e_{max} - e_{min}}{e_{max} + e_{min}} \cdot 100. \quad (6.1)$$

Eine möglichst gleichförmige Elastizität der Oberleitung führt zu geringeren Parameteranregungen des Stromabnehmers. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten wird die Kontaktkraft des Stromabnehmers erhöht, um die Kontaktqualität bei steigender Varianz der Kontaktkräfte zu halten. Zur Einhaltung des zulässigen Anhubes des Fahrdrahtes am Seitenhalter muss die Elastizität der Oberleitung mit steigender Geschwindigkeit reduziert werden, weshalb auch die mittlere Elastizität des Oberleitungstyps von Interesse ist.

Auf der dynamischen Seite stellt die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von laufenden Wellen im Kettenwerks für die maximale Befahrgeschwindigkeit ein wichtiges Kriterium dar. Bei der Betrachtung des Fahrdrahtes als Saite ergibt sich die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit zu

$$c = \sqrt{\frac{T}{\rho A}}. \quad (6.2)$$

Tab. 6.1.: Eigenschaften einiger Oberleitung der DB AG nach [Sch89].

Bezeichnung	Re 160	Re 200	Re 250
Befahrgeschwindigkeit v [km/h]	160	200	250
Zugkraft Fahrdraht T_{FD} [kN]	10	10	15
Zugkraft Trageil T_{TS} [kN]	10	10	15
max. Spannlänge l_{max} [m]	80	80	65
mittl. Elastizität \bar{e} [mm/N]	0.95	0.95	0.55
min. Elastizität e_{min} [mm/N]	0.7	0.8	0.5
max. Elastizität e_{max} [mm/N]	1.2	1.1	0.6
Ungleichmäßigkeit der Elastizität u [%]	26	16	10

Höhere Zugkräfte T respektive geringere Massenbeläge ρA erhöhen die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit.

Die Befahrgeschwindigkeit sollte nach [EN10] 70% der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit nicht überschreiten.

Die Gestaltung der Oberleitungen wurde durch diese Erkenntnisse geprägt [Pet96]:

- Y-Beiseile zur Steigerung der Elastizität im Bereich der Stützpunkte,
- kurze Spannweiten zur Reduzierung und Homogenisierung der Elastizität,
- hohe Zugkräfte in Trageil und Fahrdraht.

Diese Intentionen sind auch in den Parametern der Kettenwerke nach Tab. 6.1 zu erkennen. Die höheren Zugspannungen in Trageil und Fahrdraht sind bei dem Kettenwerk mit höheren Fahrgeschwindigkeiten zu finden.

Auch die Elastizität wird bei der höheren Befahrgeschwindigkeit reduziert, entsprechend besitzt die Oberleitung Re 250 eine niedrigere Elastizität von $0.55 \frac{\text{mm}}{\text{N}}$ gegenüber der Re 200 mit $0.95 \frac{\text{mm}}{\text{N}}$. Dies wird durch die reduzierte maximale Spannlänge um 15m und die gesteigerten Zugkräfte in Fahrdraht und Trageil erreicht. Neben diesen qualitativen Parametern des Kettenwerkes, ist die quantitative Bestimmung der Interaktion des Stromabnehmers mit dem Kettenwerk notwendig. Zu Beginn wurden diese, aufgrund zu stark vereinfachen-

der Modelle, hauptsächlich auf experimenteller Basis bestimmt. Mit Einzug der modernen Computertechnik erreichten die Simulationsmodelle eine Weiterentwicklung, wodurch diese verstärkt zur Weiterentwicklung des Systems eingesetzt werden und sich als Ergänzung zu den Testfahrten etabliert haben. Das in dieser Arbeit verwendete Simulationsmodell wird in Kap. 7 vorgestellt.

6.2 Modellierung der Oberleitung vom Typ Re 200

Da in der Arbeit unterschiedliche Konzepte der Neigekinetik der Stromabnehmer untersucht werden sollen, ist hierfür die Simulation der Einfahrt eines Neigefahrzeuges aus der Geraden in den Bogen zu modellieren. Dabei wird das Fahrzeug seine Neigebewegung ausführen und der Stromabnehmer wird diese Neigung kompensieren. Bei der hierbei befahrenen Oberleitung wurde auf den Typus Re 200 der Deutschen Bahn AG zurückgegriffen. Dieser Oberleitungstyp ist für eine Geschwindigkeit bis 200km/h zugelassen und soll eine Bestandsoberleitung auf einer Nebenstrecken - welche für Neigezüge das Haupteinsatzgebiet darstellen - abbilden. Natürlich werden sich die Ergebnisse für unterschiedliche Oberleitungstypen unterscheiden, jedoch können vermutlich die Tendenzen zum Verhalten der gewählten Kombination aus Oberleitung und Stromabnehmer auf ähnliche Oberleitungstypen übertragen werden. Die Modellierung der Oberleitung basiert auf Informationen aus [Sch89].

Neben der Bogenfahrt wird auch ein gerader Abschnitt modelliert, sodass das Verhalten der unterschiedlichen Konzepte - falls es für das jeweilige Konzept sinnvoll ist - bei Höchstgeschwindigkeit untersucht werden kann.

Abb. 6.3 zeigt die (projizierte) Seitenansicht der verwendeten Nachspannabschnitte, welche als freie Strecken mit Einzelstützpunkten modelliert wurden. Insgesamt besteht a) aus einem Nachspannungsabschnitt mit insgesamt 18 Feldern und einer Gesamtlänge von 1291m; b) besteht aus 18 Felder mit einer Gesamtlänge von 1440m.

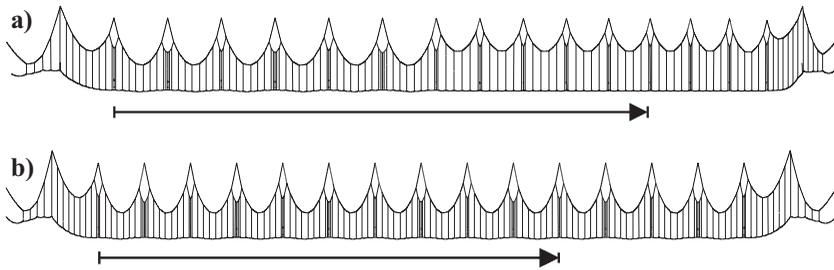


Abb. 6.3.: (Projizierte) Seitenansicht der modellierten Oberleitungsabschnitte vom Typ Re200 und der davon befahrene Bereich: a) Bogeneinfahrt; b) Geradeausfahrt.

Im Einzelnen besteht die modellierte Oberleitung aus den Komponenten

- Fahrdrabt
- Tragseil,
- Y-Beiseile,
- Hangerseile,
- angelenkte und umgelenkte Seitenhalter unterschiedlicher Länge samt Abzugshalter,
- Stutzrohre für angelenkte und umgelenkte Seitenhalter,
- Spitzanker sowie Auslegerrohr des Auslegers,
- Hangerklemmen zu Tragseil/Fahrdrabt/Y-Beiseil und
- Zahnklemmen zwischen Tragseil/Y-Beiseil.

Die verwendeten Parameter zu den Komponenten befinden sich in Tab. A.4 des Anhangs und basieren auf technischen Zeichnungen [Sch89] und Unterlagen der Zulieferindustrie [Sie12], jedoch auch aus eigenen Abschätzungen und Annahmen.

Da eine Kurveneinfahrt simuliert werden soll, kann dieser Oberleitungsabschnitt nicht periodisch modelliert werden. Ferner unterteilt sich die Oberleitung aus Modellierungssicht in die Bereiche der geraden Streckenführung, den

Bereich des Übergangsbogens und der konstanten Kurvenfahrt, sowie die Enden mit Nachspannungen. In der Geraden besitzt die Oberleitung eine asymmetrische Bespannung mit einer Längsspannweite von 80 m.

Die asymmetrische Ausgestaltung der Y-Beiseile im Bereich der angelenkten und umgelenkten Seitenhalter basiert auf der Harmonisierung der statischen Elastizität der Oberleitung in diesen Bereichen.

Der Gleisbogen der Strecke besitzt einen Radius von 900 m mit einem klothoidalen Übergangsbogen einer Länge von 100 m. Aufgrund des Radius ergibt sich eine Längsspannweite von 65,1 m für ein Feld der Oberleitung in diesem Bereich. Die Y-Beiseile dieses Oberleitungsabschnittes sind zudem symmetrisch aufgebaut. Einen detaillierten Überblick über den Oberleitungsaufbau bietet Abb. 6.4.

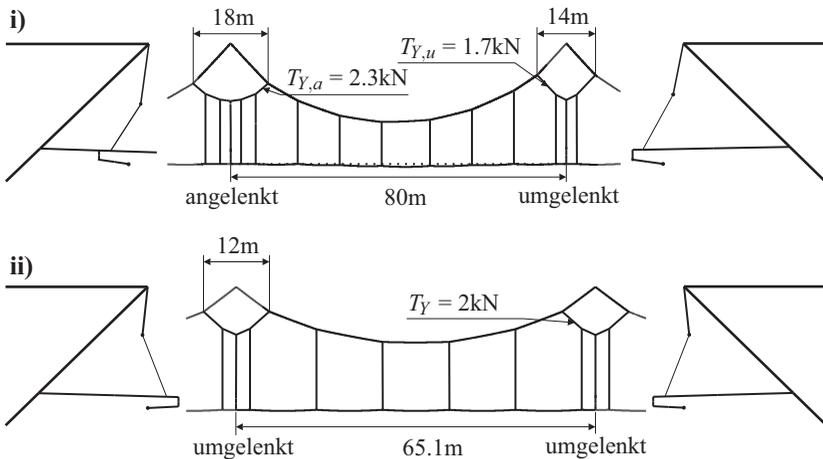


Abb. 6.4.: Längsfeld im Bereich der Geraden i) und im Bogen ii).

Der Übergang zwischen den unterschiedlichen Längsspannweiten kann in diesem Fall abrupt verlaufen, sodass eine Zwischenlänge nicht notwendig ist. Die Seitenlage des Fahrdrabtes ist nach der Nachspannung im Bereich der Geraden mit der Regelgröße von $\pm 0.4 \text{ m}$ berücksichtigt. Aufgrund des geringen Bogenradius befindet sich die Seitenlage des Fahrdrabtes an den Stützpunkten bei -0.4 m (Rechtsbogen) und es werden somit nur umgelenkte Seitenhalter in die-

sem Abschnitt verwendet. Die daraus resultierende Seitenlage wird in Abb. 6.5 dargestellt.

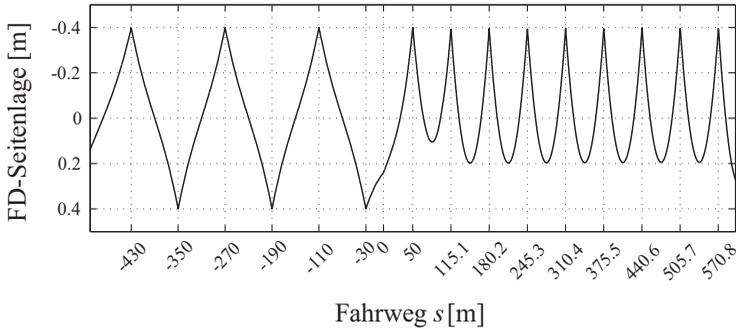


Abb. 6.5.: Verwendete Seitenlage des Fahrdrabtes

Der vom Schienenfahrzeug abgefahrene Bereich der Oberleitung umfasst eine Länge von ca. 800m. Um das Einschwingen des Systems zu ermöglichen, wurde ein großzügiger Geradenabschnitt von 400m implementiert, was fünf Feldern der Gerade entspricht. Schließlich erfolgt im Bereich des Übergangsbogens und des Bogens die eigentliche Auswertung des Kontaktverhaltens der unterschiedlichen Kinematiken. Die befahrenen Strecken zusammengefasst aus den in Tab. 6.2 aufgeführten Abschnitten.

Tab. 6.2.: Streckencharakteristik der simulierten Befahrung des Oberleitungstyps Re200.

Fall a): Bogeneinfahrt		Fall b): Geradeausfahrt	
Abschnitt	Länge [m]	Abschnitt	Länge [m]
Gerade	430	Gerade	800
Übergangsbogen (Klothoide)	100		
Bogen (R=900m)	275.5		
Summe	805.5		800

Bei der Strecke wurde, um die Anzahl der Simulationen zu reduzieren, auf die Implementierung von Gleislagefehler verzichtet. Je nach Qualität des Fahr-

weges und Geschwindigkeit des Fahrzeuges haben diese einen Effekt auf die Kontaktinteraktion [ZC98]. Hierbei ist aber auch die Frage zu stellen, ob die Betrachtung der Wagenkastenstruktur als starr generell ausreichend ist, oder ob - um die Fußpunktanregung möglichst genau darzustellen - die Wagenkastenstruktur als verformbares Element betrachtet werden muss.

6.2.1 Fahrdrathöhenlagen

Die Ergebnisse der Interaktion von Stromabnehmer und Fahrdraht werden durch die vertikale Fahrdrathlage grundlegend beeinflusst. Durch Toleranzen bei der Montage der Oberleitung, Veränderungen der Oberleitung wie auch der Gleise während der Liegezeit, sowie Umgebungseinflüssen, befindet sich der Fahrdraht meist nicht im idealen Nennabstand zur SOK. Die Fußpunktanregung des Stromabnehmers kann sich durch die Neigekinetik während der Befahrung negativ mit der abweichenden vertikalen Lage des Fahrdrahtes überlagern, und zu Kraftspitzen, oder Kontaktabrissen führen. Um diesen Effekt zu untersuchen, wurden zwei Fälle der Fahrdrathöhenlage modelliert:

1. Ideale Nennhöhe des Fahrdrahtes mit einem absoluten Fehler von $\pm 1\text{mm}$ mit verschwindender Anfangsgeschwindigkeit des Fahrdrahtes.
2. Vertikale Lage des Fahrdrahtes an den Grenzen des Toleranzbereiches, wieder keine Anfangsgeschwindigkeit.

Die verwendete Höhenlage des Fahrdrahtes für die vier Fälle ist in Abb. 6.6 dargestellt. Erkennbar ist im Bereich der Geraden der Vordurchhang des Fahrdrahtes. Dieser beträgt an den Hängern 15mm und 30mm. Im Bereich des Bogen von $R = 900\text{m}$ ist die Oberleitung identisch mit der Re 160, sodass hier kein Vordurchhang vorkommt und alle Hängerlagerstellen des Fahrdrahtes auf Nennhöhe liegen. Die Anfangsgeschwindigkeit des Fahrdrahtes ist in beiden Fällen verschwindend. Der Toleranzbereich der Oberleitung Re 200 liegt nach [KPS⁺09] bei

- $\pm 100\text{mm}$ für die Fahrdrathöhenlage
- maximaler Höhenunterschied von Hänger zu Hänger bei 20mm

- Gradient der Fahrdrabtneigung von 1:1000
- Fahrdrabtseitenlage von ± 30 mm

Der Extremalwert des Gradienten der Fahrdrabtneigung wurde hierbei verwendet um eine negative Überlagerung mit der Fußpunktanregung des Stromabnehmers durch die Neigekinematik zu erreichen. Der Fahrdrabt liegt an den Grenzen der Fahrdrabthöhenlage und wird dazwischen mit dem zul. Gradienten der Fahrdrabtneigung von 1:1000 verändert.

Da, wie im vorigen Kapitel erwähnt, keine Daten zur Validierung der hier erstellten Oberleitung vorhanden waren, ermöglicht die Approximation der statische Elastizität in ANSYS zumindest eine grobe Überprüfung der Modellierungsgüte. Hierzu werden im weiteren Verlauf des Kapitels Vergleiche mit Literaturdaten ausgeführt.

6.2.2 Statische Elastizität

Die statische Elastizität einer Oberleitung wird über den Anhub w_{stat} des Fahrdrabtes gegenüber der unbelasteten Ruhelage unter der konstanten Kontaktkraft F_{stat} an der Stelle x berechnet aus

$$e(x) = w_{stat}(x) / F_{k,stat}. \quad (6.3)$$

Die Kontaktkraft wird dabei nach der mittleren Kontaktkraft bei Höchstgeschwindigkeit der jeweiligen Oberleitung gewählt. Die statische Elastizität wurde hier mittels ANSYS approximiert unter einer statischen Kraft von $F_{stat} = 100$ N. Diese wurde mit einer örtlichen Abtastung von $\Delta x = 0.25$ m schrittweise entlang des Fahrdrabtes geführt und über eine statische Berechnung der Anhub gegenüber der unbelasteten Lage ermittelt. Das Ergebnis dieser Berechnung für den Fall a1) ist in Abb. 6.7 aufgeführt. Die statische Elastizität besitzt an den Lagerstellen des Fahrdrabtes lokale Minima und verläuft dazwischen parabelförmig.

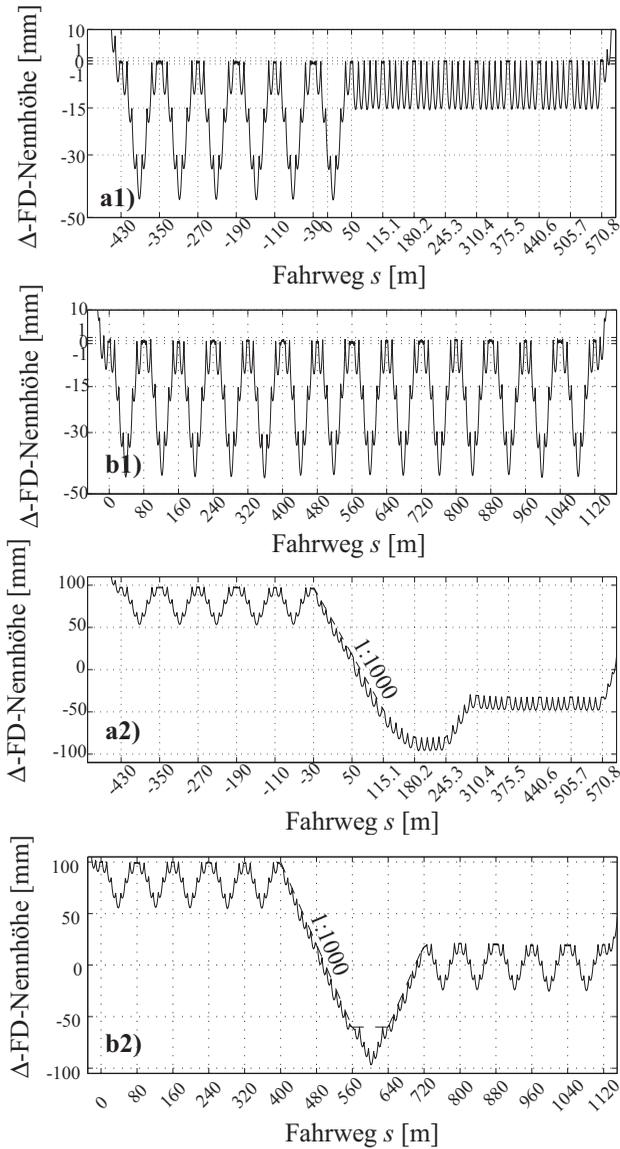


Abb. 6.6.: Fahrdrähtrelage der beiden Fälle: a) Bogeneinfahrt mit Beginn des Übergangsbogens bei $s = 0$ m; b) Geradeausfahrt jeweils für die Fahrdrähtlagen: 1) Nennlage; 2) Fahrdrähtlage an den Grenzen des Toleranzbandes.

Deutlich erkennbar ist der Umbruch der Felder im Bereich der Bogeneinfahrt im Bereich von -30m bis 180.2m . Die statische Elastizität im Bereich von -430m bis -30m ist identisch mit der statische Elastizität für den Fall der Geradeausfahrt, entsprechend wird dieser Fall nicht nochmal explizit aufgeführt. Das Minimum in diesem Bereich befindet sich bei $e_{min} \approx 0.75 \frac{\text{mm}}{\text{N}}$ und das Maximum bei $e_{max} \approx 1.2 \frac{\text{mm}}{\text{N}}$. Das arithmetische Mittel der statischen Elastizität im Bereich von -430m bis -30m beträgt $\bar{e} = 0.97 \frac{\text{mm}}{\text{N}}$.

Insgesamt stimmen die Ergebnisse damit relativ gut überein mit den in Tab. 6.1 angegebenen Werten für die Re 200.

Im Bereich von 245.3m bis 375.5m ist die statische Elastizität gegeben durch den periodischen Verlauf der kürzeren Längsspannweite mit Extrema bei $e_{min} \approx 0.77 \frac{\text{mm}}{\text{N}}$ und $e_{max} \approx 1.1 \frac{\text{mm}}{\text{N}}$. Die mittlere Elastizität beträgt $\bar{e}_{stat} = 0.95 \frac{\text{mm}}{\text{N}}$, was ebenfalls sehr gut mit den Werten der Re 160 übereinstimmt.

Mit den vorhandenen Mitteln zur Validierung der Oberleitungsmodellierung, wird diese aufgrund der guten Übereinstimmung mit den Werten aus der Literatur als validiert betrachtet, sodass die Oberleitungskonfiguration für die weitere Berechnung verwendet werden kann.

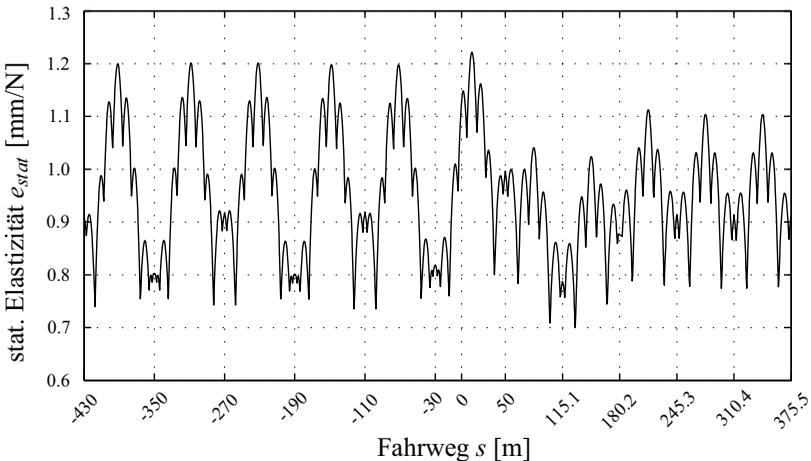


Abb. 6.7.: Ermittelte statische Elastizität aus ANSYS der Oberleitung für den Fall a1).

7 Simulation der Stromabnehmer-Oberleitung-Dynamik

Bei der Stromabnehmer- und Oberleitungsdynamik handelt es sich um Probleme der Starrkörper- und Strukturmechanik, für die geeignete Methoden der Simulation zu suchen sind. Die Herausforderung liegt hier in der Simulation der Oberleitung, die aufgrund der schwachen Dämpfung und der schnellen Wellenausbreitung zu jeder Zeit über die komplette Struktur simuliert werden muss, auch wenn der Kontakt zum Stromabnehmer nur sehr lokal ausgeprägt ist. Auch muss auf die Implementierung des schleifenden Kontaktes vom Stromabnehmer zur Oberleitung eingegangen werden, um hier ausreichend genaue Ergebnisse zu erreichen.

Der Stromabnehmer wird, wie auch schon das Fahrzeug, in SIMPACK modelliert, was sich aufgrund der starken Spezialisierung von SIMPACK auf Starrkörperdynamik anbietet. Um die Teilgebiete Oberleitung und Stromabnehmer in unterschiedlichen Programmen simulieren zu können, ist eine Kopplung der Programme notwendig. Da keine programmeigenen Kopplungsmöglichkeiten für die Programme vorhanden sind, wurde skriptbasiert eine Kopplung aufgebaut, auf welche in Kap. 7.2 detaillierter eingegangen wird. Zu Beginn dieses Kapitels wird auf die Simulation der Oberleitung eingegangen, bei der im Laufe der Zeit unterschiedliche Methoden zur Simulation des Schwingungsverhaltens entwickelt wurden. Hierzu wird an dieser Stelle nur ein kurzer Überblick geliefert, da sich mit der Steigerung der Rechenleistung die Finite-Elemente- und Finite-Differenzen-Methode durchgesetzt haben.

Darauf aufbauend wird der grundlegende Aufbau und Ablauf der Simulation vorgestellt. Mit der Verifikation der Methodik wird das Kapitel abgeschlossen.

7.1 Modellierung und Simulation der Oberleitung

Die Modellierung der Oberleitung kann über unterschiedliche Wege realisiert werden. Die Kontaktkraft wird dabei beeinflusst von der Variation der Steifigkeit der Oberleitung, wie auch von der Wellenausbreitung und Reflexion in Fahrdrabt und Trageil. [KBMM⁺ 10] gibt einen Überblick über unterschiedliche Modelle zur Simulation der Oberleitungsdynamik:

Modelle mit konzentrierten Parametern: Die Oberleitungsdynamik wird durch zeitveränderliche Werte der statischen Steifigkeit oder statischen Steifigkeit und Masse, sowie Dämpfung abgebildet. Die dynamischen Effekte der Wellenausbreitung und Reflexion werden hier nicht abgebildet. Um die Variation der statischen Steifigkeit abzubilden, werden nach [KBMM⁺ 10] häufig einfache Funktionen der Form

$$k(t) = k_0 \left[1 + \alpha_k \cos\left(\frac{2\pi v}{l} t\right) \right] \quad \text{mit} \quad (7.1)$$

$$k_0 = \frac{k_{max} + k_{min}}{2} \quad \alpha_k = \frac{k_{max} - k_{min}}{k_{max} + k_{min}}$$

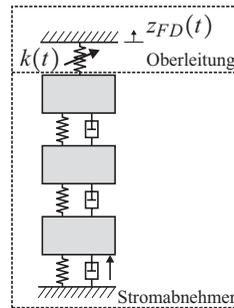


Abb. 7.1.: Oberleitungsmodell mit Stromabnehmer

verwendet. Abb. 7.1 zeigt dabei beispielhaft einen mit diesem Oberleitungsmodell gekoppelten Stromabnehmer. Die Frequenz der Kosinus-Funktion wird dabei von der Fahrgeschwindigkeit v und der Feldlänge l vorgegeben. Die Werte der statischen Steifigkeit k_{min} und k_{max} müssen aus Messungen oder Berechnungen vorliegen. Die Variation der Steifigkeit zwischen den Hängern wird dabei nicht berücksichtigt. Daher kann man alternativ auch den Verlauf der statischen Steifigkeit als Funktion bspw. in einem MKS-Programm hinter-

legen und die zeitliche Skalierung abhängig von der Geschwindigkeit machen, sodass keine Approximation der Steifigkeit nach (7.1) notwendig ist. Denkbar ist auch, einen evtl. vorhandenen Vordurchhang des Fahrdrabtes, durch eine Funktion $z_{FD}(t)$ zu berücksichtigen.

Modelle mit verteilten Parametern: Hierbei wird die Oberleitung als 2D- oder 3D-Modell aufgebaut, sodass die strukturellen Eigenschaften der Oberleitung und somit Wellenausbreitungsphänomene innerhalb der Oberleitung berücksichtigt werden. Die physikalische Modellierung der Oberleitung führt zu guten Ergebnissen in der mittleren Kontaktkraft und der Standardabweichung der Kontaktkraft.

Modelle mit verteilten Parametern führen auf partielle Differentialgleichungen, die im folgenden Abschnitt für die Seile/Drähte der Oberleitung aufgeführt sind.

7.1.1 Modellierung der Seile/Drähte

Die Oberleitung besteht, wie in Kap. 6 dargestellt, aus einem Aufbau von mechanisch vorgespannten Drähten, Seilen und stützenden Rohren zur Lagerung des Kettenwerks. Für die Modellierung der Transversaldynamik der Seile und Drähte stehen mechanische Modelle, die unterschiedliche Effekte berücksichtigen, zur Verfügung. Neben dem einfachen Saiten-Modell gibt es nach [HBW99] die Modelle

- Euler-Bernoulli-Balken,
- Rayleigh-Balken,
- Schub-Balken und
- Timoshenko-Balken

zur Beschreibung der Transversaldynamik von Balken. Tab. 7.1 stellt die Eigenschaften der Modelle gegenüber.

7. Simulation der Stromabnehmer-Oberleitung-Dynamik

Tab. 7.1.: Übersicht über die Eigenschaften der unterschiedlichen Modelle. Erweiterung um Saite aus [HBW99].

Modell	Transversale Trägheit	Biegemoment	Schubverformung	Trägheitsmoment
Saite	✓	×	×	×
Euler-Bernoulli-Balken	✓	✓	×	×
Rayleigh-Balken	✓	✓	×	✓
Schub-Balken	✓	✓	✓	×
Timoshenko-Balken	✓	✓	✓	✓

Die Bewegungsgleichung einer ungedämpften vorgespannten Saite beschreibt ein biegeschlaffes Seil unter der Zugkraft T und einer örtlich und zeitlich veränderlichen Streckenlast $q(x,t)$, mit der konstanten Querschnittsfläche A und Dichte ρ und lässt sich anschreiben durch

$$\rho A \ddot{w}(x,t) - Tw''(x,t) = q(x,t). \quad (7.2)$$

Der vorgespannte Euler-Bernoulli-Balken (EBB) berücksichtigt darauf aufbauend noch die elastische Biegesteifigkeit EI des Drahtes und erweitert sich zu

$$\rho A \ddot{w}(x,t) - Tw''(x,t) + EIw''''(x,t) = q(x,t). \quad (7.3)$$

Beim Rayleigh-Balken wiederum wird neben der Biegesteifigkeit des EBB auch noch die rotatorische Trägheit berücksichtigt, sodass sich die Bewegungsgleichung erweitert:

$$\rho A \ddot{w}(x,t) - Tw''(x,t) + EIw''''(x,t) - \rho I \ddot{w}''(x,t) = q(x,t). \quad (7.4)$$

Der Schub-Balken berücksichtigt neben der Biegesteifigkeit auch die Schubweichheit des Materials, es ergeben sich mit Hilfe des Hamiltonschen Prinzips zwei gekoppelte Bewegungsgleichung. Die Rotation der Normalen des Balkenquerschnitts stimmt nicht mehr überein mit der Biegung der Balkenachse $\partial w(x,t)/\partial x$, sondern nimmt durch die Überlagerung mit dem Schub den Winkel $\Psi(x,t)$ an. Der Schubeinfluss kann aus $\partial w(x,t)/\partial x - \Psi(x,t)$ berechnet

werden. Die gekoppelten Bewegungsgleichungen der Koordinaten $w(x,t)$ und $\Psi(x,t)$ ergeben sich zu

$$\begin{aligned} \rho A \ddot{w}(x,t) - T w''(x,t) - G A_s (w''(x,t) - \Psi'(x,t)) &= q(x,t) \\ E I \Psi''(x,t) + G A_s (w'(x,t) - \Psi(x,t)) &= 0, \end{aligned} \quad (7.5)$$

mit der Schubfläche $A_s = kA$ und häufig mit $k = 9/10$ bei kreisförmiger Querschnittsfläche A .

Stand der Technik bei der Biegetheorie stellt der Timoshenko-Balken dar, der alle oben genannten Effekte in einer Theorie vereint. Wie bei dem Schub-Balken entstehen zwei gekoppelte Gleichungen für die Beschreibung der Dynamik

$$\begin{aligned} \rho A \ddot{w}(x,t) - T w''(x,t) - G A_s (w''(x,t) - \Psi'(x,t)) &= q(x,t) \\ \rho I \ddot{\Psi} - E I \Psi''(x,t) - G A_s (w'(x,t) - \Psi(x,t)) &= 0. \end{aligned} \quad (7.6)$$

Wie [Poe00] zeigt, bringt die Verwendung des Timoschenko-Balkens gegenüber dem einfacheren EB-Balken nur im Bereich sehr kleiner Wellenlängen ($>10\text{cm}$) signifikante Abweichungen bei den Eigenfrequenzen ¹, sodass das Saiten-Modell und der EB-Balken für die Modellierung der Seile/Drähte eine ausreichende Modellierungstiefe bieten.

7.1.2 Numerische Berechnung von Modellen mit verteilten Parametern

Bei der numerischen Integration von partiellen Differentialgleichungen stehen

- Genauigkeit,
- Effizienz,
- Stabilität,
- und Robustheit

¹Diese Aussage bezieht sich auf die Parameter des Fahrdrabtes der Oberleitung Re250 von der DB AG.

des Verfahrens im Vordergrund [AU10]. Nun soll diese Arbeit keine Untersuchung nach der „besten“ Methode zur Simulation - insbesondere der Oberleitung - sein. Vielmehr ist auch die Verfügbarkeit und der Aufwand bei der Erstellung der Methode für den Autor relevant. Da die FEM eine etablierte Methode darstellt und nach der Recherche der weiteren Methoden als attraktivster Ansatz betrachtet wird, wird die Simulation der Oberleitung in dieser Arbeit mittels FEM ausgeführt. Ausschlaggebend waren vor allem die Punkte der sehr guten Verfügbarkeit und der akzeptable Aufwand bei der Implementierung der Methode, sowie der aufgrund diverser Literaturquellen [Rei05, SJOC⁺09, MLB06, KPS⁺09] zu erwartenden hohen Genauigkeit bei entsprechendem Aufwand. Vertiefende Einblicke effizienter Verfahren bietet [Poe00] und eine detailliertere Übersicht über Verfahren in [PEM⁺97]. Es wird hier nur eine knappe Darstellung verwendeter Methoden aufgeführt, sodass sich interessierte Leser über die jeweiligen Ansätze weiter informieren können.

Modalanalyse

Die Modalanalyse des Oberleitungskettenwerk wird vor allem im Bereich der Echtzeitsimulation der Stromabnehmer-Oberleitung-Interaktion, etwa für HiL-Simulatoren, eingesetzt [KBMM⁺10]. Hierbei wird aus der Überlagerung der davor extrahierten Eigenformen bis zur gewünschten Ordnungszahl mit der Skalierung der Moden durch zeitabhängige Koeffizienten die Bewegung der Oberleitung berechnet. Durch Verwendung der kontinuierlichen Eigenformen zur Ortsauflösung ist dieser Ansatz, im Gegensatz zur den anderen genannten Methoden, ortskontinuierlich. Eine Interpolation des Kontaktpunktes mit dem Stromabnehmer muss nicht durchgeführt werden.

[ZLM06] stellt ein Verfahren vor, dass von [MLB06] zur Einbindung nichtlinearer Hängerkräfte und Kontaktkräfte des Stromabnehmers erweitert wurde. Der rechnerische Aufwand bei dieser Methode wird an den Beginn der Berechnung verlagert, da die Moden und die daraus resultierenden Massen- und Steifigkeitsmatrix für das System berechnet werden müssen. Je nach Anzahl der berücksichtigten Moden wird dies entsprechend aufwändig, jedoch kann mit einer einmal erstellten Systemstruktur Parametervariationen durchgeführt

werden, ohne dass die Berechnung der Massen- und Steifigkeitsmatrix erneut durchgeführt werden muss.

D'Alembertsche Wanderwellen

Bei dem d'Alembertschen Wanderwellen-Verfahren [Buc79, Buc81, Buc82, Res91] wird von biegeschlaffen Seilen ausgegangen. Die Lösung der homogenen Saitengleichung (7.2) kann dabei durch die Addition von nach links und rechts laufenden Wellen bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \ddot{w}(x,t) &= c^2 w''(x,t) \text{ und dem Lösungsansatz} \\ w(x,t) &= f(x-ct) + g(x+ct). \end{aligned} \quad (7.7)$$

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der schnellen Berechnung, da nur an Hängern, Seitenhaltern, etc. die Bewegungsgleichung integriert werden, dazwischen wird für die Ortsauflösung des Seils lediglich die Verschiebung der Funktionen f und g um t notwendig. Der große Nachteil bei diesem Verfahren ist, dass es nur auf das Saiten-Modell anwendbar ist. [Poe00] hat in seinem Ausblick die Idee der gekoppelten Berechnung des Trageisls über diese Methode und des biegesteifen Fahrdrahtes über FDM, um Simulationen noch effizienter ausführen zu können.

FDM

Bei der numerischen Lösung dynamischer Systeme müssen die partiellen Differentialgleichungen einer Orts- und Zeitdiskretisierung unterzogen werden. Durch die Ortsdiskretisierung wird die partielle DGL in eine System gewöhnlicher Differentialgleichungen überführt. Schaut man sich die Ortsdiskretisierung eines mit der Schrittweite Δx äquidistant diskretisierten Elementes an, so lässt sich die Ortsableitung am i -ten Ortsdiskretisierungspunkt approximieren zu

$$w'(x_i, t) \approx \frac{w(x_{i+1}, t) - w(x_i, t)}{\Delta x} \quad (7.8)$$

$$w''(x_i, t) \approx \frac{w(x_{i+1}, t) - 2w(x_i, t) + w(x_{i-1}, t)}{\Delta x^2} \quad (7.9)$$

mit kleinem Abstand zwischen den Diskretisierungspunkten Δx und der vorwärts FDM-Diskretisierung erster und zentraler FDM-Diskretisierung zweiter Ordnung. Im Falle einer Saite ergibt sich die homogene DGL somit zu

$$\ddot{w}(x_i, t) = \frac{c^2}{\Delta x^2} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w(x_{i-1}, t) \\ w(x_i, t) \\ w(x_{i+1}, t) \end{bmatrix}, \quad (7.10)$$

was auf eine explizite Differentialgleichung zweiter Ordnung führt. Das numerische Verfahren zur Zeitintegration in [Poe00] wird anhand der induzierten Dispersion ausgewählt, sodass der durch die örtliche Diskretisierung induzierte Fehler möglichst kompensiert wird.

FEM

Die Finite-Elemente Methode ist im Bereich der Oberleitungssimulation eine häufig eingesetzte Methode [RD96, SJOC⁺09, ARP⁺10, DVV93]. Die grundlegende Gleichung der Strukturmechanik wird durch

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (7.11)$$

beschrieben, mit der Massenmatrix \mathbf{M} , der Dämpfungsmatrix \mathbf{D} , der Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} , dem Lastvektor \mathbf{f} und den Verschiebungsvektor \mathbf{u} . ANSYS bietet unterschiedliche Modelle zur Simulation der Dynamik von Saiten- und Balkenelementen, die natürlich nicht nur die transversalen Eigenschaften berücksichtigen. Allerdings sind für diese Arbeit hauptsächlich diese Eigenschaften maßgeblich, daher sind die verfügbaren elastischen Modelle mit den zugrundeliegenden transversalen Eigenschaften in Tab. 7.2 aufgelistet. Die Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} besitzt entsprechend modellspezifische Einträge.

Für die Hänger werden Elemente mit uniaxialen Eigenschaften benötigt, sodass dort LINK10-Elemente Verwendung finden. Ebenso wird das Tragseil und die Y-Beiseile über LINK10-Elemente modelliert. Der Fahrdrabt kann über zwei unterschiedliche Elemente modelliert werden:

Tab. 7.2.: Übersicht über elastische Saiten- und Balkenmodelle in ANSYS und deren transversale Eigenschaften.

Element	2D	3D	Beschreibung
LINK1	✓		Saite mit Zug- und Drucksteifigkeit
LINK8		✓	Saite mit Zug- und Drucksteifigkeit
LINK10		✓	Saite mit uniaxialen Eigenschaften (Zug oder Drucksteifigkeit)
LINK180		✓	Saite mit bi- und uniaxialen Eigenschaften (Zug und/oder Drucksteifigkeit)
BEAM3	✓		EBB-Modell + Schub
BEAM4		✓	EBB-Modell + Schub
BEAM188		✓	Timoshenko-Balken-Modell
BEAM189		✓	Timoshenko-Balken-Modell

Zum einen das Element BEAM4, welches in transversaler Richtung einem EBB-Balken entspricht, aber auch die Schubweichheit berücksichtigen kann, und zum anderen BEAM188/189, das auf der Theorie nach Timoshenko basiert. Für die Modellierung des Fahrdrahtes wird auf das BEAM4-Element zurückgegriffen. Hierbei wird eine kubische Ansatzfunktion [ZT05, TSS05] der transversalen Verschiebung in Längsrichtung des Elements genutzt um das kontinuierliche System in eine ortsdiskretisierte Matrixform zu überführen. Das System besteht nun aus einem semi-diskreten Gleichungssystem gewöhnlicher Differentialgleichungen, dass über die Newmark- oder HHT-Methode zeitlich integriert wird, was allerdings ein implizites Vorgehen bei der Lösung darstellt. Durch die vorhandene grafische Oberfläche und die implementierten Solver, stellt die FE-Methode in dieser Arbeit den interessantesten Ansatz dar, sodass diese Methode in dieser Arbeit Anwendung findet.

7.2 Modellierung der dynamischen Interaktion zwischen Stromabnehmer und Oberleitung

7.2.1 Kopplung von Simulationsprogrammen

Die Kopplung von Simulationsprogrammen unterschiedlicher Disziplinen zur Simulation des Gesamtsystems stellt, aufgrund des Fehlens einer universellen Programmschnittstelle eine aktuelle Herausforderung dar. Die Kopplung von Programmen kann hierbei über unterschiedliche Ansätze realisiert werden [Bus12]:

- **Starke Kopplung:** Nur ein Programm integriert die Gleichungen, die Gleichungen der anderen Programme werden mittels CodeExport in das integrierende Programm importiert und dort numerisch gelöst.
- **Schwache Kopplung:** Beide Programme integrieren hier unabhängig voneinander die Gleichungen des jeweiligen Teilsystems. Während spezieller Kommunikationszeiten werden die Ergebnisse der numerischen Lösung direkt oder in aufbereiteter Form ausgetauscht und als Eingänge für den nächsten Makrozeitschritt verwendet.

Bei der schwachen Kopplung von Simulationen können iterative und nicht-iterative Verfahren verwendet werden [Bus12]:

- **Nicht-iterativer Ansatz, angelehnt an das Jacobi-Verfahren:** Hierbei werden zu den Kommunikationszeiten die Ausgänge auf den nächsten Kommunikationszeitschritt extrapoliert und als Eingang für den aktuellen Zeitschritt verwendet. Die Integration der Teilsysteme kann parallel ausgeführt werden.
- **Nicht-iterativer Ansatz, angelehnt an das Gauss-Seidel-Verfahren:** Die Integration des ersten Teilsystems basiert auf den extrapolierten Ergebnissen des zweiten Teilsystems. Die Ergebnisse des ersten Teilsystems werden nun interpoliert an den Mikrozeitschritten der numerischen Lösung des zweiten Teilsystems. Entsprechend wird die Berechnung hierbei sequentiell ausgeführt.

- **Iterative Ansätze**, bei denen nach dem Erreichen eines Konvergenzkriteriums zum nächsten Kommunikationszeitschritt übergegangen wird. Die Stabilität der Lösung ist zwar häufig besser, allerdings wird durch die Iteration der Berechnungsaufwand stark erhöht. Durch die gesteigerte Stabilität kann ggf. die Kommunikationsschrittweite erweitert werden.

7.2.2 Co-Simulation mittels ANSYS-SIMPACK

In dem hier verwendeten Fall handelt es sich um eine schwach gekoppelte Co-Simulation, die mittels paralleler Berechnung nach dem Jacobi-Verfahren durchgeführt wird. Dies wurde ausgewählt, um die Berechnung iterationsfrei und die einzelnen Integrationen parallel durchführen zu können. Die Kopplung erfolgt über die kinematischen Größen der Positionen des Fahrdrahtes und der Schleifleisten. Da die Fahrdrachtlage aufgrund der Wellenausbreitung, Reflexionen und der Bewegung entlang des Fahrdrahtes stochastischen Charakter besitzt, ist eine Approximation der Fahrdrachtlage in nächsten Schritt schwierig, sodass hierbei auf eine Approximation 0. Ordnung zurückgegriffen wird. Die Schleifleisten des Stromabnehmers hingegen führen eine, in Größenordnungen der Kommunikationsschrittweite, langsame Bewegung aus, sodass auch höhere Ordnungen sinnvoll erscheinen.

Die Kommunikationsintervalle zwischen den zwei Programmen wurden äquidistant ausgeführt. Um die Stabilität und generelle Eignung der Simulation sicher zu stellen, wurde vor den eigentlichen Berechnungen eine schrittweise Verifikation der Methodik durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind Kap. 7.3 zu entnehmen.

Als Programme wurde die FE-Software ANSYS in der Version 12.1 für die Simulation der Oberleitung zurückgegriffen. ANSYS ist eine nahezu universell einsetzbare FE-Software mit der neben strukturmechanischer Probleme auch Aufgaben anderen Disziplinen, wie bspw. thermodynamische Problemstellungen numerisch approximiert werden können. In der vorliegenden Version kommt die Software in zwei unterschiedlichen Varianten: Zum einen die

neuere, „Workbench“ genannte Oberfläche, die dem Charakter eines modernen CAD-System ähnelt und zum anderen die „Mechanical APDL (ANSYS)“ genannte klassische Oberfläche. Sie besitzt eine „unkomfortableres GUI, lässt sich aber über die eigene Skriptsprache APDL vollständig steuern. Aus dem obigen Grund wurde auf die zweitgenannte Oberfläche zurückgegriffen. Mit der Skriptsprache lässt sich neben der ANSYS-internen Kommunikation auch die Kommunikation mit dem Betriebssystem realisieren, sodass die komplette Steuerung des Programmablaufes der Co-Simulation von ANSYS aus realisiert wurde.

Für die Simulation des Stromabnehmers wird auf die MKS-Software SIMPACK in der Version 8.905 zurückgegriffen. Da ANSYS und SIMPACK nicht über eine direkte Schnittstelle verfügen, wurde eine Umgebung entwickelt, mit der die Co-Simulation ausgeführt werden kann. Die verwendete Struktur der Simulationsumgebung wird im Folgenden skizziert.

Bei der Simulation sind neben den oben erwähnten Hauptprogrammen zwei Skripte im Einsatz, die den Datenaustausch zwischen ANSYS und SIMPACK bewerkstelligen. Für die direkte Kommunikation mit SIMPACK bietet sich die Scripting-Schnittstelle basierend auf QSA an. Hierbei werden hauptsächlich Informationen, die aufgrund der binären Speicherung nur über das Post-Processing in SIMPACK zur Verfügung stehen, extrahiert. Neben dem QSA-Skript wird auch ein Skript basierend auf der Programmiersprache Perl verwendet, das hauptsächlich die Ergebnisse von ANSYS und SIMPACK aufbereitet und an die Hauptprogramme auf ASCII-Basis zur Verfügung stellt. Abb. 7.2 zeigt grob die verwendete Struktur der Programme. ANSYS wird hierbei als Master verwendet und initiiert somit die anderen Programmabläufe. Hierfür wurde auf Basis der Programmiersprache APDL ein Master-Skript erstellt, das den zeitlichen Ablauf der Berechnung koordiniert. Die verwendete Oberleitung wird über ein weiteres Skript eingebunden, sodass die verwendete Geometrie einfach gewechselt werden kann. Selbiges gilt für den Stromabnehmer, der über den jeweiligen Dateinamen ausgewählt werden kann.

Das Perl-Skript wird bei der Initiierung von externen Abläufen und Berechnungen aufgerufen. Hierfür wird dem Programmaufruf ein zusätzlicher Para-

meter übergeben, wodurch unterschiedlichen Programmteile ausgeführt werden. Die Programmteile lauten:

- *Initialize*: Übergeben der Simulationsparameter an das Skript aus ANSYS
- *Start*: Ermitteln der statischen Fahrdrachthöhenlage im Kontaktbereiches des Stromabnehmers. Aufprägen der Simulationsparameter auf das Stromabnehmer-Modell und statisches Anheben des Stromabnehmers. Überprüfen der Lage des Stromabnehmers, ggf. Iteration.
- *Contacts*: Berechnen des schleifenden Kontaktes nach Kap. 7.2.3 und Kap. 7.2.4.
- *TimeInt*: Initiieren der zur Oberleitungsberechnung parallel ausführbaren Zeitintegration des Stromabnehmers.
- *Postprocessing*: Update der Zeiteinstellungen nach erfolgreichen Simulationen von Oberleitung und Stromabnehmer.

7. Simulation der Stromabnehmer-Oberleitung-Dynamik

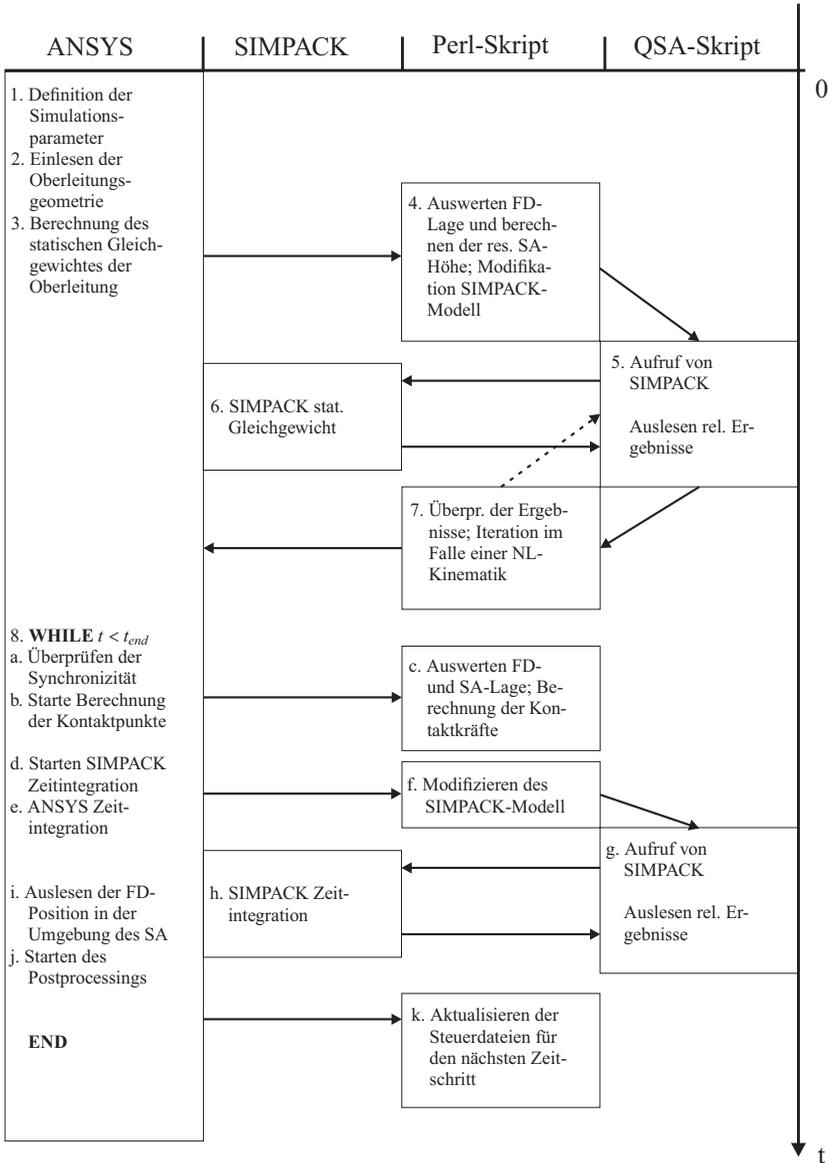


Abb. 7.2.: Grobe Skizze des verwendeten Programmablaufs.

7.2.3 Kontaktmodellierung

Die Kontaktbedingung des OHL-Systems wird in der Literatur über unterschiedliche Wege angegangen:

- Übergangsbedingungen, die örtliche Ableitungen rechts und links des bewegten Kraftangriffspunktes mit der Kontaktkraft in Verbindung bringen [Pet96].
- Kongruenzbedingungen, also das geometrische Zusammenfallen der Auslenkungen auf Basis von iterativen Verfahren [Poe00].
- Koppellemente, bei denen die geometrische Kongruenz der Schleifleiste und des Fahrdrabtes gelockert wird [DVV93].

Für die Modellierung des Kontaktes mittels Koppellementen stehen unterschiedliche Modelle zur Verfügung. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über bekannte Verfahren im Bereich der Kontaktmodellierung über Koppellemente vorgestellt. Der Grenzfall einer unendlichen Steifigkeit des Koppellements würde auf die Kongruenzbedingung zurückführen. Die Modellierungsmöglichkeiten lassen sich nach [MD06] in vier Ansätze gliedern:

1. Unidirektionales Federelement
2. Kelvin-Voigt-Modell
3. Hertz-Kontaktkraftmodell
4. Erweitertes Hertz-Modell mit paralleler Dämpfung

Die erstgenannte unidirektionale Feder stellt das einfachste Modell dar. Hierbei ist die Kontaktkraft am Fußpunkt x_{FP} des Stromabnehmers, der nicht zwangsläufig mit der Position des Kontaktpunktes x_k übereinstimmt, proportional zur Eindringung der Schleifleiste in den Fahrdrabt:

$$F_k(x_{FP}, t) = \begin{cases} c_k \Delta w(x_k, t), & \text{für } w_{SL}(x_k, t) > w_{FD}(x_k, t) \\ 0, & \text{für } w_{SL}(x_k, t) \leq w_{FD}(x_k, t), \end{cases} \quad (7.12)$$

mit der Eindringung $\Delta w(x_k, t) = w_{SL}(x_{SL}, t) - w_{FD}(x_{SL}, t)$ der Schleifleiste in den Fahrdraht. Ansonsten wird die Kontaktkraft, aufgrund des fehlenden Kontaktes zu Null gesetzt. Die Verwendung einer linearen Feder mit einer Steifigkeit von $k_c = 50 \text{ kN/m}$ wird in [EN03] als Modellierungsmöglichkeit des Kontaktes vorgeschlagen. [SVA⁺83] verwendet für die Steifigkeit 82 kN/m , [ZLM06] verwendet 82.3 kN/m und k_c wird bei [DVV93] zu 330 kN/m gesetzt. Um die Energiedissipation bei der Eindringung zu berücksichtigen, kann der Feder ein parallel wirkendes Dämpfungselement hinzugefügt werden:

$$F_k(x_k, t) = \begin{cases} c_k \Delta w(x_k, t) + d_c \Delta \dot{w}(x_k, t), & \text{für } w_{SL}(x_k, t) > w_{FD}(x_k, t) \\ 0, & \text{für } w_{SL}(x_k, t) \leq w_{FD}(x_k, t), \end{cases} \quad (7.13)$$

mit den Differenzgeschwindigkeiten $\Delta \dot{w}(x_k, t)$ und der viskosen Dämpfungskonstante d_c .

Die Modellierung nach Hertz berücksichtigt die elastische Verformung der Kontaktpaare und somit die sich vergrößernde Kontaktfläche bei steigender Eindringung des Systems. Daraus resultiert ein nichtlineares Kraftgesetz mit dem Exponent n :

$$F_k(x_k, t) = \begin{cases} c_k \Delta w(x_k, t)^n, & \text{für } w_{SL}(x_k, t) > w_{FD}(x_k, t) \\ 0, & \text{für } w_{SL}(x_k, t) \leq w_{FD}(x_k, t). \end{cases} \quad (7.14)$$

Im Falle eines Kontaktes zweier gekreuzter Zylinder ergibt sich die Steifigkeit zu $c_k = \frac{4}{3} E^* R^{\frac{1}{2}}$ mit $E^* = \frac{2E_1 E_2}{(1-\nu_1^2)E_2 + (1-\nu_2^2)E_1}$, dem Kontaktradius $R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$ und dem Exponent $n = 3/2$.

Da bei dem Hertzischen Kontaktmodell keine Energieverluste betrachtet werden, wird häufig eine Erweiterung der Kontaktmodellierung über ein paralleles nichtlineares Dämpfungselement vorgenommen. Hiermit können u.a. plastische Verformungen Berücksichtigung finden.

Die Dämpferkennlinie wird dabei häufig so gestaltet, dass im Falle von $\Delta w = 0$ keine Kraft mehr erzeugt wird [GS02]:

$$F_k(x_k, t) = \begin{cases} c_k \Delta w(x_k, t)^n + d_c \Delta w^p \Delta \dot{w}(x_k, t)^q, & \text{für } w_{SL}(x_k, t) > w_{FD}(x_k, t), \\ 0, & \text{für } w_{SL}(x_k, t) \leq w_{FD}(x_k, t). \end{cases} \quad (7.15)$$

mit der häufigen Wahl $p = n$ und $q = 1$. Der Energieverlust wurde von [HC75] mit der Stoßzahl ε in Verbindung gebracht und führt nach [LN94] auf:

$$F = c_k \Delta w^n \left[1 + \frac{3(1 - \varepsilon^2)}{4} \frac{\Delta \dot{w}}{\Delta \dot{w}_0} \right] \quad (7.16)$$

Ein solcher Ansatz wurde von [RPA⁺07] für die Modellierung des Stromabnehmer-Fahrdraht-Kontaktes verwendet.

Aus Modellierungs- und Stabilitätsgründen wird in dieser Arbeit auf die Kontaktmodellierung mittels unidirektionaler linearer Federkennlinie zurückgegriffen. Auf die Wahl der Steifigkeit wird in Kap. 7.3.2 näher eingegangen. Bei dem schleifenden Kontakt entsteht zudem eine tangentielle Reibkraft zwischen den Schleifpartnern. Dieser Effekt wird im folgenden aufgrund der geringen Reibung und den niedrigen Normalkräften nicht weiter berücksichtigt.

7.2.4 Ermittlung der Kontaktkraft und Aufprägung auf die Oberleitung

Für die Berechnung der Kontaktkraft ist die Bestimmung von $\Delta w(x_k, t)$ notwendig. Da die Oberleitung als dreidimensionale Struktur modelliert wurde, ist die geometrische Eindringung durch Projektionen zu berechnen.

Um die zeitliche Auflösung der Berechnung unabhängig von der örtlichen Auflösung zu gestalten, wird der Kontaktpunkt an der Stelle $x_k(t)$ zum Zeitpunkt t auf dem Fahrdraht räumlich mittels linearer Interpolation zwischen den Knoten an der Stelle \mathbf{r}_i und \mathbf{r}_{i+1} ermittelt. Abb. 7.3 zeigt hierzu ein Element des Fahrdrahtes.

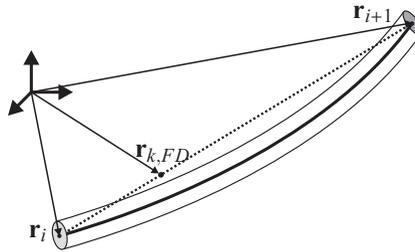


Abb. 7.3.: Lineare Interpolation der Fahrdrachtlage zwischen zwei Knoten.

Der Abstand des Kontaktpunktes des Fahrdrahtes $\mathbf{r}_{k,FD}$ zu den jeweiligen Knotenpunkten des Fahrdrahtes liefert die Aufteilung der betragsmäßigen Kontaktkraft auf die Knoten:

$$F_{k,i} = F_k \frac{\|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_{k,FD}\|}{\|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i\|} \quad (7.17)$$

$$F_{k,i+1} = F_k \frac{\|\mathbf{r}_{k,FD} - \mathbf{r}_i\|}{\|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i\|} = F_k - F_{k,i}$$

Zur Bestimmung des Kontaktpunktes $\mathbf{r}_{k,FD}$ stellt Abb. 7.4 die geometrischen Beziehungen dar.

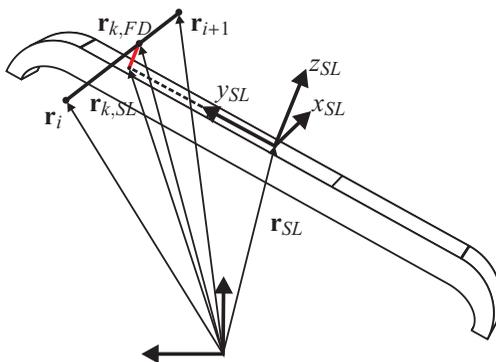


Abb. 7.4.: Bestimmung des Kontaktpunktes zwischen Stromabnehmer und Oberleitung durch Interpolation.

Hierzu wird der Schnittpunkt der $(y_{SL} - z_{SL})$ -Ebene mit der von den nächstgelegenen Knotenpunkten \mathbf{r}_i und \mathbf{r}_{i+1} aufgespannten Gerade gesucht. Der so gefundene Punkt $\mathbf{r}_{k,FD}$ wird in z_{SL} -Richtung auf die $(x_{SL} - y_{SL})$ -Ebene projiziert und definiert $\mathbf{r}_{k,SL}$. Die Betrag der Eindringung wird über $|\Delta w(x_k, t)| = \|\mathbf{r}_{k,FD} - \mathbf{r}_{k,SL}\|$ bestimmt und das Vorzeichen über die Richtung der von diesen Punkten aufgespannten Gerade in z_{SL} . Die seitliche Lage des Kontaktpunktes auf der Schleifleiste wird mittels $y_{c,SL} = \|r_{SL} - r_{c,SL}\|$ berechnet und mit dem Betrag der Kontaktkraft an SIMPACK übergeben.

7.3 Verifikation der Vorgehensweise

Die beschriebene Vorgehensweise muss auf deren Eignung für die Simulation der Oberleitung-Stromabnehmer-Interaktion hin untersucht werden. Hierfür wurde, in Anlehnung an [Poe00] eine stufenweise Verifikation durchgeführt. Die vereinfachten Modellprobleme einer wandernden konstanten Kraft an einem Seil/Draht dient der grundlegenden Überprüfung der Eignung des FE-Programms und der in (7.17) vorgestellten Aufteilung der Kontaktkräfte auf das diskretisierte Netz des Fahrdrahtes. Die mittels ANSYS erzielten Ergebnisse können analytischen Lösungen gegenübergestellt werden. Daraus aufbauend, hat [Poe00] zwei Methoden zur semi-analytischen Berechnung des sog. Wandermassen-Problems vorgestellt. Hierbei wird keine konstante Kraft entlang des Seils/Drahtes geführt, sondern eine mit konstanter Kraft angepresste Masse. Hierbei steht die Kopplung der Teilsysteme Stromabnehmer und Oberleitung im Fokus. Die Vorgehensweise wird verwendet, um die hier implementierte Kopplung hinsichtlich der verwendeten Parameter zu überprüfen.

7.3.1 Wanderkraft

Abb. 7.5 zeigt das Prinzipbild des Wanderkraft-Problems. Mit einer konstanten Zugkraft T wird der Fahrdraht vorgespannt, die konstante Kraft greift vertikal am Draht/Seil an und bewegt sich längs dessen mit konstanter Geschwindigkeit. Die analytische Lösung hängt vom Modell des Fahrdraht ab.

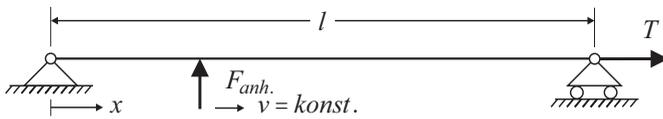


Abb. 7.5.: Prinzipbild einer konstanten Kraft F , die mit konstanter Geschwindigkeit v an einem Seil/Draht entlang fährt.

Für die ungedämpfte Saite ohne Gravitation ergibt sich aus (7.2) mit der rechten Seite der wandernden Kraft

$$\rho A \ddot{w}(x, t) - T w''(x, t) = F \delta(x - vt), \quad (7.18)$$

bei Start der Wanderkraft bei $x_0 = 0$.

Die Randbedingungen ergeben sich aus der Lagerung an den Enden $w(0, t) = w(l, t) = 0$, die Anfangsbedingungen sind durch $w(x, 0) = \dot{w}(x, 0) = 0$ gegeben. Die partielle DGL kann durch das Separationsverfahren in gekoppelte gewöhnliche Differentialgleichungen umgewandelt und mittels Exponentialansatz homogen gelöst werden können. Die Fourierreihenzerlegung der rechten Seite erlaubt die Berechnung der partikulären Lösung, sodass sich die Gesamtlösung zu

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2F}{\rho A l (\omega_n^2 - \Omega_n^2)} \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \left[\sin(\Omega_n t) - \frac{\Omega_n}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \right] \quad (7.19)$$

$$\text{mit } \omega_n = \frac{n\pi c}{l} \quad \text{und} \quad \Omega_n = \frac{n\pi v}{l}$$

berechnet. Die Lösung besteht aus den ortsabhängigen Eigenformen $\sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right)$ mit zeitabhängigen Gewichtungen. Bei der Berücksichtigung der Biegesteifigkeit durch das EBB-Modell ergibt sich die partielle DGL zu

$$\rho A \ddot{w}(x, t) + EI w''''(x, t) - T w''(x, t) = F \delta(x - vt). \quad (7.20)$$

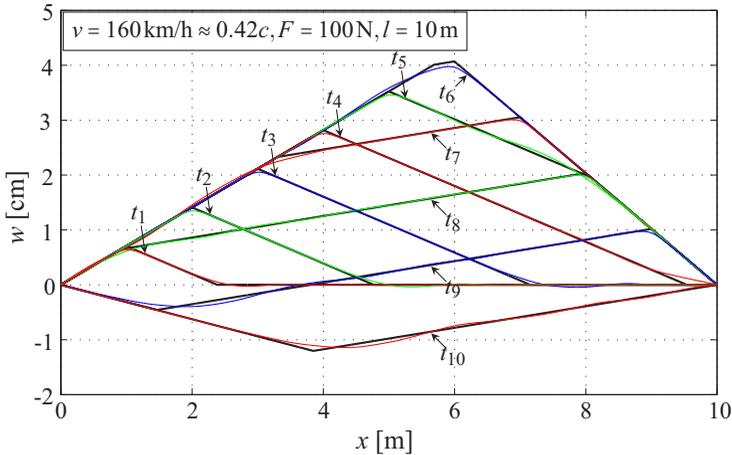


Abb. 7.6.: Semi-analytische Lösung (ersten 1000 Eigenwerte) der Auslenkung des Fahrdrhtes zu den diskreten Zeitpunkten $t_i = \frac{i}{10} \frac{l}{v}$ des Saiten- (schwarz) und EBB-Modells (farbig).

Mit selbigem Vorgehen bei der Lösung der DGL wie im Falle der Saite und den erweiterten Randbedingungen $w''(0, t) = w''(l, t) = 0$ (drehbare Lagerung), erhält man die Lösung

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2F}{\rho A l (\omega_n^2 - \Omega_n^2)} \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \left[\sin(\Omega_n t) - \frac{\Omega_n}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \right] \quad (7.21)$$

$$\text{mit } \omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{c^2 + \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \frac{EI}{\rho A}} \quad \text{und} \quad \Omega_n = \frac{n\pi v}{l}.$$

Im Gegensatz zur konstanten Wellenausbreitungsgeschwindigkeit der Saite, besitzt das Balkenmodell nach EB eine, von der Ordnungszahl n abhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit $c_n = \sqrt{c^2 + \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \frac{EI}{\rho A}}$. Die schrittweise Durchführung der Berechnung kann bspw. [Dah06] entnommen werden.

Mit 1000 verwendeten Moden ergeben sich die Lösungen der Verschiebungen zu diskreten Zeitpunkten nach Abb. 7.6. Hierbei wurde auf eine Länge $l = 10\text{ m}$ und den Parametern des Fahrdrhtes nach Tab. A.4 des Anhangs zurückgegriffen. Die Saite erfährt an der Kräfteinleitungsstelle einen Knick, wohingegen das Balkenmodell an der Kräfteinleitungsstelle stetig-differenzierbar bleibt.

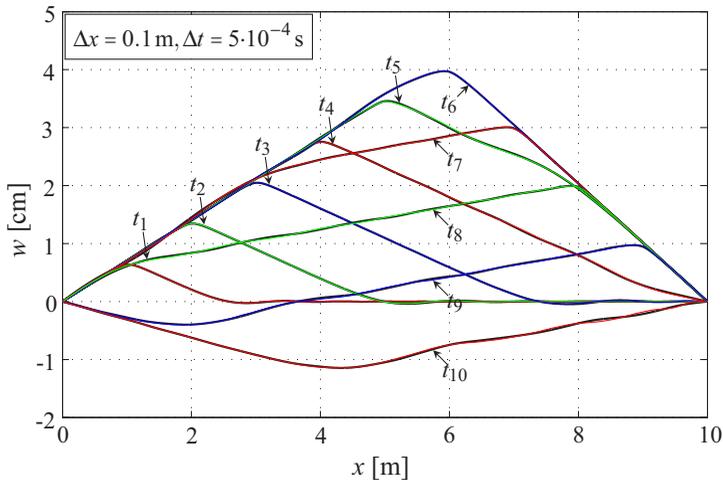


Abb. 7.7.: Vergleich der semianalytischen Lösungen (schwarz) der Wanderkraft mit der numerischen Lösung (farbig) aus ANSYS für die Zeitpunkte und Parameter aus Abb. 7.6.

Als Maß für die Güte des Parametersatzes wird der absolute Fehler gemittelt für alle Ortsschritte (ausgenommen die Lagerstellen) und die zehn betrachteten Zeitpunkte:

$$w_{ERR} = \sum_{j=1}^m \frac{1}{m} \sum_{i=2}^{k-1} \frac{1}{k} |w_{ANSYS}(x_i, t_j) - w_{AN.}(x_i, t_j)|. \quad (7.22)$$

$w_{ANSYS}(x_i, t_j) - w_{AN.}(x_i, t_j)$ sind dabei die Residuen der vertikalen Verschiebung von der semi-analytischen Lösung (ersten 1000 Eigenwerte) zur numerischen Lösung aus ANSYS ermittelt. Die Lagerstellen an den Punkten x_1 und x_k wurden herausgenommen, da sie bei kleinen k zu starken Einfluss auf den Mittelwert besitzen. Der untersuchte Parameterraum wird dabei von

$$\Delta t = \{0.5, 1, 2.5, 5, 10\} \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad \text{und}$$

$$\Delta x = \{0.01, 0.025, 0.05, 0.1\} \text{ m}$$

aufgespannt. Um die zehn Zeitpunkte der Betrachtung der Ortslösung zu berücksichtigen, wird der mittlere Fehler über die betrachteten Zeitpunkte nochmals gemittelt.

Die so erzeugten Fehlerwerte sind in Abb. 7.8 für die Geschwindigkeiten $v = \{160, 200, 250, 300\}$ km/h dargestellt. Der Fehler der Verschiebungen zeigt für alle Geschwindigkeiten einen konvergenten Charakter. Mehr Aufwand durch Reduzierung der Zeitschrittweite oder der dichteren Ortsdiskretisierung führt zu besseren Ergebnissen. Eine finale Auswahl geeigneter Parametersätze für die Simulation der Stromabnehmer-Oberleitung-Dynamik kann auf Basis der hier ermittelten Informationen des abstrahierten Modellproblems allerdings nicht vorgenommen werden. Die verwendete Aufteilung der Kräfte auf die Knoten und die Modellierungsart des Fahrdrahtes in ANSYS erweist sich entsprechend der Ergebnisse als brauchbar.

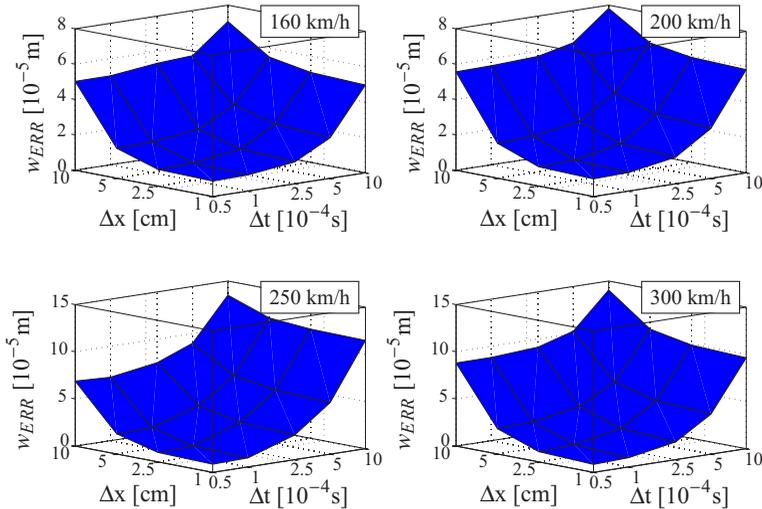


Abb. 7.8.: Gemittelter absoluter Fehler zur semi-analytischen Lösung des Wanderkraft-Problems für die betrachteten Geschwindigkeiten des EB-Balkens.

7.3.2 Wandermasse

Wie in Kap. 7.2.3 dargelegt, wird in dieser Arbeit die Kopplung über eine undirektionale Feder ausgeführt. Bei einer positiven Eindringung der Stromabnehmerschleifleiste in den Fahrdraht $w_{SL}(x, t) > w_{FD}(x, t)$ wird über die Feder-

steifigkeit c_k eine proportionale Kontaktkraft erzeugt, ansonsten wird die Kraft zu $F_k(x, t) = 0$ gesetzt. Bei der Wahl der Federsteifigkeit muss eine Balance aus Genauigkeit ($c_k \uparrow$), sowie Effizienz und Stabilität ($c_k \downarrow$) gefunden werden.

Abb. 7.9 zeigt das Prinzipbild des Wandermassen-Problems und die zur Koppelung eingefügte Feder zwischen Fahrdrabt und Masse.

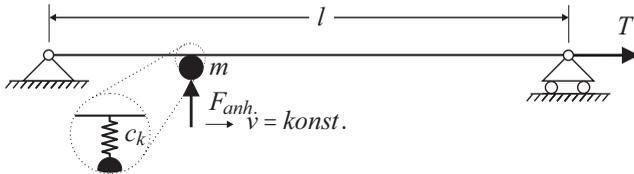


Abb. 7.9.: Wandernde Masse entlang eines Seiles/Drahtes und gewählte Kopplung durch eine Feder.

Für die Auswahl und Verifikation des Ansatzes wird auf das Modellproblem der Wandermasse an einem Seil/Balken mit konstanter Geschwindigkeit zurückgegriffen. Hierbei wird, entgegen dem Problem der Wanderkraft, eine variable Kontaktkraft zwischen der Masse und dem Seil/Balken ausgetauscht. Für die semi-analytische Lösung des Wandermassenproblems wird auf den Ansatz von [Poe00] zurückgegriffen. Die isolierte Problemstellung verwendet die komplette Implementierung der Simulationsumgebung und ermöglicht so die Überprüfung des implementierten Ansatzes auf Programmierfehler und die simulative Genauigkeit.

Da der EBB ordnungszahlabhängige Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten besitzt, bei der die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Ordnungszahl steigt, treffen die Wellenfronten mit sinkender Frequenz auf den Stromabnehmer. Die vom Stromabnehmer reflektierten ersten Wellen erfahren aufgrund des Doppler-Effektes eine erhöhte Ausbreitungsgeschwindigkeit, treffen nach abermaliger Reflexion an der Lagerung wieder auf den Stromabnehmer und resultieren in einer weiteren Überhöhung der Kontaktkraft. Dieser Effekt beschleunigt sich mit der weiteren Annäherung des Stromabnehmers an die Lagerstelle. Die Berechnung wird daher bis 0.5 m vor der Lagerung durchgeführt.

Abb. 7.10 zeigt die gefilterte und ungefilterte Kontaktkraft des Wandermassenproblems einer Masse mit $m = 1 \text{ kg}$, und $m = 7.2 \text{ kg}$ für den EBB. Im ungefilterten Fall resultiert dies in der Nähe der rechten Lagerstelle in starke Frequenz und Amplitudenüberhöhungen, die jedoch aufgrund der Tiefpassfilterung im gefilterten Fall nicht ankommen. Schon die zweite Kraftüberhöhung im Falle $m = 1 \text{ kg}$ bei ca. 65 m beträgt nur ca. 50% des ersten Kraft-Peaks. Für $m = 7.2 \text{ kg}$ ist der zweite Kraft-Peak noch größer als der erste, fällt aber im dritten und vierten wieder ab.

Um die Federsteifigkeit c_k auszuwählen, wurde ein Parameterstudie mit $c_k = \{50, 100, 200, 300\} \text{ kN}$ und den in Tab. A.4 des Anhangs für den Fahrdrat aufgelisteten Parametern durchgeführt. Die dabei verwendeten Massen sind identisch mit denen in Abb. 7.10.

Mit steigender Steifigkeit werden die Abweichungen von der semi-analytischen zur numerischen Lösung immer geringer. Zur Quantifizierung wird wieder der mittlere Fehler aus

$$F_{err} = \frac{1}{N} \|F_{ANSYS}(x) - F_{AN.}(x)\| \quad (7.23)$$

an den N -diskreten Stellen der Kommunikationsintervalle herangezogen, sowie der relative Fehler

$$f_{err}(F) = (F_{ANSYS}/F_{AN.} - 1) \cdot 100\% \quad (7.24)$$

der mittleren Kontaktkraft und deren Standardabweichung. Die Ergebnisse für den Parametersatz in Abb. 7.12 sind in Tab. 7.3 gelistet.

Erkennbar ist, dass die mittlere Kontaktkraft für alle Steifigkeitswerte sehr gute Ergebnisse liefert, die Standardabweichung und der mittlere Fehler zeigt sich da schon sensitiver der Kontaktsteifigkeit gegenüber. Der mittlere Fehler zeigt ein konvergentes Verhalten, bei dem die Steigerung der Kontaktsteifigkeit von 200kN/m auf 300kN/m keine signifikante Verbesserung bei $m = 1 \text{ kg}$ liefert. Auch die Standardabweichung ist bei $c_k = 200 \text{ kN/m}$ mit 0.77% sehr gering. Mit steigender Masse wird der Fehler bei gleicher Steifigkeit größer.

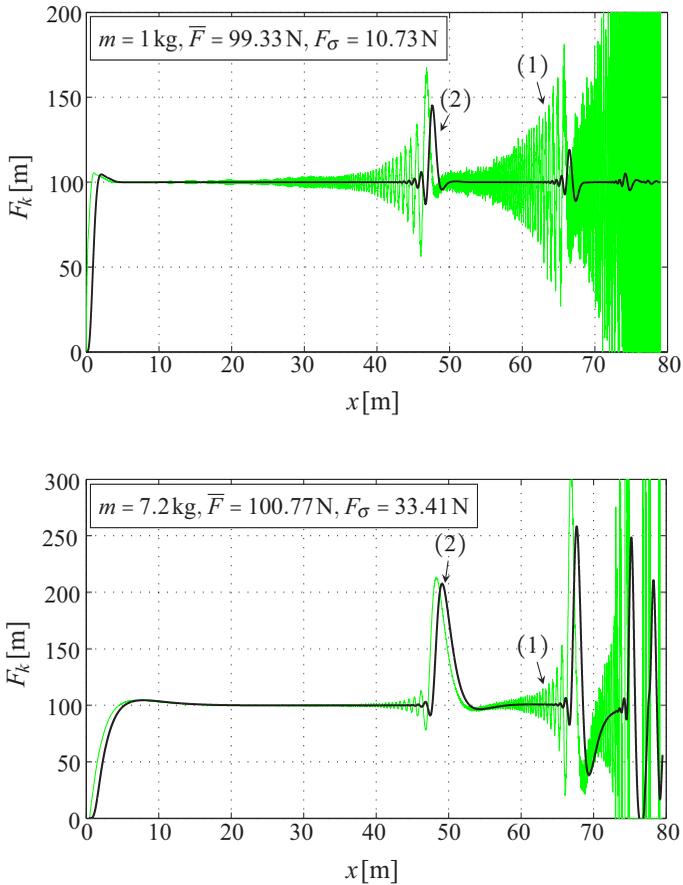


Abb. 7.10.: Semianalytisch Lösung mit 10^5 Zeitschritten und 2^{12} Ansatzfunktionen für $m = 1 \text{ kg}$ (oben) und $m = 7.2 \text{ kg}$ (unten): (1) ungefiltert; (2) gefiltert mit einem 20 Hz Bessel-Filter.

Am aussagekräftigsten erscheint der relative Fehler der Standardabweichung. Die zweite Masse entspricht ca. der im späteren Verlauf verwendeten Masse der Schleifeistenpalette. Für die Berechnung wurde $c_k = 200 \text{ kN/m}$ gewählt, was einem guten Kompromiss aus Genauigkeit und Effizienz/Stabilität entspricht.

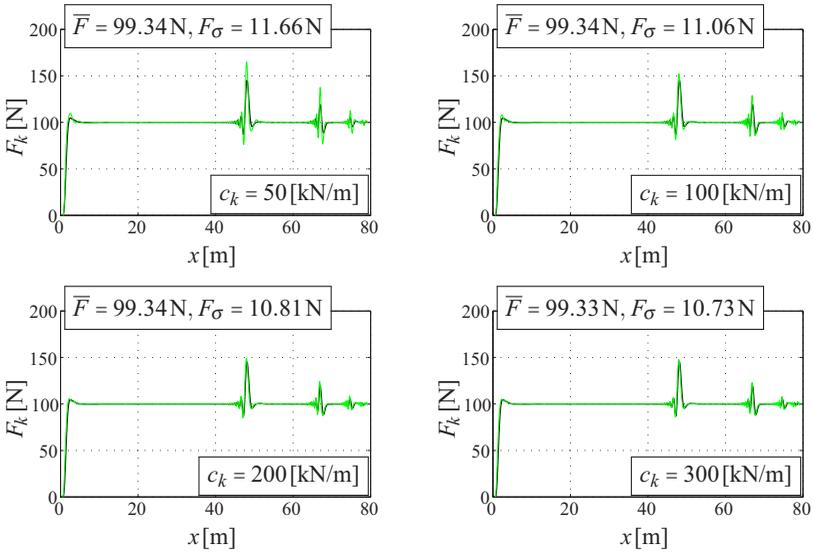


Abb. 7.11.: Parameterstudie c_k bei $\Delta x = 0.1$ m und $\Delta t = 5 \cdot 10^{-4}$ s vs. semianalytische Lösung, jeweils gefiltert mit 20 Hz Bessel-Filter für $m = 1$ kg.

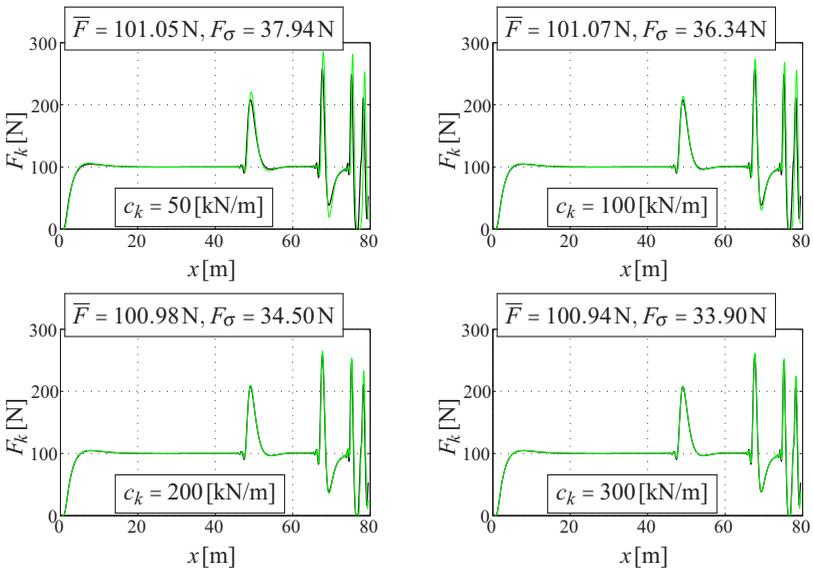


Abb. 7.12.: Parameterstudie c_k bei $\Delta x = 0.1$ m und $\Delta t = 5 \cdot 10^{-4}$ s vs. semianalytische Lösung, jeweils gefiltert mit 20 Hz Bessel-Filter für $m = 7.2$ kg.

Tab. 7.3.: Fehler der Kontaktkraft bei variiertes Kontaktsteifigkeit c_k für die Parameter nach Abb. 7.12.

m	c_k [kN/m]	50	100	200	300
1 kg	$f_{err}(F_m)$ [%]	0.00	0.00	0.00	0.00
	$f_{err}(F_\sigma)$ [%]	8.70	3.10	0.77	0.06
	F_{err} [N]	1.03	0.54	0.33	0.30
7.2 kg	$f_{err}(F_m)$ [%]	0.28	0.30	0.21	0.17
	$f_{err}(F_\sigma)$ [%]	13.57	8.79	3.26	1.50
	F_{err} [N]	6.71	3.71	1.74	1.07

7.3.3 Testfall nach EN 50318

Die EN 50318 definiert eine Vorgehensweise zur Validierung von Methodiken zur Simulation der Stromabnehmer-Oberleitung-Interaktion. Kernelement der Norm ist ein Testfall, also eine definierte Oberleitung mit einem definierten Stromabnehmer-Modell, welches unter definierten Konditionen die Oberleitung befährt. Zur Bestimmung eines zulässigen Ergebnisbereichs wurde der Testfall auf fünf validierte Simulationstools angewendet, woraus der zulässige Bereich definiert wurde [KPS⁺09]. Das verwendete Oberleitungsmodell setzt sich zusammen aus einem, mit $T_{FD} = 20\text{ kN}$ gespannten Fahrdraht und einem auf $T_{TS} = 16\text{ kN}$ gespannten Tragseil. Tragseil und Fahrdraht sind je Feld über neun masselose Hänger verbunden. Die gesamte Oberleitung besteht aus 10 Feldern. Der Zick-Zack des Fahrdrahtes beträgt $\pm 0.2\text{ m}$, der Seitenhalter wird modelliert als starrer Stab mit einer Masse von 1 kg. Der Stromabnehmer ist als Zwei-Massen-Modell (siehe Tab. A.2 des Anhangs) vorgeben, wobei die beiden Massen jeweils Freiheitsgrade in vertikaler Richtung besitzen. Gemäß der Norm ist der interessierende Frequenzbereich auf 0 Hz bis 20 Hz beschränkt, eine detaillierte Vorgabe bzgl. des zu verwendenden Filters wird nicht gemacht. Die erstellte dreidimensionale Oberleitung in ANSYS wird in Abb. 7.13 dargestellt.

Das vorgestellte Berechnungsverfahren wurde auf die zwei Stromabnehmer-Geschwindigkeiten der Norm von $v = 250\text{ km/h}$ und $v = 300\text{ km/h}$ angewandt.

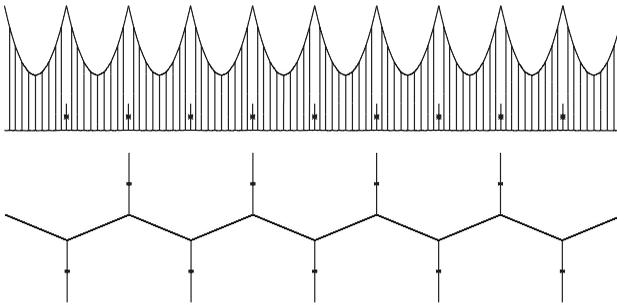


Abb. 7.13.: Statische Lage des Oberleitungsaufbau nach EN50318 in ANSYS. Verzerrte Seitenansicht (oben) und Draufsicht (unten).

Für die Auswertung der Kontaktkraft werden statistische Kenngrößen vorgegeben, denen ein Toleranzbereich von $\pm 20\%$ vorgeben wird. Die Ergebnisse stimmen mit den angegebene Bereichen für beide Geschwindigkeiten der Norm überein, siehe Tab. 7.4. Jedoch musste zum Erreichen dieses Zieles das Filter-Design angepasst werden. Ohne diese Anpassung wären die Kraftamplituden soweit reduziert, dass die Standardabweichung, sowie die Extrema der Kontaktkraft bei $v = 300 \text{ km/h}$ nicht im zulässigen Bereich liegen würden. Bei dem Filter handelt sich um einen Bessel-Filter 3. Ordnung. Die Übertragungsfunktion des verwendeten Filter besitzt die Gleichung

$$H(s) = \frac{1.9448 \cdot 10^7}{s^3 + 6.5425 \cdot 10^2 s^2 + 1.7835 \cdot 10^5 s + 1.9448 \cdot 10^7}. \quad (7.25)$$

Hierdurch ist erkennbar, dass für die Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit dem Verifikationsfall eine Aufweitung des zulässigen Frequenzbereichs notwendig war. Der Filter besitzt nicht die geforderter Grenzfrequenz von 20Hz, sondern 30.4 Hz. Ausgewertet werden die Felder 5 und 6 Feld und die dort anliegenden Seitenhalter 4, 5 und 6.

Als finalen Schritt der Validierung des Simulationstools für die jeweilige Oberleitung wird in der EN 50318 der Vergleich mittels gemessener Werte am realen System beschrieben. Hierfür existiert die verbundene Norm EN 50317, die Anforderungen an ein Messsystem beschreibt.

Tab. 7.4.: Ergebnisse der Simulationen nach EN50318.

v [km/h]	250	300
\bar{F} [N]	118.17 $_{110}^{120}$	116.46 $_{110}^{120}$
F_{σ} [N]	27.30 $_{26}^{31}$	32.26 $_{32}^{40}$
$\bar{F} + 3F_{\sigma}$ [N]	200.05 $_{190}^{210}$	213.24 $_{210}^{230}$
$\bar{F} - 3F_{\sigma}$ [N]	36.28 $_{20}^{40}$	19.69 $_{-5}^{20}$
\hat{F} [N]	181.54 $_{175}^{210}$	223.42 $_{190}^{225}$
\check{F} [N]	51.92 $_{50}^{75}$	37.41 $_{30}^{55}$
max. Anhub am Stützpunkt [mm]	52.79 $_{48}^{55}$	63.90 $_{55}^{65}$
Kontaktkraftverlust [%]	0 $_0^0$	0 $_0^0$

Hinweis: Die hoch- bzw. tiefgestellten Zahlen stellen die obere bzw. untere Grenze des zulässigen Wertebereichs dar.

In der vorliegenden Arbeit konnte leider nicht auf Messwerte für den im Folgenden verwendeten Oberleitungstyp zurückgegriffen werden, sodass die Validierung der Methodik nicht durchgeführt werden kann. Der im weiteren Verlauf verwendete Oberleitungstyp Re 200 besitzt, im Vergleich zur Oberleitung der EN 50318, an einigen Stellen einen anderen Aufbau. Wichtigstes Unterscheidungsmerkmal ist die Lagerung des Fahrdrabtes im Bereich der Stützpunkte: Bei der Re 200 kommen hier Y-Beiseile zum Einsatz, zudem ist der Hänger für das Stützrohr mit dem Y-Beiseil verbunden, sodass das Stützrohr, an dem der Seitenhalter befestigt ist, auch modelliert werden müssen.

Um die Modellierung der Oberleitung von Typ Re 200 auf Plausibilität zu untersuchen, wurde die statische Elastizität in Kap. 6.2.2 mit Literaturwerten verglichen.

7.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die verwendete Simulationsumgebung für die Simulation der Stromabnehmer-Oberleitung-Dynamik vorgestellt. Die Oberleitung wird in dem FE-Tool ANSYS modelliert, der Stromabnehmer in der MKS-

Software SIMPACK. Der schleifende Kontakt zwischen Stromabnehmer und Oberleitung wird über eine „virtuelle Feder“ realisiert, mit der ein parallele Berechnung der jeweiligen Komponenten möglich ist. Die Eignung der Vorgehensweise wurde schrittweise überprüft und lieferte - je nach gewählten Aufwand - sehr gute Ergebnisse. Hierzu wurden Parameterstudien durchgeführt, um die notwendige örtliche und zeitliche Auflösung, sowie die Steifigkeit der virtuellen Feder zu bestimmen. Bei der Verifikation des Gesamtsystems mit dem Testfall nach EN 50318 musste zum Erreichen des Ergebnisbereichs die Grenzfrequenz des Tiefpassfilters ausgeweitet werden. Mit dieser Filtereinstellung wird auch die Bewertung der Kontaktkraft im folgenden Kapitel durchgeführt.

8 Ansätze zur Neigekompensation

Die Entwicklung neuartiger technischer Lösungen bedarf der gezielter Unterstützung, um ein methodisches Vorgehen von der Ideensynthese und Konzeption bis zur Realisierung und Rückführung in die Wertstoffkette nach der Lebenszeit zu ermöglichen. Dieses Kapitel stellt in einem ersten Schritt grob die vorhanden Tools hierfür vor, um dann im zweiten Abschnitt die eigentliche Anwendung auf das hier betrachtete Problem der Neigekompensation vorzunehmen.

8.1 Entwicklungsmethodiken der Ideenfindung und -auswahl in der Konzeptphase

Die Entwicklungsmethodik des Produktentwicklungsprozesses stellt eine eigenständiges Forschungsgebiet dar, welches die systematische Unterstützung der Produktentwickler zum Ziel hat. Hierfür haben sich im Laufe der Zeit unterschiedliche Ansätze bzw. Sichtweisen etabliert, die in diesem Kapitel aufgegriffen werden. Ziel ist es, interessante Ansätze zu finden, die bei der Konzeption des interoperablen Stromabnehmers unterstützen können. Da die Konzeption in diesem Fall der Fokus der Arbeit ist, wird nach Methoden auf der Ebene dieses Arbeitsschrittes gesucht. Hierbei gilt es, Methoden zur Erzeugung von Varianten auf abstrakter Ebene zu erzeugen, und diese schrittweise zu detaillieren und kondensieren.

8.1.1 Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung

Erfolgreiche Produktentwicklung im Bereich des Maschinenbaus hat die Schaffung eines neuartigen, marktfähigen und markterfolgreichen Produktes (Innovation) zum Ziel. Vorgehensmodelle haben sich hierbei als ein geeignetes Mit-

tel zur Strukturierung und Beschreibung des Produktentwicklungsprozesses etabliert. Aufgrund der Tatsache, dass Probleme vielfältig sein können und unterschiedliche Vorgehensweisen erfordern, bzw. es nicht den „optimalen“ Weg gibt, ist die Vielzahl unterschiedlicher Modelle verständlich. Hauptaugenmerk eines Modells sollte aber auf einer flexiblen Handhabung liegen, sodass Freiheiten - wo nötig - vorhanden sind, aber methodische Unterstützung nicht zu kurz kommt.

Auch bei der Skalierung in zeitlicher und inhaltlicher Sicht sind Unterschiede vorhanden. Handlungsmodelle auf der Mikrologik-Ebene behandeln den elementaren Problemlösungsprozess. Dem gegenüber stehen Handlungsprozesse, die den kompletten Produktentwicklungsprozess von der Zieldefinition und -einschränkung über die Fertigung bis zum Ende der Produktlebensdauer beschreiben. Diese makroskopische Betrachtung gibt der Produktentwicklung einen zeitlichen Rahmen und ordnet die Arbeitsschritte sinnvoll an.

Zwischen den beiden Extremen der Mikro- und Makrologik liegen Handlungsmodelle auf der Ebene eines Arbeitsschrittes. Hierbei wird der Fokus auf das Vorgehen innerhalb dieses Arbeitsschrittes gelegt.

Tab. 8.1 listet einige Vorgehensmodell auf, deren Fokussierung von der Mikro- auf die Makrologik in absteigender Richtung übergeht.

Interessant erscheint das Vorgehensmodell des Systems Engineering, dass nach [HD02] auf vier Grundgedanken fußt:

1. Phasenunabhängiger formaler Vorgehensleitfaden als Arbeitslogik zur Problemlösung (Mikrologik)
2. Vorgehensweise vom Groben ins Detail
3. Prinzip des Denkens in Varianten beachten
4. Gliederung des Prozesses der Systementwicklung und -realisierung nach zeitlichen Aspekten (Makrologik)

Tab. 8.1.: Vorgehensmodelle der Produktentwicklung nach [Bra05].

Vorgehensmodell	Beschreibung
TOTE-Modell: Test-Operate-Test-Exit	Beschreibung der Vorgänge zur Handlungsregulation auf elementarster Ebene.
VVR-Zyklus: Vergleich-Veränderung-Rückmeldung	Zusätzliche die Betrachtung auf das Umfeld.
DPS: Discursive Problem Solving	Abstrakte Formulierung von Zielen vor und während der Lösungssuche.
PDCA-Zyklus: Plan-Do-Check-Act	Betonung vor allem der umsetzungsorientierten Handlungsschritte.
Problemlösungszyklus des Systems Engineering	Darstellung des Grundmusters zur Problemlösung: Zielsuche, Lösungssuche und Auswahl.
Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel	Verfeinerung der Hauptschritte des Problemlösungszykluses.
Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren - VDI-Richtlinie 2221	Unterteilung der Arbeitsschritte des Entwickelns und Konstruierens.
V-Modell - VDI-Richtlinie 2206	Makrozyklus zur Entwicklung mechatronischer Systeme.

Systems Engineering (SE) stellt durch die Einbeziehung von Mikro- und Makrologik einen vollständigen Ansatz zur Lösung von Produktentwicklungsaufgaben dar. Der Problemlösungszyklus aus dem ersten Punkt beinhaltet nach [HD02]

1. Zielsuche (Situationsanalyse & Zielformulierung)
2. Lösungssuche (Synthese und Analyse von Lösungen)
3. Auswahl (Bewertung & Entscheidung)

Dies ist eine sehr allgemein gehaltene Beschreibung, die Entwickler vermutlich häufig auch intuitiv verwenden. Trotzdem eignet sich diese Vorgehensweise sehr gut für die Konzeption in dieser Arbeit.

Die Zielformulierung für das hier vorliegende Gesamtproblem wird in Kap. 8.3.1 durchgeführt, die Situationsanalyse wird in Kap. 8.2.1 durchgeführt. Die Synthese und Bewertung entsprechend in Kap. 8.3.

Der zweite Punkt der steigenden Detaillierung mit dem Fortschreiten des Projektes ist ein wichtiger Aspekt. Will man eine möglichst grundlegende und breite Suche im Lösungsraum unternehmen, ist eine zu detailbezogene Lösungssuche zu Beginn kontraproduktiv - eine Abstrahierung der Komponenten entsprechend notwendig. Durch den hierbei verwendete Top-Down-Ansatz ist zur Lösung eines Problems die Betrachtungsweise anfänglich grob und abstrakt und wird mit der fortschreitenden Problemlösung immer weiter detailliert, bis die notwendige Detaillierung erreicht - das Problem gelöst ist. Der Vorteil dieses Gedankens ist, dass man aufgrund der anfänglichen niedrigen Detaillierungsgrad generelle, konzeptionelle Ansätze untersuchen und bewerten kann. Die Komplexität wird dadurch anfänglich auf das Notwendigste reduziert. Details werden erst zu einem späteren Zeitpunkt bearbeitet, ausgenommen es handelt sich um Verbesserungs- oder Anpassungskonstruktionen.

Hinter dem dritten Aspekt steckt die Idee, dass Probleme auf unterschiedliche Weise realisiert werden können. Aus einer breiten Basis an Lösungen - einem großen Lösungsraum - kann durch eine spätere (möglichst) objektive Bewertung Ideen herausgefiltert werden, die die vorteilhaftesten Eigenschaften vereint. Dadurch lässt sich ein (lokales) Optimum des gesamten Lösungsraumes finden.

In Kombination mit dem Grundgedanken Vorgehen vom Groben ins Detail kann auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen eine Vielzahl an Varianten generiert werden, die einen sinnvollen Pfad folgen, siehe Abb. 8.1.

Der letztgenannte Aspekt legt die zeitliche Strukturierung und Gliederung der Systementwicklung und -realisierung nahe. Es handelt sich hierbei um die gesamtheitliche Betrachtung des Entwicklungsprozesses von der Problemstellung bis zur Realisierung der Lösung. Das diskursive Vorgehen wird auch als Makrologik bezeichnet. Ablaufpläne unterschiedlicher Art haben sich in der Literatur entwickelt, die teilweise auf spezifische Konstruktionen eingehen oder allgemein gehalten sind.

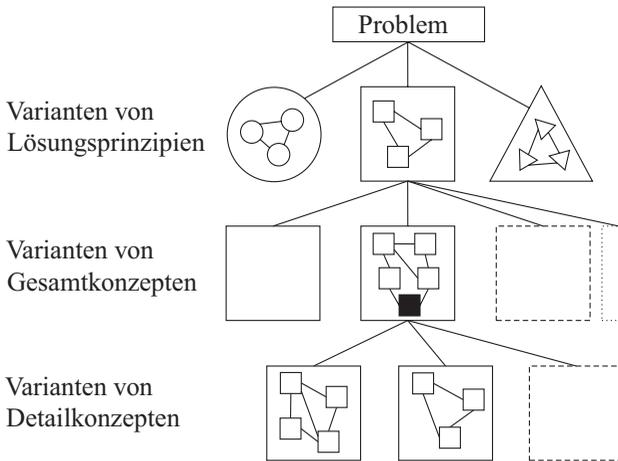


Abb. 8.1.: Variantenbildung in Verbindung mit dem stufenweisen Vorgehen vom Groben ins Detail [HD02].

Der Anspruch an ein solches Vorgehensmodell der Makrologik muss sein, den Entwickler flexibel zu unterstützen, Freiräume für Kreativität zu lassen und gleichzeitig die Entwicklung zielgerichtet auf die Lösung zu führen.

Bei dem in dieser Arbeit betrachteten Problem wird nur die Konzeption eines neuartigen Ansatzes durchgeführt, die konkrete Ausgestaltung wird in dieser Arbeit nicht durchgeführt. Vielmehr soll der Lösungsraum - wie in diesem Abschnitt vorgestellt - möglichst vollständig abgesucht werden.

8.1.2 Variantenbildung

Für die Variantenerzeugung werden Techniken angewendet, die nach [EM13] grundlegend in

- *intuitive* Vorgehen zur Lösungssuche: Kreativ werden Lösungen gefunden, dies kann auch durch kreativitätsanregende Techniken wie Brainstorming, etc. unterstützt werden;

und

- *diskursive* Vorgehen zur Lösungssuche: Systematiken unterstützen hierbei die Erzeugung und Identifizierung von neuen Lösungen. Ein Ordnungsschema stellt hierbei die Möglichkeit dar, Lösungen anhand von Merkmalen und Eigenschaften zu sortieren.

Inbesondere die diskursive Variantenbildung mit einem Ordnungsschema scheint für das Problem der NeigeKompensation sehr geeignet zu sein.

Die Grundlagen sind damit gelegt, um diese auf das vorliegende Problem anzuwenden. Hierzu wird im ersten Teil der aktuelle Stand der Technik erarbeitet und Kriterien für eine sinnvolle Lösung definiert. Eine diskursive Lösungsfindung mittels Funktionszerlegung und ein kinematisches Ordnungsschema wird als Basis für die Variation mit einer Wahrheitstabelle verwendet. Abschließend findet eine Bewertung der Prinziplösungen statt, die die genauer zu untersuchenden Lösungen weiter eingrenzt. Der kondensierte Lösungssatz wird anhand des Einflusses auf die dynamische Interaktion mit der Oberleitung bewertet.

8.2 Neigekompensation der Stromabnehmer

Die Lage der Schleifleisten und des Fahrdrachts müssen in einem definierten Bereich zueinander liegen. Würde der Stromabnehmer starr mit dem Fahrzeugdach eines aktiv geneigten Wagenkastens in Verbindung stehen, würde dieser Bereich überschritten werden.

8.2.1 Stand der Technik - Technologierecherche

Es haben sich unterschiedliche Techniken zur Vermeidung oder Kompensation der Wankbewegung des Stromabnehmers etabliert [Sch98]:

- Über einen Rahmen mit dem Drehgestell in Verbindung stehende Stromabnehmer.
- Passive Mechanismen auf dem Fahrzeugdach, die über Seilzüge oder Stangen und Umlenkungen derart mit dem Drehgestell verbunden sind, sodass der Stromabnehmer mittig zum Drehgestell positioniert ist.
- Aktive Mechanismen auf dem Fahrzeugdach.

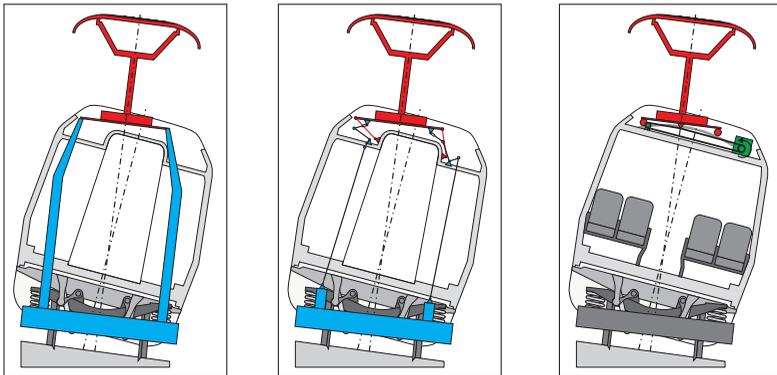


Abb. 8.2.: Möglichkeiten zur Kompensation der Wagenkastenneigung, angelehnt an [Sch98] und [Eic07]: drehgestellfeste Anbindung (links); passive bewegliche Anbindung (mittig, angelehnt an [Sie02]); aktive bewegliche Anbindung (rechts).

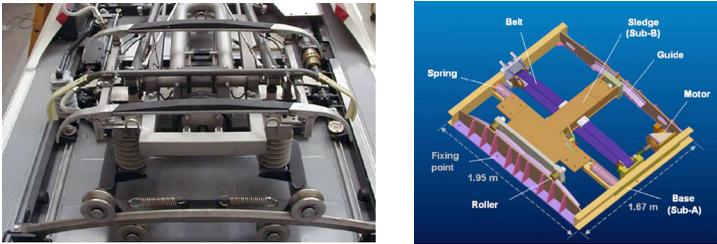


Abb. 8.3.: Aktuelle Lösung der aktiven Neigekompensation am Markt; (l): [Eic07], (r): [KLH09].

Vorteil der ersten beiden Varianten ist, dass sie passiv sind und somit über eine hohe Ausfallssicherheit verfügen. Jedoch werden bei neueren Neigetechnikfahrzeugen ausschließlich aktive Systeme auf dem Fahrzeugdach verwendet, da sie relativ einfach aufgebaut sind, den Passagierraum weniger negativ beeinflussen, und keine komplexen Seilzuganbindungen benötigen. Wenn man sich die aktuelle Lösung am Markt anschaut, dann basiert diese auf dem Prinzip nach [BBK99]. Ein Rahmen wird zwischen Stützisolatoren und Dach geschaltet, auf dem ein beweglicher Schlitten vorhanden ist, der entlang einer Bahn über mehrere Rollen den Stromabnehmer bewegt. Die Aktuierung erfolgt dabei über einen Elektromotor, der mit dem Schlitten über einen Riementrieb in Verbindung steht. Abb. 8.3 zeigt zwei Rahmen zur Kompensation: Linksseitig befindet sich auf dem Dach des ICN (InterCity-Neigezug der Schweizerischen Bundesbahn (SBB), Triebzug mit aktiver Neigetechnik) eine kreisbogenförmige Führung, deren Bewegungsbahn auf einen fixen Momentanpol hinausläuft. Auf der rechten Seite sieht man zwei gekrümmte Führungen, was zu einem wandernden Momentanpol führen wird. In dem industriellen Bereich, in dem sich diese Arbeit bewegt, finden sich die meisten Informationen über vorhandene Lösungen in Patenten. Daher wurde eine umfangreiche Recherche ausgeführt. Das Ergebnis daraus ist in Anh. A.5.1 aufgeführt. Aus der Recherche ist ersichtlich, dass hauptsächlich Variationen bekannter Lösungen - etwa beim Antriebskonzept - durchgeführt wurden. Ein systematischer Ansatz auf der Seite der verwendeten Kinematik für die Suche erscheint somit unabdingbar.

8.3 Methodische Erzeugung und Auswahl

Um Konzepte vergleichen zu können, sind Bewertungskriterien notwendig, welche im ersten Schritt definiert werden. Die Erzeugung von Konzepten wird den zweiten Abschnitt beschäftigen. Hierfür wird ein Ordnungsschema erzeugt, mit dessen Hilfe Lösungsansätze generiert werden können. Mit der Kondensierung und abschließenden Bewertung der Konzepte wird der Abschnitt geschlossen.

8.3.1 Kriterien für die Neigekompensation

Stromabnehmer sind aufgrund ihrer anspruchsvollen und wichtigen Aufgabenstellung unterschiedlichen Anforderungen ausgesetzt, die im Folgenden definiert werden. Aus der Aufgabenstellung ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Neigekinematik, die ebenfalls aufgenommen werden. Anforderungen können generell in

- *Festanforderungen* - Forderungen, die für Funktionserfüllung genau eingehalten werden müssen,
- *Mindestanforderungen* - Forderungen, deren Grenzen nicht über- oder unterschritten werden dürfen,
- *Wunschanforderungen* - zusätzliche Anforderungen, die über die eigentliche Funktionserfüllung hinausgehen und bei mehreren Varianten mit erfüllten Fest- und Mindestanforderungen relevant werden

unterteilt werden. Als Anforderungen ergeben sich die in Tab. 8.2 genannten Punkte.

F1 geht dabei direkt auf die in Kap. A.5.3 definierten Werte für die Kontaktkräfte ein. Die Stromabnehmerlinie aus [EN09] zielt vor allem auf die Schnellabsenkung ab, die notwendig wird, falls der Stromabnehmer eine Beschädigung aufweist. Durch ein Nichteinhalten des vorgesehene Raumes können weitere Gefährdungen entstehen. Diese Forderung geht einher mit F4. Mit F5 ist der notwendige Isolationsabstand zum Fahrzeugdach gemeint, dessen Abstand

Tab. 8.2.: Anforderungsliste an einen Stromabnehmer mit Neigekompensation.

#	Anforderungsbeschreibung	Referenz bzw. Grenzwert
F1	Einhaltung der Kontaktkraftbedingungen	[EN12]
F2	Einhaltung der Stromabnehmer-Begrenzungslinie	[EN09]
F3	Hohe Zuverlässigkeit	Winterrauglichkeit, einfache Aktuierung, etc.
F4	Fail-Safe Design	Sichere Schnellabsenkung [EN11], Selbstzentrierung, Selbstüberwachung
F5	Einhaltung der elektrischen Isolationsabstände	[EN10]
F6	Einhaltung des lateralen Bauraums	Abb. 4.3
M1	Reduzierung der Bauhöhe im Vergleich zu aktuellen Lösungen	$550\text{mm} \leq h \leq 750\text{mm}$ [Tes11]
W1	einfaches Funktionsprinzip	-
W2	geringer konstruktiver Aufwand	-
W3	niedrige LCC-Kosten	-
W4	geringes Gewicht	-
W5	geringe Geräuschemission	-
W6	einfache Wartbarkeit	-

durch die Kompensation nicht unterschritten werden darf. Auch der laterale Bauraum ist auf dem Fahrzeugdach begrenzt, sodass Lösungen mit einem zu hohen Bedarf aussortiert werden müssen (F6).

8.3.2 Funktionszerlegung und Prinziplösungen

Zur Erzeugung von Lösungsvarianten muss die Funktion der Stromabnehmerkomponenten im Allgemeinen und die der Neigekompensation im Speziellen aufgeschlüsselt werden.

- Hubaktor
- Hubkinematik
- Schnellsenkeinrichtung
- Kontaktierungseinheit
- Wippenkonstruktion
- Neigekompensation

Die Bewegung zur Neigekompensation lässt sich in

- Translation - Bewegung in Richtung s ,
- Rotation - Drehbewegung um die Wagenkasten-Längsachse zur Kompensation der Wankbewegung des Wagenkastens

einteilen. Die Rotation, Translation und deren Positionen der Ausführung können hierbei als Variationsparameter verwendet werden. Für die Identifikation möglicher Orte der Ausführung liefert Abb. 8.4 drei Positionen. Position 1 stellt hierbei die Verbindung zwischen Fahrzeug und Trägerrahmen dar. Als zweite mögliche Position wurde die Schnittstelle zwischen der Hubkinematik und dem Trägerrahmen identifiziert. Es handelt sich dabei um die Verbindungen zwischen Unterarm und Trägerrahmen und Lenkerstange und Trägerrahmen. Als dritte und letzte Position für die Bewegungen wurde die Schnittstelle zwischen dem Oberarm und der Wippe identifiziert.

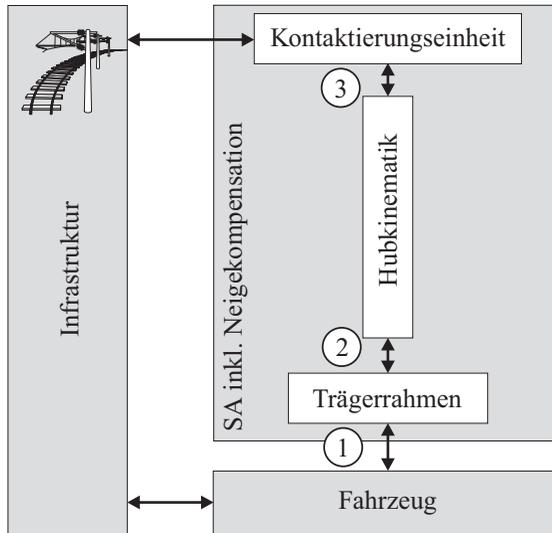


Abb. 8.4.: Variation der Systemstruktur aus Abb. 3.1 mit den drei Haupt-Leitstützstrukturen Trägerrahmen, Hubkinematik und Kontaktierungseinheit zur Identifikation der verbindenden Wirkflächenpaare 1, 2 und 3.

Durch die Identifikation der notwendigen Bewegungsarten und möglichen Positionen der Bewegungsfunktion, liefert eine Wahrheitstabelle gemäß Tab. 8.3 alle unter dieser Betrachtung möglichen Varianten. Insgesamt ergeben sich durch die 6 möglichen Zustände 2^6 Varianten, von denen einige durch Redundanzen direkt eliminiert werden können. Aus der Wahrheitstabelle wurden zehn Varianten ausgewählt, die im Folgenden detaillierter betrachtet werden. Bei der Translation $\mathbf{s} = (y'', z'')^T$ sind Bewegungen in sowohl y'' - , wie auch z'' - Richtung möglich. Da eine solche Bewegung, es sei denn sie wird von zwei unabhängigen Aktoren ausgeführt, immer mit einer Rotation gekoppelt ist, wird bei unterschiedlichen Positionen der Rotation und Translation von einer linienförmigen Bewegung ausgegangen. Ebene Bewegungen werden bei der Realisierung der Rotation und Translation an einer Position berücksichtigt.

Tab. 8.3.: Wahrheitstabelle zur diskursiven Variantenerzeugung nach Abb. 8.4

#	Pos. ③		Pos. ②		Pos. ①		Bewertung
	↔	↻	↔	↻	↔	↻	
W1	0	0	0	0	0	0	×, keine Neigekecompensation
W2	0	0	0	0	0	1	×, W5 vorteilhafter
W3	0	0	0	0	1	0	✓ → PL1
W4	0	0	0	0	1	1	✓ → PL2
W5	0	0	0	1	0	0	✓ → PL3
W6	0	0	0	1	0	1	×, Redundanz Rotation
W7	0	0	0	1	1	0	✓ → PL4
W8	0	0	0	1	1	1	×, Redundanz Rotation
W9	0	0	1	0	0	0	×, W3 vorteilhafter
W10	0	0	1	0	0	1	×, W6 vorteilhafter
W11	0	0	1	0	1	0	×, Redundanz Translation
W12	0	0	1	0	1	1	×, Redundanz Translation
W13	0	0	1	1	0	0	×, W7 vorteilhafter
W14	0	0	1	1	0	1	×, Redundanz Rotation
W15	0	0	1	1	1	0	×, Redundanz Translation
W16	0	0	1	1	1	1	×, Redundanz Rotation und Translation
W17	0	1	0	0	0	0	×, Translation fehlt
W18	0	1	0	0	0	1	×, Redundanz Rotation
W19	0	1	0	0	1	0	✓ → PL5
W20	0	1	0	0	1	1	×, Redundanz Rotation
W21	0	1	0	1	0	0	✓ → PL6
W22	0	1	0	1	0	1	×, Redundanz Rotation
W23	0	1	0	1	1	0	×, Redundanz Rotation
W24	0	1	0	1	1	1	×, Redundanz Rotation
W25	0	1	1	0	0	0	×, W19 vorteilhafter
W26	0	1	1	0	0	1	×, Redundanz Rotation
W27	0	1	1	0	1	0	×, Redundanz Translation
W28	0	1	1	0	1	1	×, Redundanz Translation und Rotation
W29	0	1	1	1	0	0	×, Redundanz Rotation
W30	0	1	1	1	0	1	×, Redundanz Rotation
W31	0	1	1	1	1	0	×, Redundanz Translation und Rotation
W32	0	1	1	1	1	1	×, Redundanz Translation und Rotation
W33	1	0	0	0	0	0	✓ → PL7
W34	1	0	0	0	0	1	✓ → PL8

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. 8.3 – Fortsetzung von der vorigen Seite

#	Pos. ③		Pos. ②		Pos. ①		Bewertung
	↔	↻	↔	↻	↔	↻	
W35	1	0	0	0	1	0	×, Redundanz Translation
W36	1	0	0	0	1	1	×, zu aufwändig
W37	1	0	0	1	0	0	✓ → PL9
W38	1	0	0	1	0	1	×, Redundanz Rotation
W39	1	0	0	1	1	0	×, Redundanz Translation
W40	1	0	0	1	1	1	×, Redundanz Rotation und Translation
W41	1	0	1	0	0	0	×, Redundanz Translation
W42	1	0	1	0	0	1	×, Redundanz Translation
W43	1	0	1	0	1	0	×, Redundanz Translation
W44	1	0	1	0	1	1	×, Redundanz Translation
W45	1	0	1	1	0	0	×, Redundanz Translation
W46	1	0	1	1	0	1	×, Redundanz Rotation und Translation
W47	1	0	1	1	1	0	×, Redundanz Translation
W48	1	0	1	1	1	1	×, Redundanz Rotation und Translation
W49	1	1	0	0	0	0	✓ → PL10
W50	1	1	0	0	0	1	×, Redundanz Rotation
W51	1	1	0	0	1	0	×, Redundanz Translation
W52	1	1	0	0	1	1	×, Redundanz Rotation und Translation
W53	1	1	0	1	0	0	×, Redundanz Rotation
W54	1	1	0	1	0	1	×, Redundanz Rotation
W55	1	1	0	1	1	0	×, Redundanz Rotation und Translation
W56	1	1	0	1	1	1	×, Redundanz Rotation und Translation
W57	1	1	1	0	0	0	×, Redundanz Translation
W58	1	1	1	0	0	1	×, Redundanz Rotation und Translation
W59	1	1	1	0	1	0	×, Redundanz Rotation und Translation
W60	1	1	1	0	1	1	×, Redundanz Rotation und Translation
W61	1	1	1	1	0	0	×, Redundanz Rotation und Translation
W62	1	1	1	1	0	1	×, Redundanz Rotation und Translation
W63	1	1	1	1	1	0	×, Redundanz Rotation und Translation
W64	1	1	1	1	1	1	×, Redundanz Rotation und Translation

Zur Beschreibung der Varianten werden Prinzipbilder verwendet, die nach Abb. 8.5 aufgebaut sind. Die Grafik enthält die Stromabnehmer - und Fahrzeugbegrenzungsline, aus denen das Lichtraumprofil errechnet wird.

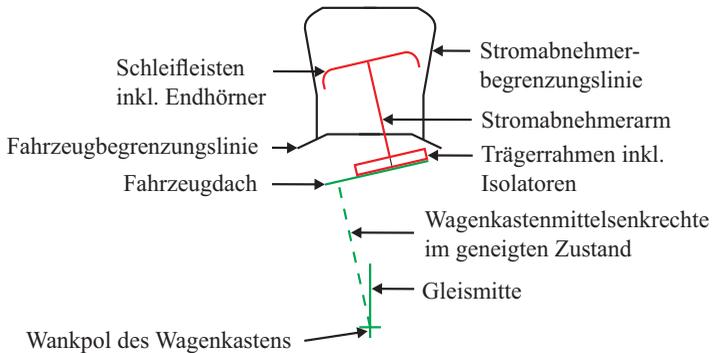


Abb. 8.5.: Merkmale der Prinzipbilder

Darin wird fahrzeugseitig der Wankpol des Wagenkastens, sowie das Dach des Fahrzeuges in abstrahiert Form (grün) dargestellt. Der Stromabnehmer wird aus den drei Funktionseinheiten Trägerrahmen inkl. der Isolatoren, Stromabnehmerarms (also der Hubkinematik) und der Kontaktierungseinheit (den Schleifleisten inkl. Endhörnern), wieder abstrahiert (rot) dargestellt. Aus einer solchen Darstellung können die Merkmale der Prinziplösungen klar und einfach dargestellt werden.

Die Translation an der i Komponente wird mit Δ_i gekennzeichnet, eine Rotation mit δ_i .

Die ausgewählten zehn Varianten sind in Tab. 8.4 mit einer Beschreibung der charakteristischen Eigenschaften aufgelistet.

Tab. 8.4.: Beschreibung der Varianten aus Tab. 8.3

#	Beschreibung	Skizze
PL1	Translation Δ_t des Trägerrahmens parallel zum Fahrzeugdach. Aufgrund des Wankwinkels η und einer fehlenden Kompensation entsteht an der Wippe ein Fehlwinkel zur Horizontalen $\delta_f = \eta$.	
PL2	Translation Δ_t und Rotation des Trägerrahmens um den Winkel $\delta_t = \eta$. Diese Prinziplösung entspricht der aktuell am weitesten verbreiteten Lösung zur Neigekompensation am Markt.	
PL3	Rotation des Stromabnehmerarms um den Winkel δ_a . Es stellt sich an der Wippe ein Fehlwinkel zur Horizontalen δ_f ein.	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. 8.4 – Fortsetzung von der vorigen Seite

#	Beschreibung	Skizze
PL4	Rotation des Stromabnehmerarms um den Winkel δ_a und Translation Δ_t des Trägerrahmens parallel zum Fahrzeugdach.	
PL5	Translation Δ_t des Trägerrahmens parallel zum Fahrzeugdach und Kompensation der Fehlstellung durch Rotation der Wippe um den Winkel $\delta_w = \eta$.	
PL6	Rotation des Stromabnehmerarms um den Winkel δ_a und Kompensation der Fehlstellung durch Rotation der Wippe um den Winkel δ_w .	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. 8.4 – Fortsetzung von der vorigen Seite

#	Beschreibung	Skizze
PL7	Translation der Stromabnehmerwippe Δ_w senkrecht zum Stromabnehmerarm. Durch die fehlende Rotation entsteht ein Fehlwinkel $\delta_f = \eta$.	
PL8	Rotation des Trägerrahmens um den Winkel δ_t und Translation Δ_w der Wippe senkrecht zum Stromabnehmerarm.	
PL9	Rotation des Stromabnehmerarms um den Winkel δ_a und Translation der Wippe Δ_w senkrecht zum Stromabnehmerarm.	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. 8.4 – Fortsetzung von der vorigen Seite

#	Beschreibung	Skizze
PL10	Rotation δ_w und Translation Δ_w der Wippe.	

Die zehn erzeugten Varianten werden im folgenden Kapitel auf grundlegende Parameter untersucht.

8.3.3 Bewertung und Auswahl

Zur Beurteilung der in Kap. 8.3.2 erstellten Konzepte ist die Bewertung im Hinblick auf die Anforderungen notwendig. Aufgrund des hohen Abstraktionsgrades der Lösungen sind genaue Parameter des Systems teilweise nicht vorhanden (bspw. Massen), die aber für einige Bewertungskriterien notwendig sind. In diesem Fall wird eine allgemeine Einflußanalyse durch Variation des untersuchten Parameters vorgenommen, wodurch ein grober Indikator erzeugt wird. Für die restlichen Parameter werden genaue Analysen durchgeführt und erste Abschätzungen zum notwendigen Bauraum durchgeführt.

Kinematik

Dieser Abschnitt dient der Beschreibung und Abschätzung der kinematischen Zusammenhänge. Translationswege $\Delta_{(t,w)}$ und Rotationswinkel $\delta_{(t,a,w)}$ werden in Abhängigkeit der Arbeitshöhe h_{eff} und des Wankwinkels η untersucht. Aus den Extremstellungen kann der Platzbedarf auf dem Fahrzeugdach, sich einstellende Fehlwinkel δ_f der Stromabnehmerwippe zur Horizontalen und

die Fußpunktanregung durch die Änderung der Stromabnehmerhöhe Δh_s abgeschätzt und im Sinne der Elimination untauglicher Lösungen verwendet werden. Für die Abschätzung wurden die in Abb. 8.6 definierten Fahrzeugparameter verwendet. Hierbei ergeben sich allerdings abweichende Ergebnisse für die unterschiedlichen Kinematiken der Neigetechnik.

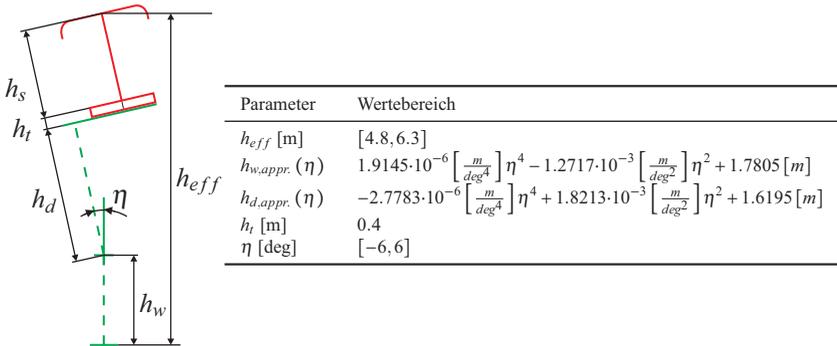


Abb. 8.6.: Erweiterung des Prinzipbilds aus Abb. 8.5 um geometrische Größen, mit den winkelabhängigen Approximation der Wankpolhöhe und der Dachhöhe zur Approximation der Bewegung des Fußpunktes aus Abb. 4.4.

Es wird daher sowohl der allgemeine Fall einer Neigung mit fixem Momentanpol, sowie die des wandernden Momentanpols nach Abb. 4.3 erstellt und verglichen. Hierbei wird vor allem auf den notwendigen Platzbedarf auf dem Dach, sowie die weitere Fußpunktanregung des Stromabnehmers dargestellt. Die Berechnung der beiden Kinematiken unterscheidet sich durch die Winkelabhängigkeit der Parameter h_d und h_w im Falle der trapez gelenkten Kinematik. Für den Fall des fixen Momentanpols sind die Parameter winkelunabhängig und nehmen die Werte bei $\eta = 0$ an. Darstellung zu diesem Fall sind in Anhang A.5.2 aufgeführt.

PL1: Translationbedarf des Trägerrahmens

Aus Abb. 8.7 kann eine Maximum im Betrag der seitliche Verschiebung von ca. 500mm abgelesen werden. Jedoch befindet sich die Randextrema im Bereich der maximalen Fahrdradhöhe, welche auf 6.5m gesetzt wurde und eher auf

Bahnhöfen Verwendung finden. Wird auf freier Strecke eine maximale Fahrdrathöhe von 6 m mit 0.1 m Anhub durch den Stromabnehmer angenommen, resultiert daraus eine notwendige Verschiebung von 450 mm. Zusammen mit einer angenommen verfügbaren Breite auf dem Dach von 2 m (siehe Abb. 4.3), ergibt sich eine mögliche Breite des Stromabnehmeraufbaus von 1100 mm. Der Wert deckt sich mit der Abstützbreite des Trägerrahmens aktueller Lösungen, jedoch muss noch der Platzbedarf für die Antriebseinheit zur Translation des Stromabnehmers berücksichtigt werden, welcher ebenfalls Bauraum benötigt. Der laterale Bauraum des Fahrzeugdachs wird durch die Fahrzeugbegrenzungslinie bestimmt, und kann nicht erweitert werden. Entsprechend kann diese Lösung nicht weiterverfolgt werden.

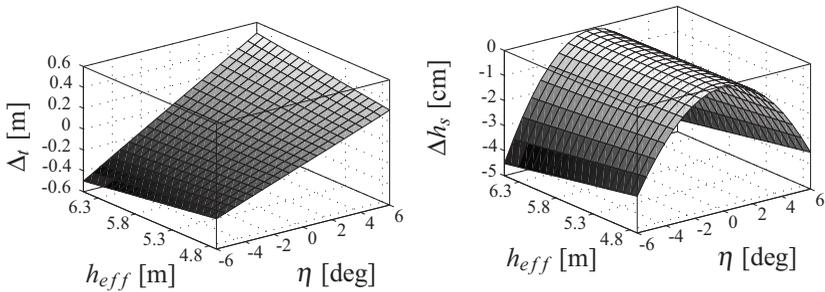


Abb. 8.7.: Translationsbedarf des Trägerrahmens (links) und induzierte Änderung der Arbeitshöhe des Stromabnehmers (rechts) für die Variante PL1.

$$\Delta_t = (h_{eff} - h_w(\eta)) \cdot \sin\eta \quad (8.1)$$

$$h_s = (h_{eff} - h_w(\eta)) \cdot \cos\eta - (h_d(\eta) + h_t) \quad (8.2)$$

$$\begin{aligned} \Delta h_s &= h_s(h_{eff}, \eta) - h_s(h_{eff}, 0) \\ &= (h_{eff} - h_w(\eta)) \cdot \cos\eta - h_d(\eta) - (h_{eff} - h_w(0) - h_d(0)) \end{aligned} \quad (8.3)$$

Bei der Lösung PL1 stellt sich zudem ein Fehlwinkel von η ein, der bei Lösung PL5 durch Rotation der Wippe um η kompensiert wird. Die Frage der Zulässig-

keit solcher Fehlstellung lässt sich mit [EN09] beantworten. Darin wird ein vertikaler Abstand definiert, welcher vom höchsten Punkt der Schleifleisten zum aktuellen Kontaktierungspunkt des Fahrdrathes gemessen wird. Dieser darf maximal 60mm betragen, was die Hersteller von Stromabnehmern mit Anschlägen der Schleifleisten realisieren, die eben jene 60mm voneinander entfernt sind. Eine zusätzliche Neigung der Schleifleisten um bis zu 6° steht somit der [EN09] entgegen. Dieses Kriterium wird als K.O. Kriterium betrachtet, weshalb die Lösung nicht weiter verfolgt wird.

PL2: Rotations- und Translationsbedarf des Trägerrahmens

Variante PL2 zeichnet sich durch eine Rotation und Translation des Trägerrahmens aus. Aufgrund der Rotationsbewegung des Trägerrahmens und dem damit einhergehenden notwendigen Abstand der Trägermitte zum Dach, wird zur Verallgemeinerung ein winkelabhängige Höhenlage $y(\eta)$ des Trägerrahmens zum Fahrzeugdach eingeführt. Durch die Gestaltung von $y(\eta)$ kann die Änderung der Stromabnehmerhöhe durch die Wankbewegung beeinflusst werden. Der Translationsbedarf entwickelt sich ebenfalls in Abhängigkeit von $y(\eta)$, ist aber allgemein kleiner als bei PL1 und unabhängig von der Arbeitshöhe h_{eff} , siehe (8.4).

$$\Delta_t = (h_d(\eta) + z''_{komp}(\eta)) \cdot \tan\eta \quad (8.4)$$

$$h_s = h_{eff} - h_w(\eta) - h_t - \frac{h_d(\eta) + z''_{komp}(\eta)}{\cos\eta} \quad (8.5)$$

$$\Delta h_s = h_w(0) + h_d(0) + z''_{komp}(0) - \left(h_w(\eta) + \frac{h_d(\eta) + z''_{komp}(\eta)}{\cos\eta} \right) \quad (8.6)$$

Aus (8.6) ist ersichtlich, dass sich eine Unabhängigkeit der Stromabnehmerhöhe vom Wankwinkel ergibt, wenn

$$z''_{komp}(\eta) = (h_w(0) + h_d(0) + z''_{komp}(0) - h_w(\eta)) \cdot \cos\eta - h_d(\eta) \quad (8.7)$$

gilt. Die winkelabhängige Höhenlage läuft somit auf ein Kreisbogensegment heraus und spiegelt die aktuell am Markt befindliche Lösung wieder.

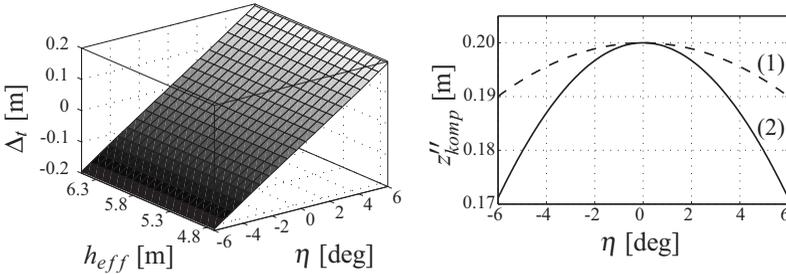


Abb. 8.8.: Translationsbedarf des Trägerrahmens (links) und Höhenfunktion der kompensierenden Komponente z''_{komp} (rechts) für die Variante PL2; (1) fixer Momentanpol auf dem Schwerpunkt und (2) hier verwendetes Fahrzeugmodell.

Für Fahrzeuge mit einem wandernden Momentanpol muss die Funktion an die Neigekinetik des Fahrzeuges angepasst werden. Aufgrund der Rotation des Trägerrahmens ist in der Nullstellung die von der Geometrie des Trägerrahmens abhängige vertikale Bauhöhe $z''_{komp}(0) \neq 0$ notwendig, wodurch die Bauhöhe der Neigekompensation negativ beeinflusst wird. Mit der Annahme $z''_{komp}(0) = 0.2$ und $h_d = h_d - z''_{komp}(0)$ ergibt sich ein Translationsbedarf nach Abb. 8.8.

PL3: Rotationsbedarf des Stromabnehmerarms

Der erzeugte Fehlwinkel wird berechnet zu

$$\delta_f = \text{atan} \left(\frac{(h_d(\eta) + h_t) \cdot \sin \eta}{h_{eff} - [h_w(\eta) + (h_d(\eta) + h_t) \cdot \cos \eta]} \right). \quad (8.8)$$

Der Fehlwinkel kann bei niedrigen Fahrdrachthöhen Randextrema von betragsmäßig 10° erreichen, siehe Abb. 8.9. Zudem besitzt der Fehlwinkel eine Abhängigkeit zur Fahrdrachthöhe. Aufgrund der Fehlstellung der Schleifleisten wird PL3, wie schon PL1, nicht weiterverfolgt. Eine Variation dieser Prinziplösung stellt PL6 dar, bei der die Neigung der Schleifleisten zusätzlich kompensiert wird. Die notwendige Rotation des Stromabnehmerarms setzt sich zusammen aus der Addition von Fehlwinkel und Neigewinkel.

Die Änderung der Stromabnehmerhöhe und der notwendige Neigewinkel δ_a

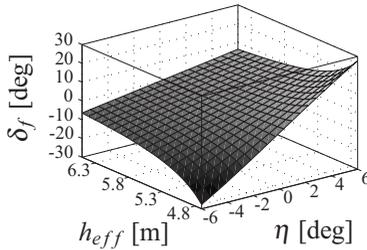


Abb. 8.9.: Fehlstellung der Stromabnehmerwippe in Abhängigkeit von der Arbeitshöhe und des Wankwinkels.

werden neben der Wagenkastenneigung η auch von der effektiven Fahrdrathöhe beeinflusst.

$$\delta_a = \eta + \delta_f \quad (8.9)$$

$$h_s = \sqrt{\left((h_d(\eta) + h_t) \cdot \sin\eta \right)^2 + \left(h_{eff} - [h_w(\eta) + (h_d(\eta) + h_t) \cdot \cos\eta] \right)^2} \quad (8.10)$$

$$\Delta h_s = h_s - (h_{eff} - h_w(0) - h_d(0) - h_t) \quad (8.11)$$

Abb. 8.10 visualisiert die Zusammenhänge für die verwendeten Parameter. Im Gegensatz zu den vorigen Lösungen wird die Stromabnehmerhöhe hier nicht reduziert, sondern vergrößert.

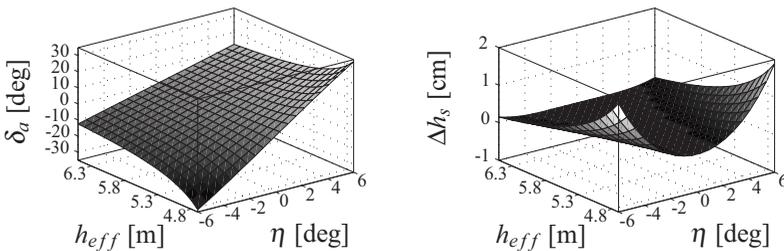


Abb. 8.10.: Notwendige Auslenkung des Stromabnehmerarms (links) und Änderung der Stromabnehmerhöhe (rechts) für die Variante PL3.

PL4: Translationsbedarf des Trägerrahmens und Rotationsbedarf des Stromabnehmerarms

Die Prinziplösung PL4 stellt eine Variation der Lösung PL2 dar. Hierbei wird nicht der gesamte Trägerrahmen rotiert, sondern ein zusätzlicher rotatorischer Freiheitsgrad des Unterarms führt zu einer Rotation des Stromabnehmerarms, ohne dass der Trägerrahmen rotiert werden muss.

Der Translationsbedarf ist für die betrachteten Parameter bei 375 mm angesiedelt und liefert mit den 1100/2 mm einen seitlichen Platzbedarf von 2·925 mm, wodurch die zur Verfügung stehenden 2 m an lateralem Bauraum eingehalten werden.

$$\Delta_t = (h_d(\eta) + h_t) \cdot \tan\eta \quad (8.12)$$

$$h_s = h_{eff} - h_w(\eta) - \frac{(h_d(\eta) + h_t)}{\cos\eta} \quad (8.13)$$

$$\Delta h_s = (h_d(0) + h_t) - \frac{(h_d(\eta) + h_t)}{\cos\eta} - h_w(\eta) + h_w(0) \quad (8.14)$$

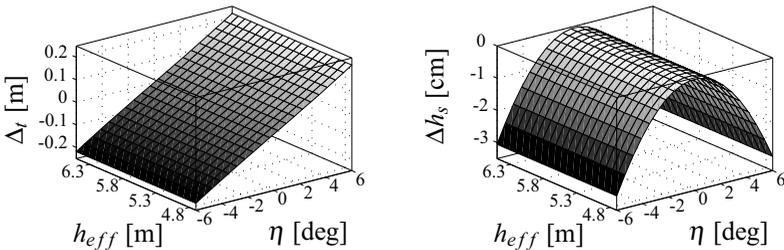


Abb. 8.11.: Translationsbedarf des Trägerrahmens (links) und induzierte Änderung der Stromabnehmerhöhe (rechts) für die Variante PL4.

PL5: Translationsbedarf des Trägerrahmens und Rotationsbedarf der Stromabnehmerwippe

Der Translationsbedarf und die Änderung der Stromabnehmerhöhe ist analog zu PL1. Lediglich der Fehlwinkel wird kompensiert: $\delta_f = 0$. Aufgrund des selben Platzbedarfes von Δ_t ist auch diese Lösung nicht realisierbar.

PL6: Rotationsbedarf des Stromabnehmerarms und der -wippe

Variation von PL3 durch den zusätzlichen rotatorischen Freiheitsgrad der Stromabnehmerwippe. Hierbei ergibt sich der Kompensationswinkel

$$\delta_w = \text{atan}\left(\frac{(h_d(\eta) + h_t) \cdot \sin(\eta)}{h_{eff} - [h_w(\eta) + (h_d(\eta) + h_t) \cdot \cos(\eta)]}\right) \quad (8.15)$$

aus dem Fehlwinkel δ_f der Lösung PL3. Schwierig an dieser Lösung ist zudem, dass der Stromabnehmerarm nicht parallel zur Gleisachse steht und es somit bei der Schnellabsenkung Probleme mit den Begrenzungslinien geben könnte.

PL7: Translationsbedarf der Stromabnehmerwippe

Die Translation der Stromabnehmerwippe und die Fußpunktanregung des Stromabnehmers errechnen sich durch

$$\Delta_w = (h_{eff} - h_w(\eta)) \cdot \sin\eta, \quad (8.16)$$

$$h_s = (h_{eff} - h_w(\eta)) \cdot \cos\eta - h_d(\eta) - h_t, \quad (8.17)$$

$$\Delta h_s = (h_{eff} - h_w(\eta)) \cdot \cos\eta - h_d(\eta) + h_d(0) - h_{eff} + h_w(0). \quad (8.18)$$

Hierbei fällt vor allem die große notwendige Verschiebung der Stromabnehmerwippe auf. Im Extremfall kann diese ca. 0.5 m betragen. Die fehlende Kompensation der Schleifleistenneigung stellt zudem ein K.O.-Kriterium dar, weshalb diese Lösung nicht weiter verfolgt wird.

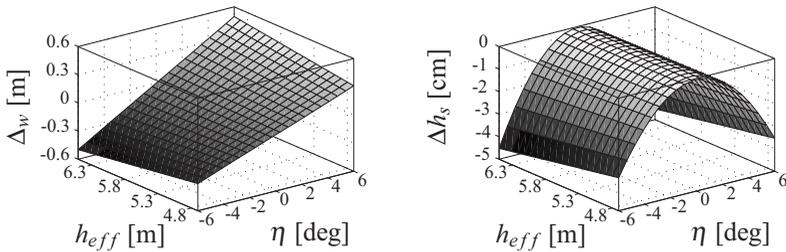


Abb. 8.12.: Translationsbedarf der Stromabnehmerwippe (links) und induzierte Änderung der Stromabnehmerhöhe (rechts) für die Variante PL7.

PL8: Rotationsbedarf des Trägerrahmens und Translationsbedarf der SA-Wippe

Rotation des Trägerrahmens um δ_t und Translation der Stromabnehmerwippe Δ_w , die sich aus

$$\Delta_w = (h_d(\eta) + y) \cdot \sin\eta \quad (8.19)$$

$$h_s = h_{eff} - (h_w(\eta) + h_t + (h_d(\eta) + y) \cdot \cos\eta) \quad (8.20)$$

$$\Delta h_s = (h_d(0) + y) - (h_d(\eta) + y) \cdot \cos\eta + h_w(0) - h_w(\eta) \quad (8.21)$$

errechnet. Die notwendige Rotation entspricht dem Wankwinkel $\delta_t = \eta$. Abb. 8.13 zeigt den Translationsbedarf und die Fußpunktanregung für den gewählten Parameterraum.

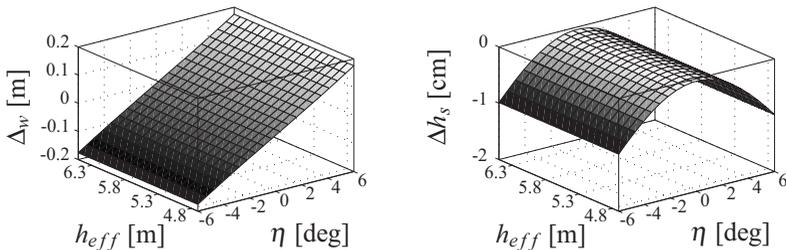


Abb. 8.13.: Translationsbedarf der Stromabnehmerwippe (links) und induzierte Änderung der Stromabnehmerhöhe (rechts) für die Variante PL8.

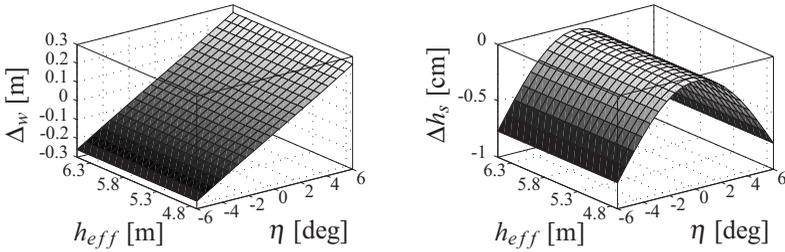


Abb. 8.14.: Translationsbedarf der Stromabnehmerwippe (links) und induzierte Änderung der Stromabnehmerhöhe (rechts) für die Variante PL9.

Die translatorische Verschiebung der Stromabnehmerwippe ist deutlich geringer im Vergleich zur vorigen Lösung und beträgt maximal ca. 0.17m. Jedoch wird für die Rotation des Trägerrahmens eine Erhöhung des Rahmens um $\min. y = \frac{b_t}{2} \sin(\eta)$ mit der Abstützbreite des Trägerrahmens b_t notwendig.

PL9: Rotationsbedarf des SA-Arms und Translationsbedarf der SA-Wippe

PL9 entspricht von der Idee PL8 mit dem Unterschied, dass die Unterarmrotation an Position 2 durchgeführt wird. Die notwendige Translation der Wippe Δ_w und die induzierte Fußpunktanregung Δh_s für dieses Konzept errechnen sich aus

$$\Delta_w = (h_d(\eta) + h_t) \cdot \sin\eta, \quad (8.22)$$

$$h_s = h_{eff} - (h_w(\eta) + (h_d(\eta) + h_t) \cdot \cos\eta), \quad (8.23)$$

$$\Delta h_s = h_w(0) + h_d(0) + h_t - (h_w(\eta) + (h_d + h_t) \cdot \cos\eta). \quad (8.24)$$

Die Visualisierung der Gleichungen über den Parameterraum wird in Abb. 8.14 vorgenommen. Generell sind die Ergebnisse fast identisch mit PL8, der Translationsbedarf δ_w ist um ca. 0.1 m größer, die Fußpunktanregung hingegen im Extremum marginal geringer.

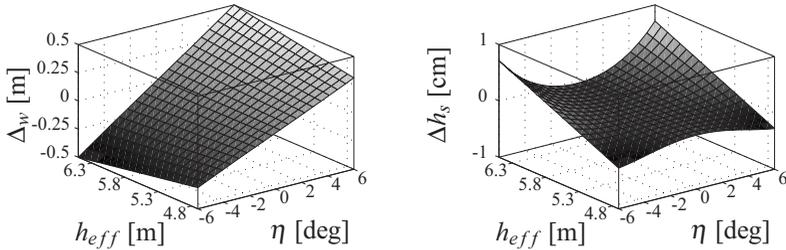


Abb. 8.15.: Translationsbedarf des Trägerrahmens (links) und induzierte Änderung der Stromabnehmerhöhe (rechts) für die Variante PL10.

PL10: Rotationsbedarf und Translationsbedarf der SA-Wippe

PL10 stellt eine Variation von PL7 durch einen zusätzlichen rotatorischen Freiheitsgrad der Wippe mit $\delta_w = \eta$ dar.

$$\Delta_w = (h_{eff} - h_w(\eta)) \cdot \tan\eta \quad (8.25)$$

$$h_s = \frac{h_{eff} - h_w(\eta)}{\cos\eta} - h_d(\eta) - h_t \quad (8.26)$$

$$\Delta h_s = (h_{eff} - h_w(\eta)) \cdot \cos\eta - h_d(\eta) - (h_{eff} - h_w(0) - h_d(0)) \quad (8.27)$$

Die notwendige laterale Bewegung der Stromabnehmerwippe ist bei diesem Lösungsansatz sehr groß, wie in Abb. 8.15 für den betrachteten Parameterraum dargestellt.

8.3.4 Einfluss der Stromabnehmer-Begrenzungslinie

Wie in Kap. A.5.3 des Anhangs erwähnt, sind die Einhaltung der Stromabnehmer-Begrenzungslinie und die Schnellabsenkung Festforderungen an das System. Die Kombination der beiden Anforderungen führt für viele der gezeigten Lösungen zu Widersprüchen. Im Falle einer Auslösung der Schnellabsenkung während einer Bogenfahrt mit aktivierter Wagenkastenneigung muss die Schnellabsenkung mit der aktivierten Neigekompensation durchgeführt werden.

Eine geordnete Reduzierung der Geschwindigkeit und Aufhebung der Wagenkasten-Neigung ist aufgrund der zeitlichen Anforderung an die Schnellabsenkung nicht realisierbar. Somit werden Lösungen, deren Hubkinematik nicht parallel zur Senkrechten der Gleismitte liegen ggf. die Begrenzungslinie nicht einhalten. Dies ist der Fall für PL1, PL3, PL5, PL6, PL7 und PL10.

Ein weiterer Punkt ist die Neigung der Wippe, die bei den Fällen PL1, PL3 und PL7, entgegen den Ausführungen in Kap. A.5.3, zusätzlich zu der, durch Anschläge technisch begrenzten Schrägstellung der Wippe, eine neigungsinduzierte Schrägstellung hinzufügen. Da diese Ansätze unvoreilhaft sind, werden die genannten Konzepte nicht weiterverfolgt.

8.3.5 Zusammenfassung aus kinematischer Sicht

Die kinematische Betrachtung der Konzepte liefert das grundlegende Zusammenspiel mit der Neigekinematik des Wagenkastens und ermöglicht die Konzepte weiter zu kondensieren. Zusammengefasst ergeben sich die extremalen Werte der notwendigen translatorischen und rotatorischen Bewegungen in Tab. 8.5. Prinziplösungen wurden aufgrund von Wippen- oder Unterarmfehlstellungen aussortiert.

Tab. 8.5.: Kinematische Auswertung der Prinziplösungen.

PL #	$\Delta_{t,extr.}$ [m]	$\Delta_{w,extr.}$ [m]	$\delta_{a,extr.}$ [deg]	$\delta_{w,extr.}$ [deg]	Bewertung
1	± 0.478	-	-	± 6	X, Wippenfehlstellung
2	± 0.195	-	-	-	✓
3	-	-	± 29.74	± 23.74	X, Wippen- und Unterarmfehlstellung
4	± 0.218	-	-	-	✓
5	± 0.478	-	-	-	X, lateraler Platzbedarf
6	-	-	± 29.74	-	X, Unterarmfehlstellung
7	-	± 0.478	-	± 6	X, Wippenfehlstellung
8	-	± 0.176	-	-	✓
9	-	± 0.259	-	-	✓
10	-	± 0.481	-	-	X, Unterarmfehlstellung

Die verbleibenden Lösungen PL2, PL4, PL8 und PL9 besitzen unterschiedliche Eigenschaften. PL2 und PL4 realisieren die Bewegung unterhalb des Un-

terarms, während PL8 und PL9 eine Kombination aus Bewegungen ober- und unterhalb des Unterarms verwendet. Die Fußpunktanregung der Prinziplösungen ist in Tab. 8.6, unter der Annahme der Werte aus Abb. 8.6 aufgeführt.

Tab. 8.6.: Wertebereich der Fußpunktanregung von PL2, PL4, PL8 und PL9.

PL #	2	4	8	9
Δh_s [cm]	0	[-3.06,0]	[-0.99,0]	[-0.77,0]

In dieser idealisierten Betrachtung erfährt PL2 (äquivalent zur Lösung am Markt) keine Fußpunktanregung. Wohingegen PL4 bei der Neigung maximal eine Reduzierung der Stromabnehmerlänge von 3 cm erfährt. PL8 und PL9 hingegen erfahren nur ca. 1/3 der Anregung von PL4.

Dafür muss hier die Translation an der Stromabnehmerwippe ausgeführt werden, sodass hier zusätzliches Gewicht eingepreßt wird. Der Einfluss der Konzepte auf die Vertikaldynamik wird im folgenden Abschnitt untersucht.

8.3.6 Einfluss auf Vertikaldynamik

Fußpunktanregung

Die Vektoren \mathbf{r}_{OS}^O und \mathbf{r}_{OA}^O nach Abb. 8.16 wurden aus SIMPACK samt zugehöriger Kardanwinkel extrahiert. Die in SIMPACK verwendete Transformationsvorschrift [SIM] lautet

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{T}_{ij} \mathbf{e}_j \quad (8.28)$$

$$\mathbf{T}_{ij} = \mathbf{T}^x(\alpha) \mathbf{T}^y(\beta) \mathbf{T}^z(\gamma). \quad (8.29)$$

Um die Kompensation und Fußpunktanregung der drei unterschiedlichen Ansätze zu untersuchen, ist die Darstellung \mathbf{r}_{SB}^S von Interesse. Der Kompensationsvektor \mathbf{r}_{AB}^A wird für die Lösungen PL2, PL4, PL8 und PL9 nach Tab. 8.7 bestimmt.

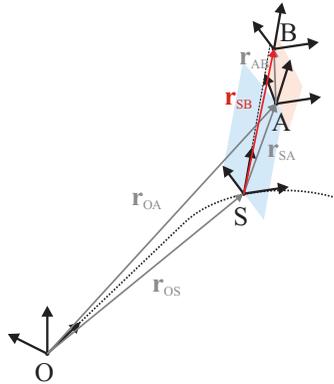


Abb. 8.16.: Relativmechanik der Stromabnehmerbewegung: Inertialkoordinatensystem (0); gleisfest (S); wagenkastenfest (A) und Koordinatensystem des Stromabnehmerfußpunktes (B).

Tab. 8.7.: Kompensationsvektor der Prinziplösungen 2, 4, 8 und 9.

Varianten	PL2	PL4	PL8	PL9
\mathbf{r}_{AB}^A	$\begin{bmatrix} 0 \\ (8.4) \\ (8.7) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ (8.12) \\ h_t \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ h_t \sin(\eta) \\ h_t \cos(\eta) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h_t \end{bmatrix}$

Die Kompensation im Inertialsystem ergibt sich zu

$$\mathbf{r}_{AB}^O = \mathbf{T}_{OA} \mathbf{r}_{AB}^A \quad (8.30)$$

und führt mit

$$\mathbf{r}_{OB}^O = \mathbf{r}_{OA}^O + \mathbf{r}_{AB}^O \quad (8.31)$$

auf den Ortsvektor des Stromabnehmerfußpunktes im Inertialsystem. Der gesuchte Vektor \mathbf{r}_{SB}^O , ausgewertet im Inertialsystem, lautet

$$\mathbf{r}_{SB}^O = \mathbf{r}_{OB}^O - \mathbf{r}_{OS}^O, \quad (8.32)$$

was durch

$$\mathbf{r}_{SB}^S = \mathbf{T}_{OS}^{-1} \mathbf{r}_{SB}^O \quad (8.33)$$

in das gewünschte gleisfeste Koordinatensystem transformiert werden kann. Die Auswertung des Ortsvektors für die unterschiedlichen Prinziplösungen wird im Folgenden durchgeführt.

PL2 ist die Kompensation der aktuellen Lösung und führt mit der Bogenfahrt nach Abb. 4.6 auf die in Abb. 8.17 dargestellte Ortskurve des Fußpunktes. Da die Auslegung des Kompensationsvektors \mathbf{r}_{AB}^A auf Basis der kinematischen Größen durchgeführt wurde, ist analog zu Abb. 4.8 eine laterale Verschiebung des Punktes erkennbar. Die vertikale Bewegung des Fußpunktes wird hingegen - bis auf dynamische Effekte - sehr gut kompensiert.

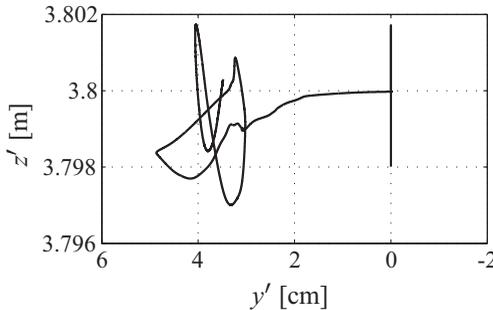


Abb. 8.17.: Auswertung des Ortsvektors \mathbf{r}_{SB}^S für PL2.

PL4 liefert im Gegensatz dazu, die in Abb. 8.18 dargestellte Ortskurve. Hierbei ist die starke Erhöhung des Punktes zum Gleiskoordinatensystem zu verzeichnen. Die laterale Verschiebung ist analog zu PL2 bei etwa 3–4 cm im Bereich der stationären Bogenfahrt. Bei PL8 wird der Trägerrahmen rotatorisch bewegt, der als Referenz verwendete Fußpunkt (Lagerstelle des Unterarms) erfährt dadurch eine Kombination aus Rotation und Translation. Die Ortskurve ist Abb. 8.19 zu entnehmen. PL9 besitzt analog zu PL8 nur eine rotatorische Kompensation, was dazu führt, dass der Fußpunkt sich ohne Kompensation

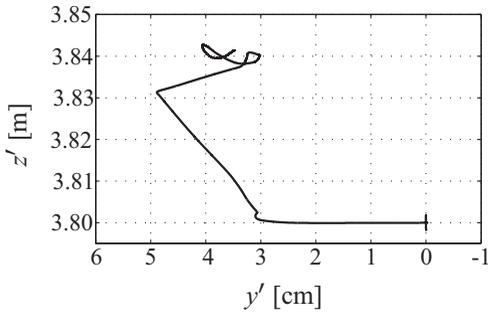


Abb. 8.18.: Auswertung des Ortsvektors r_{SB}^S für PL4.

analog zum Fahrzeugdach bewegt. Die Fußpunktanregung in vertikaler Richtung erreicht im Maximum einen Wert von ca. 1cm. Da sich die vertikale Anregung in den drei Fällen (PL4, PL8 und PL9) im positiven Bereich bewegt, ist die Absenkung des Fahrdrahtes eine negative Überlagerung der beiden Effekte und stellt somit eine Worst-Case-Abschätzung dar. Insofern wurde in Kap. 6 auch nur die Absenkung des Fahrdrahtes modelliert. Zudem sind PL8 und PL9 nahezu identisch, insofern wird hier auf die eigenständige Simulation von Konzept PL9 verzichtet, stattdessen wird PL8 als Stellvertreter für beide Konzepte verwendet.

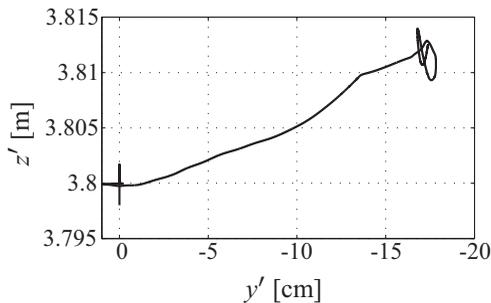
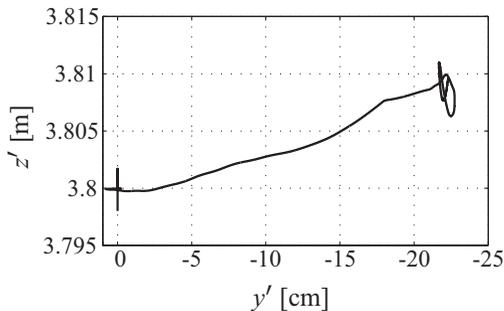


Abb. 8.19.: Auswertung des Ortsvektors r_{SB}^S für PL8.

Abb. 8.20.: Auswertung des Ortsvektors r_{SB}^S für PL9.

Scheinmassenverlauf

Der große Vorteil von PL2 ist, dass die vorhandenen Stromabnehmer ohne Modifikation für Neigetechnikfahrzeuge verwendet werden können, und somit die dynamischen Eigenschaften identisch sind. Aber auch PL4 wird durch die Rotation des Unterarms keine (großen) Massenaufschläge am Unterarm erfahren. Da sich der Massenaufschlag zudem um die Lagerstelle sammelt, wird ein sehr kleiner Einfluss auf das Massenträgheitsmoment erfolgen, insofern wird auch hier mit dem unveränderten Stromabnehmer-Modell aus Kap. 5 gearbeitet. Anders sieht dies bei PL8 und PL9 aus, hier wird das Wippenelement translatorisch bewegt, sodass zusätzliches Gewicht an m_6 aufgeprägt wird. Als Abschätzung werden zwei unterschiedliche Werte verwendet: 3kg und 6kg um zu untersuchen, ob und welche zusätzliche Masse tolerabel ist. Abb. 8.21 zeigt den Scheinmassenverlauf für die genannten Massen bei einer statischen Kraft von 70N, einer Kraftamplitude von 20N und einer Scheitelrohrhöhe von 1.59m ($\varphi_1 = 0.5$) gegenüber dem Unterarmlager. Zu erkennen ist, dass vor allem der Frequenzbereich bis ca. 4.5Hz von der Masse beeinflusst wird. Aber auch die Biegeeigenfrequenz des Oberarms wird von der zusätzlichen Masse reduziert. Im Bereich bis ca. 2.5Hz ist die Scheinmasse höher als bei einem geringen Gewicht von m_6 , entsprechend ist der Widerstand gegen eine aufgeprägte Bewegung höher. Von ca. 2.5–4.5Hz wird die Scheinmasse reduziert. Der Effekt des geänderten Systemverhaltens wird nun anhand einer vollständigen Simulation der Interaktion des Stromabnehmers mit der Oberleitung untersucht.

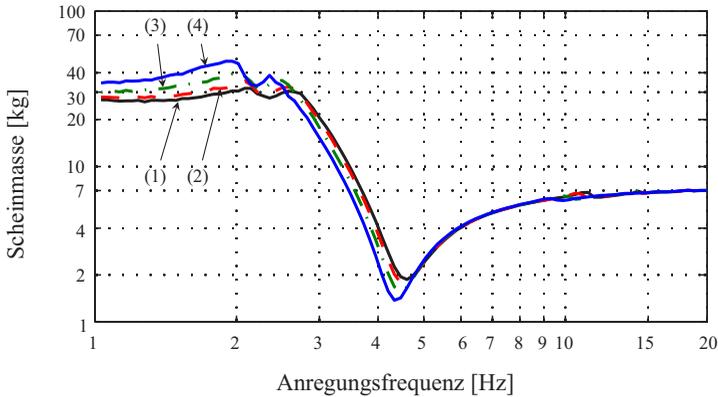


Abb. 8.21.: Vergleich der Scheinmassenverläufe bei unterschiedlichen Wippenmassen; (1): Referenz, (2): 1kg, (3): 3kg, (4): 6kg.

8.3.7 Simulationen der dynamischen Interaktion mit der Re 200

Hierzu werden die in Kap. 6 vorgestellten Oberleitungsabschnitte vom Typ Re 200 verwendet. Der hierzu aufgestellte Simulationsplan ist in Tab. 8.8 aufgeführt. Es werden hierbei zwei unterschiedliche Betriebsszenarien betrachtet:

- a) Bogenfahrt mit aktivierter Neigetechnik bei einer Geschwindigkeit von $v = 160 \text{ km/h}$ und
- b) Fahrt auf einer Geraden mit Maximalgeschwindigkeit $v = 200 \text{ km/h}$ ohne aktive Wagenkastenneigung.

Tab. 8.8.: Simulationsplan.

Oberleitung	Fall a)		Fall b)	
	a1) Nennlage	a2) Toleranz	b1) Nennlage	b2) Toleranz
Referenz	✓	✓	✓	✓
PL2	✓	✓	✗	✗
PL4	✓	✓	✗	✗
PL8	$m'_6 = m_6 + 3\text{kg}$			
	$m'_6 = m_6 + 6\text{kg}$			

Die beiden Fälle stellen damit Grenzszenarien des Betriebs für die Kombination Stromabnehmer-Oberleitung dar. Die Konzepte werfen auch zwei unterschiedliche Fragestellungen auf. Zum einen wird untersucht, inwiefern die Fußpunktanregung die Interaktion beeinflusst, und auf der anderen Seite, welche Auswirkungen die zusätzlichen Massen am Scheitelrohr in Kombination mit der kleineren Fußpunktanregung besitzen. Die unter Referenz aufgeführten Simulationen sind das unveränderte Stromabnehmermodell mit idealisierter Führung des Stromabnehmers auf konstanter Höhen- und gleismittiger Seitenlage. Für die Bewertung der Kontaktkraft werden die minimalen (\check{F}) und maximalen Kontaktkräfte (\hat{F}), sowie das arithmetische Mittel (\bar{F}) und die Standardabweichung der Kontaktkraft (F_σ) verwendet.

Fall a): Bogeneinfahrt - Referenz

Die Referenz dient dem *relativen* Benchmarking der Konzepte. Hierdurch kann der Einfluss der Fußpunktanregung und ggf. zusätzlicher Massen extrahiert werden.

Da die Oberleitung in der Bogeneinfahrt aus zwei unterschiedlich bespannten Bereichen besteht, werden hierfür gesonderte Werte der Parameter ausgegeben. Ebenso wird die Fahrdrachtsenkung und der Bereich der aktiven Neigekompensation ausgewertet. Grafisch werden die mit (7.25) gefilterten Werte der Kontaktkraft und die Höhenlage des Kontaktpunktes in Abb. 8.22 dargestellt. Von der Auswertung ausgenommen ist der Bereich der ersten drei Felder. Die Kontaktbahn zeigt im ersten Feld einen starken Anstieg bis auf ca. 12 cm über der Nennlage. Aber schon ab dem dritten Feld scheint die Kontaktbahn eingeschwungen zu sein mit lokalen Minima des Anhubes in der Feldmitte, was sich mit dem Vordurchhang des Fahrdrachtes begründen lässt. An den Seitenhaltern werden Anhubwerte von ca. 6–9 cm erreicht.

Die Hubkurve verändert sich im Bereich ab $s = 115.1 \text{ m}$, aufgrund des fehlenden Vordurchhangs grundlegend. Hier ist das lokale Minimum jeweils an den Lagerstellen bei den Stützpunkten zu finden. Auch bei den Kontaktkräften sind die zwei unterschiedlichen Bereiche der Bespannung zu erkennen. Beim ausgewerteten Bereich mit Vordurchhang im Intervall $s = [-190 \text{ m}, -30 \text{ m}]$ liegt die Standardabweichung der Kontaktkraft bei $F_\sigma = 14.02 \text{ N}$, gegenüber $F_\sigma = 16.93 \text{ N}$ im Bereich von $s = [115.1 \text{ m}, 375.5 \text{ m}]$. Dies entspricht einer Erhöhung der Standardabweichung um 20.7%.

Tab. 8.9 listet die extrahierten Parameter der Kontaktkraft für beide Fälle auf. Zudem werden die relativen bzw. absoluten Veränderung von Fall a2) zu Fall a1) aufgeführt.

Die mittleren Kontaktkraft über den Bereich von $s = [-190 \text{ m}, 375.5 \text{ m}]$ liegt mit $\bar{F} = 95.47 \text{ N}$ innerhalb des zulässigen Bereichs, siehe Abb. A.2 des Anhangs. Auch die Standardabweichung ist mit $F_\sigma = 15.74 \text{ N}$ weit unterhalb der Grenze von 24 N. Die Extrema der Kontaktkräfte befinden sich ebenfalls innerhalb des zulässigen Bereichs, werden aber hier nicht weiter zur Beurteilung herangezogen.

Der Bereich des Übergangsbogens bei $s = [0 \text{ m}, 100 \text{ m}]$ geht mit einer marginal erhöhten mittleren Kontaktkraft und einer nahezu identischen Standardabweichung zum Gesamtbereich ein.

Abb. 8.23 zeigt die Ergebnisse für den Fall der Fahrdrachtlage an den Grenzen des Toleranzbands. Die Fahrdrachtabenkung im Bereich $s = [-30 \text{ m}, 180.2 \text{ m}]$ geht einher mit einer 6.9-prozentigen Steigerung der Standardabweichung gegenüber der Nennlage des Fahrdrachtes. Auch bei der mittleren Kontaktkraft über diesen Bereich ist die Fahrdrachtabenkung mit einer Steigerung um 3.69% auf 99.27 N zu erkennen. Der Vor- und Nachlauf verändert sich nur moderat mit 2.27% respektive -1.4% gestiegener Standardabweichung.

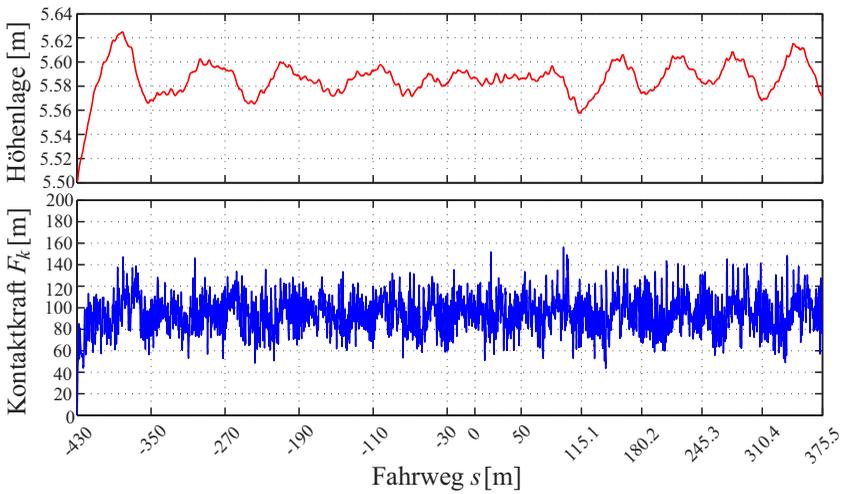


Abb. 8.22.: Simulationsergebnisse des Falls a1) mit Konzept Referenz.

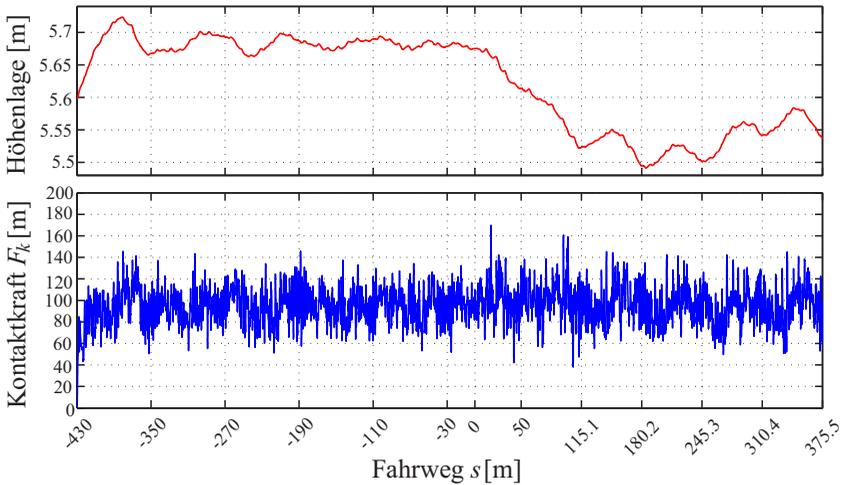


Abb. 8.23.: Simulationsergebnisse des Falls a2) mit Konzept Referenz.

8. Ansätze zur Neigekompensation

Tab. 8.9.: Auswertung der Bogeneinfahrt für Referenz in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrahlagen.

s [m]	[-190, 375.5]		[-30, 180.2]		[0, 100]		[115.1, 375.5]		[-190, -30]	
Fall a1)										
\bar{F} [N]	95.47		95.74		96.07		95.25		95.30	
F_σ [N]	15.74		15.63		15.59		16.93		14.02	
\dot{F} [N]	156.16		156.16		156.16		148.31		133.36	
\ddot{F} [N]	43.84		43.84		51.05		43.84		53.49	
Fall a2)										
\bar{F} [N]	96.46	1.03%	99.28	3.69%	101.30	5.45%	95.28	-0.02%	95.37	0.08%
F_σ [N]	16.16	2.71%	16.71	6.92%	16.86	8.11%	16.68	-1.44%	14.23	1.49%
\dot{F} [N]	169.58	13.43 N	169.58	13.43 N	169.58	13.43 N	145.21	-3.10 N	145.52	12.15 N
\ddot{F} [N]	38.25	-5.59 N	38.25	-5.59 N	42.22	-8.84 N	49.70	5.86 N	53.05	-0.44 N

Fall a): Bogeneinfahrt - PL2

PL2 entspricht der aktuellen Lösung und kann als Benchmark für die anderen Konzepte angesehen werden. Wenn man PL2 mit dem idealisierten Fall Referenz vergleicht, kann der Einfluß der Neigekompensation auf die Kontaktkräfte extrahiert werden. Die Ergebnisse der beiden Fälle sind in Abb. 8.24 und 8.25 dargestellt. Die Kontaktbahn der Schleifleiste ist im oberen Teil dargestellt. Rot hinterlegt ist dabei zum Vergleich die Kontaktbahn für Referenz. Hierdurch ist erkennbar, dass sich die Höhenlage nicht groß unterscheidet. Die größte Abweichung am Seitenhalter bei $s = 50\text{ m}$ beträgt 2.1 mm im Falle der Nennlage. Wenn man sich die Kontaktkräfte im Bereich des Übergangsbogens bei $s = [0\text{ m}, 100\text{ m}]$ anschaut, dann erkennt man gegenüber der Referenzlage fast keinerlei Abweichungen. Die Änderung der mittlere Kontaktkraft bewegt sich bei beiden Fahrdrähtlagen im Bereich von $< 0.1\%$. Die Standardabweichung weicht in diesem Bereich um -0.12% bzw. 1.35% von den ermittelten Referenzfällen ab. Entsprechend zeichnet sich PL2 durch ein ausgezeichnetes Kontaktkraftverhalten aus, bzw. einen, im Vergleich zur Fahrdrähtlage vernachlässigbaren Einfluss auf die Interaktion.

Tab. 8.10.: Auswertung der Bogeneinfahrt für PL2 in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrähtlagen und mit relativen Werten zu Referenz.

s [m]	[-190, 375.5]		[-30, 180.2]		[0, 100]		[115.1, 375.5]		[-190, -30]	
	Fall a1)									
\bar{F} [N]	95.50	0.03%	95.79	0.05%	96.05	-0.01%	95.24	0.00%	95.31	0.01%
F_σ [N]	15.86	0.80%	15.68	0.28%	15.57	-0.12%	17.05	0.74%	14.40	2.71%
\dot{F} [N]	157.35	1.20N	157.35	1.20N	157.35	1.20N	145.54	-2.76N	140.37	7.01N
\ddot{F} [N]	41.91	-1.93N	41.91	-1.93N	52.06	1.01N	41.91	-1.93N	52.07	-1.42N
	Fall a2)									
\bar{F} [N]	96.43	-0.02%	99.87	0.60%	101.20	-0.04%	95.15	-0.13%	95.33	-0.02%
F_σ [N]	16.14	-0.13%	16.95	1.44%	17.11	1.35%	16.74	-0.38%	13.81	-2.95%
\dot{F} [N]	171.91	2.33N	171.91	2.33N	171.91	2.33N	144.45	-0.76N	132.45	-13.06N
\ddot{F} [N]	39.65	1.40N	39.65	1.40N	45.35	3.13N	45.93	-3.77N	54.04	0.99N

8. Ansätze zur Neigekompensation

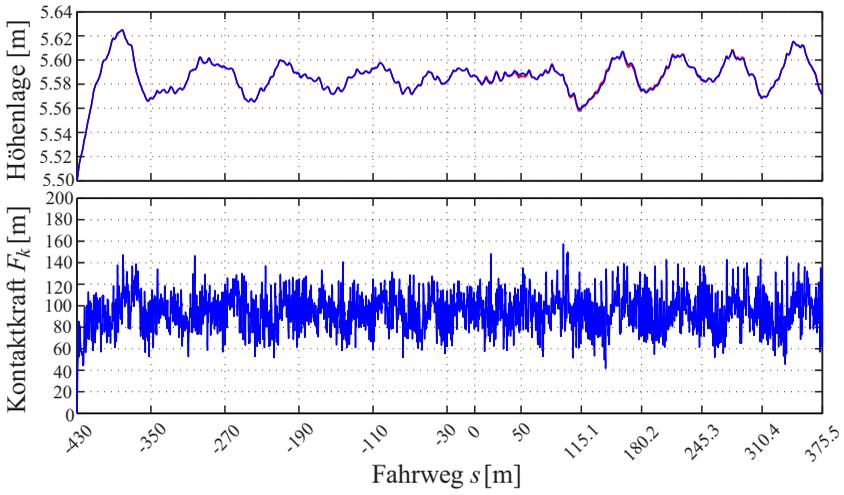


Abb. 8.24.: Simulationsergebnisse des Falls a1) mit Konzept PL2.

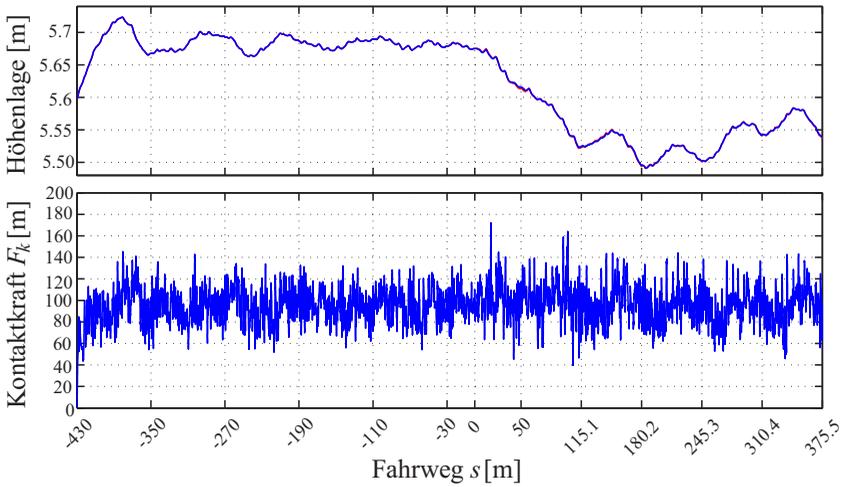


Abb. 8.25.: Simulationsergebnisse des Falls a2) mit Konzept PL2.

Fall a): Bogeneinfahrt - PL4

PL4 stellt das Konzept mit der stärksten Fußpunktanregung dar. Interessant ist zu sehen, wie stark sich diese Fußpunktanregung auf die Höhenlage des Kontaktpunktes auswirkt. Man kann in Abb 8.26 und 8.27 erkennen, dass sich im Bereich des Übergangsbogens die Kontaktbahn gegenüber Referenz anhebt. Mit Beginn des regulären Bogens reduziert sich diese Abweichung allerdings und nimmt mit Ende des betrachteten Bereichs wieder nahezu die Werte von Referenz ein. Der zusätzliche Anhub am Seitenhalt bei $s = 113.1$ m beträgt in beiden Fällen ca. 4 mm.

Die Fußpunktanregung ist auch leicht an den Kontaktkräften zu sehen: Die mittlere Kontaktkraft hat sich im Vergleich zu den Fällen Referenz um 0.4% bis 1.5% marginal erhöht. Die Standardabweichung erhöht sich um ca. 2.7%, die Extrema zeigen sich uneinheitlich: Im Fall von a1) werden Minima und Maxima um ca. 3.5N angehoben. Bei Fall a2) sind beide Werte geringer als bei Referenz.

Aus dynamischer Sicht hat die Fußpunktanregung einen eher geringen Einfluss. Die Überlagerung der Fahrdrababsenkung und der Fußpunktanregung liefern bei der Standardabweichung eine Erhöhung von 10.1% und beim arithmetischen Mittel eine Erhöhung um 6.9%, jeweils ausgewertet im Übergangsbogen. Dabei wird aber der Großteil von der Fahrdrablage beeinflusst.

Tab. 8.11.: Auswertung der Bogeneinfahrt für PL4 in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrablagen und mit relativen Werten zu Referenz.

s [m]	[-190, 375.5]		[-30, 375.5]		[0, 100]		[115.1, 375.5]		[-190, -30]	
Fall a1)										
\bar{F} [N]	95.80	0.35%	95.99	0.26%	97.51	1.50%	95.25	0.01%	95.51	0.22%
F_{σ} [N]	15.95	0.35%	15.82	1.19%	16.01	2.68%	16.90	-0.16%	14.60	4.14%
\hat{F} [N]	159.81	3.65N	159.81	3.65N	159.81	3.65N	146.14	-2.17N	138.26	4.89N
\check{F} [N]	43.41	-0.43N	43.41	-0.43N	54.56	3.48N	43.41	-0.42N	50.67	-2.82N
Fall a2)										
\bar{F} [N]	96.73	0.29%	100.05	0.78%	102.66	0.42%	95.16	-0.12%	95.30	0.72%
F_{σ} [N]	16.40	1.46%	17.18	2.75%	17.33	2.69%	16.81	0.76%	14.13	0.72%
\hat{F} [N]	168.81	-0.77N	168.81	-0.77N	168.81	-0.77N	146.81	1.60N	147.81	2.29N
\check{F} [N]	41.01	2.77N	41.01	2.77N	43.75	-1.53N	41.01	8.69N	52.17	-0.89N

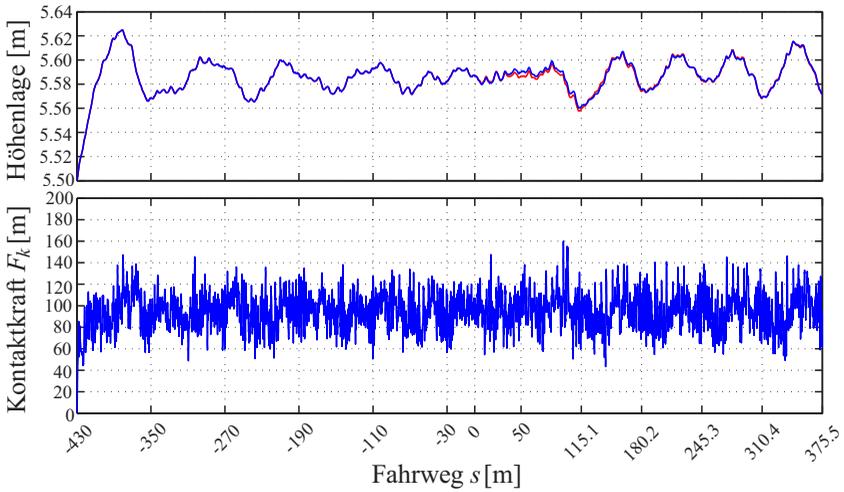


Abb. 8.26.: Simulationsergebnisse des Falls a1) mit Konzept PL4.

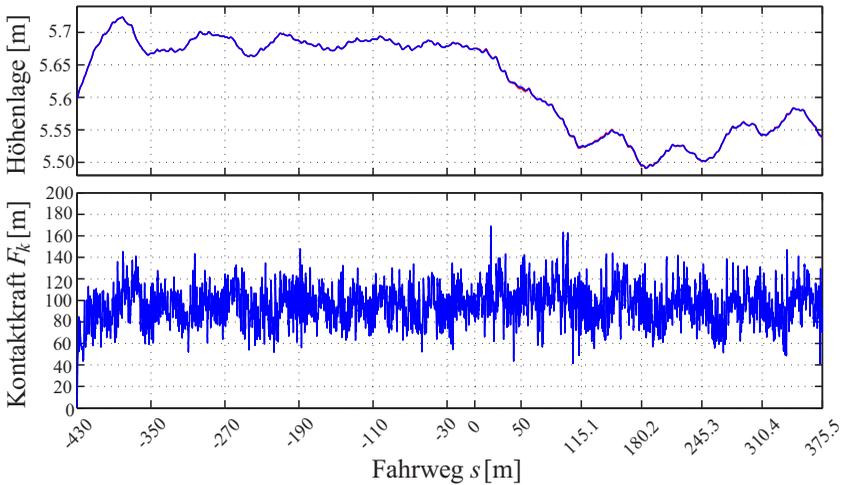


Abb. 8.27.: Simulationsergebnisse des Falls a2) mit Konzept PL4.

Fall a): Bogeneinfahrt - PL8 - 3kg

Durch die zusätzliche Masse am Oberarm wird die Trägheit des Systems erhöht, was sich gut an den Höhenlagen des Kontaktpunktes erkennen lässt. Diese läuft dem rot hinterlegten Referenzwert über den gesamten Fahrweg hinterher, siehe Abb. 8.28 und 8.29. Bei den Kontaktkräften steigert sich vor allem die Standardabweichung, sowohl bei Fall a1), wie auch bei Fall a2). Über die Felder 4-12 gemittelt, ergibt sich eine Steigerung der Standardabweichung gegenüber den Referenzwerten von 2.44% respektive 3.66%. Auf die mittlere Kontaktkraft hat die Zusatzmasse nur einen geringen Einfluss mit 0.19% respektive 0.13%, siehe Tab. 8.12.

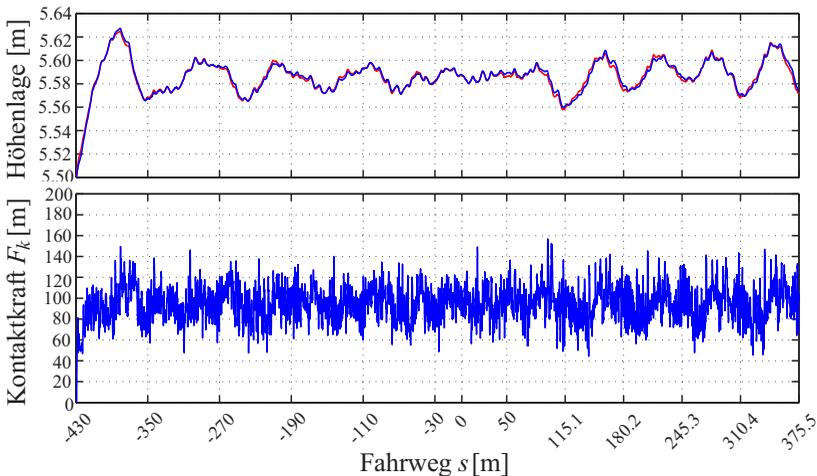


Abb. 8.28.: Simulationsergebnisse des Falls a1), PL8 mit $m_6 + 3$ kg.

8. Ansätze zur Neige kompensierung

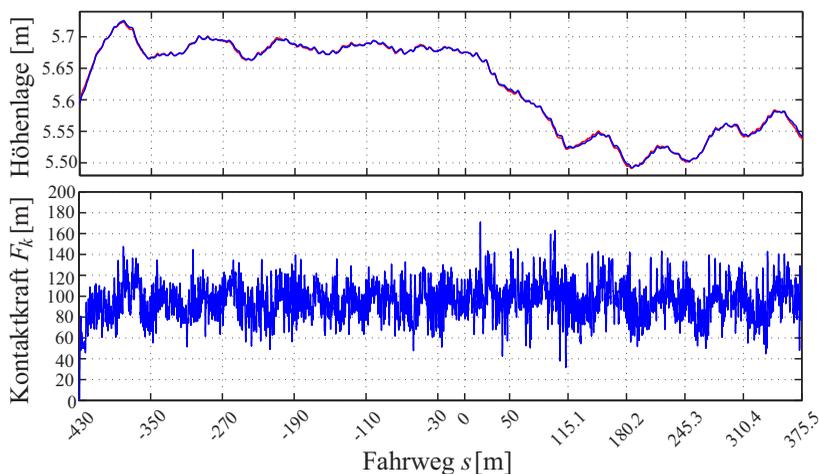


Abb. 8.29.: Simulationsergebnisse des Falls a2), PL8 mit $m_6 + 3 \text{ kg}$.

Tab. 8.12.: Auswertung der Bogeneinfahrt für PL8, $m_6 + 3 \text{ kg}$ in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrahlagen und mit relativen Werten zu Referenz.

$s \text{ [m]}$	[-190, 375.5]		[-30, 180.2]		[0, 100]		[115.1, 375.5]		[-190, -30]	
Fall a1)										
$\bar{F} \text{ [N]}$	95.65	0.19%	96.07	0.34%	96.54	0.50%	95.65	0.42%	95.65	0.37%
$F_{\sigma} \text{ [N]}$	16.12	2.44%	16.04	2.58%	15.83	1.50%	17.28	2.09%	14.51	3.46%
$\hat{F} \text{ [N]}$	156.65	0.49N	156.65	0.49N	156.65	0.49N	146.83	-1.48N	139.99	6.33N
$\check{F} \text{ [N]}$	44.58	6.33N	44.58	6.33N	54.35	6.33N	44.58	0.74N	55.15	1.66N
Fall a2)										
$\bar{F} \text{ [N]}$	96.59	0.13%	99.56	0.28%	101.72	0.41%	95.17	-0.11%	95.42	0.06%
$F_{\sigma} \text{ [N]}$	16.75	3.66%	17.63	5.47%	17.51	3.91%	17.63	5.67%	14.21	-0.88%
$\hat{F} \text{ [N]}$	170.79	1.21N	170.79	1.21N	170.79	1.21N	143.12	-2.09N	139.51	-6.01N
$\check{F} \text{ [N]}$	31.61	-6.64N	31.61	-6.64N	42.58	0.36N	44.72	-4.98N	47.78	-5.27N

Fall a): Bogeneinfahrt - PL8 - 6kg

Die Verdopplung der Masse m_6 soll den oberen Bereich des zusätzlichen Maseneintrags abschätzen. Die Kontaktbahn weicht nochmal stärker von der Referenzbahn ab, siehe Abb. 8.30 und 8.31. Der Einfluß der zusätzlichen 3 kg wirkt sich auf die Kontaktkraft allerdings nur mäßig aus: Die Steigerung der Standardabweichung gegenüber dem Fall Referenz wird mit mittleren 4% für beide Fahrdrähtlagen berechnet (siehe Tab. 8.13), was im Vergleich zu der Steigerung von ca. 3% bei dem Fall $m_6 + 3\text{ kg}$ einen eher geringen Einfluss zeigt. Auffällig ist allerdings, dass insbesondere im Bereich von $s = [115.1\text{ m}, 375.5\text{ m}]$, in dem eine Fahrdrähtlage ohne Vordurchhang vorliegt, größere Steigerungen der Standardabweichung zu beobachten sind, als im Bereich des Vordurchhangs. Dies liegt an den größeren Hubamplituden bei geringerer Längsspannweite.

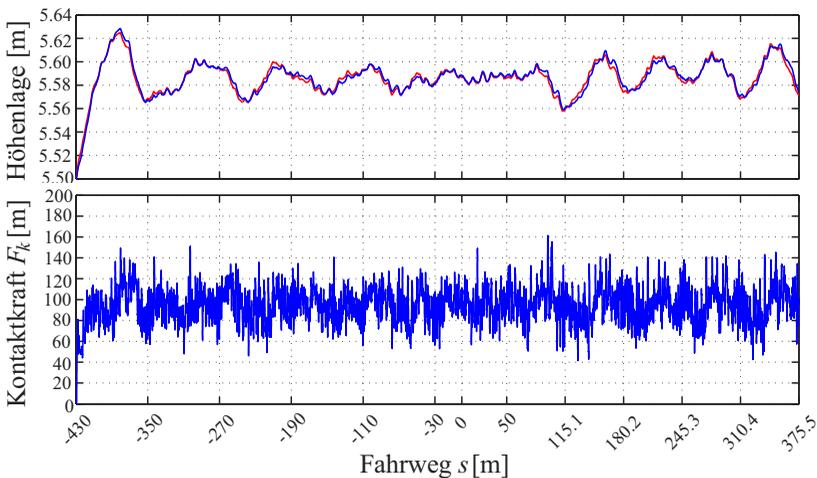


Abb. 8.30.: Simulationsergebnisse des Falls a1), PL8 mit $m_6 + 6\text{ kg}$.

8. Ansätze zur Neigekompensation

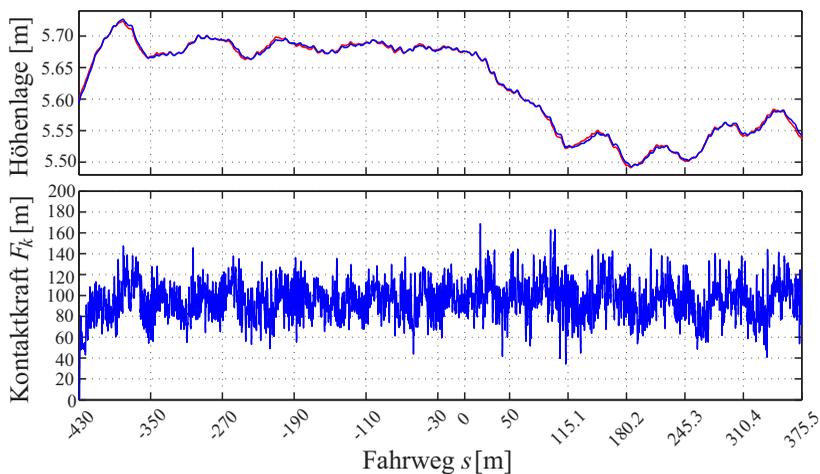


Abb. 8.31.: Simulationsergebnisse des Falls a2), PL8 mit $m_6 + 6\text{kg}$.

Tab. 8.13.: Auswertung der Bogeneinfahrt für PL8 mit $m_6 + 6\text{kg}$ in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrahlagen und mit relativen Werten zu Referenz.

s [m]	[-190, 375.5]		[-30, 180.2]		[0, 100]		[115.1, 375.5]		[-190, -30]	
Fall a1)										
\bar{F} [N]	95.41	-0.07%	96.10	0.37%	96.59	0.55%	95.31	0.06%	95.41	0.12%
F_{σ} [N]	16.35	3.91%	16.32	4.42%	16.00	2.60%	17.69	4.53%	14.34	2.30%
\hat{F} [N]	161.24	5.08N	161.24	5.08N	161.24	5.08N	145.36	-2.95N	140.32	6.96N
\check{F} [N]	41.50	-2.34N	41.50	-2.34N	50.56	-0.49N	41.50	-2.34N	52.98	-0.51N
Fall a2)										
\bar{F} [N]	96.62	0.17%	99.59	0.32%	101.81	0.51%	95.17	-0.11%	95.48	0.12%
F_{σ} [N]	16.84	4.22%	17.59	5.23%	17.30	2.61%	17.65	5.82%	14.27	-0.28%
\hat{F} [N]	168.66	-0.92N	168.66	-0.92N	168.66	-0.92N	144.20	-1.01N	136.81	-8.71N
\check{F} [N]	34.17	-4.08N	34.17	-4.08N	41.73	-0.49N	40.70	9.00N	43.77	-9.28N

Fall b): Gerade - Referenz

Die Fahrt auf der Geraden mit Höchstgeschwindigkeit stellt den zweiten betrachteten Fall dar. Um die Ergebnisse einordnen zu können, wurde - wie schon bei der Bogeneinfahrt - ein Referenzfall geschaffen. Es handelt sich dabei um das unveränderte Stromabnehmer-Modell aus Kap. 7, das mit einer Fußpunktbahn auf konstanter Höhe die Oberleitung abfährt.

Ausgewertet wird der Gesamtbereich von $s = [400\text{m}, 800\text{m}]$, nachdem sich die Höhenbahn des Stromabnehmers von der anfänglichen starken Überhöhung eingeschwungen zeigt. Zudem wird der Bereich $s = [400\text{m}, 560\text{m}]$ dargestellt, der die Absenkung mit 1:1000 im Fall der Fahrdrachtlage an den Grenzen des Toleranzbandes beinhaltet. Zu guter Letzt wird auch zusätzlich noch die Anhebung des Fahrdrachtes im Bereich $s = [400\text{m}, 720\text{m}]$ ausgewertet.

Für die Ergebnisse werden wieder die Kontaktbahn und die Kontaktkraft visuell in Abb. 8.32 und 8.33 dargestellt. Generell ist zu erkennen, dass sich die Standardabweichung mit der gestiegenen Geschwindigkeit relativ stark vergrößert hat. Hat sie bei einer Geschwindigkeit von $v = 160\text{km/h}$ noch bei ca. 14N gelegen, liegt diese bei $v = 200\text{km/h}$ um ca. 60% höher bei ca. 22N, was auch recht nahe der Begrenzung von 24N liegt.

Die mittlere Kontaktkraft erscheint für die Simulation etwas zu hoch gewählt worden zu sein. Diese liegt im Gesamtbereich bei 108.9N. Durch die hohen mittleren Kräfte bewegt sich der Anhub am Seitenhalter meist an der Grenze der Zulässigkeit. Diese liegt nach Kap. A.5.3 bei 120mm und wird am Stützpunkt bei $s = 800\text{m}$ sogar um ca. 5mm überschritten.

Fall b): Gerade - PL8 - 3kg

Abb. 8.34 und 8.35 zeigen die Kontaktbahn und die Kontaktkräfte für den Fall PL8 mit einem Zusatzgewicht von 3kg. Die zugehörigen statistischen Kennwerte sind in Tab. 8.15 aufgelistet. Analog zum Referenzfall der Geradenfahrt, wird der Fußpunkt des Stromabnehmers auf einer konstanten Höhe von 3.8m gehalten.

8. Ansätze zur Neigekompensation

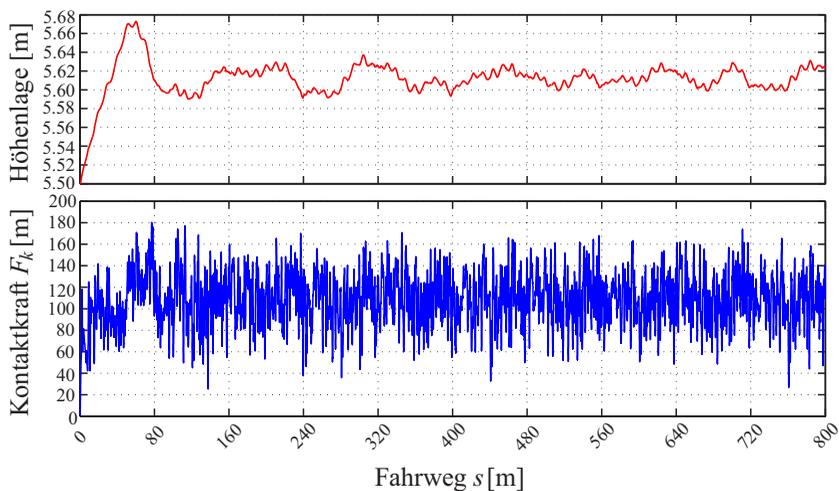


Abb. 8.32.: Simulationsergebnisse des Falls b1), PL8 mit $m_6 + 0$ kg.

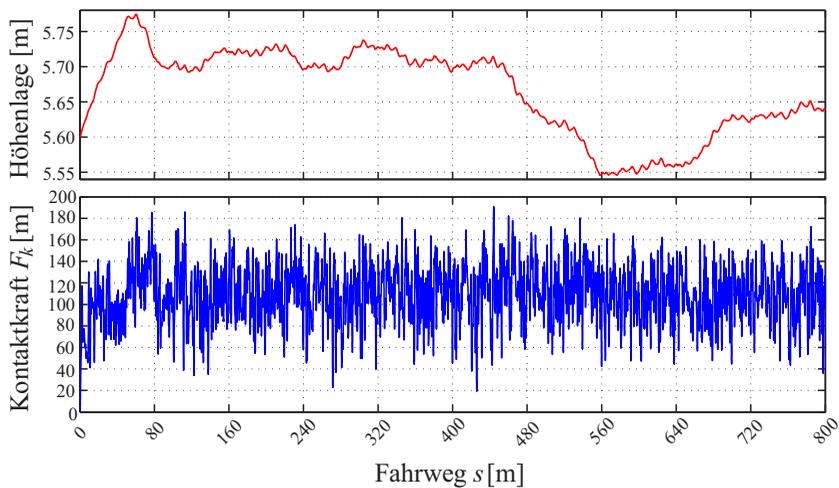


Abb. 8.33.: Simulationsergebnisse des Falls b2), PL8 mit $m_6 + 0$ kg.

Wie schon bei der Bogeneinfahrt, ist auch hier über den gesamten Fahrweg ein Nachlaufen in der Kontaktbahn aufgrund der Steigerung der Masse m_6 zu erkennen. Anhand der Daten ist zu erkennen, dass die mittleren Kontaktkräfte wieder recht unberührt vom Masseneintrag sind. Aber durch die gesteigerte Geschwindigkeit hat auch der Massenzuschlag mit ca. 4% einen größeren Einfluss auf die Standardabweichung.

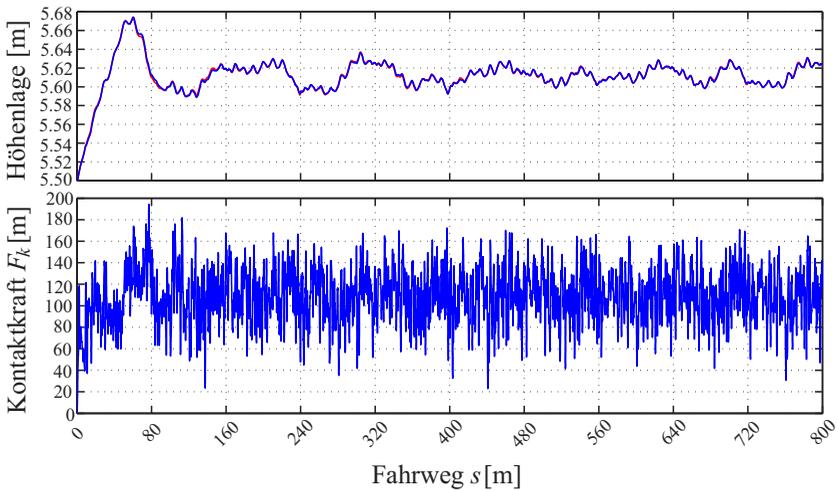


Abb. 8.34.: Simulationsergebnisse des Falls b2), PL8 mit $m_6 + 3$ kg.

8. Ansätze zur Neigekompensation

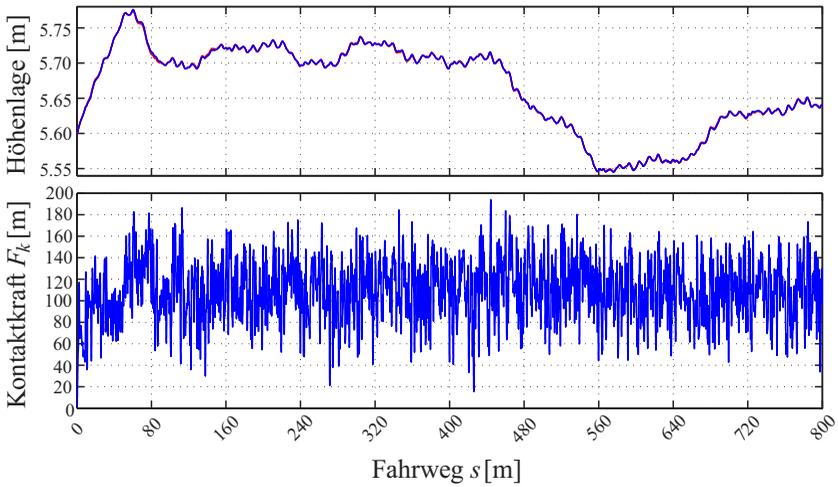


Abb. 8.35.: Simulationsergebnisse des Falls b2), PL8 mit $m_6 + 3$ kg.

Tab. 8.14.: Auswertung der Geradenfahrt für PL8 mit $m_6 + 0$ kg in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung.

s [m]	[400, 800]	[400, 560]	[400, 720]			
Fall b1)						
\bar{F} [N]	108.91	109.13	109.41			
F_σ [N]	22.56	23.25	22.67			
\hat{F} [N]	173.62	167.85	173.62			
\check{F} [N]	27.00	32.64	32.64			
Fall b2)						
\bar{F} [N]	109.83	0.43%	114.31	4.74%	110.32	0.83%
F_σ [N]	25.52	13.12%	26.76	15.10%	25.54	12.66%
\hat{F} [N]	190.89	17.27N	190.89	23.04N	190.89	17.27N
\check{F} [N]	19.42	-7.58N	19.42	-13.22N	19.42	-13.22N

Tab. 8.15.: Auswertung der Geradenfahrt für PL8 mit $m_6 + 3$ kg in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrähtlagen und mit relativen Werten zu Referenz.

s [m]	[400, 800]		[400, 560]		[400, 720]	
Fall b1)						
\bar{F} [N]	108.82	-0.08%	109.00	-0.11%	109.31	-0.10%
F_σ [N]	23.48	4.08%	24.67	6.13%	23.62	4.15%
\tilde{F} [N]	170.71	-2.91N	170.01	2.16N	170.71	-2.91N
\check{F} [N]	23.16	-3.84N	23.16	-9.48N	23.16	-9.48N
Fall b2)						
\bar{F}	109.85	0.01%	114.37	0.05%	110.27	-0.04%
F_σ	26.37	3.31%	27.51	2.79%	26.33	3.10%
\tilde{F} [N]	194.05	3.16N	194.05	3.16N	194.05	3.16N
\check{F} [N]	15.58	-3.84N	15.58	-3.84N	15.58	-3.84N

Fall b) Gerade - PL8 - 6kg

Wie schon bei der Bogeneinfahrt, wird auch auf der Geraden ein hoher Betrag für den Massenzuschlag von m_6 betrachtet, und zwar um 6kg. In Abb. 8.36 und 8.37 sind die Kontaktbahnen und die zugehörigen Kontaktkräfte der beiden Fahrdrachtlagen dargestellt. Die ermittelten statistischen Werte der Kontaktkraft sind in Tab. 8.16 aufgelistet. Die ermittelten Werte sind nahezu identisch mit den Ergebnissen aus dem Massenzuschlag von 3kg. Die Standardabweichungen über den gesamten ausgewerteten Bereich sind um ca. 4% gegenüber der Referenz im Fall b1) und 3% im Fall b2) erhöht. Im Bereich der Absenkung sind diese gar um 5.6% im Fall b1), bzw. 3.4% im Fall b2) erhöht. Das Minimum der Kontaktkraft mit ca. 11 N zu Beginn der Fahrdrachtabenkung im Fall b2) liegt nur knapp über dem Kontaktkraftabriss.

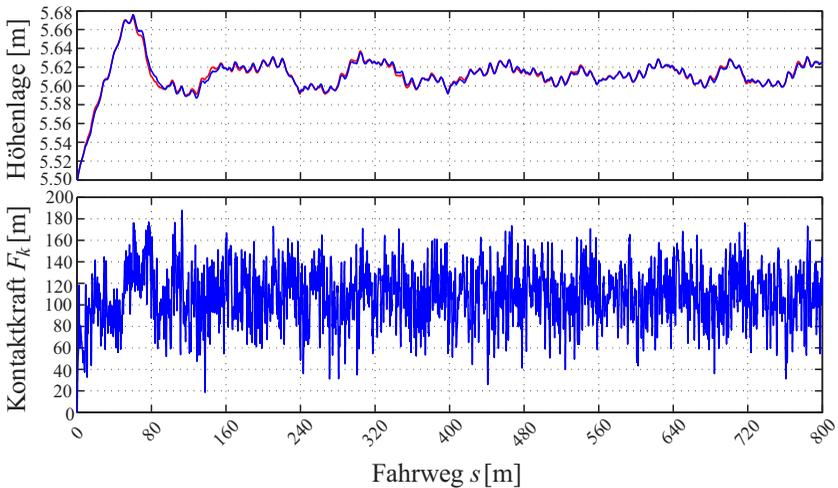
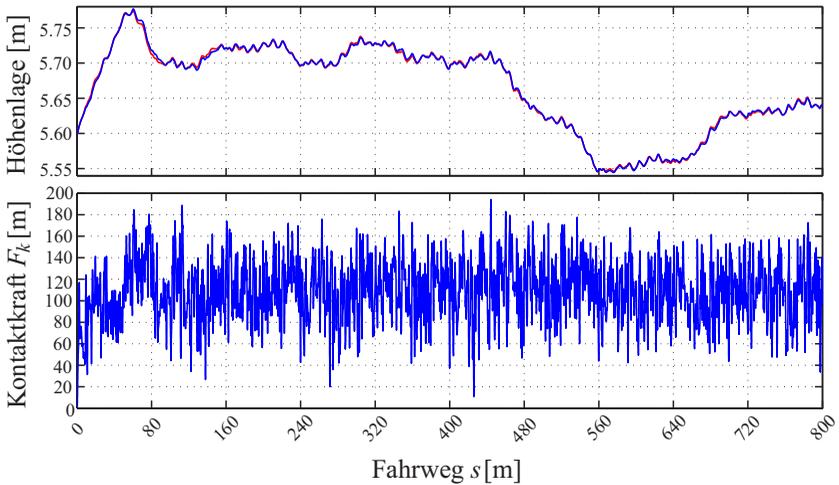


Abb. 8.36.: Simulationsergebnisse des Falls b1), PL8 mit $m_6 + 6\text{ kg}$.

Abb. 8.37.: Simulationsergebnisse des Falls b2), PL8 mit $m_6 + 6$ kg.Tab. 8.16.: Auswertung der Geradenfahrt für PL8 mit $m_6 + 6$ kg in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrähtlagen und mit relativen Werten zu Referenz.

s [m]	[400, 800]		[400, 560]		[400, 720]	
Fall b1)						
\bar{F} [N]	108.77	-0.13%	109.01	-0.11%	109.29	-0.11%
F_σ [N]	23.44	3.89%	24.55	5.60%	23.58	4.00%
\hat{F} [N]	176.03	2.41N	173.53	5.68N	176.03	2.41N
\check{F} [N]	26.00	-1.01N	26.00	-6.64N	26.00	-6.64N
Fall b2)						
\bar{F} [N]	109.81	-0.02%	114.42	0.09%	110.18	-0.12%
F_σ [N]	26.26	2.89%	27.66	3.36%	26.12	2.25%
\hat{F} [N]	192.99	2.10N	192.99	2.10N	192.99	2.10N
\check{F} [N]	11.16	-8.26N	11.16	-8.26N	11.16	-8.26N

8.3.8 Zusammenfassung aus dynamischer Sicht

Die Auswertung der Kontaktkräfte zeigt einige interessante Aspekte:

1. Die Absenkung des Fahrdrahtes führt - wie zu erwarten war - zu einer Steigerung der mittleren Kontaktkraft in diesem Bereich. Aber auch die Standardabweichung und entsprechend die Extrema weiten sich aus.
2. Die Oberleitung mit Vordurchhang im Fall a) bei $s = [-190\text{m}, -30\text{m}]$ besitzt im Vergleich zum vordurchhangsfreien Oberleitungsbereich bei $s = [115.1\text{m}, 375.5\text{m}]$ mit dem verwendeten Stromabnehmer bei 160km/h eine ca. 15-20% reduzierte Standardabweichung.
3. Die Fußpunktanregung durch die Neigetechnik für die betrachteten Konzepte besitzen im Vergleich zur Fahrdrachtsenkung weniger Einfluss auf die Kontaktkräfte. Die Auswirkung der Fußpunktlage entspricht bei PL4 etwa 1/4 der betrachteten Fahrdrachtsenkung.
4. Vergleich man die Kontaktkräfte von Fall a1) Referenz mit Fall a2) PL4, ergibt sich als worst-case-Abschätzung eine Steigerung von 5.4% in der mittleren Kontaktkraft und 7.6% in der Standardabweichung im Bereich der aktiven Neigetechnik.
5. Die zusätzliche Masse am Scheitelrohr m_6 wirkt sich bis zur Eigenfrequenz der Oberarmbiegung auf die Scheinmasse aus.
6. Bei der Bogeneinfahrt wirkt sich bei PL8 die zusätzliche Masse von 3 kg durch eine Steigerung der Standardabweichung von 6.3% im Gesamtbereich und 12.3% im Bereich der aktiven Neigetechnik aus, jeweils beim Vergleich des Falls a2) mit Fall a1) Referenz.
7. Die Steigerung der Masse um weitere 3 kg auf insgesamt 6 kg führt in der worst-case-Abschätzung auf eine Steigerung der Standardabweichung um 6.9% im Gesamtbereich, respektive 11.0% im Bereich der Fahrdrachtsenkung, was in etwa identisch zum geringeren Masseneintrag ist.

8. Der Massenzuschlag hat auf den Oberleitungsbereich ohne Vordurchhang $s = [115.1 \text{ m}, 375.5 \text{ m}]$ einen größeren Einfluss, hier liegt die Steigerung der Standardabweichung zu der Referenzlage bei etwa 4-5%.
9. Die gesteigerte Geschwindigkeit auf der Geraden führt zu einer ca. 55% Zunahme der Standardabweichung beim Vergleich der Fälle a) Referenz und b1) Referenz im Bereich der Oberleitung mit Vordurchhang.
10. Die Fahrdrahtabsenkung der Geradenfahrt führt zu einer Steigerung der mittleren Kontaktkraft um 4.7% und einer Steigerung der Standardabweichung um 14.9%
11. Der Massenzuschlag von 3 kg verursacht im betrachteten Gesamtbereich der Nennlage eine Steigerung der Standardabweichung um ca. 4%, und im Vergleich der Fälle 2) eine Steigerung um ca. 3%. Die mittleren Kontaktkräfte sind wieder nahezu unberührt davon.
12. Die Steigerung des Massenzuschlags auf insgesamt 6 kg führt im Vergleich zu 3 kg bei der Simulation der Geradenfahrt zu keiner signifikanten Veränderung.

8.3.9 Realisierbarkeit und Abschätzung der Bauhöhe

Die These der Arbeit ist, dass durch die neuen Konzepte die Bauhöhe reduziert werden kann. Für eine abschließende Bewertung davon wäre eine vollständige Konstruktion - inklusive der Steifigkeits- und Festigkeitsauslegung notwendig, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt wurde. Es können allerdings Tendenzen hierzu angegeben werden.

Für PL2 gibt es ausreichende Lösungsansätze, die Kap. A.5.1 des Anhangs entnommen werden können, entsprechend wird hier nicht weiter darauf eingegangen. Der Stand der Technik wird durch [BBK99] wiedergegeben, allerdings erscheint bspw. [Jäg04] im Sinne der Bauhöhe deutlich attraktiver zu sein.

PL4 kombiniert die Translation auf Dachebene mit der Rotation oberhalb des

Rahmens. Die Geradführung stellt eine Standardaufgabe dar, die mittels Konstruktionskataloge angegangen werden kann, um eine möglichst verschleißarme aber auch kompakte Lösung zu finden. Theoretisch kann die Translations-einrichtung auch vor die Stützisulatoren konstruiert werden, sodass die Stützisulatoren im Millimeterbereich über der Dachauflage liegen und somit keinen nennenswerten vertikalen Platz verbrauchen. Als Antrieb hierfür bietet sich wieder ein extern angetriebener Riementrieb an. Die Rotation des Unterarms relativ zum Hilfsrahmen ist für die aktuelle Bauart der Stromabnehmer mittels Viergelenk schwierig, da der Hilfsrahmen den Senkdämpfer und die Anhubseinheit, die eine direkte Verbindung zum Unterarm besitzen, beherbergt. Zudem muss die Rotationsreihenfolge (Rotation der Neigekompensation → Rotation des Unterarms) eingehalten werden. Sinnvoller erscheint hierbei die gesamte Rotation des Trägerrahmens an geeigneter Stelle, wobei eine zusätzliche Bauhöhe von minimal $\frac{\text{Stützbreite}}{2} \cdot \sin(\text{max. Neigewinkel})$ induziert wird. Dies liegt bei ca. $500 \text{ mm} \cdot \sin(6.5 \text{ deg}) = 56.6 \text{ mm}$ und somit etwa bei einem Drittel der aktuellen Lösung. Eine Reduzierung der Stützbreite kann diesen Wert weiter reduzieren.

Selbiges gilt für die Lösungen PL8 und PL9, da die Translation des Scheitelrohrs keinen zusätzlichen Bauraum benötigt. Bei der Realisierung der Translation ist es sicherlich vorteilhaft, wenn die Aktorik nicht auf Höhe des Scheitelrohrs liegt, sondern für die Energie- und Informationsübertragung geeignete Leitstützstrukturen - wie etwa Seilzüge - dazwischen geschaltet werden. Dies würde den Massenzuschlag auf Seiten des Scheitelrohrs reduzieren.

8.4 Zusammenfassung und Bewertung der Konzepte

Ziel dieses Kapitels ist die Erzeugung und Auswahl von Konzepten zur Neigekompensation des Stromabnehmers für Fahrzeuge mit Neigetechnik. Hierzu wurden zu Beginn Anforderungen hinsichtlich der Funktionserfüllung an technischen Lösungen aufgestellt. Die Funktion der Neigekompensation wurde in ihre Teilkomponenten zerlegt und es wurden Schnittstellen, an denen die Teilfunktionen erfüllt werden können, identifiziert. Die Funktionszerlegung

und Schnittstellenidentifikation wurde genutzt, um mittels eines deduktiven Lösungsansatzes den Lösungsraum zu erforschen und geeignet erscheinende Lösungen in eine Vorauswahl zu nehmen. Die so generierten Prinzipallösungen wurden dann hinsichtlich

- Vorauswahl im Sinne des Einflusses der PL auf die Kontaktkraftbedingung (F1),
- Einhaltung der Stromabnehmer-Begrenzungslinie (F2),
- Bauraum (F6, M1)

untersucht. Neben einer binären Entscheidung zur Funktionserfüllung liefern die mit F1 assoziierten Bewertungskriterien keine eindeutigen Ergebnisse zur Realisierbarkeit, da die Eigenschaften des Grundstromabnehmers hier von Relevanz sind. Aus der Tendenz der hier gemachten Simulationen kann die Realisierbarkeit der Konzepte - je nach Grundstromabnehmer - extrahiert werden.

Um die Konzepte zusammenfassend zu bewerten, wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt, die eine weitere Kondensation der PL auf die, aus Funktionssicht besten Lösungen, ermöglicht. Die Kriterien sind dabei ungleich gewichtet und können einen Wertebereich von [1,3] einnehmen. Die Vertikaldynamik, als entscheidender Faktor des Systems Stromabnehmer-Oberleitung, wird mit dem Faktor 3 gewichtet. Der vertikale Bauraum und die Einfachheit der Lösung werden jeweils mit 2 gewichtet. Die Konzepte können ohne Gewichtung den Wertebereich [0,10] einnehmen. In Summe kann bei den drei Kriterien somit insgesamt 70 Punkte erreicht werden. Die Lösung PL2, als aktuelle Lösung, erreicht 50 Punkte. Durch die ideale Führung des Stromabnehmers besitzt diese Lösung den geringsten negativen Einfluss auf die Vertikaldynamik und erhält somit die volle Punktzahl von 10. Auch die Einfachheit der Lösungen, durch eine simple Kreisbogenführung mit nur einem Aktor ist vorteilhaft. Entsprechend wird auch hier die ungewichtete volle Punktzahl von 10 Punkten erreicht. Da der vertikale Bauraum der Entwicklungsbereich dieser Lösung ist, wird der erreichte ungewichtete Wert auf 0 Punkte gesetzt.

Tab. 8.17.: Nutzwertanalyse der Prinziplösungen.

Kriterium	Gew.	PL2	PL4	PL8	PL9
1. Vert. Bauraum, Abschätzung (M1)	2	0	14	14	14
2. Vertikaldynamik, (F1)	3	30	27	21	21
3. Einfachheit (F3/W1)	2	20	10	10	10
Gesamt	70	50	51	45	45

PL4 verwendet zwei getrennte Aktoren für die Bewegung, entsprechend wird hier die erreichte Punktzahl der Wertung „Einfachheit“ halbiert auf 5. Der vertikale Bauraum konnte nur abgeschätzt werden, entsprechend einer idealisierten Drittelung der Bauhöhe, wird die Punktzahl auf 7 Punkte gesetzt. Selbiges gilt für die Lösungen PL8 und PL9.

Die Vertikaldynamik zu bewerten hängt stark von den Eigenschaften des verwendeten Grundstromabnehmer ab. Da PL4 nur eine geringe Steigerung der Standardabweichung mit sich gebracht hat, wird der Wert auf den Faktor 9 gelegt.

PL8/PL9 wurden zusätzlich zur Bogeneinfahrt auch noch auf die Geradenfahrt mit höherer Geschwindigkeit untersucht. Im Bogen wird die Standardabweichung um ca. das Dreifache der Steigerung von PL4 erhöht, entsprechend wird die Punktzahl 7 vergeben. Die Ergebnisse dieser Bewertung sind in Tab. 8.17 aufgeführt.

PL2 und PL4 heben sich nach dieser Auswertung als interessanteste Ansätze hervor. Allerdings sind auch PL8 und PL9 nicht weit davon entfernt, sodass alle drei neuen Konzepte für die Realisierung interessant erscheinen. PL2 besitzt den großen Vorteil, dass der Grundstromabnehmer nicht verändert werden muss, wohingegen bei PL8 und PL9 ein anderer Stromabnehmerkopf konstruiert werden muss. Im Folgenden wird noch eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Bauhöhe des Stromabnehmer aufgezeigt, die sich durch die elektrische Isolation des Stromabnehmers zum Wagendach realisieren lässt.

8.5 Weiterführende Möglichkeit

In dieser Arbeit wurde der Fokus auf die Realisierung der Kinematik gelegt. Wenn man von dieser kinematischen Betrachtung weg geht, gibt es Bauteiloptimierungen, die zur Reduzierung der Bauhöhe beitragen können: Die Stützisolatoren nehmen einen großen vertikalen Bauraum ein, der durch Integration der Isolation in den Unterarm und die Koppelstange gänzlich vermieden werden kann. Dieser Ansatz ist nicht neu, sondern wurde schon bei der Entwicklung eines Stromabnehmers für den ICE angedacht. Abb. 8.38 zeigt einen Prototypen des Stromabnehmers DSA 350.

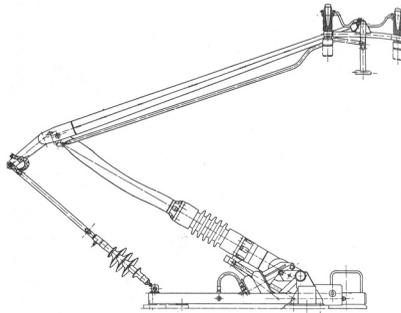


Abb. 8.38.: Stromabnehmer DSA 350 mit, in Unterarm und Koppelstange integrierter elektrischer Isolation [Bar88].

9 Zusammenfassung

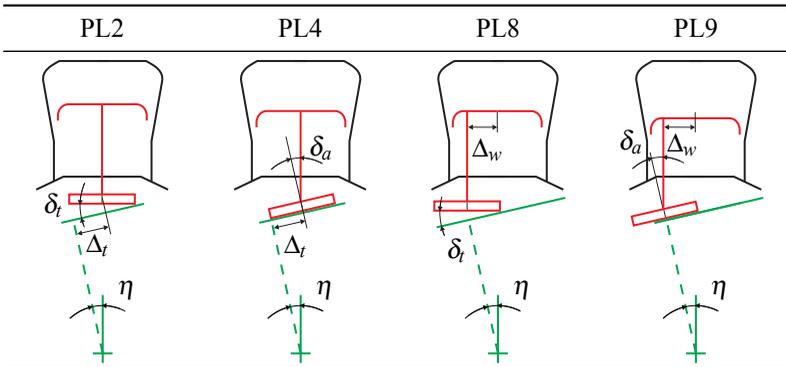
Der Fokus der Arbeit war die Interoperabilität und Neigekompensation eines Stromabnehmers. Hierzu wurde eine Machbarkeitsstudie der Interoperabilität durch laterale Verschiebung des Stromabnehmers bzw. dessen Komponenten durchgeführt. Es hat sich allerdings herausgestellt, dass im Bereich von Weichen die Auflaufbedingung und der klemmenfreien Raum berücksichtigt werden müssen, durch deren kombinierte Forderungen die technische Realisierbarkeit nicht gegeben ist.

Im folgenden stand der Fokus dann auf der Neigekompensationseinrichtung für Stromabnehmer auf Fahrzeugen mit Neigetechnik. Kritikpunkt an aktuellen Lösungen ist der hohe vertikale Bauraum, der zu einer Reduzierung des Passagiererraums führt. Zur Untersuchung des Problems mussten einige Vorbedingungen erarbeitet werden:

1. Der technische Stand von Fahrzeugen mit **Neigetechnik** wurde erarbeitet und ein **Referenzfahrzeug** anhand von Literaturdaten als MKS-Modell aufgebaut.
2. Die Entwicklung von Stromabnehmer und deren technischer Aufbau, sowie Modellierungsarten wurden vorgestellt. Es wurde als **Referenz-Stromabnehmer** ein Modell mit nichtlinearer Kinematik als MKS-Modell aufgebaut und dessen Eigenschaften anhand des resultierenden Scheinmassenverlaufes dargestellt.
3. Infrastruktureseitig wurden zwei Fahrsituationen betrachtet: Zum einen die Einfahrt in einen Gleisbogen mit aktivierter Neigetechnik bei einer Geschwindigkeit von $v = 160 \text{ km/h}$ und zum anderen die Fahrt auf einer Geraden mit $v = 200 \text{ km/h}$. Hierzu wurde ein FE-Modell der DB **Oberleitung** Re 200 aufgebaut, die für eine Geschwindigkeit bis 200 km/h zugelassen ist.

4. Die Interaktion zwischen Stromabnehmer und Oberleitung ist ein entscheidendes Kriterium für die Eignung eines Stromabnehmer-Konzeptes. Um dies bewerten zu können, wurde eine **skriptbasierte Co-Simulation** zwischen der FE-Software ANSYS und dem MKS-Tool SIMPACK erstellt und validiert.

Tab. 9.1.: Kondensierte Konzepte zur Neigekompensation.



Unter diesen Vorbedingungen wurde mit Hilfe eines deduktiven Ansatzes kinematische Konzepte zur Neigekompensation in allgemeiner Form aufgestellt und anhand erster Überlegungen auf zehn Konzepte kondensiert. Für die Beschreibung der Konzepte wurden schematische Darstellungen gewählt, die zusammen mit einer kurzen Beschreibung in Tab. 8.4 aufgeführt sind. Anhand kinematischer Überlegungen wurden diese weiter auf vier Konzepte reduziert, die mit Hilfe der aufgebauten Simulationsumgebung hinsichtlich der dynamischen Interaktion mit der erstellten Oberleitung bewertet wurden. Die Konzepte sind in Tab. 9.1 noch einmal gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Kontaktkraftsimulation lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. PL2 beeinflusst die Kontaktkraft in vernachlässigbarer Weise.
2. Die Fußpunktanregung bei PL4 verursacht eine Steigerung der mittleren Kontaktkraft um 0.4-1.5% und in der Standardabweichung eine Steigerung von ca. 2.7% im Bereich der aktiven Neigetechnik.

3. PL8 mit einer Zusatzmasse von 3 kg verursacht im gesamten Bereich der Bogeneinfahrt eine Steigerung der Standardabweichung von ca. 3%.
4. PL8 mit einer Zusatzmasse von 6 kg verursacht im gesamten Bereich der Bogeneinfahrt eine Steigerung der Standardabweichung von ca. 4%.
5. Bei der Geradenfahrt mit $v = 200$ km/h ist die Standardabweichung mit dem verwendeten Stromabnehmermodell um ca. 55% erhöht.
6. PL8 mit einer Zusatzmasse von 3 kg führt zu einer Steigerung der Standardabweichung um ca. 4% bei der Geradenfahrt.
7. PL8 mit einer Zusatzmasse von 6 kg führt zu einer Steigerung der Standardabweichung um ca. 4% bei der Geradenfahrt.

Die Fälle PL4 und PL8/PL9 verursachen somit allesamt eine Verschlechterung der Kontaktinteraktion. Falls der verwendete Grundstromabnehmer einen ausreichenden Abstand der Kraftkennwerte zu den Grenzwerten besitzt, sind die gezeigten Konzepte allesamt technisch umsetzbar. Die Bauhöhe konnte nur grob abgeschätzt werden, und könnte im Idealfall auf etwa 1/3 des aktuellen Wertes reduziert werden. Die Ergebnisse ermuntern somit zu kreativen Ansätzen im Bereich der Neigekompensation. Da die komplette Arbeit einen rein simulativen Charakter besitzt, ist natürlich eine Überprüfung am realen System von Interesse.

Die Bewertung der realen Bauraumeinsparung ist für die abschließende Bewertung notwendig, hierzu muss eine konkrete Auslegung durchgeführt werden.

A Anhang

A.1 Parameter Neigetechnikfahrzeug

Tab. A.1.: Parameter der Neigetechnikfahrzeuges nach Abb. 4.3, Daten basieren auf [Zol02] und eigenen Abschätzungen.

$m_{cb} = 38 \cdot 10^3 \text{ kg}$	$m_{bog} = 3.68 \cdot 10^3 \text{ kg}$	$m_{ws} = 1 \cdot 10^3 \text{ kg}$
$m_{bol} = 0.1 \text{ kg}$		
$J_{cb,x} = 20 \cdot 10^3 \text{ kgm}^2$	$J_{cb,y} = 12 \cdot 10^3 \text{ kgm}^2$	$J_{cb,z} = 12 \cdot 10^3 \text{ kgm}^2$
$J_{b,x} = 2.5 \cdot 10^3 \text{ kgm}^2$	$J_{b,y} = 3.5 \cdot 10^3 \text{ kgm}^2$	$J_{b,z} = 3.5 \cdot 10^3 \text{ kgm}^2$
$J_{ws,x} = 1 \cdot 10^3 \text{ kgm}^2$	$J_{ws,y} = 100 \text{ kgm}^2$	$J_{ws,z} = 1 \cdot 10^3 \text{ kgm}^2$
$J_{bol,x} = 0.1 \text{ kgm}^2$	$J_{bol,y} = 0.1 \text{ kgm}^2$	$J_{bol,z} = 0.1 \text{ kgm}^2$
$l_p = 445 \text{ mm}$	$l_{ps} = 1.3 \text{ m}$	$b_u = 930 \text{ mm}$
$b_o = 650 \text{ mm}$	$b_r = 1000 \text{ mm}$	$b_{ps} = 1000 \text{ mm}$
$b_{ss} = 800 \text{ mm}$	$h_{ws} = 500 \text{ mm}$	$h_b = 600 \text{ mm}$
$h_{bol} = 800 \text{ mm}$	$h_{cb} = 1696 \text{ mm}$	$h_m = 1781 \text{ mm}$
$h_r = 3400 \text{ mm}$	$h_{p,o} = 800 \text{ mm}$	$h_{ps} = 500 \text{ mm}$
$h_{ss} = 852 \text{ mm}$		
$c_{tr,1} = 5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$c_{tr,2} = 10 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$d_{tr,2} = 25 \cdot 10^3 \text{ Ns/m}$
$c_{ps(x,y)} = 18.6 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$c_{ps_z} = 1.6 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$d_{ps(x,y,z)} = 20 \cdot 10^3 \text{ Ns/m}$
$c_{ss,z_1} = 201.5 \cdot 10^3 \text{ N/m}$	$c_{ss,z_2} = 300 \cdot 10^3 \text{ N/m}$	$c_{ss,z_3} = 201.5 \cdot 10^3 \text{ N/m}$
$d_{ss,z_3} = 20 \cdot 10^3 \text{ Ns/m}$	$c_{ss,y_1} = 0.1 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$c_{ss,y_2} = 8 \cdot 10^6 \text{ N/m}$
$d_{ss,y_2} = 180 \cdot 10^3 \text{ Ns/m}$	$c_{ss,\alpha} = 1.5 \cdot 10^6 \text{ Nm/rad}$	$d_{ss,\alpha} = 18.2 \cdot 10^3 \text{ Ns/m}$

A.2 Parameter Stromabnehmer

Tab. A.2.: Parameter zum Zweimassenmodell für den Stromabnehmer nach EN50318 [EN03].
Skizze zu den Parametern siehe Abb. 5.4.

$m_1 = 15 \text{ kg}$	$m_2 = 7.2 \text{ kg}$
$c_1 = 50 \text{ N/m}$	$c_2 = 4.2 \text{ kN/m}$
$d_1 = 90 \text{ Ns/m}$	$d_2 = 10 \text{ Ns/m}$
$F_{anh.} = 120 \text{ N}$	

Tab. A.3.: Parameter des Stromabnehmers aus Abb. 5.6.

$m_1 = 2.08 \text{ kg}$	$m_2 = 26.25 \text{ kg}$	$m_3 = 6.83 \text{ kg}$
$m_4 = 4.36 \text{ kg}$	$m_5 = 2.45 \text{ kg}$	$m_6 = 3.68 \text{ kg}$
$m_7 = 7.26 \text{ kg}$	$m_b = 7.02 \text{ kg}$	$J_{1,s,x'} \approx 0 \text{ kgm}^2$
$J_{1,s,y'} = 0.34 \text{ kgm}^2$	$J_{1,s,z'} = 0.34 \text{ kgm}^2$	$J_{2,s,x'} = 0.29 \text{ kgm}^2$
$J_{2,s,y'} = 10.04 \text{ kgm}^2$	$J_{2,s,z'} = 10.23 \text{ kgm}^2$	$J_{3,s,x'} = 0.55 \text{ kgm}^2$
$J_{3,s,y'} = 1.36 \text{ kgm}^2$	$J_{3,s,z'} = 2.18 \text{ kgm}^2$	$J_{4,s,x'} = 0 \text{ kgm}^2$
$J_{4,s,y'} = 0.87 \text{ kgm}^2$	$J_{4,s,z'} = 0 \text{ kgm}^2$	$J_{5,s,x'} = 0.0023 \text{ kgm}^2$
$J_{5,s,y'} = 0.763 \text{ kgm}^2$	$J_{5,s,z'} = 0.763 \text{ kgm}^2$	$J_{6,s,x'} = 1.2 \text{ kgm}^2$
$J_{6,s,y'} = 0.028 \text{ kgm}^2$	$J_{6,s,z'} = 1.202 \text{ kgm}^2$	$J_{7,s,x'} = 1.62 \text{ kgm}^2$
$J_{7,s,y'} = 0.58 \text{ kgm}^2$	$J_{7,s,z'} = 2.16 \text{ kgm}^2$	$l_1 = 1.225 \text{ m}$
$l_{1,s} = 0.6125 \text{ m}$	$l_2 = 1.59 \text{ m}$	$l_{2,s} = 0.564 \text{ m}$
$l_{2,1} = 0.0349 \text{ m}$	$h_{2,1} = 0.0284 \text{ m}$	$b_{2,1} = 0.147 \text{ m}$
$l_{3,0} = 0.322 \text{ m}$	$l_{3,1} = 0.9147 \text{ m}$	$l_{3,s} = 0.1691 \text{ m}$
$\varphi_3 = 5 \text{ deg}$	$l_{4,s} = 0.488 \text{ m}$	$l_4 = 0.976 \text{ m}$
$l_5^* = 1.8699 \text{ m}$	$b_5 = 0.243 \text{ m}$	$l_{5,s}^* = 0.9396 \text{ m}$
$l_6 = 0.0405 \text{ m}$	$h_{6,s} = 0.038 \text{ m}$	$h_{6,1} = 0.0944 \text{ m}$
$l_{7,1} = 0.3 \text{ m}$	$h_{7,1} = 0.023917 \text{ m}$	$h_{7,s} = 0.031 \text{ m}$
$b_{7,1} = 0.555 \text{ m}$	$l_{7,2} = 0.29 \text{ m}$	$l_a = 0.7 \text{ m}$
$h_a = 0.15 \text{ m}$	$l_b = 0.532 \text{ m}$	$h_b = 0.01 \text{ m}$
s_b, r_b siehe Abb. 5.9	$l_c = 0.443 \text{ m}$	$h_c = 0.0605 \text{ m}$
$\varphi_c = 107.4 \text{ deg}$	$r_c = 0.1153 \text{ m}$	$d_{02} = 36 \frac{\text{Nms}}{\text{rad}}$
$d_{23} = 157.5 \frac{\text{Nms}}{\text{rad}}$	$c_{34} = 24426 \text{ Nm/rad}$	$d_{34} = 4.2857 \frac{\text{Nms}}{\text{rad}}$
$c_{67} = 8390 \text{ N/m}$	$d_{67} = 115.13 \text{ Ns/m}$	$c_{l,67} = 6000 \text{ N/m}$
$d_{l,67} = 41.74 \text{ Ns/m}$	$d_b = 10252 \text{ Ns/m}$	$F_{anh.} = 11500 \text{ N}$
$F_{auftr.} = 0.0125712 \frac{\text{Ns}^2}{\text{m}^2} \text{ v}^2$		

*) Gesamtlänge, nicht Projektion in der dargestellten Ebene.

A.3 Parameter der Oberleitung Re 200

Tab. A.4.: Verwendete Parameter für den Oberleitungstyp Re 200.

	Fahrdraht (Cu, 100mm ²)	Tragseil (BzII, 50mm ²)	Y-Beiseil (BzII, 25mm ²)	Hängerseil (BzII, 10mm ²)
ρA [kg/m]	0.89	0.45	0.2225	0.08544
ρ [kg/m ³]	8900	8900	8900	8900
E [N/m ²]	$1.2 \cdot 10^{11}$	$1.13 \cdot 10^{11}$	$1.13 \cdot 10^{11}$	$1.13 \cdot 10^{11}$
$I_{yy/zz}$ [m ⁴]	$7.957 \cdot 10^{-10}$	–	–	–
T [kN]	10	10	siehe Abb. 6.4	–
	Seitenhalter, 0.65m	Seitenhalter, 0.85m	SH-Rohr, 1.75m	
m [kg]	1.01	1.08	4.18	
J_1 [kgm ²]	0.0356	0.0651	1.4665	
	Stützrohr, angelenkt	Stützrohr, umgelenkt	Abzugshalter	
m [kg]	6.23	8.448	0.51	
J_1 [kgm ²]	2.8923	7.2098	-	
	Hängerklemme, FD	Hängerklemme, TS	Zahnklemme, TS->Y-BS	
m [kg]	0.14	0.14	0.25	
<i>Hinweis:</i> Die Daten basieren auf Informationen von [Sch89], [Bal14], [Sie12] und eigenen Abschätzungen.				

A.4 Wanderkraft: Skript in ANSYS APDL

```

!=====
! ANSYS MECHANICAL APDL
!=====
! PROJECT: Catenary simulation-Validation
! PROGRAM: Moved constant force on pretensioned beam/link element
! DATE: 2014/07/10
! AUTHOR: Steffen Koelling
! TASK: Simulation of moving force on link/beam element.
! For comparison purposes there are switching-parameters implemented which enables the
! user to change element model, force appliace and solution type conveniently.
! ANSYS VERSION: 12.1
! CALL:
!=====

!
! BEGINNING
!=====
FINI
/CLEAR
/TITLE, Moved Force on Beam
/CONFIG,NRES,10000
!===== PARAMETER AND CONSTANTS =====
p_PI = 4*ATAN(1) ! [-] Constant PI
p_E = 1.2e11 ! [N/m^2] Youngs Modulus
p_DEN = 8900 ! [kg/m^3] Density
p_AD = 0.89 ! [kg/m] Area density
p_AREA = p_AD/p_DEN ! [m^2] Area of cross section
p_R = SQRT(p_AREA/p_PI) ! [m] Radius
p_D = 2*p_R ! [m] Diameter
p_IZZ = p_AREA/4*p_R**2 ! [m^4] Inertia of area across bending in z-direction
p_PR = 0.00 ! [-] Poisson Ratio
p_T = 10000 ! [N] Tensioning force
pISTR = p_T/p_AREA*p_E ! [-] Initial strain due to tension
p_LEN = 10 ! [m] Beam length
p_ESIZE = 0.05 ! [m] Length of one segment
p_CF = 100 ! [N] Contact Force
p_V = 300/3.6 ! [m/s] Vehicle velocity
p_CFX0 = 0 ! [m] Contact point start in x-direction
p_TEND = (p_LEN-p_CFX0)/p_V ! [s] End time of simulation
p_MASSBELAG = p_AREA*p_DEN ! [kg/m] Mass per length
p_C = SQRT(p_T/p_MASSBELAG) ! [m/s] Wave propagation velocity (of link element)
p_DT = 20e-4 ! [s] Constant step time
p_MODELL = 3 ! [-] 0 = LINK180, 1 = BEAM188, 2 = BEAM4, 3 = LINK10
p_FORCEDISTR = 0 ! [-] FORCE FUNCTION: 0=2NODE distr., 1=Parabolic, 2=triangle
p_TOLER = p_ESIZE/10 ! [m] Tolerance for NSEL
p_AN_MODE = 0 ! [m] 0=full transient, 1=modsup transient
p_NUMMODES = 100 ! [-] Number of modes in modsup transient analysis

PARSAV,ALL,MODELL,PARAMETERS,DT,p_DT,p_ESIZE,p_ELEMENT,p_MODELL,p_AN,p_AN_MODE,txt
!Documentation of used parameter sets
!=====
!#####
!##### A.) P R E P R O C E S S I N G #####
!#####
!/PREP7 !Menu "Preprocessing"
!=====
! A.1 GEOMETRY CREATION
!=====
!== A.1.1 CREATE BODY CONTACT WIRE =====
K,1,0,0 !ursprung
K,2,p_LEN,0,0 !Ende
L,1,2 !Linie zwischen KP
!=====
! A.2 MESHING
!=====
!== A.2.1 ASSIGNING THE ELEMENT TYPE =====
*IF,p_MODELL,EQ,0,THEN !IF-THEN-ELSE CASE FOR APPROPRIATE MODELL
ET,1,LINK180
*ELSEIF,p_MODELL,EQ,1
ET,1,BEAM188
KEYOPT,1,2,1 !Cross section is assumed to be rigid (classical beam theory)
KEYOPT,1,3,3 !Shape function along the length: gubic
*ELSEIF,p_MODELL,EQ,2
ET,1,BEAM4
KEYOPT,1,6,1
*ELSEIF,p_MODELL,EQ,3
ET,1,LINK10
KEYOPT,1,3,0 !Tension only (cable)
*ENDIF
!=====
!== A.2.2 GENERATE SUBSET OF ELEMENTS OF MATERIAL NO.1 =====
MAT,1 !Material number of subseq. generated elements
TYPE,1 !FE type of subseq. generated elements
REAL,1 !Real set number of subseq. generated elements
ESIZE,p_ESIZE !Specifies the size of FE elements
LMESH,1 !Meshing of line 1
!=====
NSEL,ALL
CM,C,CW,NODE !Create component of nodes

```

A. Anhang

```
!=====  
! A.3 MATERIAL PROPERTIES  
!=====  
!==== A.3.1 DEFINE REAL CONSTANTS, SECTIONS AND INITIAL STATE COMMANDS =====  
*IF,p_MODEL,EQ,0,THEN  
  R,1,p_AREA,,1          !Last 1 ist pretty important  
  INIS,SET,DTYP,EPEL     !Sets type of initial state for subsequent INISTATE command:EPEL=Strain data  
  INIS,DEFI,ALL,, , ,p_ISTR !Sets CXX=p_ISTR for all selected elements  
*ELSEIF,p_MODEL,EQ,1  
  SECTYFE, 1, BEAM, CSOLID, ,0  
  SECOFFSET, CENT  
  SECDATA,p_R,10,5  
  INIS,SET,DTYP,EPEL     !Sets type of initial state for subsequent INISTATE command:EPEL=Strain data  
  INIS,DEFI,ALL,, , ,p_ISTR !Sets CXX=p_ISTR for all selected elements  
*ELSEIF,p_MODEL,EQ,2  
  R,1,p_AREA,p_IZZ,p_IZZ,p_D,p_D,,  
  RMORE,p_ISTR,2*p_IZZ  
*ELSEIF,p_MODEL,EQ,3  
  R,1,p_AREA,p_ISTR  
*ENDIF  
  
!== A.3.2 DEFINE MATERIAL PROPERTIES OF MATERIAL NO.1 =====  
MP, EX, 1, p_E           !Material properties: Elastic modulus  
MP, PRXY, 1, p_PR       !Material properties: Poisson Ratio  
MP, DENS, 1, p_DEN      !Material properties: Density  
  
!=====  
! A.4 APPLY LOADS AND BOUNDARY CONDITIONS  
!=====  
!== A.4.1 BOUNDARY CONDITIONS FAHRDRAHT =====  
  
NSEL,S,LOC,X,0*p_TOLER,0*p_TOLER      !Auswahl des nodes mit loc x =0 mit neuem Set  
NSEL,A,LOC,X,p_LEN*p_TOLER,p_LEN+p_TOLER !zusätzlich den node mit loc x = len  
D,ALL,ALL                               !die nodes der Auswahl werden in y -Richtung constrained  
DDEL,ALL,ROTY  
NSEL,ALL  
CMSEL,S,C_CW  
  
#####  
##### B.) S O L U T I O N #####  
#####  
  
*IF,p_AN_Mode,EQ,0,THEN  
!=====  
! B.1: Full transient analysis, preparatory work  
!=====  
  
/SOLU  
ALLSEL  
/SOLU  
ANTYPE,4          !transiente Analyse  
DELTIM,p_DT/1000  
KBC,1  
NLGEOM,ON        !Geometrical stiffening via stress  
OUTRES,ALL, LAST  
  
TIME,p_DT/100  
TIMINT,OFF  
ALLS  
SOLVE  
DDELE,2,UX  
F,2,FX,p_T  
TIME,2*p_DT/100  
SOLVE  
TIMINT,ON  
DELTIM,p_DT,p_DT,p_DT,ON  
  
*ELSEIF,p_AN_Mode,EQ,1,THEN  
!=====  
! B.2: Modsup transient analysis, preparatory work  
!=====  
  
/SOLU  
ANTYPE,STATIC  
KBC,1  
DELTIM,p_DT/1000  
TIME,p_DT/100  
TIMINT,OFF  
D,ALL,UY,01,,,UX  
DDELE,2,UX  
F,2,FX,p_T  
NSEL,ALL  
  
NLGEOM,ON  
SSTIF,ON  
NSEL,ALL  
EMATWRITE,YES  
SOLVE  
  
FINISH  
/SOLU  
ANTYPE,MODAL      !MODAL ANALYSIS  
UPCOORD,1,0,ON   !Modifies the coord. of the active set of nodes, based on the curr displacements.  
!Along with the Psolve command, you must issue the UPCOORD command to update the coord necessary  
!for obtaining the correct stresses.  
MODOPT,LANB,p_NUMMODES !LANB EXTRACTION METHOD  
POSTRES,ON        !PRESTRESSED ANALYSIS
```

A.4. Wanderkraft: Skript in ANSYS APDL

```

!MXPAND,50,,,YES           !Specify the number of modes to expand, if desired
!PSOLVE,EIGLANB           !Calculates the eigenvectors and freq.
!FINISH

!/SOLU
!EXPASS,ON
!PSOLVE,EIGEXP
!FINISH

/SOLU
ANTYPE,TRANS
TRNOPT,MSUP,p_NUMMODES,,1,YES,0

TIMINT,ON
KBC,1
DELTIM,p_DT
FDELE,2,ALL
OUTRES,ALL,ALL
TIME,
FDELE,ALL
SOLVE                       ! STATIC EQUILIBRIUM
*ENDIF

!Set parameters for conv. criteria
CNVTOL,F,,5e-5,,1e-3 !BEST PRACTICE: FORCE IS EQUILIBRIUM(SHOULD BE ALWAYS ON)
                        !LET VALUE BE DEFAULT, BUT CHANGE TOLER IN ORDER TO CHANGE CONV. CRITERIA
CNVTOL,U                       !IF YOU REDEFINE FORCE/MOMENT CONV. CRITERIA, YOU HAVE TO ADD DISPLACEMENT CHECKING
*IF,p_MODEL,EQ,1,OR,p_MODEL,EQ,2,THEN
  CNVTOL,M,,1e-3,,1e-3
  CNVTOL,ROT
*ENDIF

p_NSTEPS = NINT(p_TEND/p_DT) !Amount of calculation steps according to stettings
NSEL, NONE
CM,TEMP,NODE                 ! Container for force to delete in following time step

p_PL=p_ESIZE
*DIM,DEBUG,ARRAY,2*NINT(p_PL/p_ESIZE)+1,p_NSTEPS
*DIM, FN_TEMP,ARRAY,NINT(p_PL/p_ESIZE)+1,2 !muss immer genullt werden

*DO,p_I,1,p_NSTEPS,1
  CNSEL,S,TEMP
  FDELE,ALL,ALL
  p_XPOS=p_V*(p_DT*p_I)+p_CFX0
  CNSEL,S,C,CW
  !=====
  ! FORCE ACTING ON 2 NODES
  !=====
  *IF,p_ForceDist,EQ,0,THEN
    !N = Node(p_XPOS,0,0) ! äNchsten Knoten finden
    NSEL,S,NODE,,IN        !Knoten äuswählen
    ESLN,S                 !Jeweiliges Element äwählen
    NSLE,S                 !Select nodes from element
    CM,TEMP,NODE
    *GET,p_NUMNODE,NODE,0,COUNT
    *GET,p_MINNODE,NODE,0,NUM,MIN

    p_CURRNODE = p_MINNODE

    *DO,p_J,1,p_NUMNODE,1
      *get,p_LOCK,NODE,p_CURRNODE,LOC,X
      *get,p_NEXTNODE,NODE,p_CURRNODE,NXTH
      !FN_TEMP(p_J,1)=p_CURRNODE
      p_DISTANCE = ABS(p_LOCK - p_XPOS)
      *IF,p_DISTANCE,LE,p_ESIZE,Then
        p_FORCE = p_CF*(1-p_DISTANCE/p_ESIZE)
        F,p_CURRNODE,FZ,p_FORCE
      *ELSE
        p_FORCE = 0
      *ENDIF
      !FN_TEMP(p_J,2)=p_FORCE
      p_CURRNODE = p_NEXTNODE
    *ENDDO
  *ENDIF
  DEBUG(1,p_I) = p_I*p_DT
  *GET,p_DIM,PARAM,FN_TEMP,DIM,1
  *DO,p_M,1,p_DIM,1
    DEBUG(2+p_M,p_I) = FN_TEMP(p_M,1)
    DEBUG(2+p_M+1,p_I) = FN_TEMP(p_M,2)
    FN_TEMP(p_M,1) = 0
    FN_TEMP(p_M,2) = 0
  *ENDDO
  TIME,p_I*p_DT
  ALLS
  SOLVE
  /COM, DAS IST SCHRITT %p_I% von %p_NSTEPS%
*ENDDO

*IF,p_AN Mode,EQ,1,THEN
  FINI
  /SOLU
  EXPASS,ON
  OUTRES,NSOL,ALL
  NUMEXP,ALL
  SOLVE
  FINISH
*ENDIF

```

A. Anhang

```
#####
##### C.) POSTPROCESSING #####
#####
/POST1
/DSCALE,1,50
/REPLOT
*GET,p_NUMMAX,NODE,,NUM,MAX !alle Nodes sind beschrieben
*DIM,p_DOF,ARRAY,p_NUMMAX,3
*DIM,p_POS0,ARRAY,p_NUMMAX,3
*DIM,p_output_cond,ARRAY,10,3*p_NUMMAX+1

*DO,i,1,10,1
  SET,NINT(i/10*p_NSTEPS)+2,LAST,LAST
  *VGET,p_DOF(1,1),NODE,1,U,X
  *VGET,p_DOF(1,2),NODE,1,U,Y
  *VGET,p_DOF(1,3),NODE,1,U,Z
  *VGET,p_POS0(1,1),NODE,1,LOC,X
  *VGET,p_POS0(1,2),NODE,1,LOC,Y
  *VGET,p_POS0(1,3),NODE,1,LOC,Z
  *VOPER,p_DOF(1,1),p_POS0(1,1),ADD,p_DOF(1,1)
  *VOPER,p_DOF(1,2),p_POS0(1,2),ADD,p_DOF(1,2)
  *VOPER,p_DOF(1,3),p_POS0(1,3),ADD,p_DOF(1,3)
  *get,p_TMP,ACTIVE,0,SET,TIME
  p_output_cond(i,1) = p_TMP
  *DO,j,1,p_NUMMAX,1
    p_output_cond(i,3*(j-1)+2) = p_DOF(j,1)
    p_output_cond(i,3*(j-1)+3) = p_DOF(j,2)
    p_output_cond(i,3*(j-1)+4) = p_DOF(j,3)
  *ENDDO
*ENDDO

*CREATE,Auswertung
/REP/
/output,DISP_DT \p_DT\% ESIZE \p ESIZE\% \p_MODEL\%_AN_\%p_AN_MODE\%,txt,,
*MWRITE,p_output_cond(1,1),,,i,jk
(10F25.20) !Darf nicht ueingerckt werden, sonst fehlerhafte Darstellung
/output
*END

*USE,Auswertung
```

A.5 Neigekompensation

A.5.1 Patentrecherche zur Neigekompensation

Tab. A.5.: Ergebnis der Patentrecherche über Stromabnehmervorrichtungen zur Neigekompensation.

Patent	Titel und Beschreibung	Grafik (Quelle jew. Patent)
feste Verbindung zum Wagenkasten		
JP000H05328511A	<i>Pantograph supporting device for pendulum type train:</i> Der Stromabnehmer (3) ist zwischen zwei Wagen auf einem, die Drehgestelle verbindenden Gestell (6) befestigt.	
reine Rotation		
JP000S58212302A	<i>Pantograph recovering device:</i> Der Stromabnehmer (12) ist über den Aufnahmepunkt (11) rotierbar mit dem Wagenkasten verbunden. Die Neigung wird aus der Wagenkastenbewegung über das Getriebe (9, 10) auf den Stromabnehmer übertragen.	

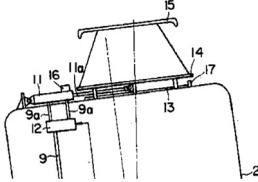
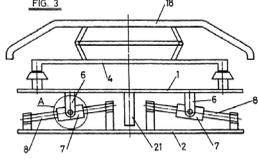
Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. A.5 – Fortsetzung von der vorigen Seite

Patent	Titel und Beschreibung	Grafik (Quelle jew. Patent)
EP000000869030A1	<p><i>Scherenstromabnehmer für Schienenfahrzeuge:</i> Der Stromabnehmer (12) ist auf einer Plattform (16) montiert welche über ein Gelenk (18) und einen Hydraulikaktor (19) mit dem Wagenkasten verbunden ist, sodass sich der Stromabnehmer um (17) dreht.</p>	<p style="text-align: right;">FIG. 1</p>
DE000001806601B	<p><i>Quer zur Fahrtrichtung kippbarer Stromabnehmer für Schienenfahrzeuge:</i> Der Stromabnehmer (2) sitzt auf einer Plattform (18), welche bei (3) gelenkig gelagert ist und über unterschiedliche Aktoren gekippt wird.</p>	<p style="text-align: left;">Fig. 2</p>
reine Translation		
JP000S60223401A	<p><i>Current collector of vehicle:</i> Stromabnehmer (3) ist mittels Stützisolatoren auf einem Plateau (7) befestigt und wird von einem Elektromotor (8) quer zur Fahrtrichtung auf Führungsschienen bewegt.</p>	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. A.5 – Fortsetzung von der vorigen Seite

Patent	Titel und Beschreibung	Grafik (Quelle jew. Patent)
JP000H08308011A	<p data-bbox="356 300 680 576"><i>Pantograph lateral sliding unit for railway vehicle and controlling method therefor:</i> Stromabnehmer (15) auf einer Plattform (14) wird über einen Linearantrieb (11) auf Führungsschienen (13) quer zur Fahrtrichtung bewegt.</p>	
Rotation und Translation		
EP00000888923A1	<p data-bbox="356 639 680 1059"><i>Electrical energy intake assembly for swivel trains:</i> Stromabnehmer (18) auf einer Plattform (1) montiert, welche über vier Kipp-lager auf geraden Führungen (8) mit nach innen ansteigender Nei-gung quer zur Fahrtrichtung ge-führt werden. Über eine Verbin-dung mittels flexibler Übertra-gungskabel ist der Stromabneh-mer mit dem Drehgestell verbun-den.</p>	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. A.5 – Fortsetzung von der vorigen Seite

Patent	Titel und Beschreibung	Grafik (Quelle jew. Patent)
DE69122037T2	<p><i>Fester Scherenstromabnehmer im Verhältnis zu einem Drehgestellrahmen:</i> Stromabnehmer (11) ist auf einer Plattform (8) montiert, welche über Gleitlagerkanäle (10) mit dem Fahrzeug verbunden ist. Eine Wickeleinheit (5) und die entsprechenden Übertragungskabel (3), welche mit dem Drehgestell verbunden sind, erzeugen die entsprechende Stellung.</p>	
DE29624310U1	<p><i>Schienefahrzeug mit einem Querneigesystem:</i> Ein Stromabnehmer (3) auf einer Plattform (6) ist über mind. 4 Schwenkhebel (5) mit dem Wagenkasten (1) verbunden.</p>	
DE3232153C2	<p><i>Verbindung eines Stromabnehmers mit einem schienengebundenen Fahrzeug:</i> Stromabnehmer (8) ist über ein Gestell, welches in Führungsschienen (9) auf dem Wagenkasten läuft, und einer Säule (12) mit dem Drehgestell verbunden.</p>	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. A.5 – Fortsetzung von der vorigen Seite

Patent	Titel und Beschreibung	Grafik (Quelle jew. Patent)
AT000000327289B	<p><i>Schienenfahrzeug mit einem Scherenstromabnehmer:</i> Der Stromabnehmer (1) sitzt auf einer Plattform (2), welche in Führungsschienen (3) auf dem Wagendach bewegt werden kann. Die Steuerung erfolgt über Hebelmechanismen (5,6,9), welche die Plattform mit dem Drehgestell verbinden (8).</p>	
EP000000847891A2	<p><i>Pantograph supporting system for a railway vehicle with variable trim carbody:</i> Scherenstromabnehmer (P), welcher auf einem Gestell (1) montiert ist, das über Schwenkarme (19,20,13) mit dem Wagenkasten verbunden ist.</p>	
EP000000436993A1	<p><i>Pantograph for variable-inclination trains:</i> Der Stromabnehmer (34) ist über Stützisolatoren (33) mit einer Plattform (31) verbunden, welche in einer kreisförmigen Führungsschiene (37) läuft. Der Antrieb erfolgt über einen Hydraulikzylinder (30).</p>	<p>Fig.3</p>

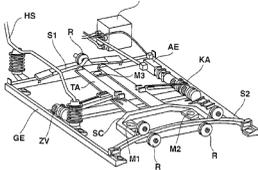
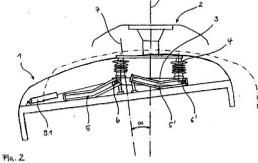
Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. A.5 – Fortsetzung von der vorigen Seite

Patent	Titel und Beschreibung	Grafik (Quelle jew. Patent)
JP002003052101A	<p><i>Attitude-holding device for pantograph for railway stock:</i> Der Stromabnehmer (8) ist auf einer Platte (81) montiert, welche über einen Hebel (9) mit dem Differentialgetriebe (7) verbunden ist. Der Antrieb des Getriebes erfolgt über ein, mit dem Fahrgestell verbundenen, Gestänge.</p>	
JP000002547864Y2	<p>Stromabnehmer (9) wird auf einer kreisförmige Führungsschiene über einen Riemenantrieb entsprechend der Neigung des Wagenkastens geführt.</p>	
WO001997003858A1A	<p><i>pantograph control assembly:</i> Der Stromabnehmer (18) wird durch kreisbogenförmige Führungen (23) auf dem Wagenkasten durch einen Getriebe entgegengesetzt der Bewegung des Wagenkastens bewegt.</p>	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. A.5 – Fortsetzung von der vorigen Seite

Patent	Titel und Beschreibung	Grafik (Quelle jew. Patent)
DE000019819959A1	<p data-bbox="356 300 680 798"><i>Verfahren zur Einstellung der Neigung eines Stromabnehmers und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens:</i> Stromabnehmer, der auf einem Schlitten (SC) montiert ist, welcher über zwei kreisförmigen Führungsschienen (S1, S2) mit dem Wagenkasten verbunden ist. Die Positionierung erfolgt über einen Riemenantrieb mit zusätzlicher Zentriervorrichtung (ZV), für den Fall eines Ausfalls von Systemkomponenten.</p>	
EP000001396376A1	<p data-bbox="356 818 680 1099"><i>Neigeeinrichtung für einen Stromabnehmer:</i> Ein Stromabnehmer (2) wird über einen Schlitten (3) in Führungsschienen (5, 5') geführt, und kann durch den Hydraulikzylinder (9.1) in eine entsprechende Position bewegt werden.</p>	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. A.5 – Fortsetzung von der vorigen Seite

Patent	Titel und Beschreibung	Grafik (Quelle jew. Patent)
EP000001078806B1	<p><i>Neigbares Schienenfahrzeug mit einem Stromabnehmer und Ausgleichsvorrichtung des Stromabnehmers:</i> Stromabnehmer (13) ist auf einem Plateau (10) montiert, welches mittels einem Linearantrieb (8) auf Gleitschienen (6) geführt wird. Die Stellung erfolgt über den Hebelarm (9) und eine Arretierung über den Antrieb (12).</p>	
EP000001099590B1	<p><i>Stromabnehmervorrichtung und entsprechendes Schienenfahrzeug:</i> Stromabnehmer (4), welcher auf einer beweglichen Plattform (9) befestigt ist. Diese ist über zwei schwenkbaren Verbindungselemente (14) mit der stationären Plattform (8) verbunden und wird von einem Elektromotor (26) über eine Antriebswelle und einem Untersetzungsgetriebe (27) bewegt.</p>	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. A.5 – Fortsetzung von der vorigen Seite

Patent	Titel und Beschreibung	Grafik (Quelle jew. Patent)
EP000000841207A2	<p><i>Stromabnehmer:</i> Der Stromabnehmer (1) ist über (min. zwei) gelenkig gelagerte Stützisolatoren (5, 6, 7) mit dem Wagenkasten verbunden. Der Stellmechanismus erfolgt über eine isolierte Lenkerstange mit Linearantrieb (9).</p>	
DE000019852639B4	<p><i>Stromabnehmer:</i> Stromabnehmer (12) ist auf einer Plattform montiert und über 4 Pendelstangen (6) mit den Aufnahmestangen (4) des Wagenkastens verbunden.</p>	
DE000019805950C2	<p><i>Dachstromabnehmer für Schienenfahrzeuge mit Neigetechnik:</i> Stromabnehmer (7) ist über Isolatoren (6) mit einer Plattform (3) verbunden, welche über Pendel (4) mit dem Wagenkasten in Verbindung steht. Der Stellmechanismus erfolgt wahlweise über einen Linearantrieb (8a) oder einen Drehantrieb.</p>	

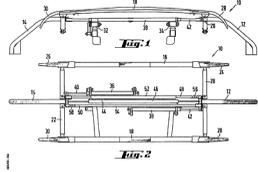
Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. A.5 – Fortsetzung von der vorigen Seite

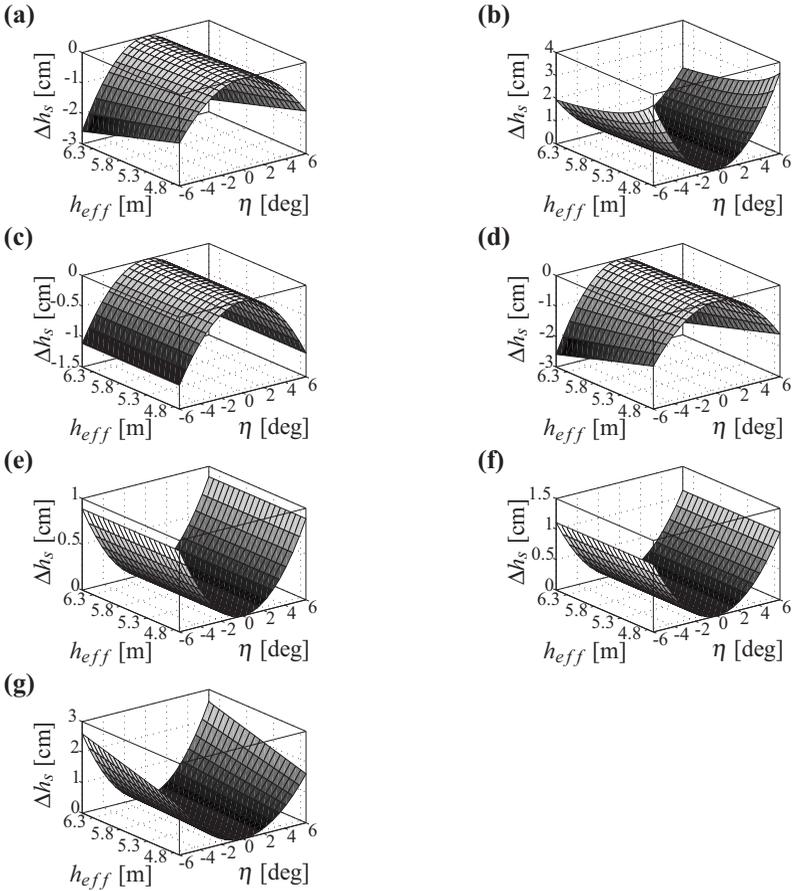
Patent	Titel und Beschreibung	Grafik (Quelle jew. Patent)
DE000019603077C2	<p><i>Stromabnehmer für Schienenfahrzeuge mit Neigetechnik:</i> Der Stromabnehmer ist mit Stützisolatoren (6) auf einem Rahmen (5,11,12) montiert. Dieser ist in den Lagern (8) über Pendel (7) am Wagenrahmen (14) aufgehängt. Der Antrieb erfolgt über einen Linearantrieb (9).</p>	
DE000019614554A1	<p><i>Railway vehicle with tilting body and also tiltable pantograph:</i> Es werden mehrere Ausführungsformen aufgezeigt, die gewählte Abbildung zeigt gekrümmte Gleit- oder Wälzlager (4a, 4b) der Stromabnehmerlagerung auf dem Wagendach.</p>	
DE000019713816A1	<p><i>Schienenfahrzeug:</i> Ein Stromabnehmer (6) ist über Stützisolatoren (5) auf gekrümmten Lagern (9) abstützt. Der Antrieb erfolgt über einen Linearantrieb quer zur Fahrtrichtung.</p>	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. A.5 – Fortsetzung von der vorigen Seite

Patent	Titel und Beschreibung	Grafik (Quelle jew. Patent)
DE000019601009C1	<p data-bbox="356 300 680 576"><i>Current collector esp. for overhead traction wire railway vehicles: Stromabnehmer mit eine seitenverstellbaren Wippe, welche über zwei Druckluftzylinder (36, 38) und Führungshülsen und -stangen (44 46, 50, 52, 54) verstellbar ist.</i></p>	

A.5.2 Fusspunktanregung bei fixem Momentanpol



A.5.3 Regelwerk

Schnittstellenbauteile müssen aufgrund der Interaktion zwischen den verbindenden Subsystemen eine genaue Abstimmung hinsichtlich der Eigenschaften aufweisen, sodass eine verbindliche Definition der geforderten Eigenschaften notwendig ist. In diesem Abschnitt wird ein grober Überblick über relevante Abschnitte des Regelwerks aufgestellt, sodass auf diese, ohne tiefer ins Detail gehen zu müssen, in den jeweiligen Kapiteln als definiert betrachtet werden können. Detaillierte Beschreibungen dazu findet sich in der jeweiligen zitierten Norm, oder auch [KPS⁺09] als weitgefächertes Nachschlagewerk im Bereich der Oberleitungsanlagen.

Absenkvorrichtung

Schadhafte Kontaktierungseinheiten der Stromabnehmer führen zu teilweise schweren Beschädigungen (meist mehr als 1 km [Lan02a]) der Oberleitung und somit zu zeitintensiven Reparaturen, die starken Einfluss auf die Verkehrsleistung der Betreiber haben kann. Um das Ausmaß der Schäden möglichst gering zu halten, werden die Integrität und somit Funktionsfähigkeit der Schleifleisten und ggf. Auflauhörner überwacht. Bei schadhafte Bauteilen verhindert das automatische Schnell-Absenken des Stromabnehmers eine großflächige Beschädigung der Oberleitung. Die DB Netz AG definiert in der Richtlinie 810 Bedingungen für den Streckennetzzugang. Darin wird in [DB 08] eine Absenkeinrichtung (AS) beschrieben, die innerhalb von 1.0s den beschädigten Stromabnehmer um 150mm von der Oberleitung absenken können muss.

Kontaktkräfte

Die Interaktion zwischen Oberleitung beeinflusst die Leistungsfähigkeit der elektrischen Übertragung und somit des Zugbetriebes, wie auch den Verschleiß des Fahrdrachts und der Schleifleisten. Für die Bewertung der Interaktionsgüte werden die Parameter

- mittlere Kontaktkraft \bar{F} ,

- Standardabweichung der Kontaktkraft F_{σ} und
- der Zeitanteil der Lichtbogenbildung $NQ = \frac{\sum t_{arc}}{\sum t_{total}}$

nach [EN12] herangezogen. Auch der Anhub des Fahrdrabes am Seitenhalter und die minimalen und maximalen Kontaktkräfte bei Filterung mit 20Hz werden berücksichtigt.

Für die mittlere Kontaktkraft wurden Ziel-Kurven für die unterschiedlichen Stromsysteme entwickelt. Die oberen und unteren Grenzen der mittleren Kontaktkraft sind für Wechselstromsysteme gegeben durch

$$\bar{F}_{min} = 60 \text{ [N]} + v^2 4.7 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{Nh}^2}{\text{km}^2} \right] \quad (\text{A.1})$$

$$\bar{F}_{max} = 90 \text{ [N]} + v^2 4.7 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{Nh}^2}{\text{km}^2} \right] \quad \text{für } v \leq 200 \text{ km/h.} \quad (\text{A.2})$$

Der zulässige Bereich der mittleren Kontaktkraft ist somit gegeben durch die graue Fläche in Abb. A.2. Da in dieser Arbeit die Geschwindigkeiten 160 km/h und 200 km/h in den Simulationen verwendet werden, werden hierfür die Grenzen gesondert dargestellt. Für den betrachteten Fall von Geschwindigkeiten $v \leq 200 \text{ km/h}$ wird in Deutschland nach [EN12] Grenzwerte von 40N und 200N als Minimum, respektive Maximum, der Kontaktkraft vorgegeben, die maximale Standardabweichung beträgt hierbei 24N. NQ wird in Deutschland nicht als Referenzwert herangezogen.

Arbeitsbereich des Stromabnehmers

Der Arbeitsbereich des Stromabnehmers wird nach [EN12] in Deutschland eingeteilt in den Bereich für den normalen Betrieb und für kleine Geschwindigkeiten. Dieser beträgt 4.8 – 6.3 m bei Betriebsgeschwindigkeit und 4.7 – 6.5 m bei kleinen Geschwindigkeiten.

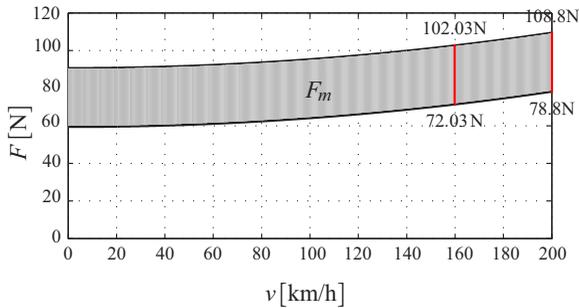


Abb. A.2.: Grenzwerte der mittleren Kontaktkraft nach [EN12].

Schrägstellung der Stromabnehmerwippe

Durch die Kontaktierung der Schleifleisten mit dem Fahrdrabt werden diese geneigt. Um ein problemloses Befahren von Klemmen etc. zu gewährleisten, wird die Neigung auf einen Wert der Schrägstellung von $f_{ws} = 60\text{mm}$ begrenzt, siehe Abb. A.3. Der Wert wird hierbei vom höchsten Punkt der Wippe zum Kontaktpunkt des Fahrdrahtes gemessen. In der Praxis wird die Einhaltung dieser Bedingung über Anschläge in der Schleifleistenfederung realisiert.

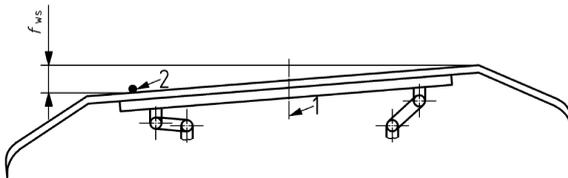


Abb. A.3.: Neigung der Stromabnehmerwippe [EN12].

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Vergleich unterschiedlicher Stromabnehmerwippen-Profile . . .	3
1.2.	Vergleich der Querschnitte eines konventionellen und eines Neigetechnikfahrzeuges	4
2.1.	Stromabnehmerprofile, Stromsysteme und Anteil elektrifizierter Bahnstrecken in europäischen Ländern	6
2.2.	CH-Wippenprofil erweitert um den klemmenfreien Raum	8
2.3.	Kreuzende Weichenbespannung und Auflaufbedingung	9
2.4.	Befahrene Weichen mit beispielhafter Bespannung	9
2.5.	Befahrung einer Weiche mit lateraler Nachführung	11
2.6.	Tangentiale Weichenbespannung	11
3.1.	Strukturierung der Arbeit	14
4.1.	Bogenfahrt eines Schienenfahrzeuges mit Neigetechnik	18
4.2.	Passive Neigetechnik des Herstellers Talgo	20
4.3.	Modelliertes Neigetechnikfahrzeug	25
4.4.	Kinematik des Viergelenks und Stromabnehmerfußpunktbewegung	26
4.5.	Regelstruktur des Neigetechnikfahrzeuges	27
4.6.	Ergebnisse der geneigten Bogenfahrt, Übergangsbogen = 100m	29
4.7.	Ergebnisse der geneigten Bogenfahrt, Übergangsbogen = 50m .	30
4.8.	Fußpunktbahn der Bogenfahrten - Vergleich mit kinematischer Bahn	30
5.1.	Qualitative grafische Darstellung der Evolution der mechanischen Stromabnahme an Oberleitungen durch Stromabnehmer	31

5.2.	Brecknell Willis Stromabnehmer und Schunk Stromabnehmer WBL	33
5.3.	Hubkurve des Scheitelrohrs	34
5.4.	Zwei- und Dreimassenmodell eines Stromabnehmers	35
5.5.	Scheinmassenverläufe: DSA350, SBS65 (und EN50318)	39
5.6.	Parameter des modellierten Stromabnehmers	40
5.7.	Eigenmoden und -frequenzen des Oberarms	41
5.8.	Detail der Schleifleistenfederung	42
5.9.	Hebelarm r_b der Anhubeinheit in Abhängigkeit des Unterarmwinkels φ_1	44
5.10.	Resultierende vertikale Dämpfung und Steifigkeit der Schleifleisten	44
5.11.	Scheinmassenverlauf des verwendeten Stromabnehmermodells bei unterschiedlichen Kraftamplituden	45
5.12.	Verlauf relevanter Eigenwerte für die Vertikaldynamik in Abhängigkeit des Unterarmwinkels und der Schleifleisteneinfederung	46
6.1.	Gliederung der Fahrleitungenarten	47
6.2.	Beispielhafter Oberleitungsaufbau	48
6.3.	Seitenansicht der modellierten Oberleitungsabschnitte vom Typ Re200 und der davon befahrene Bereich	52
6.4.	Längsfeld im Bereich der Geraden und im Bogen	53
6.5.	Verwendete Seitenlage des Fahrdrahtes	54
6.6.	Fahrdrachtruhelage bei Bogeneinfahrt und Geradeausfahrt	57
6.7.	Ermittelte statische Elastizität aus ANSYS der Oberleitung für den Fall a1)	58
7.1.	Oberleitungsmodell mit Stromabnehmer	60
7.2.	Grobe Skizze des verwendeten Programmablaufs	72
7.3.	Lineare Interpolation der Fahrdrachtlage zwischen zwei Knoten	76
7.4.	Bestimmung des Kontaktpunktes zwischen Stromabnehmer und Oberleitung durch Interpolation	76

7.5.	Prinzipbild Wanderkraft	78
7.6.	Semi-analytische Lösung (ersten 1000 Eigenwerte) der Auslenkung des Fahrdrahtes zu den diskreten Zeitpunkten $t_i = \frac{i}{10} \frac{l}{v}$ des Saiten- (schwarz) und EBB-Modells (farbig)	79
7.7.	Vergleich der semianalytischen Lösungen der Wanderkraft mit der numerischen Lösung aus ANSYS	80
7.8.	Gemittelter absoluter Fehler zur semi-analytischen Lösung des Wanderkraft-Problems für die betrachteten Geschwindigkeiten	81
7.9.	Wandernde Masse entlang eines Seiles/Drahtes und gewählte Kopplung durch eine Feder	82
7.10.	Semianalytisch Lösung für $m = 1 \text{ kg}$ und $m = 7.2 \text{ kg}$	84
7.11.	Parameterstudie c_k vs. semianalytische Lösung für $m = 1 \text{ kg}$. . .	85
7.12.	Parameterstudie c_k vs. semianalytische Lösung für $m = 7.2 \text{ kg}$. .	85
7.13.	Statische Lage des Oberleitungsaufbau nach EN50318 in ANSYS	87
8.1.	Variantenbildung in Verbindung mit dem stufenweisen Vorgehen vom Groben ins Detail	95
8.2.	Möglichkeiten zur Kompensation der Wagenkastenneigung . . .	97
8.3.	Aktuelle Lösung der aktiven Neigekompensation am Markt . . .	98
8.4.	Variation der Systemstruktur aus Abb. 3.1	102
8.5.	Merkmale der Prinzipbilder	105
8.6.	Erweiterung des Prinzipbilds aus Abb. 8.5 um geometrische Größen	110
8.7.	Translationsbedarf des Trägerrahmens und induzierte Änderung der Arbeitshöhe des Stromabnehmers für Variante PL1	111
8.8.	Translationsbedarf des Trägerrahmens und Höhenfunktion der kompensierenden Komponente z''_{komp} für Variante PL2 . . .	113
8.9.	Fehlstellung der Stromabnehmerwippe in Abhängigkeit von der Arbeitshöhe und des Wankwinkels	114

8.10. Notwendige Auslenkung des Stromabnehmerarms und Änderung der Stromabnehmerhöhe für die Variante PL3	114
8.11. Translationsbedarf des Trägerrahmens und induzierte Änderung der Stromabnehmerhöhe für Variante PL4	115
8.12. Translationsbedarf der Stromabnehmerwippe und induzierte Änderung der Stromabnehmerhöhe für Variante PL7	117
8.13. Translationsbedarf der Stromabnehmerwippe und induzierte Änderung der Stromabnehmerhöhe für Variante PL8	117
8.14. Translationsbedarf der Stromabnehmerwippe und induzierte Änderung der Stromabnehmerhöhe für Variante PL9	118
8.15. Translationsbedarf des Trägerrahmens und induzierte Änderung der Stromabnehmerhöhe für Variante PL10	119
8.16. Relativmechanik der Stromabnehmerkompensation	122
8.17. Auswertung des Ortsvektors \mathbf{r}_{SB}^S für PL2	123
8.18. Auswertung des Ortsvektors \mathbf{r}_{SB}^S für PL4	124
8.19. Auswertung des Ortsvektors \mathbf{r}_{SB}^S für PL8	124
8.20. Auswertung des Ortsvektors \mathbf{r}_{SB}^S für PL9	125
8.21. Vergleich der Scheinmassenverläufe bei unterschiedlichen Wippenmassen	126
8.22. Simulationsergebnisse des Falls a1) mit Konzept Referenz . . .	129
8.23. Simulationsergebnisse des Falls a2) mit Konzept Referenz . . .	129
8.24. Simulationsergebnisse des Falls a1) mit Konzept PL2	132
8.25. Simulationsergebnisse des Falls a2) mit Konzept PL2	132
8.26. Simulationsergebnisse des Falls a1) mit Konzept PL4	134
8.27. Simulationsergebnisse des Falls a2) mit Konzept PL4	134
8.28. Simulationsergebnisse des Falls a1), PL8 mit $m_6 + 3 \text{ kg}$	135
8.29. Simulationsergebnisse des Falls a2), PL8 mit $m_6 + 3 \text{ kg}$	136
8.30. Simulationsergebnisse des Falls a1), PL8 mit $m_6 + 6 \text{ kg}$	137
8.31. Simulationsergebnisse des Falls a2), PL8 mit $m_6 + 6 \text{ kg}$	138
8.32. Simulationsergebnisse des Falls b1), PL8 mit $m_6 + 0 \text{ kg}$	140
8.33. Simulationsergebnisse des Falls b2), PL8 mit $m_6 + 0 \text{ kg}$	140
8.34. Simulationsergebnisse des Falls b1), PL8 mit $m_6 + 3 \text{ kg}$	141

8.35. Simulationsergebnisse des Falls b2), PL8 mit $m_6 + 3\text{kg}$	142
8.36. Simulationsergebnisse des Falls b1), PL8 mit $m_6 + 6\text{kg}$	144
8.37. Simulationsergebnisse des Falls b2), PL8 mit $m_6 + 6\text{kg}$	145
8.38. Stromabnehmer DSA 350 mit, in Unterarm und Koppelstange integrierter elektrischer Isolation	151
A.1. Induzierte Änderung der Arbeitshöhe des Stromabnehmers für die verschiedenen Varianten für ein Schienenfahrzeug mit fixem Momentanpol	176
A.2. Grenzwerte der mittleren Kontaktkraft	179
A.3. Neigung der Stromabnehmerwippe	179

Tabellenverzeichnis

4.1.	Darstellung der aktiven Neigemechanismen nach ihren Einbauorten	22
5.1.	Numerisch ermittelte Verschiebungen und Verdrehungen am Oberarm	42
6.1.	Eigenschaften einiger Oberleitung der DB AG	50
6.2.	Streckencharakteristik der simulierten Befahrung des Oberleitungstyps Re200	54
7.1.	Übersicht über die Eigenschaften der unterschiedlichen Modelle	62
7.2.	Übersicht über elastische Saiten- und Balkenmodelle in ANSYS und deren transversale Eigenschaften	67
7.3.	Fehler der Kontaktkraft bei variiertes Kontaktsteifigkeit c_k . . .	86
7.4.	Ergebnisse der Simulationen nach EN50318	88
8.1.	Vorgehensmodelle der Produktentwicklung	93
8.2.	Anforderungsliste an einen Stromabnehmer mit Neigekompensation	100
8.3.	Wahrheitstabelle zur diskursiven Variantenerzeugung nach Abb. 8.4	103
8.4.	Beschreibung der Varianten aus Tab. 8.3	106
8.5.	Kinematische Auswertung der Prinziplösungen	120
8.6.	Wertebereich der Fußpunktanregung von PL2, PL4, PL8 und PL9	121
8.7.	Kompensationsvektor der Prinziplösungen 2, 4, 8 und 9	122
8.8.	Simulationsplan	126

8.9.	Auswertung der Bogeneinfahrt für Referenz in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrähtlagen	130
8.10.	Auswertung der Bogeneinfahrt für PL2 in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrähtlagen und mit relativen Werten zu Referenz	131
8.11.	Auswertung der Bogeneinfahrt für PL4 in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrähtlagen und mit relativen Werten zu Referenz	133
8.12.	Auswertung der Bogeneinfahrt für PL8, $m_6 + 3$ kg in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrähtlagen und mit relativen Werten zu Referenz	136
8.13.	Auswertung der Bogeneinfahrt für PL8 mit $m_6 + 6$ kg in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrähtlagen und mit relativen Werten zu Referenz	138
8.14.	Auswertung der Geradenfahrt für PL8 mit $m_6 + 0$ kg in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung	142
8.15.	Auswertung der Geradenfahrt für PL8 mit $m_6 + 3$ kg in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrähtlagen und mit relativen Werten zu Referenz	143
8.16.	Auswertung der Geradenfahrt für PL8 mit $m_6 + 6$ kg in verschiedenen Abschnitten der Oberleitung, jeweils für beide Fahrdrähtlagen und mit relativen Werten zu Referenz	145
8.17.	Nutzwertanalyse der Prinziplösungen	150
9.1.	Kondensierte Konzepte zur Neigekompensation	154
A.1.	Parameter des Neigetechnikfahrzeuges nach Abb. 4.3	157
A.2.	Parameter zum Zweimassenmodell für den Stromabnehmer nach EN50318	158
A.3.	Parameter des Stromabnehmers aus Abb. 5.6	159
A.4.	Verwendete Parameter für den Oberleitungstyp Re 200	160
A.5.	Ergebnis der Patentrecherche über Stromabnehmervorrichtungen zur Neigekompensation	165

Literaturverzeichnis

- [ARP⁺10] AMBRÓSIO, J. ; RAUTER, F. ; POMBO, J. u. a.: Dynamics of High-Speed Train Pantograph-Catenary Co-Simulation of Finite Element and Multibody Codes. In: *AIP Conference Proceedings* 1233 (2010), Nr. 1, S. 213–218
- [AU10] ARENDT, W. ; URBAN, K.: *Partielle Differentialgleichungen: Eine Einführung in analytische und numerische Methoden*. Spektrum Akademischer Verlag, 2010
- [Bal14] BALFOUR BEATTY RAIL GMBH: *Fahrleitungssysteme*. <http://komponenten.bbrail.de/index.php>, Juni 2014
- [Bar88] BARTEL, S.: Versuchsstromabnehmer für ICE. In: *Elektrische Bahnen* 86 (1988), Nr. 9, S. 290–296
- [BBK99] Schutzrecht DE 19819959 A1 (November 1999). BERGER, T. ; BRUTTI, E. ; KWASNICKI, E. (Erfinder); FIAT-Sig Schienenfahrzeuge AG (Anmelder).
- [BKK05] BALDAUF, W. ; KOLBE, M. ; KROTZ, W.: Geregelter Stromabnehmer für Hochgeschwindigkeitsanwendungen. In: *Elektrische Bahnen* 103 (2005), Nr. 4-5, S. 225–230
- [BKS89] BAUER, K. H. ; KIESSLING, F. ; SEIFERT, R.: Einfluss der Konstruktionsparameter auf die Befahrung einer Oberleitung für hohe Geschwindigkeiten - Theorie und Versuch. In: *Elektrische Bahnen* 87 (1989), Nr. 10, S. 269–279
- [Bra05] BRAUN, T. E.: *Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld*, Universitätsbibliothek der TU München, Diss., 2005

- [Buc79] BUCKSCH, R.: Beitrag zum Verständnis des Schwingungsverhaltens eines Fahrdraht-Kettenwerkes. In: *Wiss. Ber. AEG-TELEFUNKEN* 52 (1979), Nr. 5, S. 250–262
- [Buc81] BUCKSCH, R.: Theorie der Wechselwirkung von Fahrdrahtwellen mit angekoppelten mechanischen Systemen (I). In: *Wiss. Ber. AEG-TELEFUNKEN* 54 (1981), Nr. 3, S. 129–140
- [Buc82] BUCKSCH, R.: Theorie der Wechselwirkung von Fahrdrahtwellen mit angekoppelten mechanischen Systemen (II). In: *Wiss. Ber. AEG-TELEFUNKEN* 55 (1982), Nr. 1-2, S. 112–122
- [Bus12] BUSCH, M.: *Zur effizienten Kopplung von Simulationsprogrammen*, Universität Kassel, Diss., 2012
- [Dah06] DAHLBERG, T.: Moving force on an axially loaded beam - with applications to a railway overhead contact wire. In: *Vehicle System Dynamics* 44 (2006), Nr. 8, S. 631–644
- [DB 08] DB Netz AG: *Richtlinie 810.0242: Technischer Netzzugang für Fahrzeuge; Kompatibilität mit den Anforderungen des Netzes; Zusammenwirken Fahrzeug - Stromabnehmer Oberleitung*. April 2008
- [DLJ94] Schutzrecht DE 4311521 C1 (April 1994). DÜSINGER, M. ; LUE, Y. ; JAKOB, J. (Erfinder); Talbot Waggonfabrik (Anmelder).
- [DVV93] DOOMERNIK, J. ; VALKENBURG, C. ; VET, B. d.: Anhebung der Geschwindigkeit auf dem Gleichstromfahrleitungsnetz der Nederlandse Spoorwegen. In: *Elektrische Bahnen* 91 (1993), Nr. 4, S. 114–119
- [Eic07] EICHER, H.: *Tilting trains in Switzerland*. Vortrag auf High Speed Railway Transport in the World and in the Czech Republic. <http://vrt.fd.cvut.cz/data/konference/44.pdf>. Version: 2007

- [EM13] EHRENSPIEL, K. ; MEERKAMM, H.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2013
- [EN03] Norm DIN EN 50318 (VDE 0115-504) April 2003. *Bahnanwendungen – Stromabnahmesysteme – Validierung von Simulationssystemen für das dynamische Zusammenwirken zwischen Stromabnehmer und Oberleitung*
- [EN09] Norm DIN EN 15273-1 Dezember 2009. *Bahnanwendungen - Begrenzungslinien – Teil1: Allgemeines – Gemeinsame Vorschriften für Infrastruktur und Fahrzeuge*
- [EN10] Norm DIN EN 50119 (VDE 0115-601) Mai 2010. *Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Oberleitungen für den elektrischen Zugbetrieb*
- [EN11] Norm DIN EN 50206-1 (VDE 0115-500-1) Februar 2011. *Bahnanwendungen – Schienenfahrzeuge – Merkmale und Prüfungen von Stromabnehmern – Teil 1: Stromabnehmer für Vollbahnfahrzeuge*
- [EN12] Norm DIN EN 50367 (VDE 0115-605) 2012. *Bahnanwendungen - Zusammenwirken der Systeme - Technische Kriterien für das Zusammenwirken zwischen Stromabnehmer und Oberleitung für einen freien Zugang*
- [Eur11] EUROPEAN COMMISSION: *EU transport in figures - Statistical Pocketbook 2011*. European Union, 2011
- [FAL98] FÖRSTBERG, J. ; ANDERSSON, E. ; LEDIN, T.: Influence of different conditions for tilt compensation on symptoms of motion sickness in tilting trains. In: *Brain research bulletin* 47 (1998), Nr. 5, S. 525–535

- [Fen07] FENDRICH, L. (Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2007
- [Fre12] FREGIEN, G.: 20 Jahre Hochgeschwindigkeitsverkehr in Deutschland aus Sicht des Betreibers. In: *ZEV Rail* 136 (2012), Nr. 1-2, S. 26–35
- [Goo97] GOODALL, R.: Active railway suspensions: Implementation status and technological trends. In: *Vehicle System Dynamics* 28 (1997), Nr. 2-3, S. 87–117
- [GS02] GILARDI, G. ; SHARF, I.: Literature survey of contact dynamics modelling. In: *Mechanism and machine theory* 37 (2002), Nr. 10, S. 1213–1239
- [HBW99] HAN, S. M. ; BENAROYA, H. ; WEI, T.: Dynamics of transversely vibrating beams using four engineering theories. In: *Journal of Sound and Vibration* 225 (1999), Nr. 5, S. 935–988
- [HC75] HUNT, K. H. ; CROSSLEY, F. R. E.: Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact. In: *J. Appl. Mech.* (1975)
- [HD02] HABERFELLNER, R. (Hrsg.) ; DAENZER, W. F. (Hrsg.): *Systems engineering: Methodik und Praxis*. 11. durchges. Aufl. Zürich : Verl. Industrielle Organisation, 2002
- [HKS88] HARPRECHT, W. ; KIESSLING, F. ; SEIFERT, R.: „406,9 km/h“ – Weltrekord auf der Schiene - Energieübertragung bei der Rekordfahrt des ICE der DB. In: *Elektrische Bahnen* 86 (1988), Nr. 9, S. 268–289
- [ILK07] IMMISCH, R. ; LINKE, K. H. ; KÜGLER, H.: Pro und Contra Neigetchnik. In: *Der Eisenbahningenieur* 58 (2007), Nr. 11, S. 10–17
- [Jäg04] Schutzrecht EP 1 396 376 A1 (März 2004). JÄGER, K. (Erfinder); Bombardier Transportation GmbH (Anmelder).

- [KBMM⁺10] KIA, S. H. ; BARTOLINI, F. ; MPANDA-MABWE, A. u. a.: Pantograph-catenary interaction model comparison. In: *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* IEEE, 2010, S. 1584–1589
- [KD⁺11] KNÖRR, W. ; DÜNNEBEIL, F. u. a.: *Aktualisierung des "Daten und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030-Endbericht*. IFEU Heidelberg, 2011
- [KLH09] KIM, D. K. ; LEE, M. S. ; HAN, J. H.: Substructure synthesis method for a nonlinear structure with a sliding mode condition. In: *Journal of Sound and Vibration* 321 (2009), Nr. 3, S. 704–720
- [Kom08] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: Entscheidung der Kommission vom 6. März 2008 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Energie“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitssystems. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (2008), Nr. 2008/284/EG
- [Kom11] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: Beschluss der Kommission vom 26. April 2011 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Energie“ des konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystems. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (2011), Nr. 2011/274/EG
- [KPC08] KEEN, P. M. ; PHILLPOTTS, R. E. ; CONWAY, S.: An instrumented pantograph for high speed current collection measurements. In: *4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring* IET, 2008, S. 1–5
- [KPS⁺09] KIESSLING, F. ; PUSCHMANN, R. ; SCHMIEDER, Axel u. a.: *Contact Lines for Electric Railways. Planning, Design, Implementation, Maintenance*. 2. rev., and enlarged ed. Erlangen : Publicis Publ., 2009

- [Lan02a] LANDWEHR, B.: Automatische Schnellabsenkung für Stromabnehmer. In: *Elektrische Bahnen* 100 (2002), Nr. 5, S. 172–177
- [Lan02b] LANG, H. P.: Neigetechnik, Erfahrungen aus dem Betriebseinsatz von Neigetechnikfahrzeugen bei der Deutschen Bahn AG. In: *ZEVrail - Glasers Annalen* 126 (2002), S. 60–69
- [LN85] LINK, M. ; NOWAK, B.: *Studie zur Auslegung eines Stromabnehmers für den Intercity Experimental (ICE) durch Simulation des Schwingungsverhaltens von Stromabnehmer und Fahrleitung*. 1985 (Bericht. Fachgebiet Leichtbau, Fachbereich 14 Bauingenieurwesen, Gesamthochschule Kassel, Universität)
- [LN94] LANKARANI, H. M. ; NIKRAVESH, P. E.: Continuous contact force models for impact analysis in multibody systems. In: *Non-linear Dynamics* 5 (1994), Nr. 2, S. 193–207
- [Lup82] LUPPI, J.: Les installations fixes de traction électrique de la ligne nouvelle à grande vitesse Paris-Sued-Est. In: *Elektrische Bahnen* 80 (1982), Nr. 5, S. 148–156
- [MD06] MUTHUKUMAR, S. ; DESROCHES, R.: A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation. In: *Earthquake engineering & structural dynamics* 35 (2006), Nr. 7, S. 811–828
- [MLB06] MASSAT, J. P. ; LAINE, J. P. ; BOBILLOT, A.: Pantograph-catenary dynamics simulation. In: *Vehicle System Dynamics* 44 (2006), Nr. sup1, S. 551–559
- [PEM⁺97] POETSCH, G. ; EVANS, J. ; MEISINGER, R. u. a.: Pantograph-catenary dynamics and control. In: *Vehicle System Dynamics* 28 (1997), Nr. 2-3, S. 159–195
- [Per07] PERSSON, R.: *Tilting trains: description and analysis of the present situation*. Skolan för teknikvetenskap, Kungliga Tekniska högskolan, 2007

- [Pet96] PETRI, K.: *Vergleichende Untersuchung von Berechnungsmodellen zur Simulation der Dynamik von Fahrleitungs-Stromabnehmer-Systemen*. Paderborn, HNI Paderborn, Diss., 1996
- [PGS09] PERSSON, R. ; GOODALL, R. M. ; SASAKI, K.: Carbody tilting–technologies and benefits. In: *Vehicle System Dynamics* 47 (2009), Nr. 8, S. 949–981
- [Poe00] POETSCH, G.: *Untersuchung und Verbesserung numerischer Verfahren zur Simulation von Stromabnehmer-Kettenwerk-Systemen*. Düsseldorf, HNI Paderborn, Diss., 2000
- [RD96] REINBOLD, M ; DECKART, U: FAMOS: Ein Programm zur Simulation von Oberleitungen und Stromabnehmern. In: *ZEV + DET Glasers Annalen* 120 (1996), Nr. 6, S. 239–243
- [Rei05] REICHMANN, T.: Simulation des Systems Oberleitungskettenwerk und Stromabnehmer mit der Finite-Elemente-Methode. In: *Elektrische Bahnen* 103 (2005), Nr. 1-2, S. 69–75
- [Res91] RESCH, U.: Simulation des dynamischen Verhaltens von Oberleitungen und Stromabnehmern bei hohen Geschwindigkeiten. (1991)
- [RPA⁺07] RAUTER, F. G. ; POMBO, J. ; AMBRÓSIO, J. u. a.: Contact model for the pantograph-catenary interaction. In: *Journal of System Design and Dynamics* 1 (2007), Nr. 3, S. 447–457
- [Sac73] SACHS, K.: *Elektrische Triebfahrzeuge: ein Handbuch für die Praxis sowie für Studierende: in drei Bänden*. Springer, 1973
- [Sch89] SCHWACH, G.: *Oberleitungen für hochgespannten Einphasenwechselstrom in Deutschland, Österreich und der Schweiz*. Furrer+Frey, 1989

- [Sch98] SCHNEIDER, R.: Pantograph for tilting trains. In: *Current Collections for High Speed Trains Seminar (Ref. No. 1998/509)*, IEE IET, 1998, S. 1–5
- [Sch00] SCHUNK BAHNTECHNIK GMBH: *Stromabnehmersysteme für Oberleitungsfahrzeuge*. 2000
- [Sch11] SCHNEIDER, R.: *Bildinformationen bzgl. Querschnitten von Schienenfahrzeugen mit und ohne Neigetchnik*. 2011
- [Sie02] Schutzrecht DE 296 24 310 U1 (März 2002). Siemens Duewag Schienenfahrzeug GmbH.
- [Sie12] SIEMENS AG: *Produktkatalog 2012 - Fahrleitungsmaterial für den Nah- und Fernverkehr*. 2012
- [SIM] SIMPACK: *SIMPACK Documentation*
- [SJOC⁺09] SUCH, M. ; JIMÉNEZ-OCTAVIO, J. R. ; CARNICERO, A. u. a.: EN50318. Validación de la simulación de la interacción dinámica catenaria-pantógrafo. In: *Anales de Mecánica y Electricidad LXXXVI* (2009), Nr. IV, S. 22–28
- [Ste06] STEIMEL, A.: *Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung: Grundlagen und Praxis*. Oldenbourg Industrieverlag, 2006
- [Str08] STREIT, S.: Kontaktkraft-geregelter Hochleistungs-Stromabnehmer. In: *Elektrische Bahnen* 106 (2008), Nr. 8-9, S. 365–370
- [SVA⁺83] SEERING, W. ; VESELY, C. ; ARMBRUSTER, K. u. a.: Experimental and analytical study of pantograph dynamics. In: *American Control Conference IEEE*, 1983, S. 270–275
- [Tal14] TALGO: *Talgo 250*. http://www.talgo.com/pdf/t250_250H_en.pdf, 2014

- [Tes10] Schutzrecht WO 2010/051807 A2 (Mai 2010). TESSMER, W. (Erfinder); Bombardier Transportation GmbH (Anmelder).
- [Tes11] TESSMER, W.: *Gespräch*. 2011
- [TSS05] TEICHELMANN, G. ; SCHAUB, M. ; SIMEON, B.: Modelling and simulation of railway cable systems. In: *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 85 (2005), Nr. 12, S. 864–877
- [Vei01] VEITL, A.: *Integrierter Entwurf innovativer Stromabnehmer*. Düsseldorf, DLR, Diss., 2001. – Zugl.: Diss., 2000
- [ZC98] ZHAI, W. M. ; CAI, C. B.: Effect of Locomotive Vibrations on Pantograph-Catenary System Dynamics. In: *Vehicle System Dynamics* 29 (1998), Nr. sup1, S. 47–58
- [ZLM06] ZHANG, W. ; LIU, Y. ; MEI, G.: Evaluation of the coupled dynamical response of a pantograph–catenary system: contact force and stresses. In: *Vehicle System Dynamics* 44 (2006), Nr. 8, S. 645–658
- [Zol02] ZOLOTAS, A. C.: *Advanced control strategies for tilting trains*, Loughborough University, Diss., 2002
- [ZT05] ZIENKIEWICZ, O. C. ; TAYLOR, R. L.: *The finite element method for solid and structural mechanics*. 6. ed. Amsterdam [u.a.] : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005

Auszüge aus DIN-Normen wurden „**Wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neusten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.**“

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Die Bände sind unter www.ksp.kit.edu als PDF frei verfügbar
oder als Druckausgabe bestellbar.

- Band 1** Urs Wiesel
Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug. 2010
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber
Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahntriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers. 2010
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener
Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement. 2010
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog
Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslasterfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten. 2011
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft
Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. 2011
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker
Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation. 2011
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe. 2011
ISBN 978-3-86644-599-4

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 8** Vladimir Iliev
Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs. 2011
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz
Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk. 2011
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. 2012
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler
Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis. 2012
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies
Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen. 2012
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber
Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz. 2012
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik.**
27./28. September 2012 in Karlsruhe. 2012
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen
20. Februar 2013, Karlsruhe. 2013
ISBN 978-3-86644-970-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 16** Hans-Joachim Unrau
Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen. 2013
ISBN 978-3-86644-983-1
- Band 17** Xi Zhang
Untersuchung und Entwicklung verschiedener Spurführungsansätze für Offroad-Fahrzeuge mit Deichselverbindung. 2013
ISBN 978-3-7315-0005-6
- Band 18** Stefanie Grollius
Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells. 2013
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke
Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. 2013
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr
Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch. 2014
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova
Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme. 2014
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt
Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. 2014
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann
Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System. 2014
ISBN 978-3-7315-0187-9

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 24** Roman Weidemann
Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger. 2014
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei
Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. 2014
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz
Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren. 2014
ISBN 978-3-7315-0264-7
- Band 27** Christian Schwab
Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte. 2014
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler
Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung. 2015
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös
Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen. 2015
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen 25. Februar 2015, Karlsruhe. 2015
ISBN 978-3-7315-0323-1
- Band 31** Michael Eckert
Energieoptimale Fahrdynamikregelung mehrmotoriger Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0332-3

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 32** Martin Scherer
**Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen.
Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung
mit aufgeprägtem Volumenstrom.** 2015
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33** Rinaldo Arnold
**Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines dreiphasigen
Systems zur berührungslosen induktiven Energieübertragung.** 2015
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34** Johannes Gültlinger
Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen. 2015
ISBN 978-3-7315-0358-3
- Band 35** Thorsten Dreher
**Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit sekundärgeregelten
Antrieben beim Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen.** 2015
ISBN 978-3-7315-0377-4
- Band 36** Steffen Kölling
**Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation
von Stromabnehmern.** 2015
ISBN 978-3-7315-0387-3

Stromabnehmer für Neigetechnikfahrzeuge besitzen durch die Neigekompensation einen erhöhten vertikalen Bauraum, der zu Einschränkungen im nutzbaren Passagierraum führt. Zudem besitzen Stromabnehmer in Europa länder- bzw. netzspezifische Stromabnehmerwippenprofile, die sich unter anderem durch unterschiedliche Breiten charakterisieren. Die mechatronische Nachführung einer schmalen Wippe im Netz einer originär breiteren Wippe und die Untersuchung der Kinematiken der Neigekompensation werden verknüpft durch die Bewegung des Stromabnehmers oder Komponenten davon, welche für beide Ansätze notwendig ist. In dieser Arbeit wird im ersten Schritt die mechatronische Nachführung des Stromabnehmers in einer Machbarkeitsstudie untersucht. Im zweiten Schritt werden kinematische Konzepte für die Neigekompensation von Stromabnehmern methodisch erzeugt und auf Basis der vielfältigen Anforderungen bewertet und ausgewählt. Als Ergebnis wird so ein vorteilhafter Satz von neuartigen Konzepten als Impuls für die industrielle Weiterentwicklung der Komponente erzeugt.