

Jens Geisler

*Selbstoptimierende Spurführung
für ein neuartiges Schienenfahrzeug*

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2014

ISSN 2195-5239

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Satz und Gestaltung: Jens Geisler, \LaTeX

Hersteller: Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG
Druck · Buch · Verlag
Münster

Printed in Germany

Selbstoptimierende Spurführung für ein neuartiges Schienenfahrzeug

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
M.Sc. Jens Geisler
aus Salzkotten

Tag des Kolloquiums: 28. Oktober 2013
Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Entwicklung von zwei selbstoptimierenden Reglern für die aktive Spurführung eines neuartigen Schienenfahrzeugs vorgestellt. Mithilfe aktiv lenkbarer Achsen kann der mit einer passiven Spurführung verbundene Kompromiss zwischen Verschleiß und Laufstabilität überwunden werden. Durch die Selbstoptimierung wird der Regler zur Laufzeit so an die jeweilige Situation angepasst, dass die Stellenergie und die Regelgüte unabhängig von der Amplitude der Störungen sind und so z. B. auf bestimmte feste Werte eingestellt werden können. Der erste Regleransatz basiert auf der Vorsteuerung von modellprädiktiv optimierten Trajektorien, die mit einem P-Regler stabilisiert werden. Bei der zweiten Methode wird die Rückführungsmatrix eines vollständigen Zustandsreglers situationsabhängig optimiert. Beiden Methoden gemeinsam ist das Konzept der „Selbstoptimierung durch Mehrzieloptimierung“. Dabei wird zunächst für alle Anforderungen ein separates Gütekriterium formuliert. Danach wird das Mehrzieloptimierungsproblem durch die mathematische Formulierung der gewünschten Relation zwischen den Anforderungen in ein skalares Optimierungsproblem überführt. Diese Vorgehensweise ist sehr allgemein und lässt sich auf viele andere Regelungsaufgaben übertragen. Die vorliegende Arbeit leistet daher über die vorgestellte konkrete Anwendung hinaus einen generellen Beitrag zur Entwicklung selbstoptimierender Systeme.

Abstract

In this thesis, the development of two self-optimizing controllers for the active guidance of an innovative rail vehicle is presented. Using actively steerable axles, the compromise between abrasive wear and stability that is inherent to passive guidance can be suspended. A self-optimization algorithm adjusts the controller at runtime to the current situation such that the actuation energy and the controller performance are no longer affected by disturbances. The first controller concept comprises a feed forward control of model based optimized trajectories that are stabilised by a proportional feedback controller. The second concept is based on a linear state feedback controller where the feedback law is optimized at runtime. Both methods share the concept of „self-optimization by multi-objective optimization“. In multi-objective optimization, all requirements are formulated as a separate criterion. Subsequently, a scalar optimization problem is derived by mathematically defining the desired quantitative relation between the separate objectives. This approach is not limited to any one controller design method. Therefore, the contribution of this thesis is not only to the presented applications but further to the general method of designing self-optimizing systems.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung	11
2 Grundlagen und Stand der Technik	17
2.1 Das System RailCab	17
2.2 Spurführung von Schienenfahrzeugen	21
2.2.1 Kräfte zwischen Rad und Schiene	22
2.2.2 Verschleiß an Rad und Schiene	28
2.2.3 Entgleisung durch Aufklettern	29
2.2.4 Achskonzepte: Radsatz und Radpaar.....	31
2.2.5 Aktueller Stand der Technik und Forschung	33
2.3 Selbstoptimierende Systeme – der SFB 614	36
2.3.1 Der Selbstoptimierungsprozess	37
2.3.2 Ziele und Zielsysteme	38
2.3.3 Makrostruktur	40
2.3.4 Mikrostruktur – das Operator-Controller-Modul (OCM)	41
2.4 Modellbasierte Selbstoptimierung	44
2.4.1 Modellprädiktive Regelung.....	45
2.4.2 Selbstoptimierung und Mehrzieloptimierung.....	47
2.4.3 Grundlagen der Mehrzieloptimierung	48
2.4.4 Mehrzieloptimierung, aktueller Stand der Forschung	49
2.4.5 Automatische Mehrzieloptimierung durch Skalarisierung ...	52
3 Das Spurführungsmodul der RailCab-Versuchsfahrzeuge	61
3.1 Physikalischer Aufbau eines RailCabs	62
3.2 Sensoren und Aktoren	64
3.2.1 Relative Querpositionssensoren.....	66
3.2.2 Lenkzylinder	68
3.3 Lineare Modelle.....	71
3.4 Identifikation	78
3.5 Trassierung und Gleislagefehler	81
3.5.1 Trassierung.....	81
3.5.2 Gleislagefehler	82
3.6 Detailliertes Simulationsmodell	91
3.6.1 Aufbau des Modells	92
3.6.2 Validierung des Simulationsmodells.....	93

4	Selbstoptimierende Spurführungsregelung	95
4.1	Hierarchische Strukturierung	95
4.2	Allgemeine Struktur des Spurführungsreglers	98
4.2.1	Kurvenvorsteuerung	100
4.2.2	Störgrößenaufschaltung	100
4.2.3	Regelung mit Vorsteuerung der Gleislagefehler	101
4.2.4	Regelung bei unbekanntem Gleislagefehlern	101
4.2.5	Zustandsregler zur modellgestützten Vorsteuerung	102
4.3	Ziele	103
4.3.1	Inhärente Ziele	103
4.3.2	Externe Ziele	107
5	Selbstoptimierende Trajektorienvorsteuerung	109
5.1	Modellprädiktive Planung und Interpolation der Trajektorien	109
5.1.1	Proportionaler Störregler	110
5.1.2	Differenzielle Dynamische Programmierung	110
5.1.3	Berücksichtigung von Beschränkungen	111
5.2	Trajektoriengenerierung für die Spurführung	111
5.3	Ergebnisse und Validierung	115
5.3.1	Die Pareto-Front der optimalen Trajektorien	115
5.3.2	Optimale Trajektorien	116
5.3.3	Testfahrten mit optimaler Trajektorienvorsteuerung	116
6	Selbstoptimierende Riccati-Regler	125
6.1	Riccati-Regler mit mehreren Gütemaßen	127
6.2	Iterative Optimierung der Gewichte	130
6.3	Algorithmus für einen Pareto-Regler	136
6.3.1	Quasikontinuierliche Regleranpassung	137
6.3.2	Der Algorithmus im Detail	142
6.4	Pareto-Regler mit dynamischen Führungsgrößen	143
6.5	Pareto-Regler für die Spurführung	146
6.5.1	Zustandsrekonstruktion	148
6.5.2	Wahl der Ziele	149
6.5.3	Wahl des Pareto-Punktes	151
6.6	Ergebnisse und Validierung	155
6.6.1	PaCo-Regelung für ein einfaches Beispiel	155
6.6.2	Funktion der Spurführung mit PaCo-Regler	158
6.6.3	Validierung der Funktion	161
6.6.4	Fahrten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten	163
6.6.5	Fahrten mit unterschiedlichen Vorgaben	165

7 Ausblick	167
Verwendete Formelzeichen	173
Literaturverzeichnis	179

1 Einleitung

Das innovative Schienenfahrzeug RailCab¹ ist Teil eines neuartigen Transportsystems, das den Komfort und die individuelle Mobilität von Straßenfahrzeugen mit den Vorteilen des schienengebundenen Verkehrs vereint. Das Konzept sieht vor, dass kleine, leichte und in kostengünstiger Massenproduktion gefertigte fahrerlose Fahrzeuge auf bestehenden Bahntrassen verkehren, um Personen und Güter nach Bedarf (und nicht nach Fahrplan) und ohne Umsteigen direkt an ihren Zielort zu transportieren. Die Fahrzeuge werden von einem Logistiksystem koordiniert, sind aber in der Lage, die ihnen zugewiesene Route autonom abzufahren. Durch Kommunikation untereinander sind mehrere Fahrzeuge auf der gleichen Strecke in der Lage, sich dezentral zu organisieren und zu Konvois zusammenzuschließen. Obwohl sie dabei nicht mechanisch miteinander gekoppelt werden, kann dadurch wie bei konventionellen Schienenfahrzeugen der Luftwiderstand reduziert und der Streckendurchsatz erhöht werden.

Von den vielen Funktionen und technologischen Neuerungen der RailCabs wird in dieser Arbeit die aktive Spurführung betrachtet. Die Aufgabe der aktiven Spurführung besteht darin, mit Hilfe von lenkbaren Achsen die Querlage des Fahrzeugs im Gleis zu regeln und so die Gefahr einer Entgleisung zu minimieren und Spurkranzanläufe und damit Verschleiß zu vermeiden. Außerdem ist die Lenkung die Voraussetzung dafür, dass die Fahrzeuge ihre Fahrtrichtung an neuartigen passiven Weichen selbstständig bestimmen können. Neben den lenkbaren Achsen liegt die Innovation des RailCab-Fahrwerks vor allem in der selbstoptimierenden Regelung, deren Entwicklung im Zentrum dieser Arbeit steht.

Die hier vorgestellten Methoden zur Entwicklung selbstoptimierender Regelungen wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ (SFB 614) an der Universität Paderborn erforscht und entwickelt. Die Vision des SFB 614 ist eine neue Schule des Entwurfs von intelligenten mechatronischen Systemen. Unter Selbstoptimierung wird die selbstständige Anpassung der Ziele eines Systems auf veränderliche Einflüsse (Umwelt und Benutzer) verstanden. Selbstoptimierung ermöglicht Systeme mit inhärenter „Intelligenz“, die in der Lage sind, selbstständig und flexibel auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren. Der Entwurf selbstoptimierender Regelungen spielt dabei eine zentrale Rolle, und der praktischen Erprobung, Validierung und Demonstration wird eine große Bedeutung beigemessen. Neben verschiedenen kleineren Demonstratoren werden an den zwei RailCab-Versuchsfahrzeugen außer

¹ Die Fahrzeuge und das Systemkonzept wurden im Projekt RailCab (ehemals *Neue Bahntechnik Paderborn*, NBP) an der Universität Paderborn entwickelt.

der selbstoptimierenden Spurführung auch eine aktive Federung, berührungslose Konvoi-Fahrten und das Energiemanagement mit Batterien und Ultracaps erforscht.

Motivation

Wie auch bei konventionellen Schienenfahrzeugen haben die Räder der RailCabs sogenannte Spurkränze, die es dem Fahrzeug (nahezu) unmöglich machen, die von den Gleisen vorgegebene Spur zu verlassen. Diese Spurkränze stellen jedoch nur eine Rückfallebene dar und sollen im Normalfall keinen Kontakt mit dem Schienenkopf haben. Die Spurführung ohne Spurkranzanläufe wird durch das sogenannte Spurspiel ermöglicht. Das Spurspiel ist ein Freiraum zwischen Spurkranz und Schienenkopf, innerhalb dessen sich das Fahrzeug in Querrichtung frei bewegen kann. Bei konventionellen Schienenfahrzeugen wird die Spurführung passiv durch konisch profilierte Räder, die starr mit einer gemeinsamen Achse verbunden sind, realisiert. Die kinematischen Eigenschaften dieser sogenannten Radsätze führen zu dem sogenannten Sinuslauf, bei dem Querverschiebungen oder Anlaufwinkel in Kurven durch eine oszillierende Bewegung abgebaut werden. Die Dämpfung dieser Schwingung nimmt mit der Geschwindigkeit ab. Um die kritische Geschwindigkeit, bei der der Sinuslauf instabil wird, nach oben zu verschieben, muss die Achse mehr oder weniger starr an ein Drehgestell oder einen Wagenkasten gefesselt werden. Dadurch wird jedoch die Selbstzentrierung behindert und es muss ein Kompromiss zwischen guten Führungseigenschaften und der Laufstabilität gefunden werden. Je stärker der Sinuslauf gedämpft wird, desto größerer Längsschlupf tritt auf, und desto schlechter erfolgt die Radialstellung der Räder in Kurven, was zu erhöhtem Querschlupf und einer größeren Spurkranzanlaufwahrscheinlichkeit führt. Insgesamt ist der daraus resultierende Verschleiß an Rädern und Schienen ein zentrales Problem der klassischen Spurführung. Die damit verbundenen Instandhaltungskosten sind ein wesentlicher Grund dafür, dass der Schienenverkehr nicht wirtschaftlicher betrieben werden kann.

Verschiedene Studien in der Vergangenheit haben immer wieder gezeigt, dass die Notwendigkeit, einen Kompromiss bei der Auslegung von Eisenbahnfahrwerken machen zu müssen, durch einen aktiven Eingriff in die Spurführung aufgehoben werden kann. Es gibt viele theoretische und wenige praktische Untersuchungen zur aktiven Spurführung. Das mag daran liegen, dass der Aufbau von Versuchsfahrzeugen eine erhebliche Investition darstellt und der Nutzen auf dem etablierten Markt nur zögerlich anerkannt wird. Die RailCab-Versuchsfahrzeuge sind kostengünstig in einem Maßstab von 1:2,5 aufgebaut und haben technologisch einen experimentellen Charakter. Daher eignen sie sich in mehrfacher Hinsicht zur Erprobung dieser neuen Technologie. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine selbstoptimierende Spurführungsregelung für die RailCabs zu entwickeln und praktisch zu erproben.

Neben den höheren Entwicklungs- und Investitionskosten für eine aktive Spurführung ist ihr Energiebedarf ein großes Gegenargument. Daher liegt ein Schwerpunkt dieser Arbeit darauf, die neuen Möglichkeiten selbstoptimierender Regelungen dazu zu nutzen, die Spurführungsregelung so zu gestalten, dass ein Optimum an Verschleißminimierung und Energiebedarf erzielt wird.

Problemstellung

Die Aufgabe der Spurführungsregelung ist es, die Achsen so im Gleis zu führen, dass möglichst keine Spurkranzanläufe auftreten, da diese das Risiko einer Entgleisung durch Aufklettern bergen und zu starkem Verschleiß führen. Gleichzeitig sollten die Lenkeingriffe (also das Bewegen der Achse) so gering wie möglich sein, da sie Energie kosten und auch zu Verschleiß führen. Dabei besteht die Herausforderung darin, dass die Gleise nicht mathematisch exakt als Geraden, Kreisbögen oder Übergangsbögen (Klothoiden) verlegt sind. Es treten mehr oder minder starke Abweichungen von dem geplanten Idealverlauf auf, sogenannte Gleislagefehler. Die Überlagerung aus Trassierung und Gleislagefehlern kann als (teilweise bekannte) Störgröße der Spurführungsregelung aufgefasst werden. Das Frequenzspektrum dieser Führungsgröße wird linear mit der Fahrzeuggeschwindigkeit gespreizt, sodass auch die Bandbreite des Reglers an die Geschwindigkeit angepasst werden muss, um den Gleislagefehlern folgen zu können.

Zur Minimierung der Lenkbewegungen kann theoretisch so geregelt werden, dass das gesamte Spurspiel ausgenutzt wird. Da die Gleislagefehler und andere Störungen jedoch oft nicht oder nur ungenau bekannt sind, kann der Regler sie nicht exakt kompensieren. Es besteht also immer die Gefahr, dass es durch einen unerwarteten Verlauf zu einem Spurkranzanlauf kommt. Um die Wahrscheinlichkeit eines Anlaufs zu minimieren, ist es am sinnvollsten zu versuchen, entlang der Mittellinie des Gleisverlaufs zu fahren. Dann kann jedoch nicht mehr das gesamte Spurspiel genutzt werden, um möglichst glatte Trajektorien zu fahren. Es ergibt sich also der folgende Zielkonflikt:

- Einerseits muss jede Achse dem Gleisverlauf folgen und einen „Sicherheitsabstand“ zum Rand des Spurkanals halten, um Spurkranzanläufe zu vermeiden.
- Andererseits sollen möglichst „glatte“ Bahnen gefahren werden, um Energie zu sparen und um den Lenkverschleiß und Queranregungen, die den Fahrkomfort beeinträchtigen, zu minimieren.

Beitrag und wesentliche Ergebnisse

Die Selbstoptimierung bietet eine Möglichkeit, die Kompromisslösung, die diese Art von Zielkonflikt gewöhnlich erfordert, zu vermeiden: Anstatt das Verhältnis von Sicherheit zu Energieeffizienz fest in den Regler einzuprogrammieren, werden die Ziele stets neu an die aktuelle Situation, also an Umwelteinflüsse, Benutzeranforderungen und andere systeminterne Vorgaben, angepasst. In dieser

Arbeit werden zwei Konzepte für die selbstoptimierende Spurführungsregelung vorgestellt, denen beiden gemeinsam ist, dass es sich um optimale Regelungsstrategien handelt, die als Mehrzieloptimierungsproblem formuliert sind. Mehrzieloptimierungsprobleme haben zunächst unendlich viele Lösungsmöglichkeiten und Eigenschaften. Diese können u. U. offline berechnet werden. Die konkrete Ausprägung eines eindeutigen Ziels, nach dem der Regler ausgelegt wird, wird jedoch erst zur Laufzeit, also online, bestimmt und fortwährend an die aktuellen Umstände angepasst. Die beiden vorgestellten Konzepte unterscheiden sich in der Art des Eingriffs der selbstoptimierenden Regelung:

Optimale Trajektorienvorsteuerung: Hierbei handelt es sich um eine Modellprädiktive Planung der Soll-Trajektorien für die Vorder- und Hinterachse. Die Trajektorien werden anhand der aktuell bekannten Gleislagefehler so geplant, dass sie innerhalb des Spurspiels liegen und mehr oder weniger stark von der Mittellinie abweichen. Alle möglichen Trajektorien werden mit mehreren Kriterien bewertet und durch ein Optimierungsverfahren wird online diejenige Trajektorie generiert, deren Kriterienwerte am besten zur Situation passen. Mittels Modellinversion werden dann die Lenkbewegungen berechnet, die nötig sind, um die Trajektorie abzufahren. Modellfehler und Störungen, auf die diese Vorsteuerung nicht reagieren kann, werden mit einem P-Regler kompensiert.

Selbstoptimierender Riccati-Regler: Bei unbekanntem Gleislagefehlern oder anderen Störeinflüssen können keine Trajektorien berechnet werden. Daher wird ein zweites Konzept vorgestellt, bei dem der Regler direkt angepasst wird. Das Konzept basiert auf der Mehrzielvariante des bekannten Riccati-Reglers. Für die Selbstoptimierung wird eine Methode entwickelt, die es erlaubt, eine beliebige Ausprägung der Zielfunktionswerte durch die Anpassung der Reglermatrix zur Laufzeit einzuregulieren. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der effizienten und ressourcensparenden Realisierung sowohl der Optimierung als auch der fortwährenden Lösung der Riccati-Gleichung zur Bestimmung der Reglermatrix.

Die aktive Spurführung ist ein Beispiel für die Selbstoptimierung eines mechanischen Systems. Die hohen, z. T. gegensätzlichen Anforderungen (z. B. geringer Verschleiß und Energieeffizienz), sind mit herkömmlichen Methoden nur schwer zu erfüllen. Der Einsatz einer Mehrzielformulierung zur gezielten Anpassung des Systemverhaltens an veränderte Umweltbedingungen oder Benutzeranforderungen stellt eine Neuerung dar und ist ein vielversprechender Ansatz für die Selbstoptimierung von Systemen mit modellierbarem Verhalten. Insbesondere der Ansatz, eine Regelungsaufgabe als Mehrzieloptimierungsproblem zu formulieren, ermöglicht es, die Ziele und ihre Wichtigkeit getrennt voneinander zu betrachten

und damit die Bestimmung der konkreten Ausprägung des Regelungsziels in die Betriebsphase zu verlegen.

Der Mehrwert der selbstoptimierenden Spurführung besteht in der Entkopplung von Umwelteinflüssen und Leistungsbedarf sowie in der Möglichkeit, mit einem übergeordneten Modul die Leistungszuteilung gegen die erwartete Spurkranzanlaufrate (Spurkranzanläufe pro km) auszuhandeln. Bei konventionellen und auch bei adaptiven Regelungen würden der Leistungsbedarf und die Häufigkeit von Spurkranzanläufen stets durch die Amplitude der Gleislagefehler und durch die stochastischen Störungen bestimmt (beide steigen mit der Amplitude der Störung, da der Regler einen bestimmten Kompromiss verfolgt). Die selbstoptimierende Spurführung dagegen ist in der Lage, eine Leistungszuteilung unter allen Bedingungen einzuhalten (Vorgabe für die Trajektorienvorsteuerung) oder alternativ stets nur so viel Energie aufzunehmen, wie nötig ist, um Spurkranzanläufe sicher zu vermeiden (Vorgabe für den Riccati-Regler). Bei einer selbstoptimierenden Regelung wird der Ziel-Kompromiss also gezielt an die Störungen angepasst.

Strukturierung der Arbeit

Der Hauptteil dieser Arbeit ist in fünf Kapitel untergliedert. Zunächst werden im Kapitel 2 theoretische Grundlagen und der aktuelle Stand der Technik und Forschung besprochen. Das Konzept RailCab und die RailCab-Versuchsfahrzeuge werden im Detail vorgestellt und es werden die theoretischen Grundlagen sowohl der Spurführung von Schienenfahrzeugen als auch der Selbstoptimierung dargelegt. Nach diesem allgemeinen Teil werden in den folgenden Kapiteln die Ergebnisse dieser Arbeit beschrieben. In Kapitel 3 wird die Grundlage für die Entwicklung der Spurführungsregelung geschaffen: Es werden der mechanische Aufbau, die Funktion und die mathematische Modellierung des Spurführungsmoduls beschrieben.

Die Beschreibung der Regelung und ihre Erprobung und Validierung sind auf die letzten drei Kapitel verteilt. Zunächst werden in Kapitel 4 die allgemeine Struktur der Spurführungsregelung und die grundlegenden Entwurfsziele erläutert. In Kapitel 5 werden dann die Regelung mit selbstoptimierender Trajektorienvorsteuerung beschrieben und die Ergebnisse der Testfahrten vorgestellt. In Kapitel 6 schließlich wird ein selbstoptimierender Riccati-Regler zunächst allgemein und dann für die Spurführungsregelung entwickelt. Auch hier erfolgt die abschließende Vorstellung und Analyse der Ergebnisse anhand von ausgewählten Testfahrten.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Das System RailCab

RailCab ist ein neuartiges schienengebundenes Verkehrssystem. Das Konzept umfasst die Technik der Fahrzeuge, die Logistik und den Vertrieb ([Trä06], [HRS⁺07]). Das Ziel von RailCab ist es, die Anforderungen des Individualverkehrs mit den Gegebenheiten eines schienengebundenen Verkehrsmittels zu vereinbaren. Das Konzept basiert auf der Technologie von völlig neuartigen Bahnfahrzeugen, den RailCabs (vgl. [LGH⁺08]). Die RailCabs sind aus wirtschaftlichen und logistischen Gründen relativ kleine Fahrzeuge (ca. 10 m Länge, 10–20 Personen oder ein 20-Fuß-Container), die mit einer hohen Standardisierung in großen Stückzahlen gebaut werden sollen. Die wichtigste Eigenschaft ist, dass sie führerlos und autonom mit inhärenter Teilintelligenz verkehren können. Dies ermöglicht einen bedarfsgesteuerten, fahrplanungebundenen Betrieb. Ein Umsteigen oder Umladen ist so nicht mehr notwendig und keine oder wenige Zwischenstopps erhöhen die Tür-zu-Tür-Geschwindigkeit bei einer moderaten Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h.

Die in Bild 2-1 dargestellten Bilder von zwei Designstudien zeigen den Innenraum eines Personen-RailCabs (links) und das Verladen eines Containers auf ein Güter-RailCab (rechts) jeweils als digitales Mock-up. Bei dem Personen-RailCab ist das Fahrgastterminal zu erkennen, das die Wahl des Zielbahnhofes und weitere Konfigurationsmöglichkeiten erlaubt. An dem Güter-RailCab ist die Außenhülle zu erkennen, die dem Fahrzeug sowohl bei Fahrten im Konvoi als auch bei Individualfahrten eine aerodynamisch günstige Form verleiht.

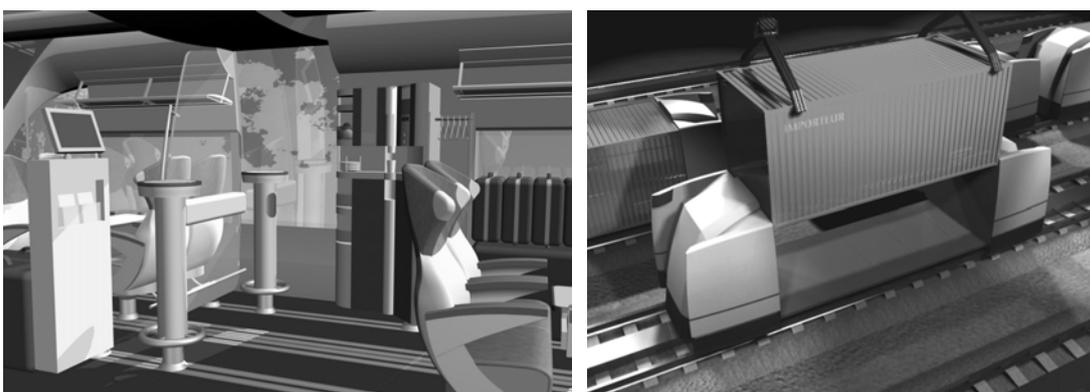


Bild 2-1: Designstudie RailCab, links: Innenraum eines Personen-RailCabs, rechts: Beladen eines Güter-RailCabs mit einem Container

Weiterhin soll durch die Vermeidung von Hochgeschwindigkeitsstrecken eine Mischung von Personen- und Gütertransport ermöglicht werden, was wiederum eine höhere Streckenauslastung ermöglicht. Durch den bedarfsgenauen Transport, bei

dem das Ziel zur gewünschten Ankunftszeit erreicht wird, kann der Teufelskreis des fahrplangebundenen Verkehrs durchbrochen werden. Dort führt die niedrige Taktrate zu einem niedrigeren Fahrgastaufkommen, was den Betrieb unrentabel macht und oft zu einer weiteren Verringerung der Taktrate führt.

Das Fahrzeugkonzept ist zwischen PRT-Systemen (Personal Rapid Transit) und GRT-Systemen (Group Rapid Transit) anzusiedeln¹. Das Konzept geht jedoch in vielen Punkten weit über die Eigenschaften bisher bekannter Systeme hinaus. Dies gilt vor allem für die höhere Geschwindigkeit, die Reichweite und die Flexibilität, die durch die Einbindung der Fahrzeuge in ein intelligentes Logistiknetzwerk mit dezentraler Teilintelligenz erreicht wird („Internet auf Rädern“). Dadurch soll auch die Trennung von Nah- und Fernverkehr überwunden werden, sodass nahezu ein Tür-zu-Tür-Transport möglich wird, wie ihn heute nur das Auto bietet.

Die einzelnen RailCabs sind in ein Kommunikationsnetz eingebunden, über das sie untereinander und mit Leitrechnern Informationen austauschen können. Dies ermöglicht es, mehrere Fahrzeuge mit ähnlichem Ziel zu Konvois zusammenzufassen und Fahrwege auf die gegenwärtige Netzauslastung hin zu optimieren. Die wesentliche Technik der Fahrzeuge ist in der flach bauenden Bodengruppe untergebracht, auf der die Nutzlastzellen für den Personen- und Gütertransport aufsetzen. Diese Bodengruppe besteht aus drei Hauptmodulen: dem Antrieb, der Spurführung und der aktiven Federung.

Antrieb

Da sich die RailCabs autonom auf der Schiene bewegen können sollen, muss jedes RailCab über einen eigenen Antrieb verfügen. Der Antrieb erfolgt berührungslos mithilfe eines doppelt gespeisten Linearantriebs, dessen Stator zwischen den Schienen verlegt ist und dessen Läufer sich unter den Fahrzeugen befindet (vgl. [Pot06]). Im doppelt gespeisten Asynchronbetrieb können mehrere Fahrzeuge auf dem gleichen Statorabschnitt mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten verkehren und sich so z. B. zu Konvois zusammenschließen. Der doppelt gespeiste Motor ermöglicht außerdem die induktive Energieübertragung in das Fahrzeug ohne Oberleitungen, Stromschienen oder separate berührungslose Abnehmer (vgl. [SSH⁺09]).

¹ Die sogenannten Group Rapid Transit Systeme (GRT) mit einer Fahrzeugkapazität von ca. 10 bis 20 Personen werden eher nach Bedarf als nach Fahrplan betrieben. Die Fahrzeuge bieten eine Auswahl an Fahrtrouten, wobei die Fahrgäste die jeweilige Fahrtroute bestimmen. Zwischenstopps sind jedoch möglich. Personal Rapid Transit Systeme (PRT) dagegen bestehen aus kleineren Fahrzeugen mit einer Kapazität von 3 bis 6 Personen für den exklusiven Transport von einzelnen Personen oder auch kleinen Gruppen, die auf Wunsch gemeinsam befördert werden möchten. Die Fahrzeuge fahren nach Bedarf, nicht nach Fahrplan, individuell und ohne Zwischenstopp. Bei beiden Systemen beträgt die Höchstgeschwindigkeit ca. 40 km/h (vgl. [ATA03], [And78] und [IBO⁺87]).

Durch den Linearmotor wird eine der Hauptursachen für den Verschleiß an Rädern und Schienen eliminiert, da der Rad-Schiene-Kontakt nur noch durch Gewichtskräfte und die wesentlich geringeren Spurführungskräfte belastet wird, jedoch nicht mehr durch Längskräfte. Beim Linearmotor handelt es sich um einen nahezu verschleißfreien Antrieb. Dadurch wird die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Fahrzeuge erhöht.

Da Antriebs- und Bremskraft nicht vom Reibwert zwischen Rad und Schiene abhängen, unterliegen sie keinen Witterungseinflüssen und die Steigfähigkeit des Fahrzeugs ist nur durch die Antriebsleistung begrenzt. Herkömmliche Schienenfahrzeuge können in der Regel Steigungen von maximal 4% befahren. Für die RailCabs ergibt sich die deutlich höhere Obergrenze durch die den Passagieren maximal zumutbare Steigung. Die erhöhte Steigfähigkeit des Systems ermöglicht den weitgehenden Verzicht auf Tunnel, Brücken und Serpentinaugen bei Neubaustrecken.

Spurführung

Das Tragen und Führen der RailCabs erfolgt über den Rad-Schiene-Kontakt auf Normalspurgleisen ([Ett99] und [EHO03]). Dadurch können bestehende Trassen genutzt werden. Um Gewicht und Kosten gering zu halten, hat das Fahrzeug zwei Einzelachsen. Die Achsen sind als Losradsätze mit zylindrischen Rädern ausgeführt und in einem Drehschemel gelagert. Bei Losradsätzen tritt der für konventionelle Schienenfahrzeuge typische Sinuslauf nicht auf, der bei höheren Geschwindigkeiten zu einer instabilen Laufdynamik führt. Ohne einen aktiven Eingriff treten bei Losradsätzen jedoch permanent Spurkranzanläufe auf. Zur Zentrierung des Fahrwerks im Gleis und zur Radialstellung der Räder in Kurven sind die Achsen daher über hydraulische Zylinder aktiv lenkbar. Die selbstoptimierende Regelung dieser aktiven Spurführung ist das Thema dieser Arbeit. Dabei wird das Ziel verfolgt, das Fahrzeug sicher im Gleis zu führen und gleichzeitig den Verschleiß an den Rädern und der Schiene zu minimieren. Weiterhin ermöglicht es die aktive Lenkung, dass die Richtungswahl beim Überfahren von speziellen Weichen vom Fahrzeug selbst umgesetzt wird.

Aktive Federung

Bei den RailCabs mit Einzelachsen und einer geringen Länge werden Anregungen aus dem Gleis stärker in den Wagenkasten übertragen, als dies bei Drehgestellfahrwerken der Fall ist (vgl. [Sch06]). Aus diesem Grund und zur weiteren Steigerung des Fahrkomforts sind die RailCabs mit einer aktiven Sekundärfederung ausgestattet. Das dämpferlose aktive Federungssystem basiert auf einer schwingungstechnischen Entkopplung des Wagenkastens vom Fahrwerk. Der Wagenkasten ist lediglich über vier Luftfedern mit dem Fahrwerk verbunden. Die Luftfedern sind in allen drei Raumrichtungen elastisch. Es können also Anregungen sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung abgefedert werden. Die Dämpfung des Systems erfolgt aktiv über hydraulische Zylinder. Ein Neigen der

Fahrgastzelle in Kurven ist über diese Zylinder ebenfalls möglich, wodurch der Fahrkomfort für die Passagiere weiter gesteigert wird und höhere Geschwindigkeiten ermöglicht werden (*Feder-/Neigetchnik, FNT*).

Konvoibildung

Wenn Fahrzeuge sehr dicht hintereinander herfahren, sinkt der Windwiderstand und damit der Energiebedarf einer solchen Kolonne drastisch. Das System RailCab mit seinen vielen kleinen Einheiten soll diesen Effekt nutzen. Sobald mehrere Fahrzeuge auf einem Streckenabschnitt unterwegs sind, sollen sie sich zu sogenannten Konvois zusammenschließen und im Meterabstand hintereinander herfahren (vgl. [HFB06] und [HTS⁺08]). Die Verkopplung der Fahrzeuge in einem Konvoi erfolgt dabei rein informationstechnisch, sodass ein RailCab einen Konvoi an Weichen und selbsttätig verlassen oder sich einem anderen Konvoi anschließen kann. Die Konvois sollen bei voller Reisegeschwindigkeit gebildet und dynamisch durch dezentrale Kommunikation organisiert werden. Einzelne RailCabs fädeln sich bei vollem Tempo über Weichen in den Konvoi ein oder aus. Diese Ein- bzw. Ausfädelmanöver sind mit konventionellen Weichen nicht realisierbar, da der Schaltvorgang einige Sekunden dauert, in denen es zu Entgleisungen kommen kann. Im Bereich konventioneller Weichen müssen Fahrzeuge daher einen Sicherheitsabstand einhalten, der ein Auflösen des Konvois erfordern würde. Daher wurde eine spezielle passive Weiche ohne bewegliche Teile entwickelt.

Passive Weichen

Die neuen passiven Weichen, die ein Befahren mit minimalem Abstand zwischen den Fahrzeugen ermöglichen, sind im Gegensatz zu konventionellen Weichen in beide Richtungen (Stammgleis und Zweiggleis) gleichzeitig geöffnet ([SGM⁺08]). Die Richtungswahl wird vom Fahrzeug umgesetzt, indem es an den entsprechenden Rand des Gleises lenkt, dem es folgen will. Am Rand treten die Spurkränze in denjenigen Kanal ein, der das Fahrzeug dann auf das gewünschte Gleis führt. In Bild 2-2 ist dieser Vorgang beispielhaft für ein Abbiegen auf das Zweiggleis (links) dargestellt. Die aktive Spurführung ist also eine wichtige Voraussetzung zum Befahren passiver Weichen, die wiederum die Voraussetzung für das Bilden von Konvois sind. Während der Weichenfahrt hat der Spurführungsregler das Ziel, die Achsen sicher und möglichst ohne Spurkranzanläufe in den richtigen Spurkanal zu lenken. Da der Spurkanal jedoch sehr viel enger ist, als das normale Spurspiel, ist das Selbstoptimierungspotenzial hier gering.

Versuchsbetrieb

Zur Entwicklung und Erprobung der Technologien, die zur Realisierung des RailCab-Konzeptes benötigt werden, wurde am Campus der Universität Paderborn eine Versuchsanlage im Maßstab 1:2,5 aufgebaut. Die Teststrecke mit Schmalspurgleisen (60 cm Spurweite), die in Bild 2-3 zu sehen ist, hat eine Gesamtlänge

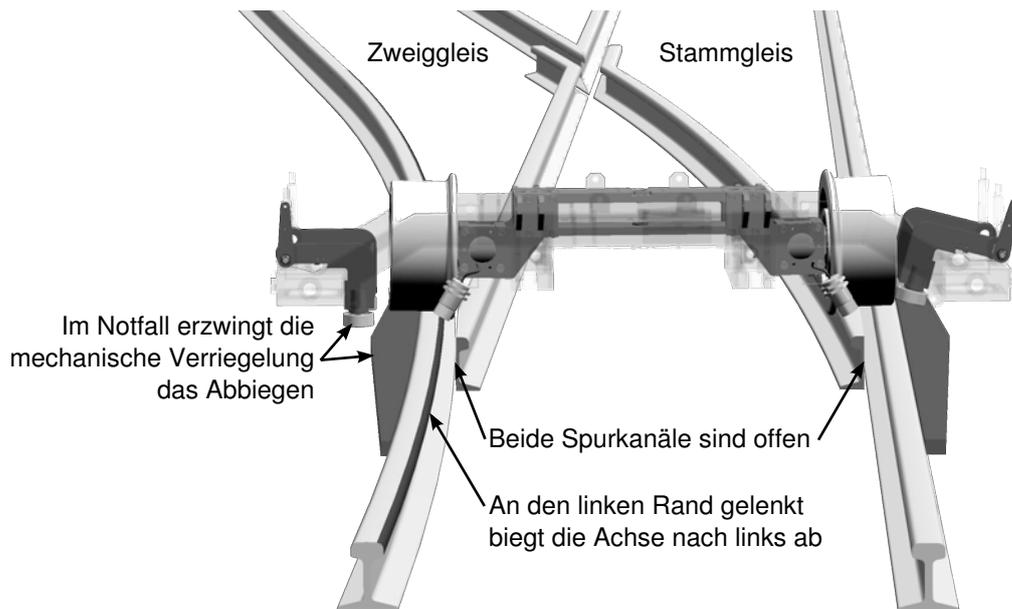


Bild 2-2: Das Konzept der passiven Weiche

von ca. 530 m und besteht aus einem Oval, einem Garagen-Zubringer und einer Weiche. Auf der Strecke kann ein Konvoi mit zwei Fahrzeugen demonstriert werden. In Abschnitt 3.1 wird die Konstruktion der Fahrzeuge im Rahmen der Modellierung der Spurführung genauer erläutert.



Bild 2-3: Die Teststrecke und die beiden RailCab-Versuchsfahrzeuge der Neuen Bahntechnik Paderborn

2.2 Spurführung von Schienenfahrzeugen

Die Erforschung und Verbesserung der Spurführungsdynamik reicht bis in die Anfänge der Eisenbahn im Jahre 1804 zurück. Dennoch sind viele fundamentale Zusammenhänge erst in den letzten 50 Jahren und einige sogar erst im letzten Jahrzehnt zufriedenstellend geklärt worden. Insbesondere die Vorgänge in der Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene sind so komplex, dass sie im mathematisch-mechanischen Sinne derzeit noch nicht vollständig zugänglich sind (vgl. [Rie07]).

Viele Fortschritte haben die Eisenbahn zu einem der schnellsten, komfortabelsten und ökonomischsten Fortbewegungsmittel gemacht. Nicht zuletzt wegen der hohen Investitionskosten sind große Innovationen jedoch eher selten. Insbesondere das definierende Element der Eisenbahn, nämlich das Rad-Schiene-System, hat sich in seiner Form kaum gewandelt. Nach der Besprechung der wichtigsten Grundlagen werden im Folgenden Ansätze zur Überwindung der bestehenden Probleme vorgestellt.

2.2.1 Kräfte zwischen Rad und Schiene

Schienenfahrzeuge sind dadurch definiert, dass sie auf Schienen fahren und geführt werden. Dem System aus Rad und Schiene kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Das Rad-Schiene-System kann dabei bis zu drei verschiedene Funktionen erfüllen (siehe [KS07]):

- 1) Rad und Schiene übernehmen stets die **Tragfunktion** und stützen das Gewicht des bewegten Fahrzeugs am Boden ab.
- 2) Das Zusammenspiel von Rad und Schiene gewährleistet die **Führungsfunktion**. Es stellt also sicher, dass das Fahrzeug dem Gleisverlauf mit geringen Abweichungen folgt.
- 3) Optional kann das Rad-Schiene-System die **Antriebs-** und **Bremsefunktion** übernehmen. In diesem Punkt unterscheidet sich das RailCab von den meisten anderen Schienenfahrzeugen.

Da beim RailCab die Antriebskräfte entfallen, und die Tragkräfte für die Spurführung eine untergeordnete Rolle spielen, werden im folgenden Abschnitt nur die Querkräfte im Rad-Schiene-Kontakt betrachtet.

Alle Kräfte am Rad treten in der Kontaktfläche zur Schiene auf, die bei konventionellen Bahnen etwa $1,5 \text{ cm}^2$ groß ist (das ist ungefähr die Größe einer Centmünze). Bei den folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die Kontaktfläche ausschließlich auf der Lauffläche des Rades liegt (Einpunktkontakt). Der Zweipunktkontakt bei Spurkranzanläufen und das sogenannte Aufklettern sind für die aktive Spurführung unerheblich und werden nur kurz in Abschnitt 2.2.3 behandelt.

Es ist zweckmäßig, die Kräfte in einem kartesischen Koordinatensystem zu betrachten, dessen Achsen normal (Normalkraft N) und tangential zur Lauffläche des Rades liegen (siehe Bild 2-4). In der Tangentialebene wird zwischen der Umfangsrichtung (T_x , längs) und der Richtung parallel zur Radachse (T_y , quer) unterschieden. Bei der Normalkraft handelt es sich um eine Zwangskraft. Die Kräfte in der Tangentialebene am rollenden Rad sind sogenannte *Schlupfkräfte*, die aus einer Relativbewegung zwischen Rad und Schiene resultieren. In vielen Fällen ist

die getrennte Behandlung von Normal- und Tangentialkontaktproblem möglich (vgl. [Iwn06]).

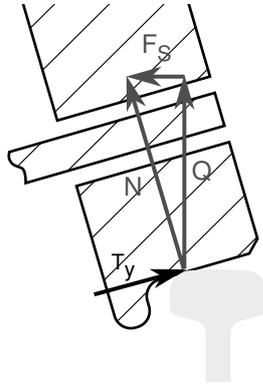


Bild 2-4: Die Kräfte am Rad im Berührungspunkt zwischen Rad und Schiene: die Normalkraft N kann in die Radstützkraft Q und die Profelseitenkraft F_S zerlegt werden, die Tangentialkraft T_y ist eine Schlupfkraft

Zwangskräfte: Die senkrecht zur Kontaktfläche stehende Normalkraft N kann abhängig vom Sturzwinkel Γ in die Radstützkraft Q und die Profelseitenkraft F_S aufgeteilt werden. Die Radstützkraft kompensiert den vom jeweiligen Rad in die Schiene eingeleiteten Anteil der Gewichtskraft. Dabei wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Gewichtskraft stets gleichmäßig auf alle vier Räder verteilt ist. Anteile von Trägheitskräften und externen Kräften (z. B. Windkräfte) an der Normalkraft werden ebenfalls vernachlässigt. Bei nicht ausgelenktem Radsatz ($y_{R,rel} = 0$) treten die Profelseitenkräfte $F_{S,r}$ bzw. $F_{S,l}$ an den Rädern einer Achse symmetrisch auf und kompensiert sich daher. Wird der Radsatz ausgelenkt, folgt daraus eine Verdrehung um ϕ_{FW} (abhängig von $y_{R,rel}$, Γ und der Spurweite sw , siehe Bild 2-5) und die resultierende Profelseitenkraft F_{rck} hat eine rückstellende Wirkung. Für kleine Winkel ϕ_{FW} kann diese Gravitationsrückstellkraft wie folgt linearisiert werden:

$$\begin{aligned}
 F_{rck} &= F_{S,r} - F_{S,l} \approx -2Q\phi_{FW} \approx \frac{4\Gamma Q}{sw} y_{R,rel} \\
 \phi_{FW} &\approx \frac{2\Gamma}{sw} y_{R,rel} \\
 Q &= \frac{mg}{4}
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

Schlupfkräfte: Die Kraftübertragung in der Tangentialebene wird durch Relativbewegungen beim Abrollen ermöglicht, die normiert auf die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v als Schlupf bezeichnet werden. Die Definition des Schlupfs, insbesondere des Querschlupfs, ist nicht eindeutig festgelegt. Je nach Detaillierungsgrad der Berechnung werden unterschiedliche Formeln eingesetzt. Lineari-

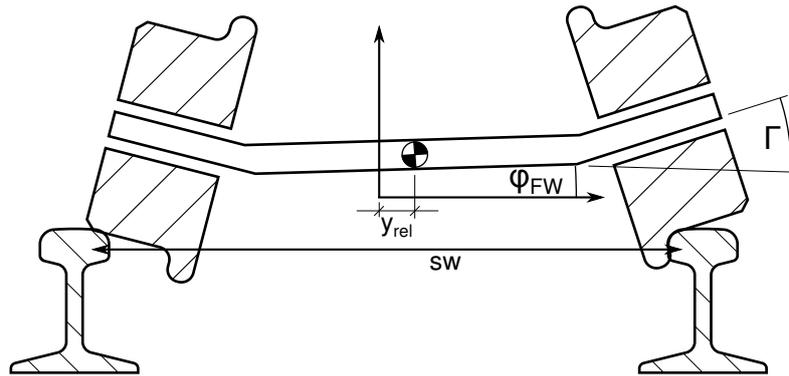


Bild 2-5: Eine quer verschobene und dadurch gekippte Achse mit Sturz

siert und unter Vernachlässigung von Wankbewegungen lauten die Gleichungen für den Längs-, Quer- und Bohrschlupf:

$$\begin{aligned}
 s_x &\approx \frac{v \pm (\dot{\psi}_{FW} + \dot{\delta}_R) \cdot sw/2 - \omega_R \cdot r_{R,eff}}{v} \\
 s_y &\approx \frac{\dot{y}_{R,rel}}{v} - \delta_R \\
 s_\psi &\approx \frac{-\Gamma_{kon} \cdot \omega_R + \dot{\delta}_R + \dot{\psi}_{FW}}{v}
 \end{aligned} \tag{2-2}$$

Dabei ist $\dot{\psi}_{FW}$ die Gierrate der Achse, δ_R der Lenkwinkel der Drehschemelachse, ω_R die Winkelgeschwindigkeit des Rades, $r_{R,eff}$ der Radius des Rades in der Kontaktfläche, $\dot{y}_{R,rel}$ die Relativbewegung zwischen Rad und Schiene quer zum Fahrzeug und Γ_{kon} das Steigungsverhältnis des konischen Rades².

Der Bohrschlupf resultiert aus einer rotatorischen Relativbewegung zwischen Rad und Schiene. Diese Relativbewegung kann ihre Ursache in einer Drehung des Rades um seine Hochachse haben und sie kann durch ein konisches Radprofil bedingt werden. Ein Konus oder Kegel rollt natürlicherweise im Kreis. Wird er in eine andere (lineare) Bewegung gezwungen, so entspricht das einer ständigen Rückdrehung, die zu Bohrschlupf führt.

Wenn zwischen zwei reibungsbehafteten Körpern beim Abrollen aufeinander eine Relativbewegung bzw. Schlupf auftritt, so bilden sich in der Kontaktfläche, wie in Bild 2-6 dargestellt, eine Haft- und eine Gleitzzone aus. Die folgende Modellvorstellung beschreibt die Vorgänge, die zum Aufbau einer Schlupfkraft an einem angetriebenen Rad führen: Ein Punkt auf der Oberfläche, der am Einlauftrand in die Kontaktfläche eintritt, verschiebt sich zunächst nicht gegenüber dem anderen Körper (Haftzone). Wohl aber tritt eine elastische Deformation auf und die Tangentialspannung nimmt kontinuierlich zu, bis die Grenze der Haftreibung

² Im Abschnitt 3.3 wird auf diese Größen genauer eingegangen.

erreicht ist. Danach beginnt die Gleitzone, in der der Punkt gleichmäßig über den anderen Körper gleitet, bis er am Auslaufrand die Kontaktfläche verlässt. Mit steigendem Schlupf wird das Gleitgebiet immer größer, bis es die gesamte Kontaktfläche einnimmt und reine Gleitreibung herrscht. Wird der Schlupf wie in Gleichung (2-2) in drei Richtungen betrachtet, so kann grundsätzlich Schlupf in jeder Richtung den Kraft- (T) bzw. Momentenaufbau (M) auch in den anderen Richtungen beeinflussen:

$$\begin{aligned}
 T_x &= T_x(s_x, s_y, s_\psi) \\
 T_y &= T_y(s_x, s_y, s_\psi) \\
 M_\psi &= M_\psi(s_x, s_y, s_\psi)
 \end{aligned}
 \tag{2-3}$$

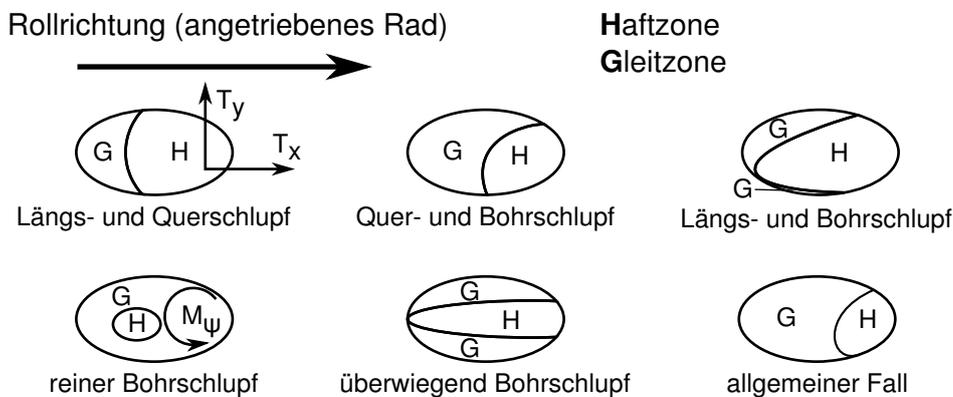


Bild 2-6: Verschiedene Konfigurationen von Haft- und Gleitzone in der Kontaktfläche (nach [Rie07]) und die resultierenden Längs-, Quer- und Bohrschlupfkraft T_x , T_y bzw. M_ψ

Die genauen Vorgänge in der Kontaktfläche sind sehr viel komplexer, da hier mechanische, chemische und atomare Effekte zwischen den Körpern und den meist vorhandenen Deck- und Zwischenschichten zusammenwirken. Die makroskopisch beobachtbare Ausbildung der Schlupfkraft wird daher durch viele Faktoren beeinflusst:

- Material von Rad und Schiene
- Beschaffenheit der Oberflächen (Rauheit, Körnung, Oxidation)
- Zustand der Oberflächen (Zwischenschichten): trocken, nass, sauber, ölig, schmierig (bei Regenbeginn oder durch Laub)
- Fahrgeschwindigkeit
- Gleitgeschwindigkeit
- Dynamische Einflüsse (Normalkraftschwankungen, Schlupfdynamik, Starrkörperschwingungen und elastische Schwingungen)

Mathematische Modelle, die versuchen, die genannten Effekte zu beschreiben, sind seit über 100 Jahren Gegenstand der Forschung [Rie07]. Zwei mögliche Ansätze sind hierbei zu unterscheiden. Zum einen analytische Ansätze, wie ihn zum Beispiel Carter (1926), Fromm (1927) oder Kalker (1964) für ihre Kraftschlussmodelle verwendet haben, zum anderen heuristische, d. h. auf Experimenten beruhende Modelle wie die von Barwell oder Frederick. Analytische Ansätze haben den Vorteil, dass die Modelle mithilfe physikalischer Größen und Parameter formuliert sind und daher an viele Situationen angepasst werden können. Der realisierbare Detaillierungsgrad ist jedoch begrenzt, sowohl was die analytische Zugänglichkeit betrifft als auch im Hinblick auf die praktische Auswertung der Formeln im Rahmen einer Simulation. Es müssen also Annahmen getroffen werden, die die allgemeine Gültigkeit des Modells einschränken. Die Formeln heuristischer Modelle dagegen werden aus Messdaten abgeleitet und so gewählt, dass sie die Daten bei vertretbarem Fehler möglichst einfach beschreiben. Heuristische Modelle können also für beliebige, messtechnisch zugängliche Konfigurationen erstellt werden. Ihre Gültigkeit beschränkt sich dann aber auch meist auf den erfassten Fall.

Die analytische Kalker-Theorie stellt heute die Basis aller Berechnungen im Bereich der Eisenbahnfahrzeuge dar. Sie geht von elliptischen Kontaktflächen aus, deren Form (Halbachsenverhältnis a/b) von den Krümmungsradien im Berührungspunkt bestimmt wird und deren Größe von der Normalkraft N , dem Schubmodul des Werkstoffes G und der Poissonzahl ν abhängt³. Die Theorie berücksichtigt Längs-, Quer- und Bohrschlupf. Bei kleinem Schlupf wird häufig die lineare Theorie nach Kalker verwendet, bei der die Kraftschlusskurve um null linearisiert wird:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ M_\psi \end{bmatrix} = G a b \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & \sqrt{a b} C_{23} \\ 0 & -\sqrt{a b} C_{23} & a b C_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_\psi \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

Die Schlupfkoeffizienten C_{ij} , die vom Halbachsenverhältnis a/b und der Poissonzahl ν abhängen, werden aus Tabellen abgelesen. Interessant ist, dass großer Bohrschlupf, wie er beispielsweise beim Lenken auftritt, auch eine Querkraft hervorruft. Da in Kalkers Modell von trockener Reibung ohne Zwischenstoffe und Feuchtigkeit und von glatten Laufflächen ausgegangen wird, was in der Realität nur selten auftritt, sind die Werte als obere Grenze zu betrachten.

Da Modelle für die Reglerauslegung möglichst gut mit der Realität übereinstimmen sollten, müssen sie gegebenenfalls zur Laufzeit angepasst werden. In diesem Fall ist eine Online-Identifikation der Modellparameter nötig. Komplizierte Mo-

³ Es wird meist vereinfachend davon ausgegangen, dass Rad und Schiene aus dem gleichen Werkstoff bestehen.

delle mit vielen Parametern sind dann eher von Nachteil. Daher wird im Folgenden das heuristische Modell von Frederich vorgestellt, das mit zwei Parametern und einer sehr einfachen Rechenvorschrift auskommt, ohne dass die Art der Deformation der Kontaktfläche oder deren Größe berechnet werden muss. Das Modell berücksichtigt nur die gegenseitige Beeinflussung der Längs- und Querrichtung. Da die Losräder der RailCabs jedoch nicht angetrieben sind, kann der auftretende Längsschlupf⁴ vernachlässigt werden. Die Formeln zur Berechnung des Querkraftschlussbeiwertes f_y (auch Seitenkraftbeiwert genannt) und der Querschluftpkraft für ein durchschnittliches Normalspurschienenfahrzeug bei trockener und schmutzfreier Fahrbahn nach Frederich lauten:

$$\begin{aligned}
 T_y &= f_y(s_y) \cdot N \\
 f_y &= a_y \cdot \left(1 - e^{-b_y \cdot |s_y|}\right) \cdot \operatorname{sgn}(s_y) \\
 a_y &= 0,38 \\
 b_y &= 576
 \end{aligned}
 \tag{2-5}$$

Die Kurve des Seitenkraftbeiwerts ist zusammen mit der Linearisierung in Bild 2-7 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass das Modell von Frederich die Sättigung wiedergibt, die durch die Gleitgrenze a_y bestimmt wird. Die Steigung des linearisierten Seitenkraftbeiwerts multipliziert mit der Normalkraft ist die aus der Fahrzeugtechnik bekannte Schräglaufsteifigkeit $c_\alpha = a_y b_y N$ (vgl. [PS93]). Bei stationär nicht verschwindendem Querschluftp (bspw. bei der Kurvenfahrt) muss um den mittleren Schlupf linearisiert werden, und die Schräglaufsteifigkeit fällt geringer aus: $c_\alpha = a_y b_y e^{-b_y |s_y|} N$. Die Parameterwerte von Frederich müssen dabei natürlich für das RailCab angepasst werden.

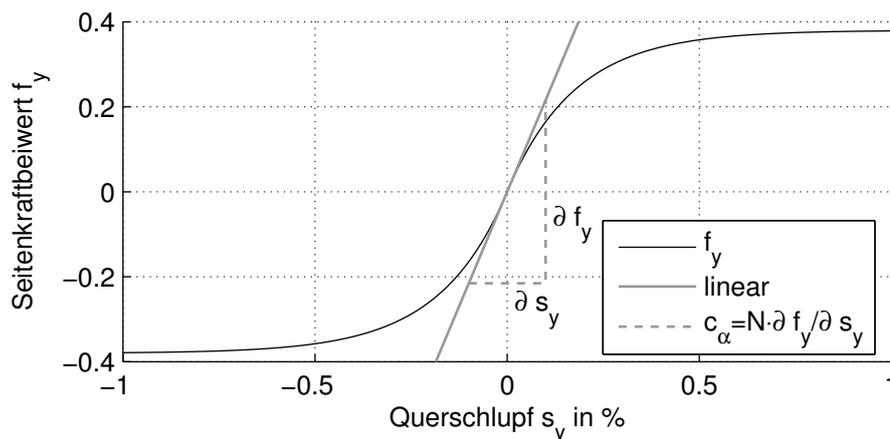


Bild 2-7: Der Seitenkraftbeiwert f_y nach Frederich und ihre Ableitung um den schlupffreien Zustand ($s_y = 0$)

⁴ Die Längsschlupfkraft beschränken sich auf Abroll-, Lager- und Drehbeschleunigungskräfte.

2.2.2 Verschleiß an Rad und Schiene

Übliche Kriterien für den Verschleiß an der Lauffläche, am Spurkranz und an den Schienen basieren auf der Reibarbeit im Gleitbereich der Kontaktfläche (vgl. [Zob97], [Iwn03] oder [Pow98]). Es gibt zwei bis drei Bereiche (je nach Quelle), in denen der Verschleiß jeweils proportional zur Reibarbeit ist: milden, heftigen und extremen Verschleiß. Die Bereichsgrenzen und zugehörigen Proportionalitätsfaktoren müssen durch Versuche ermittelt werden. Die Faktoren der Bereiche unterscheiden sich jeweils um etwa eine Größenordnung. Messen lässt sich Verschleiß als der Materialabtrag (Massenstrom) über einen Versuchszeitraum:

$$\dot{m} \propto P_{reib} = F_{reib} \cdot v_{rel} \quad (2-6)$$

Dabei gibt es eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die den Gültigkeitsbereich des Versuchs festlegen:

- Grundkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche)
- Zwischenstoff (Art, Teilchengröße u. A.)
- Gegenkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche)
- Belastung (Größe, zeitlicher Verlauf)
- Art der Bewegung (gleitend, rollend, stoßend)
- umgebende Atmosphäre (z. B. Luft, Schutzgas, Vakuum)
- Temperatur (Höhe, zeitlicher Verlauf)

In der Realität lassen sich also nur situationsabhängige statistische Werte bestimmen, die oft auf die gefahrene Strecke bezogen werden. In Simulationen lassen sich diese Größen dann kontinuierlich aus den Schlupfkraften berechnen:

$$\frac{W_{reib}}{l} = \frac{P_{reib}}{v} = T_x \cdot s_x + T_y \cdot s_y + M_\psi \cdot s_\psi \quad (2-7)$$

Bei detaillierteren Betrachtungen, wie in [Mei99] muss weiterhin berücksichtigt werden, wie sich der Verschleiß über die Kontaktfläche verteilt und ob er einer Dynamik unterliegt. Es kann z. B. zu periodischem Verschleiß am Rad (Polygonalisierung) und an der Schiene (Riffelung, Wellenbildung) kommen. Auch können Flachstellen (durch Blockieren beim Bremsen), Überwälzungen, Ausbröckelungen (durch Materialermüdungen) oder Laufflächenrisse auftreten, die sich nur sehr schlecht simulieren lassen.

2.2.3 Entgleisung durch Aufklettern

Es gibt verschiedene Gründe für Entgleisungen. Ein hoher Anteil der Entgleisungen ist auf vorangegangene mutwillige Zerstörungen an Fahrzeug und Gleis zurückzuführen ([Hai02]). Weitere Gründe sind Gleisdefekte (bspw. eine aufgeweitete Spur, tordierte Schienen oder ein verschobenes Gleisbett) und instabile Fahrzeugdynamik. Da der Zustand der Gleise nicht von der aktiven Spurführung beeinflusst werden kann und instabiles Verhalten durch eine entsprechende Auslegung generell ausgeschlossen werden muss, wird an dieser Stelle nur auf das Entgleisen durch Aufklettern eingegangen.

Ein Rad beginnt am Schienenkopf aufzuklettern, wenn hohe Querkräfte Y gemeinsam mit reduzierter Vertikalkraft Q (z. B. bei starken Gleisverwindungen oder starken vertikalen Schwingungen) auftreten (vgl. [SE97]). Hohe Querkräfte resultieren meist aus der Querbeschleunigung in Kurven oder aus großen Anlaufwinkeln und den damit einhergehenden Querschleppkräften. Ein Anlaufwinkel liegt vor, wenn die Laufrichtung des Rades nicht parallel zur Gleistangente ist.

Das Problem der Entgleisung durch Aufklettern beschäftigt die Forschung schon seit über 100 Jahren. Eins der ersten Kriterien, das aufgrund seiner einfachen Berechnung auch heute noch verbreitet ist (vgl. [DIN05] oder [IM99]), ist das Kriterium von Nadal. Auch die meisten neuere Kriterien basieren auf Nadals Kriterium. Nadals Theorie geht von der Annahme aus, dass zu Beginn des Aufkletterns Zweipunktkontakt (in der Lauffläche und am Spurkranz) herrscht, wobei der Spurkranz die Schiene in Laufrichtung vor der Lauffläche berührt und sich dort durch die größere Umfangsgeschwindigkeit an der Schiene abwärts bewegt (siehe Bild 2-8. Die aus dieser Reibung resultierende Kraft kann das Rad anheben, bis es über die Schiene hinweg rutscht. Bei Radsätzen mit starr gekoppelten Rädern findet die Abwärtsbewegung des Spurkranzes auch dann noch statt, wenn die Lauffläche sich schon von der Schiene gelöst hat, da das gegenüberliegende Rad diese Bewegung weiterhin antreibt. Ob es zum Aufklettern kommt, hängt vom Reibkoeffizienten μ im Kontaktpunkt des Spurkranzes, vom Winkel der Spurkranzflanke γ_{SK} und vom Verhältnis von Querkraft zu Radaufstandskraft Y/Q ab:

$$\frac{Y}{Q} \leq \frac{\tan \gamma_{SK} - \mu}{1 + \mu \cdot \tan \gamma_{SK}} \quad (2-8)$$

Das kritische Verhältnis Y/Q ist in Bild 2-9 für verschiedene Spurkranzwinkel γ_{SK} und Reibkoeffizienten dargestellt. Die Gefahr des Aufkletterns steigt bei einem flachen Spurkranzwinkel (z. B. durch Verschleiß), und mit einem hohen Reibkoeffizienten. Ein Anschmieren der Schienenflanken kann also Entgleisungen vorbeugen. Diese Zusammenhänge wurden generell durch Experimente bestätigt. Wenn die Bedingung eines großen Anlaufwinkels jedoch nicht erfüllt ist, kann

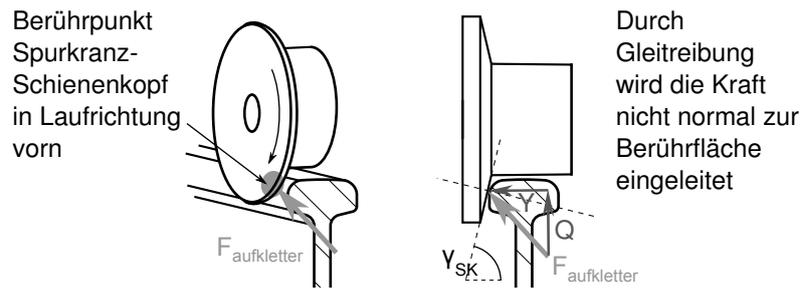


Bild 2-8: Die Kräfte am Spurkranz beim Aufklettern

das Y/Q -Verhältnis erheblich höher sein, bevor es zur Entgleisung kommt. Das Kriterium von Nadal ist also eher konservativ.

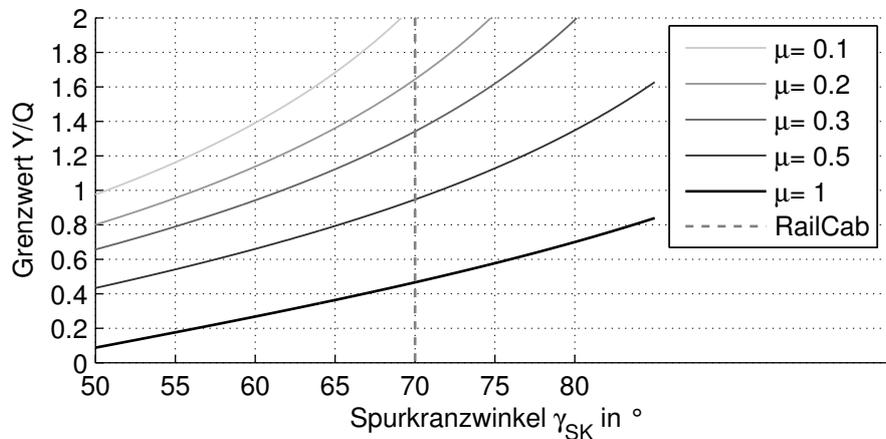


Bild 2-9: Das kritische Verhältnis von Quer- zu Normalkraft in Abhängigkeit von Spurkranzwinkel γ_{SK} und Reibungskoeffizienten μ

Das Kriterium geht davon aus, dass unmittelbar nach Überschreiten der Grenze die Entgleisung eintritt. Tatsächlich dauert es danach jedoch eine gewisse Zeit, in der weiterhin eine Überschreitung vorliegen muss, bis das Rad so weit aufgeklettert ist, dass es über die Schiene hinweg rutschen kann. Neuere Kriterien berücksichtigen dies in Form einer minimalen Überschreitungsdauer oder einer Wegstrecke, über die der Grenzwert überschritten wird (vgl. [ES97]).

Über das Aufklettern von Losradsätzen, bei denen sich beide Räder frei drehen können, gibt es unterschiedliche Theorien: Da keine selbsttätige Radialstellung in Kurven erfolgt, ist mit höheren Anlaufwinkeln zu rechnen, was die Entgleisungsgefahr erhöht. Fahrzeuge mit Losradsätzen müssen daher gesteuert oder geregelt und sehr viel kritischer überwacht werden ([FLE95]). Andererseits sind die Raddrehzahlen in Losradsätzen nicht gekoppelt. Sobald also der Kontakt in der Lauffläche beim Aufklettern abreißt, findet kein weiterer Antrieb mehr statt und die Abwärtsbewegung im Kontaktpunkt des Spurkranzes wird unterbrochen. Das Aufklettern wird dann nicht mehr von der Reibkraft unterstützt und das

Y/Q -Verhältnis könnte theoretisch bis auf $\tan \gamma_{SK}$ ansteigen. Praktische Untersuchungen hier zu gibt es jedoch nicht.

2.2.4 Achskonzepte: Radsatz und Radpaar

Sind zwei Räder über eine Welle verdreh- und biegesteif miteinander verbunden, so spricht man von einem Radsatz. Im Gegensatz dazu sind beim Radpaar (Losradsatz) die Räder einer Achse frei drehend bzw. nicht gekoppelt, die übrigen Relativbewegungen sind jedoch blockiert (oder in seltenen Fällen aktuiert: Sturz in [BTG09], Achsschenkelenkung in [MG00]).

Laufstabilität von Radsätzen

Über die Radsatzwelle haben beide Räder eines Radsatzes immer die gleiche Winkelgeschwindigkeit. Im Zusammenspiel mit konischen Radprofilen ergibt sich daraus eine kinematische Eigenschaft, auf der die Spurführung konventioneller Bahnen basiert: Ein Radsatz mit konischem Profil vollführt die in Bild 2-10 dargestellte sinusförmige Abrollbewegung. Startet der Zyklus beispielsweise in der Mitte mit leicht um die Hochachse verdrehtem Radsatz (1), so sind in der Ausgangslage beide Rollradien gleich groß. Durch die Verdrehung gegenüber dem Gleis (Anlaufwinkel) bewegt sich der Radsatz aus der Mittellage heraus (z. B. nach links). Dabei wird der linke Rollradius größer, der rechte kleiner, das linke Rad wird schneller, als das rechte und „holt auf“. Das setzt sich so lange fort, bis die Radachse senkrecht zur Gleisrichtung steht (2). Der Radsatzschwerpunkt ist nun im Scheitelpunkt maximal nach links verschoben. Danach überholt das linke Rad das Rechte und die Achse rollt zurück in die Mittellage, bis wieder die zentrische Stellung mit maximaler Verdrehung (diesmal in die entgegengesetzte Richtung) erreicht ist (3). Bei kleinen Querbewegungen lässt sich die Bewegung des Schwerpunktes in sehr guter Näherung durch eine Sinusfunktion beschreiben, weshalb diese Abrollbewegung auch *Sinuslauf* genannt wird. Ungedämpft führen daher sowohl ein Querversatz als auch ein Anlaufwinkel zu einer zyklischen Bewegung. Die Wellenlänge des Sinuslaufs in Abhängigkeit von den Einflussparametern (nomineller Radradius r , Konussteigung des Rades λ und Spurweite sw) wurde zu erst 1883 von Klingel wie folgt beschrieben ([Kli83]):

$$y(x) = y_{max} \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{2\lambda}{r \cdot sw}} \cdot x \right) \quad (2-9)$$

Da reale Radprofile nicht ideal konisch und Schienen nicht linienförmig sind, wird die Kinematik (und damit auch die Laufdynamik von Schienenfahrzeugen) stark vom Rad- und Schienenprofil (Profilpaarung) bestimmt. Weitere Parameter sind die Einbauneigung der Schienen, die Spurweite und der Verschleißzustand. Die Lage der Kontaktpunkte und die Rollradiendifferenz müssen dann in Abhängigkeit von der Relativverschiebung und der Wendebewegung berechnet werden. Zur

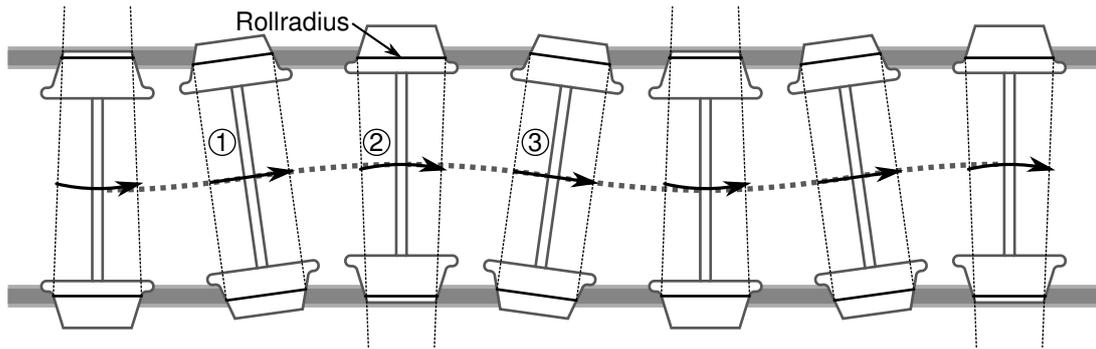


Bild 2-10: Der Sinuslauf eines konischen Radsatzes

Vereinfachung wird daher oft mit der sogenannten äquivalenten oder wirksamen Konizität gerechnet. Diese wird durch harmonische oder stochastische Linearisierung berechnet und gilt nur für eine bestimmte bzw. mittlere Amplitude der Sinusbewegung.

Da ein Radsatz nicht alleine läuft, wird seine Bewegung mehr oder weniger steif an ein Drehgestell oder an einen Wagen gefesselt (längs, quer und rotatorisch). Bei Drehgestellfahrzeugen wird zusätzlich die Bewegung zwischen Drehgestell und Wagenkasten mit sogenannten Schlingerdämpfern eingeschränkt. Im Zusammenspiel mit dem Schlupf wird dadurch der Sinuslauf gedämpft. Allerdings nimmt diese Dämpfung mit steigenden Geschwindigkeiten ab, sodass es stets eine kritische Geschwindigkeit gibt, ab der die Laufdynamik instabil wird. Da zur Optimierung der Laufdynamik oft nichtlineare Federn und Dämpfer oder Gummielemente eingesetzt werden, gestaltet sich der Nachweis der Laufstabilität von Wagen und Zügen sehr kompliziert.

Der Kompromiss bei der Fesselung von Radsätzen

Neben der Selbstzentrierung durch den Sinuslauf ergibt sich aus der Kinematik des Radsatzes ein weiterer Vorteil: In Kurven wandert der Radsatz so weit aus der Mitte, bis die Differenz der Rollradien den Laufwegunterschied zwischen kurvenäußerer und kurveninnerer Schiene ausgleicht. Eine ungefesselte Achse stellt sich also radial ein und läuft ohne Spurkranzanläufe im Bogen (siehe Bild 2-11). Durch die Fesselung im Drehgestell wird dieses Verhalten jedoch zu mindest teilweise unterbunden. Konventionelle Fahrzeuge fahren daher immer mit einem Anlaufwinkel durch Kurven, der bei engen Radien sogar zu einem dauerhaften Spurkranzanlauf führt. Der größte Anteil des Verschleißes im gesamten Streckennetz entfällt daher auf die Kurvenfahrt (vgl. [MD95] und [PBG02]). Damit liegt ein klassischer Zielkonflikt vor: Parameteränderungen, die den Bogenlauf verbessern, senken die kritische Geschwindigkeit und umgekehrt. Es werden große Anstrengungen unternommen, um diesen Zielkonflikt z. B. durch progressive Federn zu umgehen. Ähnlich wie bei der Fahrzeugfederung haben rein mechanische Lösungen jedoch klare Grenzen. Der aktuelle Stand aktiver Spurführungsansätze wird in Abschnitt 2.2.5 vorgestellt.

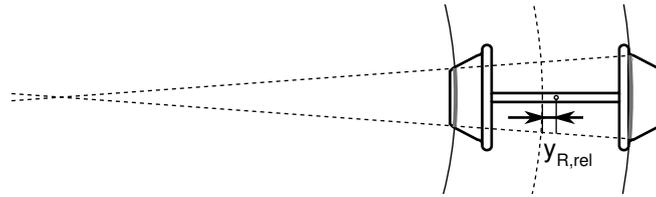


Bild 2-11: Die durch die Querverschiebung bedingten unterschiedlichen Laufradien einer ungefesselten Achse im Gleisbogen

Eigenschaften von Radpaaren

Obwohl die Nachteile von Radsätzen mit Sinuslauf seit Langem bekannt sind, gibt es nur wenige Fahrzeuge mit alternativen Achskonzepten⁵. Ansätze, theoretische Untersuchungen und akademische Versuchsträger gibt es jedoch viele (siehe z. B. [Sei83], [Har95], [FRE99], [GL00], [GK02], [PBG02], [BLM04], [Böc06] oder [FD06]). Die wichtigste Alternative sind Losradsätze, bei denen sich beide Räder frei drehen können, sodass kein Sinuslauf auftritt. Sind die Räder zylindrisch und nicht gestürzt, treten außer den Schlupfkraften keine Querkräfte oder Giermomente auf. Sind die Räder konisch oder gestürzt, ist der freie Radsatz instabil: Da sich die Räder gegeneinander drehen können, kann sich die Achse frei um ihre Hochachse drehen und wird über den Konus- oder Sturzwinkel wie eine Schraube von der Schwerkraft aus dem Gleis gedreht. Die Achse ist jedoch stabil, wenn die Drehung um die Hochachse durch eine Fesselung am Wagenkasten verhindert wird. Dann führt die Profelseitenkraft zu einer asymptotischen Rückstellung bei Querauslenkungen. Es gibt jedoch keinen Mechanismus, der einen Anlaufwinkel (z. B. aufgrund von Einstell- oder Bautoleranzen) abbaut oder eine Radialstellung in Kurven gleich der von Radsätzen bewirkt. Daher reichen schon kleine Fehler aus, um den Radsatz anlaufen zu lassen. Ohne weitere Maßnahmen ist das Losradkonzept also mit einem höheren Verschleiß verbunden. Möglichkeiten, die Nachteile von Losradsätzen zu überwinden, um die Vorteile (kein Sinuslauf, geringer Längsschlupf) auszunutzen, werden im nächsten Abschnitt besprochen.

2.2.5 Aktueller Stand der Technik und Forschung

Bei den Versuchen, die Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen zu verbessern, lassen sich passive und aktive Ansätze unterscheiden (vgl. [GM01], [GK02], [MG03b] und [GBM06]). Der überwiegende Anteil der Verbesserungen, die praktisch erprobt werden oder sogar im kommerziellen Einsatz sind, beruht auf passiven oder semi-aktiven Ansätzen.

⁵ Der spanische Hochgeschwindigkeitszug Talgo beispielsweise hat Einzelachsen mit konischen Losrädern.

Zwar sind aktiv gelenkte Schienenfahrzeuge Gegenstand fortlaufender Forschungen, jedoch konzentrieren sich diese Arbeiten hauptsächlich auf Drehgestellfahrzeuge (z. B. [GBM06]). Die Lenkstrategien beziehen sich vorrangig auf das Folgen der Gleiskrümmung in Kurven und nicht auf das Ausregeln von lokalen Gleislagefehlern (vgl. [Har95]). Es gibt jedoch auch Ansätze, höherfrequente Anregungen mit einer aktiven Primärfederung (vgl. [HSE02]) oder Lenkeingriffen (z. B. [WGL06]) auszuregeln. Wie auch in [MG01] verzichten die meisten der vorgestellten Regelungen auf eine direkte Messung des Rad-Schiene-Abstands und verlassen sich vollständig auf leichter zu erfassende Größen und die Zustandsrekonstruktion mithilfe von Beobachtern.

Konzepte für Radsatzfahrzeuge

Radsatzfahrzeuge haben den Vorteil, dass sie die vorhandene Infrastruktur ohne Modifikationen nutzen können und durch den Sinuslauf bis zu einer gewissen Geschwindigkeit inhärent sicher sind. Die meisten Verbesserungen zielen darauf ab, den Zielkonflikt zwischen Stabilität und freiem Kurvenlauf zu überwinden. Speziell bei Drehgestellfahrzeugen sind hier drei Ansätze zu unterscheiden: selbstlenkende Drehgestelle mit sich gegenseitig steuernden Achsen, kastenseitig gesteuerte Achsen und aktiv gesteuerte oder geregelte Achsen.

Die einfachste Möglichkeit zur Verbesserung des Kurvenlaufs besteht in der kinematischen Verkopplung der beiden Achsen eines Drehgestells, sodass gegenseitiges, nicht aber gleichsinniges Lenken ermöglicht wird. Diese Scheffel- oder Kreuzanker-Drehgestell genannte Modifikation befindet sich bereits im kommerziellen Einsatz. Durch den zusätzlichen Freiheitsgrad ergibt sich jedoch wieder ein Problem mit der Laufstabilität. Die erzielbare Verbesserung ist daher gegenüber dem erhöhten Aufwand nicht wirtschaftlich genug.

Eine signifikante Verbesserung besonders auf kurvenreichen Strecken, wie z. B. in Süddeutschland oder der Schweiz, kann durch die kastenseitige Steuerung der Achsen erreicht werden (vgl. [FD06]). Dabei wird die Verdrehung des Drehgestells gegenüber dem Wagenkasten mechanisch auf die Achsen übertragen. Die Achsen sind also weiterhin so starr gefesselt wie in einem konventionellen Drehgestell, in Kurven wird ihnen jedoch eine kraftfreie Radialstellung ermöglicht.

Das größte Problem bei aktiven Spurführungen stellt die Ausfallsicherheit dar (vgl. [HD07]). Da sowohl freilaufende Aktoren (Instabilität) als auch blockierte Aktoren (Anlaufwinkel) zu Entgleisungen führen können, gestaltet sich die Entwicklung von Rückfallebenen äußerst kompliziert. Dennoch ist es Bombardier mit seinem Flexx-Tronic ARS⁶ Drehgestell (das in [SH09] vorgestellt wird) gelungen, die Zulassung für ein aktives Drehgestell zu bekommen. Das Konzept sieht eine

⁶ Aktive Radialsteuerung mit Stabilisierung

komplett redundant ausgelegte Regelung und Steuerung beider Achsen vor (Sensorik, Aktorik und Rechenhardware sind doppelt vorhanden). Die beiden identischen hochdynamischen hydraulischen Schwenkmotoren verschieben die Achse über Lenker in Längsrichtung an beiden Seiten und stellen so einen Lenkwinkel ein. Dabei ist ein Antrieb nur für die Kurvenvorsteuerung zuständig, während der andere den Sinuslauf dämpft. Für den Fall, dass der vorsteuernde Aktor ausfällt, kann der andere dessen Funktion übernehmen. Mit diesem System können höhere Geschwindigkeiten bei gleicher oder sogar geringerer Gleisbelastung gefahren werden.

Es gibt auch Ansätze, den Sinuslauf durch aktive Querkräfte, also eine aktive Primärfederung zu dämpfen. Damit wird der Nachteil von Radsätzen jedoch nur unterdrückt und nicht behoben. Solange aus dem Sinuslauf keine Spurkranzläufe resultieren, führt seine Bedämpfung stets zu erhöhtem Schlupf und damit zu größerem Verschleiß.

Konzepte für Losradfahrzeuge

Der Vorteil von Losradfahrzeugen ist, dass sie das Potenzial haben, verschleißärmer zu laufen (vgl. [DSO92]). Obwohl das Radpaar für sich allein instabil ist und Anlaufwinkel nicht ausgleichen kann, gibt es Konzepte, die einen stabilen Betrieb von Fahrzeugen mit Losrädern erlauben (vgl. [Fra04]). Eine Möglichkeit, Anlaufwinkel auszugleichen, besteht darin, zwei Räder hintereinander in einem Drehgestell zu koppeln. Im Verbund bewirkt die Querzentrierung dann ein Moment, das das Drehgestell radial einstellt. Ein anderes Konzept, das der kastenseitigen Steuerung von Radsätzen ähnelt, wird bei dem kommerziellen Zug Talgo aus Spanien angewandt. Hier sind die Wagen so aneinander gekoppelt, dass der führende Wagen die Achse des Folgenden steuert und so in Kurven radial stellt.

Da die Querzentrierung bei Radpaaren ausschließlich über die Gravitationsrückstellkraft erfolgt, ist generell eine größere Steigung der Laufflächen erforderlich. Dafür wurde in [DF06] ein spezielles Radprofil für Losräder entwickelt, das einen progressiven Steigungsverlauf aufweist. Dadurch bleiben die Querkräfte und der Bohrschlupf bei Geradeausfahrt klein und in Kurven kann die Querbeschleunigung aufgebaut werden, ohne dass es zu Spurkranzläufen kommt. Mit dem neuen Profil kann der Verschleiß signifikant reduziert werden. Die Steigung der Laufflächen kann jedoch auch über den Sturz (also ohne Bohrschlupf) eingestellt werden. Dieses Konzept wird in [Sei83] zunächst theoretisch untersucht und dann mit einem Versuchsfahrzeug auf einer Normalspurstrecke validiert. Das Ergebnis der Studie ist eindeutig: Gestürzte Losräder haben das Potenzial, Radsätze als Spurführungskonzept abzulösen. Diese Aussage ist über 20 Jahre alt und es ist nicht bekannt, ob sie seither bestätigt oder widerlegt wurde.

Neben diesen konstruktiven Ansätzen zur Verbesserung des Laufverhaltens eignen sich Losradsätze besonders als Basis für vollaktive Spurführungen. Insbesondere

mit zylindrischen Laufflächen und ohne Sturz sind sie weder instabil noch selbstlenkend (Sinuslauf) und lassen sich somit leicht aktuieren. Für den aktiven Eingriff gibt es mehrere Möglichkeiten: Lenkmomente und Koppelmomente zwischen den Drehbewegungen der Räder. Sowohl Lenk- als auch Koppelmoment ermöglichen einen aktiven Eingriff in den Anlaufwinkel und damit in die Laufrichtung. Ein Koppelmoment, das die Achse über eine gezielte Drehzahldifferenz lenkt, ist eine praktische Möglichkeit, angetriebene Achsen zu regeln. Dabei können die beiden Räder wie in [Böc06] über getrennte Motoren oder wie in [FRE99] über ein Differenzialgetriebe mit variablem Moment angetrieben werden. Bei nicht angetriebenen Achsen ermöglicht eine variable Kupplung zwischen den Rädern, wie sie z. B. in [KK91] vorgestellt wird, einen stufenlosen Übergang zwischen dem Verhalten von Losrädern und dem von Radsätzen.

Bei Fahrzeugen mit höheren Geschwindigkeiten ist der Sicherheitsaspekt stets das entscheidende Hindernis für aktive Spurführungen. Den Redundanzkonzepten und Rückfallebenen kommt daher höchste Bedeutung zu. Zwar wird die Sicherheit auch von aktiven Komponenten, z. B. in der Luftfahrtindustrie, seit Langem beherrscht, die nötigen Entwicklungsprozesse sind in der Bahntechnik jedoch noch nicht etabliert. Auch sind die Erwartungen an die Kosten und die Sicherheitsstandards von Eisenbahnen nicht mit denen anderer Verkehrsmittel vergleichbar.

2.3 Selbstoptimierende Systeme – der SFB 614

Die Vision des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ an der Universität Paderborn ist eine neue Schule des Entwurfs von intelligenten mechatronischen Systemen. Diese neue Schule beruht auf einem Instrumentarium, das aus Vorgehensmodellen, Entwurfsmethoden, Werkzeugen und Praktiken besteht.

Aus der zunehmenden Durchdringung des Maschinenbaus mit Informationstechnik, also der Mechatronik, eröffnen sich erhebliche Nutzenpotenziale. Künftige Systeme des Maschinenbaus werden aus Konfigurationen von Systemelementen mit einer inhärenten Teilintelligenz bestehen. Das Verhalten des Gesamtsystems wird durch die Kommunikation und Kooperation der intelligenten Systemelemente geprägt sein. Daraus eröffnen sich faszinierende Möglichkeiten für die Gestaltung zukünftiger maschinenbaulicher Erzeugnisse. Der Begriff *Selbstoptimierung* charakterisiert diese Perspektive:

Unter Selbstoptimierung eines technischen Systems wird die endogene Änderung der Ziele des Systems auf veränderte Einflüsse und die daraus resultierende zielkonforme autonome Anpassung der Parameter und ggf. der Struktur und somit des Verhaltens dieses Systems verstanden. Damit geht Selbstoptimierung über

die bekannten Regel- und Adaptionsstrategien wesentlich hinaus; Selbstoptimierung ermöglicht handlungsfähige Systeme mit inhärenter „Intelligenz“, die in der Lage sind, selbstständig und flexibel auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren ([SFB08]).

Bei der Entwicklung konventioneller technischer Systeme für mehrere Anwendungssituationen treten Konflikte zwischen den Anforderungen auf, sodass im Entwicklungsprozess Kompromisse zwischen den Anforderungen gefunden und ausgewählt werden müssen. Das bedeutet aber, dass das entstandene technische System sich nur in den seltensten Fällen optimal für die aktuelle Anwendungssituation verhält. Einen Lösungsansatz zur Aufhebung der Anforderungskonflikte im Entwurfsprozess stellen intelligente technische Systeme dar (vgl. [GFS⁺07]). Intelligent bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Maschine ihre aktuelle Anwendungssituation erkennt, die richtige Gewichtung oder Priorisierung der Anforderungen bestimmt und daraus die erforderlichen Verhaltensanpassungen ableitet. Systeme, die diese Fähigkeiten besitzen, werden als selbstoptimierend bezeichnet. Selbstoptimierende Systeme reagieren autonom und flexibel auf sich ändernde Betriebsbedingungen. Eine gute Einführung in die Grundlagen der Selbstoptimierung wird in [Mün12] gegeben.

2.3.1 Der Selbstoptimierungsprozess

Ein selbstoptimierendes System ist insbesondere dazu in der Lage, seine Ziele selbstständig festzulegen und sein Verhalten entsprechend anzupassen. Diese Anpassung wird als Prozess definiert, der aus drei Aktionen besteht:

1. Analyse der Ist-Situation: Die betrachtete Ist-Situation umfasst den Zustand des Systems selbst sowie alle möglichen Beobachtungen über seine Umgebung, also das Umfeld des Systems. Dabei können Beobachtungen auch indirekt durch Kommunikation mit anderen Systemen gewonnen werden. In diesem ersten Schritt werden außerdem die externen Ziele ausgeprägt, die sowohl auf den Benutzer als auch auf technische Systeme im Umfeld zurückgehen können. Der Zustand eines Systems beinhaltet aktuelle sowie eventuell gespeicherte zurückliegende Beobachtungen. Ein wesentlicher Aspekt der Analyse ist die Prüfung des Erfüllungsgrades der verfolgten Ziele. Es wird festgestellt, ob die aktuell verfolgten Ziele für die gegenwärtige Situation angebracht sind.

Einflüsse können von der Systemumgebung (dem Umfeld oder Benutzer) oder von anderen technischen Systemen auf das System ausgehen. Dabei werden Einflüsse, die den Zweck des Systems behindern oder verhindern, als Störgröße betrachtet. Diese sind meist nicht geplant, nicht vorhersehbar und un-

strukturiert. Vorgaben dagegen kommen geplant und haben einen gezielten Einfluss auf das System.

2. Bestimmung der Systemziele: In der zweiten Aktion werden als Reaktion auf veränderte Einflüsse die konkreten (aktuellen) Ziele des Systems durch Auswahl oder Anpassung neu festgelegt (siehe auch Abschnitt 2.3.2). Unter Auswahl wird die Selektion einer Alternative aus einer vorgegeben, diskreten, endlichen Menge von möglichen Zielen verstanden. Eine Anpassung von Zielen beschreibt dagegen die graduelle Veränderung der Ausprägung oder Gewichtung bestehender Ziele.

3. Anpassung des Systemverhaltens: Um die veränderten Ziele zu erreichen, muss das Systemverhalten angepasst werden. In dieser dritten Aktion wird also die abschließende Rückwirkung des Selbstoptimierungskreislaufes auf das System vorgenommen. Die *Verhaltensanpassung* kann durch Parameter- oder durch Strukturanpassungen erreicht werden. Unter einer Parameteranpassung wird die Anpassung eines Systemparameters verstanden, z. B. die Änderung eines Regelparameters. Strukturanpassungen betreffen die Anordnung und Beziehungen der Elemente eines Systems. Diese Änderungen erfolgen im Regelungsgesetz oder auf der nächsttieferen Hierarchieebene des Systems. Die konkrete Form der Anpassung kann je nachdem, auf welcher Ebene eines mechatronischen Systems sie stattfindet, sehr unterschiedlich ausfallen.

Ein Selbstoptimierungsprozess findet in einem System genau dann statt, wenn durch das Zusammenwirken der enthaltenen Elemente die genannten Aktionen wiederkehrend ausgeführt werden. Der Selbstoptimierungsprozess kann reaktiv (ausgelöst durch geänderte Betriebsbedingungen) und auch proaktiv (im Sinne einer regelmäßigen Planung) arbeiten. Die entscheidende Voraussetzung, um von einem selbstoptimierenden System sprechen zu können, ist die tatsächliche Anpassung der Ziele zur Laufzeit. Damit unterscheidet sich eine selbstoptimierende Regelung von einer Adaptiven dadurch, dass nicht nur das innere Modell des Reglers angepasst wird, sondern auch die Ziele, auf die hin der Regler optimiert wird (vgl. [BSK⁺06]). Dieser zusätzliche Freiheitsgrad selbstoptimierender Systeme ist in Bild 2-12 durch die äußere Rückführungsschleife dargestellt.

2.3.2 Ziele und Zielsysteme

Allgemein formulieren Ziele die geforderten, gewünschten oder zu vermeidenden Eigenschaften eines Systems. Die Ziele werden bereits beim Entwurf des Systems vorausgedacht, ihre gewünschten Ausprägungen allerdings erst zur Laufzeit des Systems festgelegt. Ziele unterscheiden sich demnach dahin gehend von Anforderungen, dass Anforderungen Systemeigenschaften betreffen, deren Ausprägungen

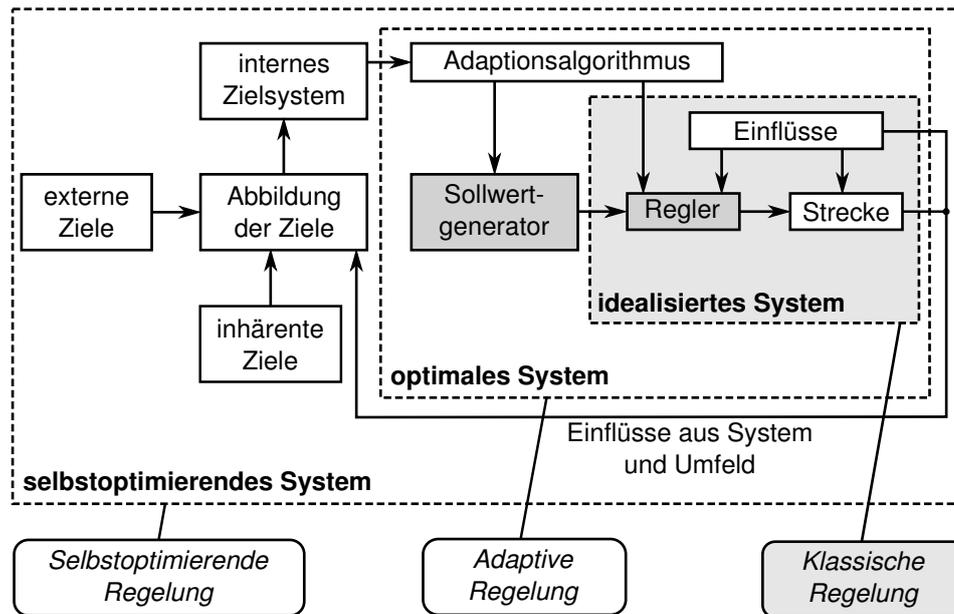


Bild 2-12: Die generelle Struktur einer selbstoptimierenden Regelung [BSK⁺ 06]

bereits während der Entwicklung festgelegt werden. Es wird zwischen externen, inhärenten und internen Zielen unterschieden.

Inhärente Ziele spiegeln den Entwurfszweck des Systems wider. Sie sind Teil der zu entwickelnden Funktionalität des Systems. Beispiele für inhärente Ziele sind die Minimierung des Verschleißes oder die Maximierung der Ausfallsicherheit eines Systems.

Externe Ziele beschreiben die von außen an das System herangetragenen Ziele. Dies kann beispielsweise durch den Benutzer oder andere Systeme aus dem Umfeld geschehen. Externe Ziele sind beispielsweise bei einem Fahrzeug der vom Benutzer gewünschte Fahrkomfort oder bei einem Energieversorgungssystem die von den Verbrauchern gewünschte zur Verfügung stehende Leistung.

Interne Ziele sind diejenigen Ziele, die zu einem konkreten Zeitpunkt vom System verfolgt werden. Interne Ziele können durch Auswahl, Priorisierung, Gewichtung usw. von inhärenten und externen Zielen festgelegt werden. Dies unterliegt der Kontrolle des Systems.

Als Zielsystem wird ganz allgemein eine Menge von Zielen bezeichnet, die miteinander in Beziehung stehen. Im einfachsten Fall kann dies ein Zielvektor sein, also eine schlichte Menge von Zielen. Existieren darüber hinaus Ordnungsbeziehungen zwischen den Zielen, beispielsweise durch eine Priorisierung oder durch die Dekomposition von Zielen in Teilziele, wird von einer Zielhierarchie gesprochen. Komplexere Zusammenhänge, wie wechselseitige Beziehungen zwischen Zielen, lassen sich durch Zielgraphen abbilden (vgl. [SFB08]).

2.3.3 Makrostruktur

Um die Regelung komplexer mechatronischer Systeme beherrschbar zu machen, wird die Informationsverarbeitung modular hierarchisch strukturiert (vgl. [EHL⁺01]). Die Unterteilung des Systems in einzelne Aggregate orientiert sich dabei an der (Gebrauchs-)Funktionshierarchie. Bei mechatronischen Systemen ist das meist die Hierarchie der Bewegungsfunktionen. Dazu werden, ausgehend von den Anforderungen, die Hauptgebrauchsfunktionen des Systems identifiziert und diese immer weiter in ihre Teilfunktionen zerlegt. Dies gewährleistet die in der Mechatronik zentrale Einheit von physikalischen Bauelementen mit den sie steuernden und regelnden Software-Modulen.

Jedes Informationsverarbeitungs-Modul besitzt die Mikrostruktur des Operator-Controller-Moduls (OCM, siehe nächster Abschnitt). Jedes Systemelement erhält also die gleichen Schnittstellen, die die Funktion des Moduls nach außen hin kapseln⁷, und damit eine inhärente Teilintelligenz ermöglichen.

Bei der hierarchischen Modularisierung wird zwischen mechatronischen Funktionsmodulen (MFM) und mechatronischen Funktionsgruppen (MFG) unterschieden. Sowohl die Module als auch die Gruppen können über eine eigene mechanische Tragstruktur und eigene Sensoren verfügen. Beiden ist in allen Fällen ein eigenes OCM zugeordnet. Die Unterscheidung ergibt sich dadurch, dass ein MFM über eigene Aktorik, also eine physikalische Regelstrecke verfügt, während eine MFG einen übergeordneten Regelkreis mit anderen MFG oder MFM als Strecke bildet.

Eine Sonderrolle im Bezug auf die Informationsverarbeitung nimmt die oberste Hierarchieebene ein, da sie die ohnehin schon komplexen Funktionen aller (Haupt-)Gruppen koordinieren muss und gleichzeitig für die Kommunikation mit dem Benutzer zuständig ist. Diese beiden Aufgaben erfordern Algorithmen und Strukturen, die bei anderen MFG eher selten auftreten. Daher wird die MFG an der Wurzel des Hierarchiebaums auch Autonomes Mechatronisches System (AMS) genannt.

Die Reglerstruktur, die sich aus einer derartigen Hierarchisierung und Unterteilung in einzelne OCM ergibt, wird nach [LHL01] *verallgemeinerte Kaskade* genannt. In [LEH⁺02] wird dieses Prinzip auf die Strukturierung des RailCabs angewandt. Wie bei der klassischen Kaskadenregelung werden die Regler von unten nach oben ausgelegt, wobei die Abtastzeit meist nach oben hin abnimmt. Im

⁷ Die Strukturierung weist viele Parallelen zur Objekt-Orientierten Programmierung auf. So sind z. B. die Kapselung der Funktion und die Trennung von Klasse und Instanz von zentraler Bedeutung. Beides sind zentrale Eigenschaften eines OCM, das eine logisch abgeschlossene Einheit mit möglichst kompakten Schnittstellen darstellt.

Gegensatz zur klassischen Kaskade kann eine höhere Ebene in der verallgemeinerten Kaskade mehrere Teilregler ansteuern. Die Stellgrößen der höheren Ebene sind dabei meist die Führungsgrößen der unterlagerten Regler, es handelt sich also um eine Steuerung. Eine Regelung im klassischen Sinne der Kaskade, bei der die höhere Ebene eine Messung an unteren Ebenen vornimmt, sollte vermieden werden. Die Kommunikation zwischen den Modulen erfolgt strikt entlang der Kanten des Hierarchiebaums. Eine höhere Ebene kann also mehrere Teilregler ansteuern, aber nicht mehrere höhere Ebenen dieselbe Subebene. Bei der Auslegung unterscheiden sich die unterlagerten Regelkreise von den überlagerten: Bei den physikalischen Regelstrecken handelt es sich oft um Eingrößensysteme mit mehr oder weniger stark ausgeprägter Nichtlinearität. Mit jeder Hierarchieebene nehmen dann die Regelgrößen, Zustände und auch die Ziele zu, dafür kann jedoch von einem weitestgehend linearen Verhalten der unterlagerten Regelkreise ausgegangen werden. Entsprechend kommen auf unteren Ebenen Techniken des Frequenzbereichs für Eingrößensysteme zum Einsatz, während auf den hohen Ebenen vorwiegend Verfahren der Mehrgrößenregelung im Zeitbereich verwendet werden.

2.3.4 Mikrostruktur – das Operator-Controller-Modul (OCM)

Die Informationsverarbeitung eines mechatronischen (Teil-) Systems bzw. Moduls muss eine Vielzahl von Funktionen erfüllen: Ein quasi-kontinuierlich arbeitender Regelungscode regelt die Bewegungen der Strecke, Fehleranalyse-Software überwacht die Strecke auf auftretende Fehlfunktionen, Adaptionsalgorithmen passen die Regelung an veränderte Umgebungseinflüsse an, unterschiedliche Systeme werden vernetzt – um einige der Funktionen zu nennen.

Um die Übersichtlichkeit der Informationsverarbeitung zu gewährleisten, müssen die Aufgaben sinnvoll strukturiert werden. Hierzu wurde das Konzept des Operator-Controller-Moduls (OCM) eingeführt ([HSN⁺97]). Bild 2-13 zeigt diese dreiteilige OCM-Struktur im Überblick, die als Mikrostruktur für die Informationsverarbeitung selbstoptimierender Systeme genutzt wird. Der zentrale Gedanke bei dieser Strukturierung ist die starke Kapselung der Aufgaben und der zu ihrer Erfüllung notwendigen Ressourcen und Prozesse.

Die OCM-Struktur orientiert sich an der Art des Durchgriffs auf das technische System:

Der Controller ist der Regler, der im direkten Wirkungskreis mit der Regelstrecke steht. Er setzt das konfigurierte Regelgesetz um und hat keine Überwachungs- oder Entscheidungsfunktion. Seine Aufgabe besteht darin, das dynamische Verhalten des physikalischen Systems in gewünschter Weise zu beeinflussen. Die Software-Verarbeitung auf dieser Ebene arbeitet quasi-kontinuierlich

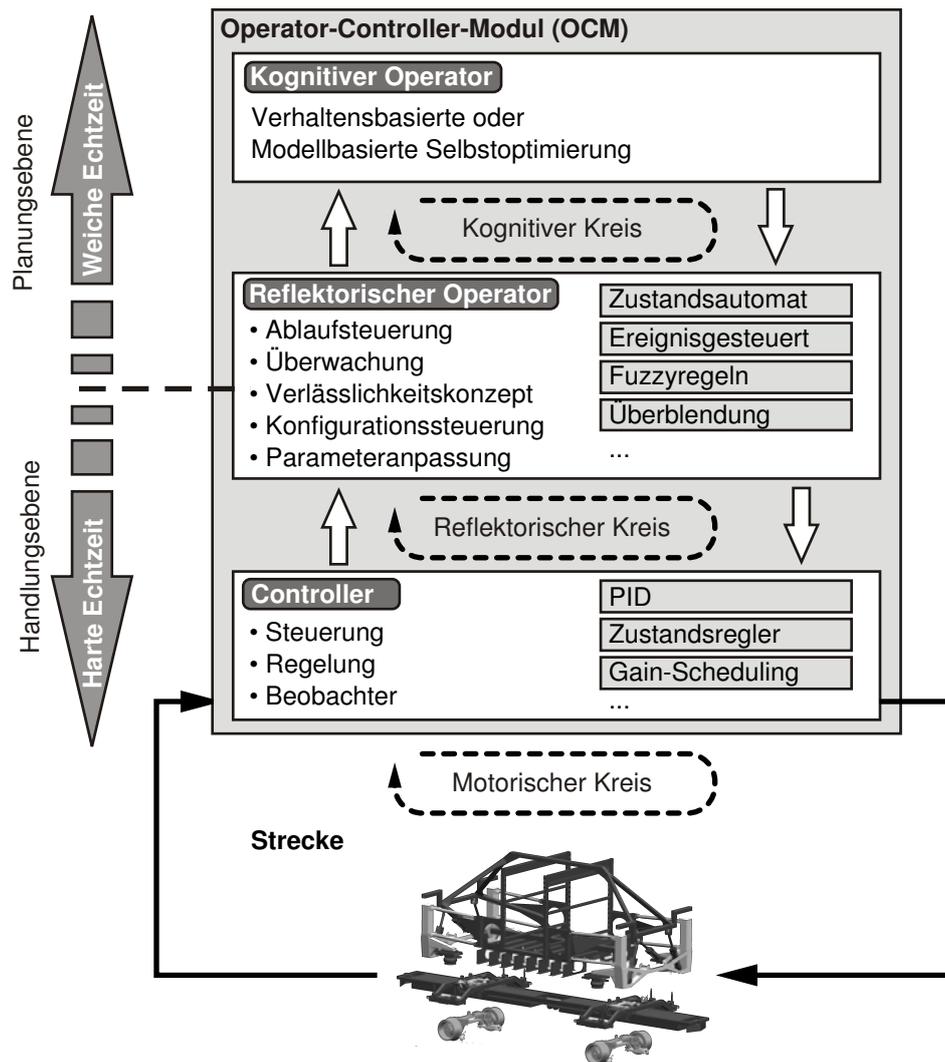


Bild 2-13: Die dreiteilige OCM-Struktur

d. h., Messwerte werden kontinuierlich eingelesen, verarbeitet und in direkter Wirkkette unter harten Echtzeitbedingungen wieder ausgegeben. Dabei kann der Controller mehrere Regler enthalten, zwischen denen umgeschaltet werden kann.

Der reflektorische Operator steuert das Verhalten, die Struktur und die Parameter des Controllers und überwacht das Systemverhalten. Ein Großteil an Hilfsfunktionen für die Automatisierung wie Ablaufsteuerung, Überwachungs- und Notfallprozesse, aber auch Adaptionsroutinen zur Verbesserung des Controllerverhaltens sind hier angesiedelt. Der reflektorische Operator greift dabei nicht direkt auf die Aktorik des Systems zu, sondern modifiziert den Controller durch Parameter- oder Strukturanpassungen.

Die Konfigurationssteuerung definiert, bei welchem Systemzustand welche Konfiguration gültig ist und wie und unter welchen Bedingungen (Reihenfolge, Restriktionen, zeitlicher Ablauf) zwischen den Konfigurationen um-

geschaltet wird. Weiterhin koordiniert der reflektorische Operator die verschiedenen Betriebszustände und Betriebsmodi. Jedes Modul hat mindestens vier Betriebszustände: „Aus“ (nicht betriebsbereit), „An“ (betriebsbereit), „Manuell“ (für den Testbetrieb) und „Fehler“ (gravierende Fehler, die einer Bedienerintervention bedürfen). In den unterschiedlichen Zuständen sind verschiedene Modi möglich, z. B. entsprechend der Fehlerursache oder dem gewünschten Testszenario.

Die Implementierung des reflektorischen Operators arbeitet überwiegend ereignisorientiert. Die enge Verknüpfung mit dem Controller und die sicherheitskritischen Funktionen erfordern eine Abarbeitung in harter Echtzeit. Der reflektorische Operator ist weiterhin das Verbindungselement zur kognitiven Ebene des OCM und vermittelt zwischen den nicht echtzeitfähigen bzw. mit weicher Echtzeit arbeitenden Elementen und dem Controller. Er nimmt Ergebnisse des kognitiven Operators entgegen, filtert diese und bringt sie in die unterlagerten Ebenen ein. Im Gegenzug werden Messwerte vom Controller zwischengespeichert und an den kognitiven Operator übergeben.

Der kognitive Operator bildet die oberste Ebene des OCM. Auf dieser Ebene kann das System durch Anwendung vielfältiger Methoden Wissen über sich und die Umgebung zur Verbesserung des eigenen Verhaltens nutzen. Der Schwerpunkt liegt hier auf den kognitiven Fähigkeiten zur Selbstoptimierung des Moduls. Der kognitive Operator kann in weicher Echtzeit arbeiten.

Zusammenfassend lassen sich zwei Trennungsebenen erkennen: Zum einen gliedert sich die Informationsverarbeitung in einen direkt auf das System wirkenden und in einen nur indirekt darauf wirkenden Kreis. Diese Einteilung entspricht der Einteilung in Operator und Controller. Zum anderen lässt sich die Informationsverarbeitung nach harter und weicher Echtzeitanforderung trennen. Diese Einteilung führt zu einer Trennung zwischen kognitivem Operator einerseits und reflektorischem Operator und Controller andererseits. Diese beiden Trennungsebenen der OCM-Architektur ermöglichen die benötigten Vorhersagen über kritische Verhaltensaspekte (Stabilität, Zeitinkonsistenzen, Verklemmungen), wodurch ein sicherer Betrieb des Systems gewährleistet werden kann.

Die drei Aktionen der Selbstoptimierung – Ist-Analyse, Zielbestimmung und Verhaltensanpassung – können mithilfe der OCM-Architektur auf vielfältige Art und Weise durchgeführt werden. Muss die selbstoptimierende Anpassung Echtzeitanforderungen genügen, werden in einem individuell selbstoptimierenden System alle drei Aktionen im reflektorischen Operator durchgeführt. Systeme, die die Selbstoptimierung nicht in Echtzeit durchführen müssen, können aufwendigere Verfahren einsetzen, die im kognitiven Operator angesiedelt werden. Die Verhaltensanpassung erfolgt in diesem Fall indirekt unter Vermittlung durch den reflektorischen Operator, der die Anweisungen zur Verhaltensanpassung auf geeignete

Weise mit dem Echtzeitablauf des Controllers synchronisiert. Die Informationsverarbeitung eines OCM kann auf einer eigenen Rechenhardware ablaufen, sie kann sich jedoch auch gemeinsam mit anderen OCM eine Recheneinheit teilen oder sogar je nach Bedarf auf unterschiedlichen Rechenknoten ausgeführt werden.

Im SFB 614 werden die Sicherheitsfunktionen als Teil eines vierstufigen Verlässlichkeitskonzeptes betrachtet ([SGH⁺09]). Dabei wird der Systemzustand ständig überwacht und bewertet. Anhand der vier Verlässlichkeitsbereiche, in denen sich das System befinden kann, wird entschieden, ob und welche Maßnahmen zur Steigerung und Wahrung der Sicherheit zu treffen sind. Auch können die Aspekte Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit berücksichtigt werden, wenn es die Situation zulässt.

2.4 Modellbasierte Selbstoptimierung

Schon im Begriff „Selbstoptimierung“ kommt zum Ausdruck, dass die Optimierung eine wesentliche Rolle beim Entwurf und im Betrieb selbstoptimierender Systeme spielt. Die eingesetzten Verfahren hängen dabei von der Art des Einsatzes ab: ob geregelt, gesteuert oder geplant wird. Für die Regelung, die hier von Interesse ist, kommen hauptsächlich Verfahren der mathematischen Optimierung auf Basis von physikalischen Modellen zum Einsatz. Diese *modellbasierten Methoden* werden von den *verhaltensorientierten Methoden* unterschieden, die auf Blackbox-Modellen basieren und zu denen auf [ADG⁺08] verwiesen sei. Weiterhin wird zwischen diskreten und kontinuierlichen Optimierungsproblemen und -Verfahren unterschieden. Dabei sind mit diskreten Problemen vor allem solche mit diskreten Entscheidungsoptionen und groben Schrittweiten gemeint, wie sie hauptsächlich bei langfristigen Planungen eingesetzt werden. Die hier eingesetzten kontinuierlichen Methoden können durchaus auch auf diskretisierten Problemen beruhen (meist nur zeitlich, manchmal aber auch im Zustandsraum). Entscheidend aus der Sicht der Regelungstechnik ist der Charakter des Eingriffs in das System. Das Ziel aller Selbstoptimierungsverfahren ist es, den Eingriff so festzulegen, dass die Systemziele möglichst gut erreicht werden. Allgemeine Optimierungsverfahren, sowohl für statische Probleme als auch für optimale Kontroll-Probleme, sind seit langem Gegenstand der Forschung. Auf die Grundlagen und konkreten Implementierungstechniken soll daher hier nicht näher eingegangen werden, stattdessen sei auf [JS03], [Sch01] und [BV04] für statische Probleme bzw. [CB99] und [BH75] für optimale Kontrolle und Regelung verwiesen.

Optimierung im engeren Sinne, also die explizite Anwendung eines Optimierungsalgorithmus, kann im Selbstoptimierungsprozess in der zweiten Aktion (Bestimmung geeigneter Ziele), in der dritten (Systemanpassung) oder in beiden stattfinden. Letzteres ist der Fall bei den im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Verfahren. Beide Verfahren basieren auf einer Mehrzieloptimierung, bei der zunächst

die optimale Gewichtung der Ziele bestimmt wird. Mit dieser wird dann eine optimale Vorsteuerung bzw. ein optimaler linearer Regler berechnet.

Für die Optimierung werden Algorithmen gewählt, die in jedem Iterationsschritt ein gültiges und garantiert nicht schlechteres Regelgesetz als Zwischenlösung haben. Diese Algorithmen, die im Allgemeinen eine nicht vorhersehbare Laufzeit haben, können also jederzeit unterbrochen werden und sind somit bedingt echtzeitfähig. Die Optimierung zur Anpassung des Reglers wird mit einem festen Takt gestartet. Die Iterationsschritte werden jedoch in einem Task mit niedriger Priorität ausgeführt. Wenn nötig wird alle verfügbare Rechenzeit genutzt, ohne dabei wichtigere Funktionen zu blockieren.

2.4.1 Modellprädiktive Regelung

Die Theorie der *Modellprädiktiven Regelung* (MPC) ist ein sehr aktives Forschungsgebiet (eine gute Einführung geben z. B. [Mor94] oder [CB04]). *Modellprädiktive Regler* sind optimale Regler, die viele Eigenschaften anderer Konzepte in sich vereinen ([GPM89] gibt eine Zusammenfassung der unterschiedlichen Ansätze zur MPC). Zu den wichtigsten Eigenschaften zählen: die Möglichkeit, auch nichtlineare Systeme und Zielfunktionen zu verwenden, die Möglichkeit, Zustands- und Stellgrößenbeschränkungen zu berücksichtigen, die Möglichkeit, robuste Regler auszulegen und die Möglichkeit, das Regelverhalten auf vielfältige Weise zur Laufzeit anzupassen. Diese Flexibilität wird dadurch erreicht, dass das Regelgesetz als Lösung eines Optimierungsproblems zur Laufzeit periodisch neu berechnet wird. Die Optimierung wählt das Regelungsgesetz so, dass es die Zielfunktion minimiert und zwar über einen Zeitabschnitt in der Zukunft (Horizont), der mithilfe des Systemmodells und unter Berücksichtigung des aktuellen Zustands simuliert wird. Bild 2-14 zeigt den Optimierungshorizont, der immer in der unmittelbaren Zukunft liegt und so vor der aktuellen Zeit her gleitet (engl. receding horizon). Dabei ist die Zeit zwischen zwei Optimierungen sehr viel kürzer als der Optimierungshorizont. Entsprechend wird nur der erste kurze Teil der Stellwerte zur Regelung verwendet, bis die nächste Optimierung aktuellere Werte liefert. Diese Überlappung ist notwendig, um die Stabilität der MPC zu garantieren. Eine hinreichende Bedingung für die Stabilität einer MPC lässt sich nicht allgemeingültig formulieren. Oft sind jedoch eine besondere Gewichtung und ggf. eine Beschränkung des Zustands am Ende des Horizonts ausreichend (vgl. [MRR⁺00]).

Bei der Form, die das Regelungsgesetz hat, lassen sich prinzipiell drei Varianten unterscheiden:

- 1) In der klassischen MPC wird eine (zeitdiskrete) Folge von Stellwerten berechnet, von denen typischerweise nur der erste einer jeden Trajektorie zur

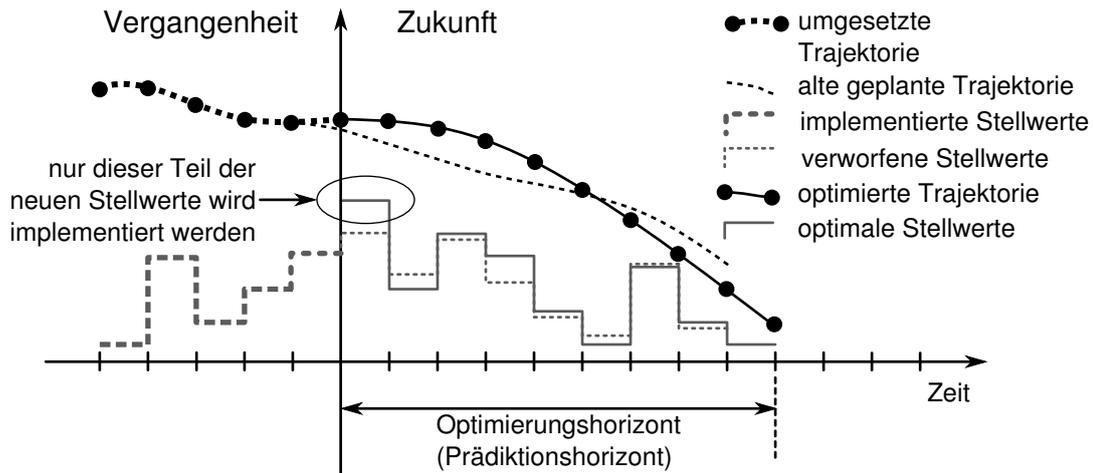


Bild 2-14: Das Prinzip der Modellprädiktiven Regelung

Regelung verwendet wird. Da bei dieser Methode die Rückführung der Messgrößen stets über die Optimierung führt, ist die Periodendauer der Optimierung auch gleich der Abtastzeit der Regelung. Sie muss daher entsprechend der Systemdynamik schnell genug gewählt werden.

- 2) Eine Weiterentwicklung der ersten Methode sieht die Stabilisierung des Systems durch ein statisches Rückführungsgesetz vor (vgl. [GKM06]). Die Optimierung bestimmt dann zusätzliche Stellwertanteile, die die Optimalität herstellen und evtl. vor der Verletzung von Beschränkungen schützen. Diese Online-Optimierung könnte damit auch langsamer sein, als es zur Stabilisierung notwendig wäre. Mit sinkender Optimierungsrate gehen jedoch auch die Vorteile verloren, insbesondere, wenn unbekannte Störungen auf das System wirken.
- 3) Die dritte Variante, die z. B. in [LXZ09] vorgeschlagen wird, sieht die gleichzeitige Optimierung von Stellgrößentrajektorien und linearen Rückführungen vor. Liegen stochastische oder beschränkte Störungen vor (siehe auch [Bat04] oder [BSW02]), so kann mit dieser Methode ein verbessertes Regelverhalten bei evtl. längeren Optimierungsintervallen erzielt werden. Die Anpassung des Rückführungsgesetzes erhöht jedoch die Anzahl der Optimierungsvariablen erheblich und führt somit zu einem höheren Rechenaufwand.

Allen Varianten gemeinsam ist der hohe Rechenaufwand, der sich aus der Online-Optimierung ergibt, und der für die große Flexibilität der Modellprädiktiven Regelung in Kauf genommen werden muss. Daher ist das klassische Einsatzgebiet der MPC eher im Bereich der Prozessregelung, da hier mit größeren Abtastintervallen gearbeitet werden kann. Für mechanische Systeme mit schneller Dynamik ist die MPC erst in letzter Zeit durch die steigende Rechenleistung interessant geworden (vgl. [RSF⁺01]). Dabei sind viele Ansätze entstanden, die mit unterschiedlichen Mitteln versuchen, die Rechenlast zu reduzieren. Diese basieren zumeist auf dem

in dieser Arbeit gewählten Ansatz, die prädiktive Planung mit einem unterlagerten Regelkreis zu kombinieren (vgl. [MW08]) oder sie setzen eine bestimmte Struktur der Systemdynamik, der Zielfunktion und der Nebenbedingungen voraus (z. B. in [Gra12]).

Andere Methoden basieren auf der Offline-Optimierung von Kennfeldern, die dann zur Laufzeit nur noch durchsucht werden müssen. Dabei geht jedoch die Flexibilität von Online-Optimierungen verloren, die es ermöglichen, die Zielfunktionen zur Laufzeit anzupassen (siehe z. B. [PAB⁺04], [KJM12]). Da allgemeine Optimierungsalgorithmen schon seit langer Zeit perfektioniert werden, ist eine effiziente und gleichzeitig in allen Aspekten flexible Lösung auch in Zukunft nicht zu erwarten.

Die Forschung konzentriert sich daher vermehrt auf die implizite Berücksichtigung von Störungen und die Robustheit gegenüber Unsicherheiten (vgl. [BM99] oder [PB06]). Besonders im Bereich der echtzeitfähigen Regelung von Systemen mit schneller Dynamik wurden einige Fortschritte erreicht. Die vorgestellten Methoden unterscheiden sich jedoch grundlegend von der Selbstoptimierung in sofern, als dass die „Anpassung“ an eine störende Umwelt fest im Optimierungsalgorithmus eingebaut ist und nicht in Form von veränderten Zielen von außen vorgegeben werden kann. In einigen Arbeiten, wie z. B. in [MHJ⁺02] oder [BP09], wird zwar vorgeschlagen, die Zielfunktion der Optimierung zur Laufzeit anzupassen, es werden jedoch keine konkreten Vorschläge gemacht, nach welchen Kriterien die Anpassung stattfinden soll. Es gibt zwar einige interessante Ansätze, die Mehrzahl der Arbeiten behandelt jedoch die theoretischen Grundlagen, die mit Simulationsergebnissen von zumeist akademischen Beispielen verifiziert werden. Von Selbstoptimierung mit Praxisbezug wird in den Arbeiten aus dem SFB berichtet, z. B. in [HOG04], [TMV06], [MT06], [HMS04], [OHK⁺02], [OMH⁺08], [KRB⁺06] oder [SFB04].

2.4.2 Selbstoptimierung und Mehrzieloptimierung

Für die Selbstoptimierung spielt die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Zielfunktionen eine wesentliche Rolle. Insbesondere für den Ingenieur ist die klassische, skalare Optimierung unzureichend, da aus den Anforderungen an ein technisches Produkt stets mehrere Ziele resultieren. Das Konzept der Mehrzieloptimierung wird diesem Umstand gerecht. Dazu werden alle Anforderungen so detailliert wie möglich und nötig in Form von sinnvoll formulierten, physikalisch oder ökonomisch interpretierbaren Zielfunktionen beschrieben. Dabei gibt es grundsätzlich zwei Arten von Anforderungen:

- 1) Kriterien, deren Wert von vornherein festgelegt oder festen Grenzen unterworfen ist (bspw. Stellwertbegrenzungen).

- 2) Kriterien, deren Wert möglichst klein sein soll. Bei mehreren zu minimierenden Kriterien ist weiterhin oft eine bestimmte Priorisierung (vgl. [Ng08]) oder ein gewünschtes Verhältnis zwischen den Werten bekannt.

Die Mehrzieloptimierung als Mittel zur Selbstoptimierung ist sehr transparent. Einerseits wird der Entwickler dadurch angehalten, alle Anforderungen exakt als mathematische Optimierungsziele zu definieren. Andererseits versetzt ihn die Formulierung der Ziele in Form von mathematischen Funktionen in die Lage, das gewünschte Systemverhalten präzise zu beeinflussen. In Kombination mit dem modellbasierten Ansatz zur Selbstoptimierung haben auch die Einflussparameter (Optimierungsvariablen) einen interpretierbaren Sachbezug. Insbesondere in der Entwicklungsphase ist diese Zugänglichkeit der Optimierungsergebnisse sehr hilfreich, z. B. bei der Fehlersuche, der Validierung oder dem Funktions- und Sicherheitsnachweis bis hin zur Zulassung. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass es Methoden gibt, diesen Ansatz in einem effektiven Selbstoptimierungsverfahren umzusetzen.

2.4.3 Grundlagen der Mehrzieloptimierung

Die Lösung eines Mehrzieloptimierungsproblems ist typischerweise nicht mehr ein eindeutiges Optimum, sondern eine Menge optimaler Kompromisse – die sogenannte *Pareto-Menge*. Mathematisch formuliert stellt sich ein Mehrzieloptimierungsproblem wie folgt:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \mathbf{J}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{J}(\mathbf{x}) &= (J_1(\mathbf{x}), \dots, J_k(\mathbf{x})) \\ J_1, \dots, J_k &: \mathbb{R}^{n_{opt}} \rightarrow \mathbb{R} \end{aligned} \tag{2-10}$$

wobei \mathbf{J} als der Vektor der Zielfunktionen definiert ist und \mathbf{x} der Vektor der Optimierungsvariablen.

Da somit eine vektorwertige Funktion minimiert wird, muss die Bedeutung von ‘min’ genauer erläutert werden. Dazu wird die folgende Partialordnung \leq_p auf \mathbb{R}^k definiert: Seien $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in \mathbb{R}^k$. Dann ist der Vektor \mathbf{u} kleiner als \mathbf{v} (also $\mathbf{u} \leq_p \mathbf{v}$), falls $u_i \leq v_i$ für alle $i \in \{1, \dots, k\}$. Nun können die Lösungen von Gleichung (2-10) definiert werden: Ein Punkt $\mathbf{x}^* \in \mathbb{R}^n$ heißt *global pareto-optimal* (oder ein *globaler Pareto-Punkt* von (2-10)), falls kein \mathbf{x} existiert mit $\mathbf{J}(\mathbf{x}) \leq_p \mathbf{J}(\mathbf{x}^*)$ und $J_j(\mathbf{x}) < J_j(\mathbf{x}^*)$ für mindestens ein $j \in \{1, \dots, k\}$ (vgl. [Hil01]). Die Menge aller globalen Pareto-Punkte heißt *Pareto-Menge*, die Menge der optimalen Zielfunktionswerte heißt *Pareto-Front*. Die Punkte der Pareto-Front werden ambivalent ebenfalls Pareto-Punkte genannt.

Ein zentrales Ergebnis der Mehrzieloptimierung ist die *Karush-Kuhn-Tucker-Bedingung* (KKT). Sie ist eine notwendige und für konvexe Probleme auch eine hinreichende Bedingung für Pareto-Optimalität, hier dargestellt für Mehrzieloptimierungsprobleme ohne Nebenbedingungen (vgl. [Mie04]):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \nabla J_i(\mathbf{x}^*) &= 0 \\ \alpha_i &\geq 0 \\ \sum_{i=1}^k \alpha_i &= 1 \end{aligned} \tag{2-11}$$

Damit kann gezeigt werden, dass sich die Pareto-Menge konvexer Probleme (mit konvexen Zielfunktionen) als gewichtete Summe darstellen lässt:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(\mathbf{x}') &= \mathbf{J}^* \\ \mathbf{x}' &= \arg \min_{\mathbf{x}} \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot J_i(\mathbf{x}') \\ \alpha_i &\geq 0 \\ \sum_{i=1}^k \alpha_i &= 1 \end{aligned} \tag{2-12}$$

Aus dem Vektor der Gewichte $\boldsymbol{\alpha}$ lässt sich ein Kompromiss-Verhältnis (engl. trade-off rate) berechnen:

$$\frac{\partial J_i^*}{\partial J_j^*} = -\frac{\alpha_j}{\alpha_i} \tag{2-13}$$

Das Kompromiss-Verhältnis ist der lokale Gradient der Pareto-Front. Es gibt an, wie sich leichte Änderungen einer Zielfunktion auf die Werte der anderen auswirken. Wie in Bild 2-15 dargestellt, kennzeichnet eine sehr flache oder steile Steigung der Pareto-Front (eine geeignete Skalierung der Zielfunktionswerte vorausgesetzt) Bereiche, in denen sich eine Zielfunktion sehr stark verbessern lässt, während die andere Zielfunktion ihren Funktionswert fast nicht verändert. Diese Bereiche sollten also bei der Auswahl gemieden werden, da sie ein schlechtes „Kosten-Nutzen-Verhältnis“ aufweisen.

2.4.4 Mehrzieloptimierung, aktueller Stand der Forschung

Bei der praktischen Mehrzieloptimierung ergibt sich stets das Problem, dass die Lösung eine Menge optimaler Kompromisse ist und kein konkretes eindeutiges Ergebnis. Für die praktische Lösung von Mehrzieloptimierungsproblemen, also die Bestimmung eines bestimmten Punktes mit wünschenswerten Eigenschaften, gibt

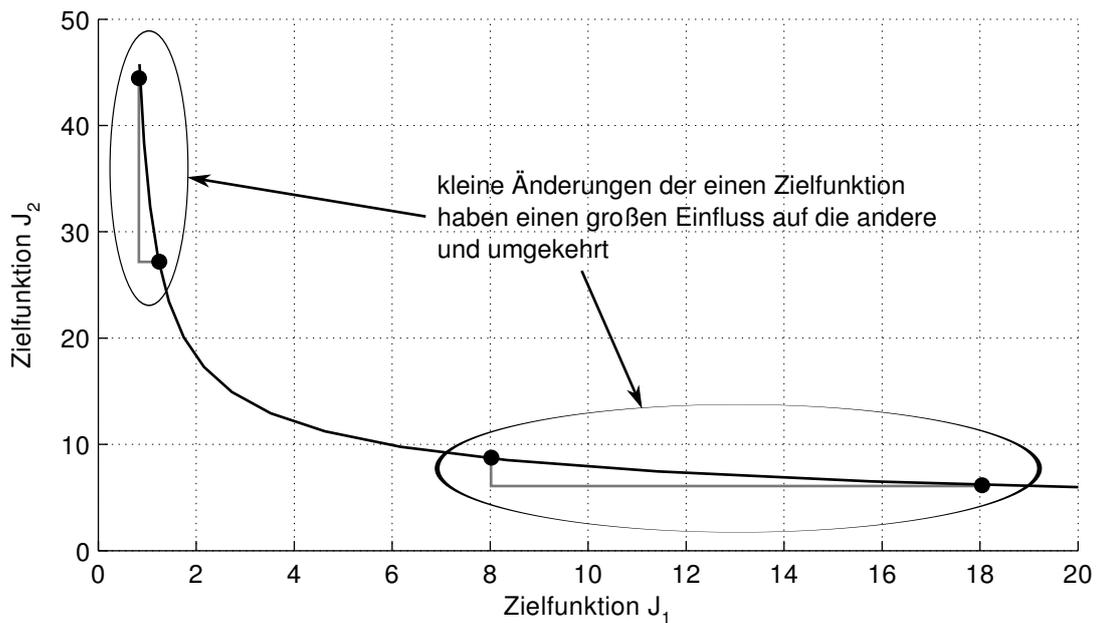


Bild 2-15: Bereiche mit großem Kompromiss-Verhältnis an einer zweidimensionalen Pareto-Front

es viele verschiedene Ansätze. Sie lassen sich grob in drei Kategorien einordnen (vgl. [CP07]):

- Interaktive Methoden
- Approximation der gesamten Pareto-Front
- Automatische Methoden

Bei den ersten beiden Methoden handelt es sich um Offline-Methoden, bei denen das Mehrzieloptimierungsproblem bereits zur Entwicklungszeit teilweise oder ganz gelöst wird, um mithilfe von Expertenwissen einen geeigneten Pareto-Punkt auszuwählen. Bei der Selbstoptimierung muss die Wahl eines geeigneten Punktes zur Laufzeit (also online) von einem autonomen Algorithmus getroffen werden. Eine Interaktion mit einem Experten kann nicht stattfinden. Das Expertenwissen muss komplett mathematisch bzw. algorithmisch formuliert werden. Aufgrund der besonderen Bedeutung dieser Kategorie der automatischen Mehrzieloptimierungsmethoden für die Selbstoptimierung wird sie in Abschnitt 2.4.5 eingehender betrachtet.

Interaktive Methoden

Die bisher am meisten erforschte Kategorie ist die der interaktiven oder auch manuellen Methoden ([MRW08] gibt einen umfassenden Überblick über die wichtigsten Methoden). Dabei werden „Kandidaten-Punkte“ im Wechselspiel mit einem Experten berechnet. Der Experte bewertet eine kleine Menge von Punkten. Unter Berücksichtigung dieser Bewertung wird algorithmisch eine neue Menge

vorgeschlagen, bis keine Verbesserung mehr erzielt werden kann. Generell kann zwischen Methoden unterschieden werden, die keine a priori Information benötigen, und solchen, die bestimmte Formen von Wissen über die gewünschte Lösung berücksichtigen.

- Wenn Wunschwerte für die Zielfunktionen bekannt sind, können z. B. sogenannte Referenzpunkt-Methoden oder das bekannte Goal-Programming (vgl. [Wie80] und [CGG⁺98]) angewandt werden.
- Oft sind auch nur Grenzwerte gefordert, die einige oder alle Zielfunktionen nicht überschreiten sollen. Dies führt zu sogenannten ε -Constraint-Methoden.
- Sind bestimmte Kompromiss-Verhältnisse gefordert, so führt dies auf eine gewichtete Summe (vgl. den vorigen Abschnitt 2.4.3).
- Es gibt auch Methoden, die eine Ordnung oder Priorisierung der Ziele berücksichtigen können (vgl. [Toi84]).

Oft sind diese a-priori-Methoden interaktiv und erlauben die gezielte Variation der Präferenzen, da im Voraus meist nicht bekannt ist, welche Zielfunktionswerte realisierbar sind und welche Kompromisse eingegangen werden müssen.

Approximation der Pareto-Front

Eine besondere Stellung nehmen Methoden ein, die auf der Approximation der gesamten Pareto-Front basieren. Ist die Gestalt der gesamten Pareto-Front bekannt, kann eine konkrete Lösung direkt ausgewählt werden. Dieser Prozess wird als *Decision Making* bezeichnet und wird vor allem im Bereich des Operations-Management schon seit Längerem erforscht. Im Unterschied zu den beiden zuvor genannten Methoden kann hier die Auswahl sowohl von einem Experten, als auch algorithmisch getroffen werden. Wird ein Punkt automatisch bestimmt, so erlaubt die Kenntnis der gesamten Pareto-Front ein ganz anderes Vorgehen, als wenn nur die gewünschten Eigenschaften des Punktes formuliert werden können, ohne die Alternativen zu kennen. Der Nachteil dieser Methode zur automatischen Mehrzieloptimierung liegt in dem hohen Rechenaufwand, der zur Approximation der Pareto-Front erforderlich ist. Ist die Gestalt der Pareto-Front von Parametern oder Störungen abhängig, die sich zur Laufzeit ändern können, so lässt sich die Pareto-Front meist nicht mehr im Voraus berechnen. Je nachdem, wie schnell sich die Einflussfaktoren ändern, ist eine Online-Berechnung auch in weicher Echtzeit nicht durchführbar.

Eine mögliche Vorgehensweise zur Approximation der Pareto-Front ist es, durch geeignete Variation der Gewichtung in Gleichung (2-12) eine gute Überdeckung zu erzielen (vgl. [ELS⁺08]). Hierbei stellt sich allerdings das Problem, dass eine gleichmäßige Schrittweite in den Gewichten nicht notwendigerweise zu einer

äquidistanten Aufteilung der Pareto-Punkte führt. Besser eignen sich mengenorientierte Methoden, wie sie z. B. im Softwarepaket *GAIIO* (Global Analysis of Invariant Objects) implementiert sind, das an der Universität Paderborn entwickelt wird ([Del06]). Diese Algorithmen können in zwei wesentliche Klassen aufgeteilt werden: die *Unterteilungstechniken* und die *Recoveringtechniken*. Die Unterteilungstechniken sind globaler Natur und eignen sich u. a. auch für Mehrzieloptimierungsprobleme, bei denen keine Ableitungen zur Verfügung stehen, sind aber auf moderate Dimensionen beschränkt. Die Recoveringtechniken sind hingegen lokaler Natur, lassen sich aber (vor allem bei glatten, d.h. hinreichend oft differenzierbaren Problemen) bei höheren Dimensionen sowohl im Urbildraum ($n_{opt} \approx 1000$ und höher) als auch im Bildraum (typischerweise $2 \leq k \leq 5$) anwenden. Mengenorientierte Methoden liefern eine feine Überdeckung der (globalen) Pareto-Front in vergleichsweise kurzer Rechenzeit.

2.4.5 Automatische Mehrzieloptimierung durch Skalarisierung

Nach der Formulierung der einzelnen Ziele muss für die automatische Mehrzieloptimierung eine eindeutige Regel zur Bestimmung eines konkreten Pareto-Punktes definiert werden. Hierbei helfen die aus den Anforderungen bekannten Grenzwerte, Prioritäten und Wunschverhältnisse. Die Auswahlregel muss so formuliert werden, dass das Mehrzieloptimierungsproblem auf ein Einzielproblem reduziert wird, da nur ein solches zu einer eindeutigen Lösung führen kann. Diese Umwandlung in ein Einzielproblem wird meist als Skalarisierung bezeichnet. Die Funktion, die die unterschiedlichen Ziele zu einem Ziel zusammenfasst, wird verschiedentlich als Skalarisierungs-, Synthese-, Wert- oder Utility-Funktion bezeichnet.

Die in dieser Arbeit angewandte Methodik zum Entwurf eines selbstoptimierenden Reglers besteht darin, die Reglerauslegung als Mehrzieloptimierungsproblem ($\mathbf{J}(\mathbf{x})$) zu formulieren, und den Zielkonflikt online durch die Minimierung einer Skalarisierungsfunktion \mathfrak{s} zu lösen, um so zu einem eindeutigen Regelgesetz \mathbf{x} zu gelangen⁸:

$$\min_{\mathbf{x}} \mathfrak{s}(\mathbf{J}(\mathbf{x})) \quad (2-14)$$

⁸ Wenn letzten Endes doch wieder ein Einzielproblem gelöst wird, so stellt sich die Frage, ob es sich dann überhaupt um eine Mehrzieloptimierung handelt. Aus Sicht des Ingenieurs muss diese Frage im Kontext der Methodik beantwortet werden: Die Formulierung getrennter Ziele und die evtl. viel später stattfindende Skalarisierung ermöglichen die Anwendung von Methoden und Erkenntnissen der Mehrzieloptimierung. So können z. B. in der Entwurfsphase Entscheidungen anhand einer Approximation der Pareto-Front getroffen werden. Das beschriebene Vorgehen ist also eine Mehrziel-Methodik, auch wenn es sich im mathematischen Sinne nicht mehr um eine Mehrzieloptimierung handelt.

Diese Optimierung wird zyklisch wiederholt. Durch die Berücksichtigung von Störungen (Umwelteinflüsse) und Parametern in der Skalarisierungsfunktion (Benutzeranforderungen) wird so implizit in jedem Anpassungszyklus ein neuer Pareto-Punkt ausgewählt, der nach den Maßgaben der Skalarisierungsfunktion optimal zu der jeweiligen Situation passt.

Formulierung der Skalarisierungsfunktion

Der Formulierung der Skalarisierungsfunktion kommt eine besondere Bedeutung zu, da in ihr das gesamte Expertenwissen in einer mathematischen Formulierung kondensiert werden muss, das bei den Offline-Methoden zur Auswahl des Pareto-Punktes nötig ist. Die Skalarisierungsfunktion vereint alle Zielfunktionen zu einem reellwertigen Skalar, sodass das Problem auf eine Einzieloptimierung reduziert wird. Neben den Zielfunktionen kann die Skalarisierungsfunktion auch von weiteren Parametern abhängen, mit denen die Eigenschaften des resultierenden Pareto-Punktes beeinflusst werden können.

Die Konturlinien von $\mathfrak{s}(\cdot)$ heißen Indifferenzkurven oder Konturlinien. Entlang einer Indifferenzkurve werden alle \mathbf{J} als gleichwertig betrachtet. Wenn $\mathfrak{s}(\mathbf{J}_A) < \mathfrak{s}(\mathbf{J}_B)$ ist, wird \mathbf{J}_A besser bewertet bzw. bei der Auswahl bevorzugt. Damit das Minimum der Skalarisierungsfunktion auch pareto-optimal ist, muss sie monoton steigend sein. Dies ist gegeben, wenn kein Punkt einer Indifferenzkurve im negativen Orthanten um einen beliebigen anderen Punkt derselben Indifferenzkurve liegt. Weiterhin sollte $\mathfrak{s}(\cdot)$ konvex sein, damit immer eine eindeutige Lösung existiert. Bei der Minimierung der Skalarisierungsfunktion wird derjenige Pareto-Punkt gewählt, in dem die Indifferenzkurven mit dem kleinsten Wert die gegebene Pareto-Front gerade noch berührt. Dies ist anschaulich in Bild 2-16 dargestellt, das die Konturlinien einer beispielhaften Skalarisierungsfunktion und drei unterschiedliche Pareto-Fronten zeigt. Die unterschiedlichen Pareto-Fronten können bei einer selbstoptimierenden Regelung z. B. daher rühren, dass das System durch eine Störung mit variierender Amplitude angeregt wird. In der Praxis treten daher meist sogar von mehreren Parametern abhängige Pareto-Front-Scharen auf, deren Form im Voraus nur schlecht oder gar nicht bestimmt werden kann.

Aus der Vielzahl von Möglichkeiten, die Skalarisierungsfunktion zu konstruieren, sollen hier einige anschauliche Beispiele vorgestellt werden, um einen Eindruck davon zu vermitteln, wie das Expertenwissen mathematisch formuliert werden kann.

Eine vielseitige und verbreitete Klasse von Funktionen hat die Minimierung des Abstands zu einem utopischen Wunschkpunkt \mathbf{J}_{ref} zum Ziel (auch „Goal-Programming“ genannt). Die Forderung, dass der Wunschkpunkt nicht in der Bildmenge der vektorwertigen Zielfunktion enthalten sein darf, garantiert, dass die Minimie-

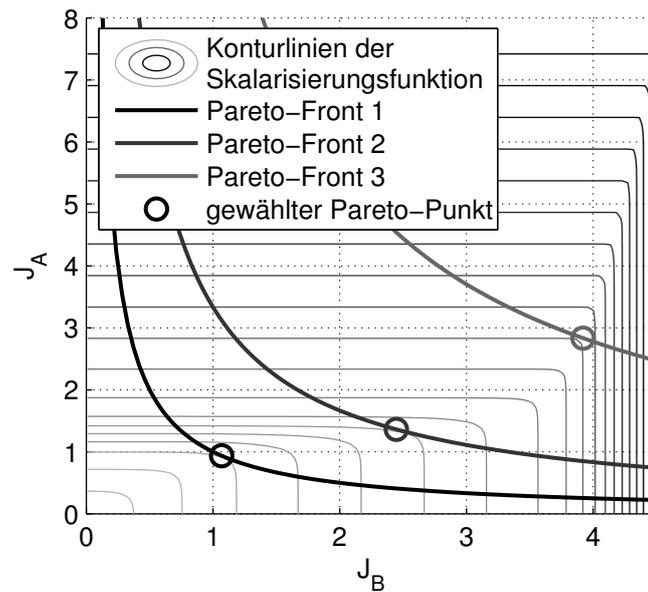


Bild 2-16: Die Konturlinien einer Skalarisierungsfunktion und drei Pareto-Fronten mit den jeweils ausgewählten Pareto-Punkten

zung der Skalarisierungsfunktion zu einem Pareto-Punkt führt⁹. Als utopischer Punkt wird häufig der Ursprung des Bildraums gewählt. Der Abstand zwischen dem Wunschpunkt und dem Pareto-Punkt kann durch jede beliebige Vektornorm definiert werden. Dabei sind die 1-, 2- und die ∞ -Norm die Bekanntesten. Um die Eigenschaften des Pareto-Punktes genauer zu beeinflussen, werden oft auch gewichtete Normen mit den Gewichtungen β_i verwendet:

$$\mathfrak{s}_p(\mathbf{J}(\mathbf{x})) = \left(\sum_{i=1}^k \beta_i \cdot |J_i - J_{i,ref}|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2-15)$$

In Bild 2-17 ist der Einfluss der gewählten Norm auf die Lage des resultierenden Pareto-Punktes dargestellt. Die Eigenschaften der drei Metriken können folgendermaßen charakterisiert werden:

1-Norm Die Gewichte β_i definieren die Normale der Tangentialebene (Indifferenzfläche), auf der der Pareto-Punkt liegt. Dies entspricht der gewichteten Summe (Gleichung (2-12)) mit $\beta_i = \alpha_i$. Die Lage des Wunschpunktes und die Betragsbildung haben hier keinen Einfluss. Die Gewichte bestimmen das bereits besprochene Kompromiss-Verhältnis.

2-Norm Die euklidische Norm ist wohl die bekannteste Norm. Als Skalarisierungsfunktion führt es zum kürzesten Abstand zwischen Wunsch- und Pareto-

⁹ Andernfalls, wenn also der Wunschpunkt im Bildbereich liegt, kann der Abstand auf null minimiert werden. Die erreichten Zielfunktionswerte gleichen dann dem Wunschpunkt, sind aber nicht pareto-optimal (es sei denn, der Wunschpunkt liegt genau auf der Pareto-Front).

Punkt im euklidischen Raum. Die Gewichte können dazu verwendet werden, die Zielfunktionen in geeigneter Weise zu skalieren. Die Indifferenzflächen sind Ellipsoide.

∞ -Norm Die auch Tschebyschow- oder Maximums-Norm genannte ∞ -Norm hat die Eigenschaft, dass immer nur das jeweils größte Element des Zielfunktionsvektors minimiert wird. Eine Optimierung, bei der mithilfe der ∞ -Norm skalarisiert wird, heißt daher auch *min-max-Optimierung*. Sie wird auch in der interaktiven Mehrzieloptimierungsmethodik nach Kreisselmeier und Steinhauser verwendet, bei der die Gewichte in mehreren Iterationsschritten angepasst werden ([KS83] und [KS79]). Für eine nicht-interaktive, autonome Mehrzieloptimierung müssen die Gewichte im Voraus festgelegt werden. Hierfür ist es hilfreich, ihren Einfluss anhand von Bild 2-18, genauer zu studieren. Daraus geht hervor, dass alle Pareto-Punkte auf einer Geraden liegen, die durch den utopischen Punkt geht und deren Richtung durch den Vektor der elementweisen Kehrwerte der Gewichte bestimmt wird. Da die ∞ -Norm nicht stetig ist, bietet es sich an, sie mit der von Kreisselmeier und Steinhauser vorgeschlagenen Formel zu approximieren:

$$\max(\mathbf{x}) \approx \hat{m}(\mathbf{x}, \rho) = \frac{1}{\rho} \cdot \log\left(\sum e^{\rho \cdot x_i}\right) \quad (2-16)$$

Dabei ist ρ ein Glättungsfaktor, mit dem die Approximationsgüte festgelegt werden kann: je größer ρ gewählt wird, desto besser wird das wahre Maximum angenähert.

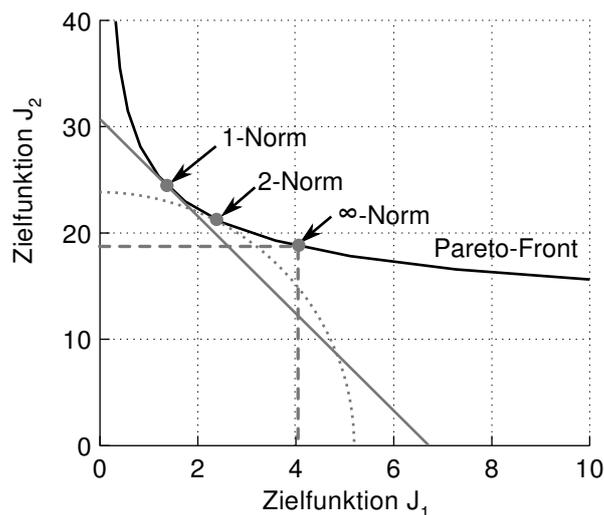


Bild 2-17: Die drei als Skalarisierungsfunktion verwendeten Normen und ihr Einfluss auf den gewählten Pareto-Punkt

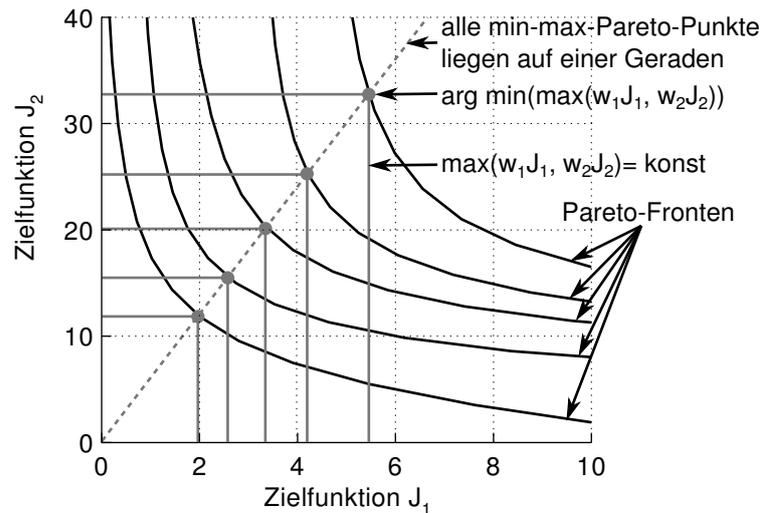


Bild 2-18: Die Gütevektoroptimierung nach Kreisselmeier und ihre Äquivalenz mit einer linearen Gleichungsbedingung

Zwei interessante Kombinationen der 1-Norm und der ∞ -Norm helfen, die Wirkung einer beliebigen Skalarisierungsfunktion besser zu verstehen: die erweiterte Tschebyschow-Norm

$$\mathfrak{s}_{max+\Sigma}(\mathbf{J}) = \max(\beta_i \cdot |J_i - J_{i,ref}|) + \sum \alpha \cdot J_i \quad (2-17)$$

und die gewichtete Summe von zwei Tschebyschow-Normen

$$\mathfrak{s}_{\Sigma max}(\mathbf{J}) = \alpha_\beta \cdot \max(\beta_i \cdot |J_i - J_{i,ref}|) + \alpha_\gamma \cdot \max(\gamma_i \cdot |J_i - J_{i,ref}|) \quad (2-18)$$

Die Konturlinien dieser beiden Skalarisierungsfunktionen sind in Bild 2-19 dargestellt. Die erweiterte Tschebyschow-Norm hat die Eigenschaft, dass, wie bei der Tschebyschow-Norm, Pareto-Punkte gewählt werden, die auf einer Geraden liegen, aber nur, wenn ihr Kompromiss-Verhältnis nicht zu groß oder zu klein ist. Die erweiterte Tschebyschow-Norm enthält also eine Sicherung gegen die Wahl von unökonomischen Punkten (vgl. Abschnitt 2.4.3). Die gewichtete Summe von zwei Tschebyschow-Normen führt zu der Wahl eines Pareto-Punktes auf einer der beiden Geraden, die den beiden Tschebyschow-Normen zugeordnet sind oder auf einer Linie dazwischen. Die Wahl richtet sich nach dem Kompromiss-Verhältnis: Kann auf der unteren Geraden eine Verbesserung des einen Ziels durch entsprechend kleine Änderungen des anderen Ziels bewirkt werden, so wandert der Punkt auf die obere Gerade und umgekehrt. Auch hier findet also primär eine Zuweisung der Verhältnisse zwischen den absoluten Zielfunktionswerten statt, aber mit zwei Alternativen und einem ökonomischen Auswahlkriterium.

Im Zusammenhang mit der Festlegung der Pareto-Punkte auf eine Linie mithilfe der ∞ -Norm ist in der Praxis die $(\cdot)_+$ -Funktion von besonderem Interesse:

$$(x)_+ = \max\{0, x\}, \quad (2-19)$$

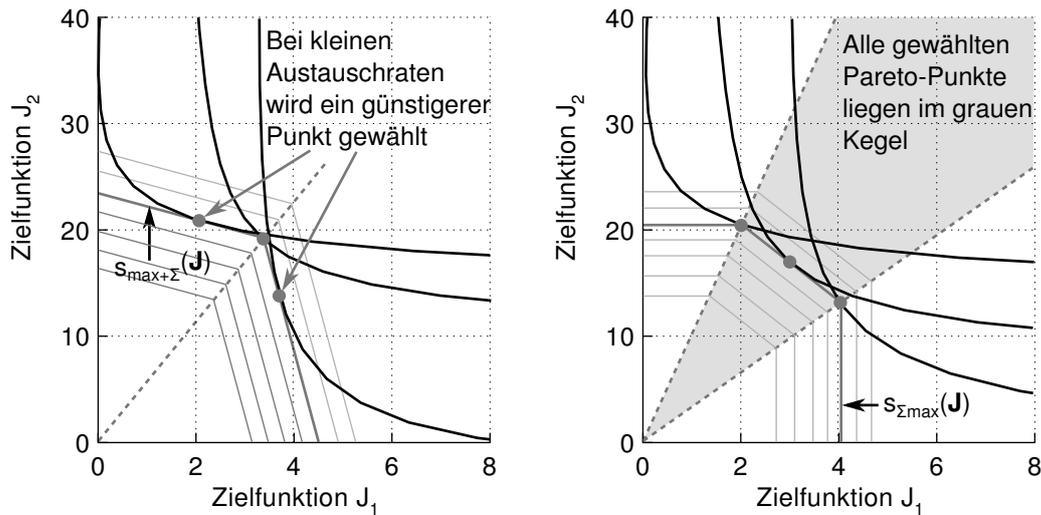


Bild 2-19: Links: die Konturlinien der erweiterten Tschebyschow Skalarisierung, rechts: die gewichtete Summe von zwei Tschebyschow-Normen, beide nach [Mie04]

bzw. ihre glatte Approximation nach [CM96] mit dem Glättungsfaktor ρ , der die Approximationsgüte festgelegt (je größer ρ gewählt wird, desto besser wird $(\cdot)_+$ angenähert):

$$(x)_+ \approx \hat{p}(x, \rho) = x + \frac{1}{\rho} \cdot \log(1 + e^{-\rho x}) \tag{2-20}$$

Mithilfe der $(\cdot)_+$ -Funktion lassen sich Kurven definieren, die aus Linienzügen mit abschnittsweise unterschiedlichen Steigungen zusammengesetzt sind. Um die praktische Relevanz dieser Vorgehensweise zu veranschaulichen, soll folgendes Beispiel betrachtet werden. Für eine SISO-Regelstrecke, auf die Störungen mit variierender Amplitude einwirken, werden die Ziele „Regelgüte“ J_y und „Stelleistung“ J_u definiert und es soll gelten: Die Regelgüte soll ca. 1 betragen, aber ab einer Stelleistung von 4 darf diese nicht viel weiter steigen. Weiterhin sollen für Stelleistungen unter 1 die Regelgüte und die Stelleistungen proportional zueinander sein. Wird nun die Stelleistungen auf die Abszisse und die Regelgüte auf die Ordinate eines Graphen gelegt, so lassen sich die Anforderungen mit dem in Bild 2-20 links dargestellten Linienzug formulieren. Dabei wird werden die unscharfen Formulierungen „Regelgüte ca. 1“ und „Stelleistung darf 4 nicht viel übersteigen“ als Geraden mit der Steigung 0,25 bzw. 10 interpretiert. Mathematisch ist dieser Linienzug wie folgt formuliert:

$$\begin{aligned}
 J_{y, \text{ soll}}(J_u) = & (1 \cdot J_u) + \\
 & ((0,25 - 1) \cdot (J_u - 1))_+ + \\
 & ((10 - (0,25 - 1)) \cdot (J_u - 4))_+
 \end{aligned} \tag{2-21}$$

Wird hierin nun die geglättete $(\cdot)_+$ -Funktion (2-20) mit $\rho = 5$ eingeführt ($J_{y,soll}(J_u)$ wird zu $\hat{J}_{y,soll}(J_u)$), so lässt sich mithilfe der geglätteten ∞ -Norm (2-16) ebenfalls mit $\rho = 5$ die folgende Skalierungsfunktion für das formulierte Problem aufstellen, deren Konturlinien in Bild 2-20 rechts dargestellt sind:

$$\mathfrak{s}_{polyline}(J_u, J_y) = \hat{m}\left([J_y, \hat{J}_{y,soll}(J_u)], 5\right) \quad (2-22)$$

Ein ähnliches Beispiel wird in Abschnitt 6.6.1 im Detail betrachtet.

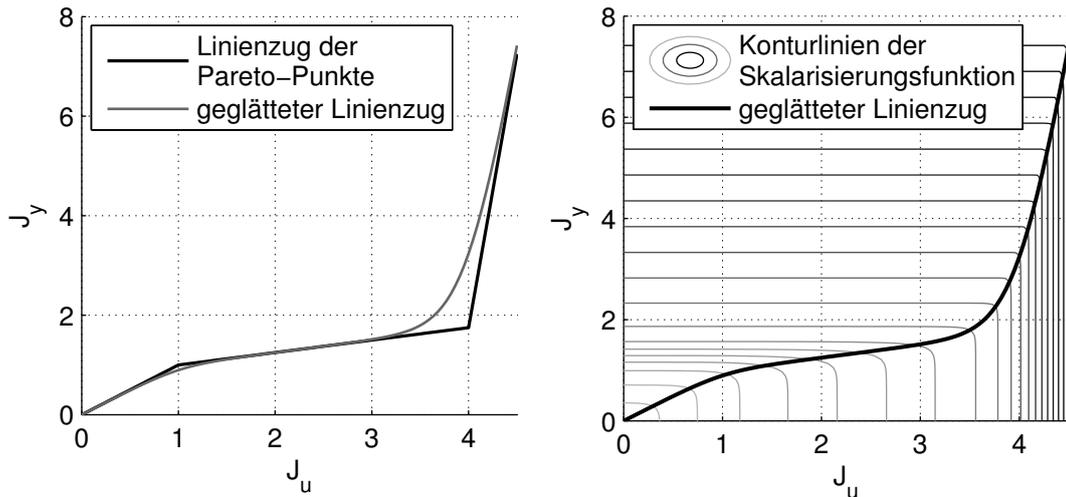


Bild 2-20: Links der Linienzug, auf dem die gewünschten Pareto-Punkte liegen sollen, rechts die Konturlinien der zugehörigen Skalarisierungsfunktion

Minimierung der Skalierungsfunktion mit Nebenbedingungen

Die Auswahl eines Pareto-Punktes durch Optimierung einer Skalierungsfunktion kann auch durch Nebenbedingungen beeinflusst werden. Dabei können die Funktion der Gleichungsnebenbedingungen und die Funktion der Ungleichungsnebenbedingungen vektorwertig sein. Die Bedingungen gelten dann elementweise. Um die Separation von Mehrzieloptimierungsproblem und Pareto-Punkt-Auswahl zu wahren, sind auch die Nebenbedingungen nicht direkt von den Optimierungsvariablen abhängig, sondern nur von dem Vektor der Zielfunktionen:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \mathfrak{s}(\mathbf{J}(\mathbf{x})) \\ \text{u.d.N. } \mathbf{F}(\mathbf{J}(\mathbf{x})) = 0, \mathbf{G}(\mathbf{J}(\mathbf{x})) \leq 0 \end{aligned} \quad (2-23)$$

Mithilfe von Gleichungsbedingungen kann das Verhältnis zwischen Zielfunktionswerten festgelegt werden. Mit Gleichungsnebenbedingungen festgelegte Pareto-Punkte liegen stets aus der durch die Gleichung beschriebenen Kurve bzw. Fläche. Darin ist die Wirkung Gleichungsnebenbedingungen sehr ähnlich der der ∞ -Norm in der Skalierungsfunktion. Im Gegensatz zur ∞ -Norm, die unstetig ist, und für die meisten Anwendungen nach Gleichung (2-16) geglättet werden muss, kann die Festlegung mithilfe von Gleichungsbedingungen exakt erfolgen,

da es viele effiziente Methoden gibt, Gleichungsbedingungen bei der Optimierung zu berücksichtigen. Die Platzierung von Pareto-Punkten auf festgelegten Linien ist oft intuitiver und in seiner Wirkung vorhersehbarer, als der Zugang über die Konturlinien der Skalierungsfunktion. In der Praxis lassen sich viele Anforderungen in Form solcher Linie beschreiben. Ein Hinweis für diese Art von Regel sind Sätze wie etwa: „Die Regelgüte in x-Richtung soll doppelt so gut sein wie in y-Richtung“ (Ursprungsgerade mit Steigung 2) oder: „Der Regelfehler soll 3 mm betragen“ (achsparelle Gerade bzw. Fläche).

Häufig sind physikalische oder ökonomische Begrenzungen Bestandteil der Anforderungen an einen Regler. Sie lassen sich leicht als Ungleichungsnebenbedingungen formulieren. Eine spezielle Mehrzieloptimierungsmethode in diesem Zusammenhang ist die sogenannte ε -Constraint-Methode. Dabei werden alle Zielfunktionen bis auf eine als Nebenbedingungen der Form $J_i \leq \varepsilon_i$ aufgefasst und nur die verbleibende Zielfunktion in einer Einzieloptimierung minimiert.

Bei der Formulierung der Ungleichungen ist unbedingt darauf zu achten, dass alle Bedingungen stets erfüllt werden können, da der autonome Algorithmus zur Bestimmung des Wunsch-Pareto-Punktes sonst ohne Ergebnis terminieren muss. Weil dies oft nicht sicher zu gewährleisten ist, ist es ratsam, zusätzliche Schlupf- oder Fehlervariablen zu den Bedingungen zu addieren. Diese Variablen werden dem Minimierungskriterium in geeigneter Weise angehängt und sind null, solange die Ungleichungen erfüllt werden können.

3 Das Spurführungsmodul der RailCab-Versuchsfahrzeuge

Für den Reglerentwurf im mechatronischen Entwicklungsprozess [Hes06] und die modellbasierte Selbstoptimierung werden Modelle des Spurführungsmoduls und seiner Umgebung mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad benötigt. In diesem Kapitel werden dazu die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Modelle beschrieben, die die Grundlage für die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Regler sind.

Die Einflüsse und Wechselwirkungen werden in dem, im SFB entwickelten, Partialmodell *Umfeld* in Bild 3-1 dargestellt (vgl. [SFB08]). Die für die Funktion relevante Umgebung umfasst das gesamte Fahrzeug und den Gleiskörper, mit denen die Spurführung eine dynamisch verkoppelte Einheit bildet. Für die Selbstoptimierung sind weiterhin die Vorgaben des Benutzers und Informationen über die aktuell befahrene Strecke relevant. Der Einfluss der Temperatur auf das Verhalten wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Störungen durch Wind werden als allgemeine, unbekannte Störungen behandelt.

Zur Modellierung wird zunächst, ausgehend von der physikalischen Struktur des Fahrzeugs, ein Mehrkörpersystem (MKS) mit Kräften und Momenten abgeleitet. Dieses wird dann um die Modelle der externen Kräfte und der Aktoren und Sensoren ergänzt. Schließlich wird die Geometrie der Gleise modelliert, die im detaillierten Simulationsmodell zur Berechnung der Spurkranzanläufe dient und aus regelungstechnischer Sicht die Störgröße darstellt.

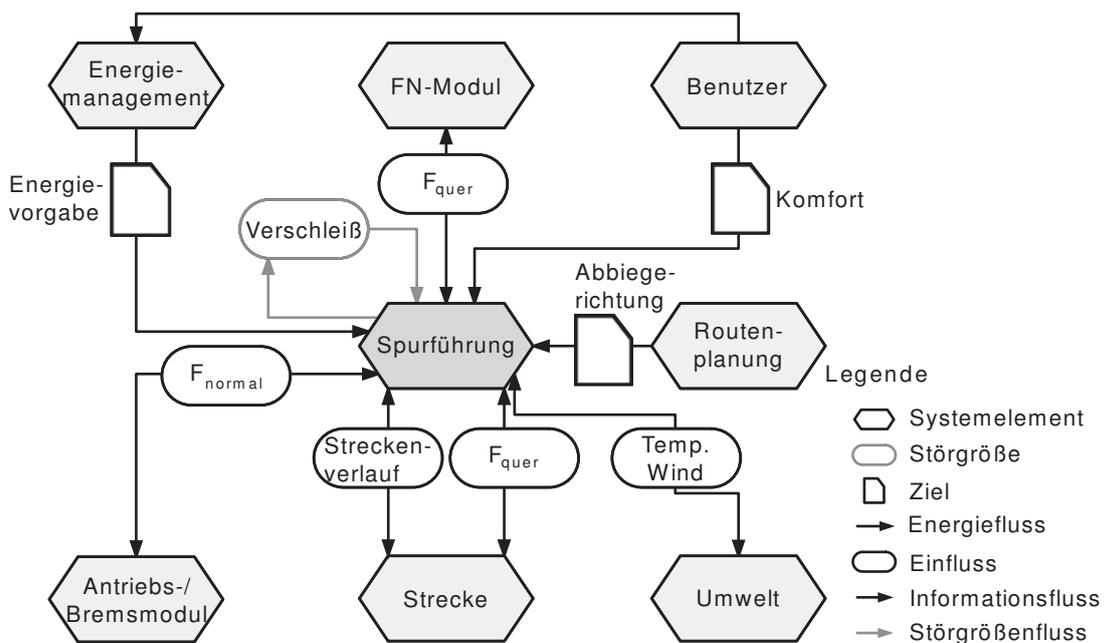


Bild 3-1: Das Partialmodell Umfeld für ein RailCab

3.1 Physikalischer Aufbau eines RailCabs

Die RailCab-Versuchsfahrzeuge (kurz RailCabs) haben die in Bild 3-2 dargestellte modulare Architektur, die im SFB mithilfe des Partialmodells *Wirkstruktur* abstrahiert wird (Bild 3-3).

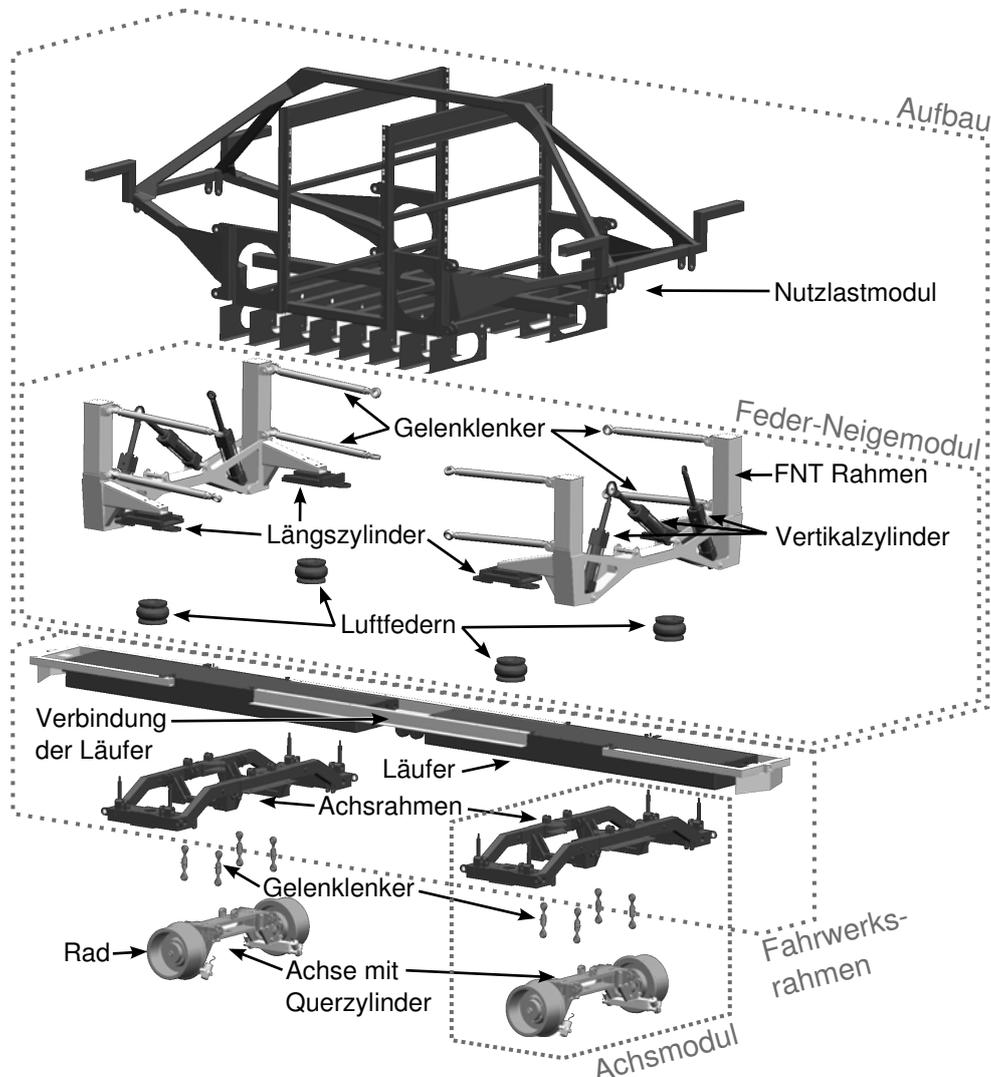


Bild 3-2: Der modulare Aufbau eines RailCabs in Explosionsansicht

Das Spurführungsmodul besteht aus zwei identischen Achsmodulen, die je ein Läuferelement des Antriebsmoduls tragen. Die Läuferelemente sind miteinander verbunden, sodass die Achsrahmen zusammen mit den Läufern einen starren Fahrwerksrahmen bilden. Die Achsrahmen sind über je vier Gelenklenker an den Achsen aufgehängt, sodass die Achsen eine Lenkbewegung, also eine Drehung um die Hochachse vollführen können und auch in Quer- und Längsrichtung frei beweglich sind. Zur Einschränkung dieser translatorischen Freiheitsgrade (DOF) sind die Achsen zusätzlich über einen senkrechten Zapfen und einen Querzylinder mit dem Achsrahmen verbunden. Der Querzylinder, der ursprünglich für eine

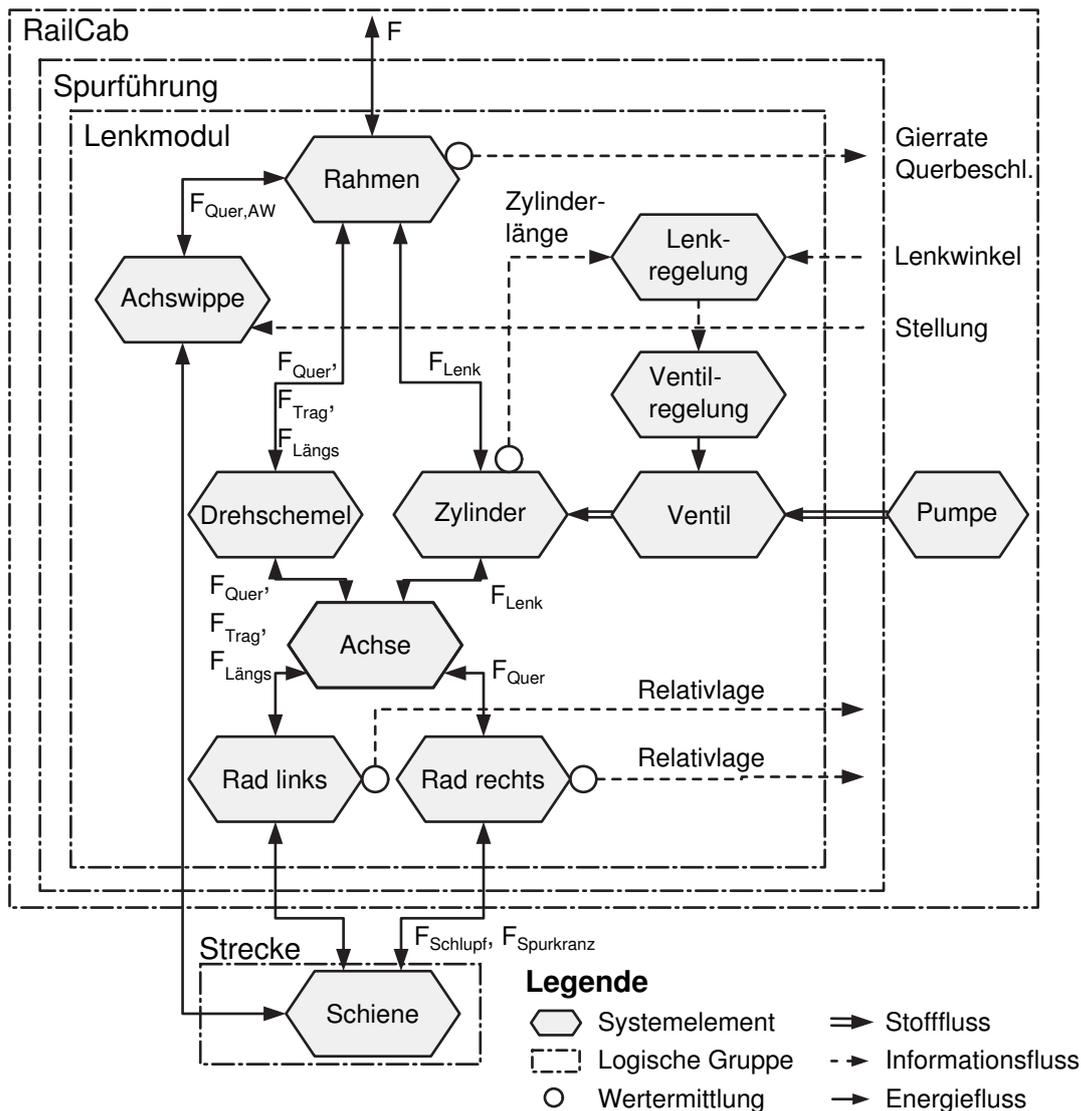


Bild 3-3: Das Partialmodell Wirkstruktur eines RailCabs

aktive Querverfederung vorgesehen war, ist durch Hartgummieinlagen in den Zylinderkammern arretiert. Damit ist die Achse in Querrichtung sehr steif an den Fahrwerksrahmen angekoppelt. Die Lenkbewegung wird durch einen positionsregulierten Differentialzylinder zwischen Achse und Achsrahmen aktuiert. An den Achsen sind die freidrehenden zylindrischen Räder mit einem Sturz von 1:40 (ca. $1,5^\circ$) montiert.

Der Aufbau, also das Nutzlastmodul zusammen mit dem Feder-/Neigemodul, ist über vier Faltenbalg-Luftfedern (Kissenform) mit dem Fahrwerksrahmen verbunden, sodass der Aufbau sechs DOF gegenüber dem Fahrwerksrahmen hat. Die Luftfedern sind mit 2,5 bar vorgespannt. Durch die Bauform bedingt und aufgrund der unterschiedlichen Volumenänderung haben Luftfedern in horizontaler und vertikaler Richtung eine unterschiedliche Federsteifigkeit. Da der hohl ausgeführte Achsrahmen als gemeinsames Zusatzvolumen für die beiden Federn einer Achse dient, kommt es bei gegensinniger Anregung zu einem Luftaustausch. Eine

Volumen- und Druckänderung findet nur durch gleichsinnige Anregung statt. Das Luftfedersystem der RailCabs hat daher in Wankrichtung eine andere Steifigkeit als beim Huben.

Am Achsrahmen sind auch die Notbremsen und die mechanische Rückfallebene für die Weichenfahrt, auch Achswippe oder Weichenwippe genannt, befestigt (siehe [SGH⁺09]). Diese werden nicht modelliert, da die Notfallsituationen, für die diese Vorrichtungen vorgesehen sind, im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

Das Feder-/Neigemodul besteht aus zwei identischen Rahmen, die auf den Luftfedern aufliegen. Zwischen jeder Feder und den Rahmen befinden sich Längszylinder, die eine Verschiebung und Verdrehung jedes Rahmens ermöglichen. Das Nutzlastmodul ist über Gelenklenker und insgesamt sechs Zylinder so mit den Feder-/Neigerahmen verbunden, dass es in allen DOF außer in x-Richtung bewegt werden kann. Somit kann das Nutzlastmodul in allen sechs DOF manipuliert werden¹. Da in dieser Arbeit die Entwicklung der aktiven Spurführung im Vordergrund steht, und ein aktiver Eingriff durch die Feder-/Neigetechnik speziell berücksichtigt werden müsste, sind alle zehn Feder-/Neigezylinder in Ruhelage blockiert, sodass der Aufbau als starre Masse betrachtet werden kann.

Die wichtigsten externen Kräfte, die auf das Fahrzeug wirken, sind: die Radkräfte, wie sie in Abschnitt 2.2.1 besprochen werden, die Längskraft im Luftspalt des Linearmotors und die Schwerkraft. Neben der Längskraft entfaltet der Linearmotor auch eine ca. viermal größere Normalkraft, die von den Rädern getragen wird und somit die Schupf- und Reibkräfte beeinflusst. Sind die Läufer gegenüber dem Stator verschoben oder verdreht, wirkt auch eine Rückstellkraft bzw. ein -Moment. Diese wurden an einem Prüfstand vermessen (siehe auch [SFB08]). Die Rückstellkraft ist so gering, dass sie bei der Modellierung vernachlässigt werden. Weiterhin werden auch Kräfte vernachlässigt, die aus der Windlast und dem Fahrwiderstand resultieren. Sie finden lediglich Eingang in das lineare Modell als stochastische Störungen.

3.2 Sensoren und Aktoren

Zur aktiven Spurführung wird eine Vielzahl an Messgrößen benötigt: teils als Ausgänge des Modells zur Zustandsrekonstruktion, teils als langsam veränderli-

¹ Da hierfür zehn Zylinder zur Verfügung stehen, verbleiben vier weitere DOF. Zwei davon führen zu einer Verspannung (in x-Richtung) bzw. Torsion (um die Längsachse). Die restlichen zwei waren ursprünglich zum Lenken der nicht verbundenen Achsmodule mit Linearmotor vorgesehen. Durch die Verbindung der Linearmotoren kommt es jedoch auch hier zu einer Verspannung.

che Parameter des Modells oder als Führungsgröße. Eine Übersicht aller verwendeten Signale ist in Tabelle 3-1 aufgelistet (eine Beschreibung der Messprinzipien findet sich in [Log08]). Die Messgrößen in den ersten drei Zeilen von Tabelle 3-1 können einfach durch eine affine Transformation aus den Spannungssignalen gewonnen werden, die die integrierten Messverstärker der Sensoren liefern. Die anderen Größen stehen auch als verstärkte Signale zur Verfügung, weisen jedoch unterschiedliche Arten von Nichtlinearität auf und müssen daher noch weiter verarbeitet werden.

Tabelle 3-1: Überblick über die Sensoren der Spurführung.

Messgröße	Beschreibung	Anz.	Anordnung	Messprinzip
$\dot{\psi}_{FW}$	Gierrate	1	Fahrwerk	Kapazitiv
$a_{FW,v}, a_{FW,h}$	Querbeschleunigung	2	Fahrwerk	Kapazitiv
$a_{A,\psi}, a_{A,o}, a_{A,u}$	Gier- und Querbeschl.	4	Aufbau	Kapazitiv
δ_{Rv}, δ_{Rh}	Lenkwinkel	2	FW-Achse	LVDT
$y_{Rv,rel}, y_{Rh,rel}$	relative Querposition	8	Achse	Wirbelstrom (WS)
v	Längsgeschwindigkeit	4	Rad	Inkremental
s_{Pos}	Streckenposition	1	Fahrwerk	WS schaltend

Der Lenkwinkel wird nicht direkt gemessen, sondern aus der Position des Lenkzylinders ermittelt. Der Zusammenhang zwischen Zylinderposition und Lenkwinkel lässt sich theoretisch aus der Kinematik bestimmen². Dazu wäre jedoch eine im Achsrahmen absolut referenzierte Position nötig, die sich nur schlecht vermessen lässt. Die Aufzeichnung einer Kennlinie mithilfe eines temporär montierten Winkelgebers erweist sich als schwierig. Daher wird die Kennlinie aus Messungen mit einem speziell zur Vermessung auf der Achse montierten Drehrahtensensor berechnet. Der bei der Integration der Drehrate unbekannt Nullpunkt des Lenkwinkels wird so bestimmt, dass die Achse nach Augenmaß geradeaus lenkt. Die Feinjustierung des Nullpunktes erfolgt mithilfe des I-Anteils der Lenkregelung bei Geradeausfahrt.

Die Querposition des Achsmittelpunktes zur Mittellinie der idealen Trassierung wird für die Folgeregelung benötigt, die die Achsen entlang der Gleislagefehler führt. Gemessen werden kann jedoch nur die Querposition relativ zur Mittellinie des tatsächlichen Gleisverlaufs ($y_{Rv,rel}, y_{Rh,rel}$). Die benötigte Querablage zur Trassierung y_R kann nur unter Kenntnis der momentanen Gleisabweichung von der Ideallinie y_{Gl} bestimmt werden (siehe auch Abschnitt 3.5):

$$y_R = y_{Gl} + y_{R,rel} \quad (3-1)$$

² Aufgrund der kleinen Lenkwinkel ($\pm 2,5^\circ$) wäre auch eine Linearisierung denkbar. Dies wird jedoch zugunsten einer höheren Genauigkeit verworfen.

Dieser Zusammenhang ist in Bild 3-4 dargestellt. Die Berechnung der relativen Querposition erfordert eine detailliertere Betrachtung und wird daher in Abschnitt 3.2.1 erläutert.

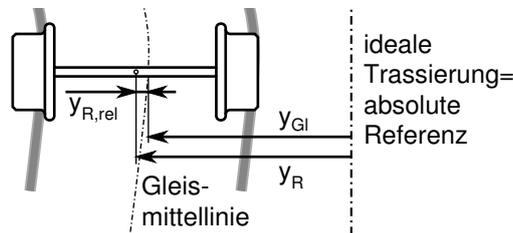


Bild 3-4: Die Zusammensetzung der modellierten Absolutlage aus der messbaren Relativlage und den geschätzten Gleislagefehlern

Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs ist ein Parameter des Einspurmodells. Sie wird über die Geschwindigkeit der vier Räder bestimmt. Dazu wird die Raddrehzahl mit hochauflösenden Inkrementalgebern gemessen. Um den Einfluss der Lenkbewegung und der Gierrate in den Radaufstandspunkten zu eliminieren, wird die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit durch den Mittelwert der vier Raddrehzahlen bestimmt.

Die Streckenposition wird benötigt, um positionsbezogene Daten, wie bspw. die Gleislagefehler oder die Kurvenkrümmung, aus den gespeicherten Tabellen zu ermitteln. Ferner ist die Streckenposition von entscheidender Bedeutung, wenn passive Weichen befahren werden sollen, um rechtzeitig in den gewünschten Spurkanal einzulenken. Die Position wird durch Aufintegrieren der Geschwindigkeit berechnet. Um die dabei unvermeidlich auftretende Drift zu korrigieren, werden Positionsmarken verwendet, die in einem Abstand von ca. 15 m zwischen den Gleisen in der Gleisebene angebracht sind. Die Lage dieser Positionsmarken ist bekannt und wird in einer Tabelle abgelegt. Beim Überfahren wird die Marke von einem induktiven Näherungsschalter erkannt und die Position auf den gespeicherten Wert korrigiert. Da die Marken selbst jedoch keine Information über ihre Lage vermitteln können, ist auch keine absolute Referenzierung möglich. Daher ist geplant, in Zukunft mit einem GPS-gestützten System zu arbeiten.

3.2.1 Relative Querpositionssensoren

Da die Querablage der Achsen (Räder) die Regelgröße der Spurführung ist, muss sie möglichst akkurat gemessen werden. Die Messung erfolgt relativ zwischen einem bewegten und einem stehenden Objekt, wobei die Bewegungsfreiheit in Längsrichtung quasi unbeschränkt ist. Messprinzipien, die eine mechanische Kopplung erfordern, sind also ausgeschlossen. Weiterhin ist der Ort, an dem die Messung erfolgen muss, im ungeschützten Außenbereich mit starker Schutzbelastung. Unter diesen Voraussetzungen wird in der Dissertation [Kra98] untersucht,

welches die optimale Methode ist, die relative Querablage von Schienenfahrzeugen zu messen. Das Ergebnis ist eindeutig: Es kommt nur das Prinzip der Wirbelstrommessung in Frage, da es als Einziges robust genug ist und unabhängig von Verschmutzungen arbeiten kann³ (für eine nähere Beschreibung des Prinzips siehe [Ric04]). Allerdings ergeben sich auch hierbei einige Probleme: Das Profil des Schienenkopfes, gegen das gemessen wird, bietet keine eindeutige Referenzfläche und ist durch Abnutzung stark variabel. Weiterhin bedingt der Verschleiß am Rad (über die gesamte Lebensdauer einige cm im Radius), dass sich das gesamte Fahrzeug und damit auch die Position des Sensors gegenüber der Schiene absenkt. Es müssen also theoretisch zwei Sensoren im Verbund eingesetzt werden: einer in horizontaler und einer in vertikaler Richtung, um die Querlage dann aus einem zuvor vermessenen zweidimensionalen Kennfeld zu ermitteln.

Die Architektur der RailCabs (nicht angetriebene Losräder mit aktiver Spurführung) hat u. A. einen möglichst verschleißarmen Lauf der Räder zum Ziel. Die angesprochene Höhenänderung des Sensors gegenüber dem Gleis kann also (zumindest im Prototypenbetrieb mit geringer Laufleistung) vernachlässigt werden. Es besteht jedoch weiterhin das Problem, dass der Sensor nicht in idealer Weise horizontal auf die Seite des Schienenkopfes messen kann. Dazu müsste er unterhalb der Gleisebene montiert sein, wo die Gefahr besteht, dass er durch Teile der Weiche, Unebenheiten im Unterbau oder die Positionsmarken beschädigt wird. Es kommt also nur eine Anbringung unter einem flachen Winkel in Frage, wie sie in Bild 3-5 rechts dargestellt ist. Der Winkel und die Position sind so gewählt, dass sie trotz des knappen Bauraums eine gute Ausnutzung des Messbereichs gewährleisten.

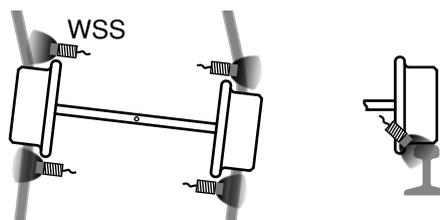


Bild 3-5: Die Anordnung der Wirbelstromsensoren (WSS) im Fahrzeug und ihr Messfeld

³ In [LMP⁺02], [MGL99] und [MG03a] wird eine Methode beschrieben, bei der die Querposition über die Drehzahldifferenz konischer Räder geschätzt wird. Da die Drehzahldifferenz jedoch noch von anderen Faktoren beeinflusst wird und sich die Konizität durch Verschleiß ständig ändert, handelt es sich hierbei wohl eher um eine akademische Methode.

Das Patent [HF98] beschreibt eine Methode zur Ermittlung der Querposition anhand von Momentenmessung an den Radachsen (um die Längsrichtung). Eine Momentenmessung ist jedoch meist stark verrauscht und mit anderen Einflüssen überlagert. Ein Rückschluss auf die Querposition ist aufgrund der geringen Änderung des Hebelarms allenfalls als grobe Abschätzung möglich.

Gemessen werden soll der Abstand zwischen Spurkranz und Schienenkopf in der Ebene des Radaufstandspunktes. Da dies nicht möglich ist, sind zwei Sensoren mit kleinstem Abstand zu beiden Seiten des Rades montiert (siehe Bild 3-5 links). Die zwei Sensoren sind nötig, da der gemessene Abstand durch die außermittige Lage der Sensoren auch vom Winkel zwischen Achse und Schiene abhängt. Der Abstand in der Mitte ergibt sich näherungsweise aus dem Mittelwert:

$$\begin{aligned} y_l &= 0,5 (y_{l,v} + y_{l,h}) \\ y_r &= 0,5 (y_{r,v} + y_{r,h}) \end{aligned} \quad (3-2)$$

Aus dem Abstand zwischen Rad und Schiene an beiden Seiten, y_l und y_r , wird der Abstand zwischen der Achse und der Mittellinie der Schienen sowie das Spurspiel G berechnet⁴:

$$\begin{aligned} y_{R,rel} &= 0,5 (y_r - y_l) \\ G &= y_r + y_l \end{aligned} \quad (3-3)$$

Die Abbildung des gemessenen Abstands zur Sensorspannung ist nicht linear (siehe Bild 3-6). Dies ist vor allem auf das Schienenprofil und die Messanordnung zurückzuführen (der Messkegel erfasst sowohl die Flanke der Schiene als auch Teile der Lauffläche). Da die Kennlinie auch vom Winkel und von der Höhe über der Schiene abhängt, und diese beim Einbau im RailCab nicht genau bekannt sind, wird die Identifikation „in situ“ vorgenommen. Dazu wird die Achse im Stillstand in verschiedene Querpositionen (inklusive der Anschlagposition links und rechts) gebracht und der Abstand zu einer festen Referenz gemessen. In jeder Position werden die Sensorsignale aufgezeichnet, wobei die Achse gleichzeitig eine Lenkbewegung ausführt. Für jeden Sensor wird eine eigene Kennlinie mit zehn Stützpunkten und linearer Interpolation angenommen. Damit ist es möglich, für jedes Messtupel (Sensorspannungen, Querposition und Lenkwinkel) vier lineare Gleichungen (3-3) bzw. (3-2) aufzustellen. Alle Messungen zusammen ergeben dann ein überbestimmtes Gleichungssystem, das mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate nach den Stützstellenwerten aufgelöst werden kann.

3.2.2 Lenkzylinder

Die Lenkbewegung der Achsen wird mit hydraulischen Differenzialzylindern aktuiert (vgl. [Koh08]). Der Ölvolumenstrom in die Zylinderkammern wird über ein 4-3-Wege Ventil beeinflusst. An der Druckseite ist das Ventil an die zentrale

⁴ Zur Berechnung der relativen Querposition reicht auch ein kreuzweises Sensorpaar aus. Zwei Paare ermöglichen die redundante Berechnung und verbessern die Messgüte. Die kreuzweise Auswertung ist in [Möh07] näher beschrieben.

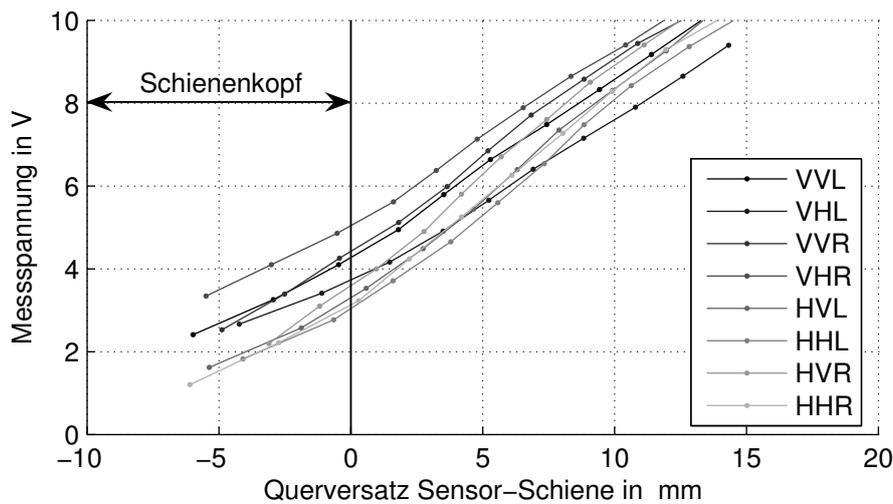


Bild 3-6: Die vermessenen Kennlinien der Wirbelstromsensoren

Versorgungsleitung des RailCabs angeschlossen. Diese wird von einer druckgeregelten Pumpe (Zweipunkt-Regelung) und einem Druckspeicher gespeist, sodass die Versorgung als Konstantdruckquelle aufgefasst werden kann. Die Position des Zylinders wird über ein induktives Messsystem erfasst.

Die Durchflusskennlinie des Ventils ist nur bei nominalem Druckabfall ($\Delta p_N = 35 \text{ bar}$) linear. Der Druckabfall hängt – bei konstanter Versorgung – vom Druck in den Zylinderkammern ab, welcher bei konstanter Geschwindigkeit vorwiegend von der nichtlinearen Reibkraft bestimmt wird. Daraus resultiert eine nichtlineare Durchfluss- bzw. Geschwindigkeitskennlinie des Ventils. Inkompressibles Öl vorausgesetzt, ist die Geschwindigkeit konstant proportional zum Durchfluss. Daher wird angenommen, dass sich bei einer konstanten Ventilöffnung eine konstante Lenkwinkelrate einstellt. Diese Kennlinie wird vermessen, indem über die Steuerspannung U_{Vent} eine konstante Ventilschieberstellung vorgegeben wird. Zu jeder Schieberstellung wird dann aus der gemessenen Zylinderposition die Lenkwinkelrate berechnet, die sich nach Abklingen der Transitionsdynamik einstellt (siehe Bild 3-7). Der elektromagnetisch verstellte Ventilschieber mit integrierter Lageregelung hat eine Bandbreite von 60 Hz. Daher wird das Ventil im relevanten Frequenzbereich (bis ca. 10 Hz) vereinfachend als Kennlinienglied betrachtet. Dieses Verhalten wird im Regler durch die entsprechende inverse Kennlinie kompensiert. Vor der Kompensation kann im Regler also mit der Lenkwinkelrate $\dot{\delta}_R$ gerechnet werden.

Bei einer dynamischen Betrachtung kann nicht vernachlässigt werden, dass das Öl und die Schläuche elastisch sind. Bei der einfachsten Modellierung bilden die Leitungen, die Zylinderkammern und die beschleunigte Achsmasse ein schwingfähiges System zweiter Ordnung mit konjugiert komplexer Nullstelle. Die Koeffizienten dieser Übertragungsfunktion werden ohne physikalische Modellierung direkt aus Messungen identifiziert. Dafür wird das in Abschnitt 3.4

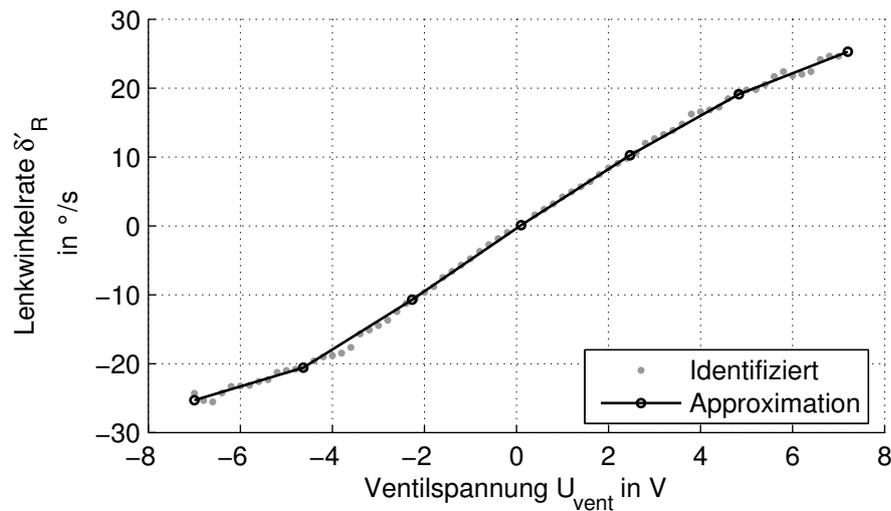


Bild 3-7: Die statisch vermessene Geschwindigkeitskennlinie (U - v) der Lenkzylinder

beschriebene Frequenzbereichsverfahren angewandt. Im Bild 3-8 ist neben dem verwendeten Modell auch ein Modell höherer Ordnung dargestellt, das den gemessenen Verlauf besser nachbildet. Dieses Modell weist zwei zusätzliche Pole auf, die dem Ventil und den Hydraulikschläuchen zugeordnet werden können. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Dynamik im relevanten Frequenzbereich bis 10 Hz von dem Modell zweiter Ordnung gut abgebildet wird. Da das Übertragungsverhalten die Differenzordnung null hat und die Nullstelle stabil ist, lässt es sich invertieren und zur Kompensation im Regler verwenden (lead-lag-Glied). Da diese Dynamik dem hydraulischen System hinter dem Ventil zugeordnet wird, ist das entsprechende Kompensationsglied im Regler vor der Ventilkennlinie angeordnet. Dabei wird ignoriert, dass die Nichtlinearität nicht allein auf das Ventil konzentriert ist. In der Praxis werden mit dieser Vereinfachung jedoch gute Ergebnisse erzielt.

Der Zylinderregler ist ein PI-Regler mit Vorsteuerung. Durch die beiden Kompensationsglieder lässt sich die Zylindergeschwindigkeit nahezu perfekt steuern, was auch die Annahme im linearen Modell für den Zustandsregler aus Abschnitt 3.3 ist. Die in Abschnitt 4.2 vorgestellte Struktur mit zwei Freiheitsgraden erfordert es, dass der Lenkwinkel nicht allein vom Zustandsregler vorgegeben wird – dieser muss sich die Lenkung mit der Kurvenvorsteuerung quasi teilen. Da für die Kurvenvorsteuerung nicht die Ableitung, sondern der Lenkwinkel selbst entscheidend ist, kann nicht einfach die Lenkwinkelgeschwindigkeit der beiden Regler addiert werden. Stattdessen wird die Lenkwinkelgeschwindigkeit als Vorsteuerwert betrachtet, und beide Regler geben zusätzlich den von ihnen geforderten Lenkwinkelanteil vor. Die Summe der beiden Anteile ist die Führungsgröße des PI-Reglers. Diese Struktur einer modellbasierten Vorsteuerung mit zwei Freiheitsgraden ist in Bild 3-9 dargestellt. Der I-Anteil hat eine große Zeitkonstante und dient lediglich der Kompensation der geringen Drift der Ventilschiebernulllage.

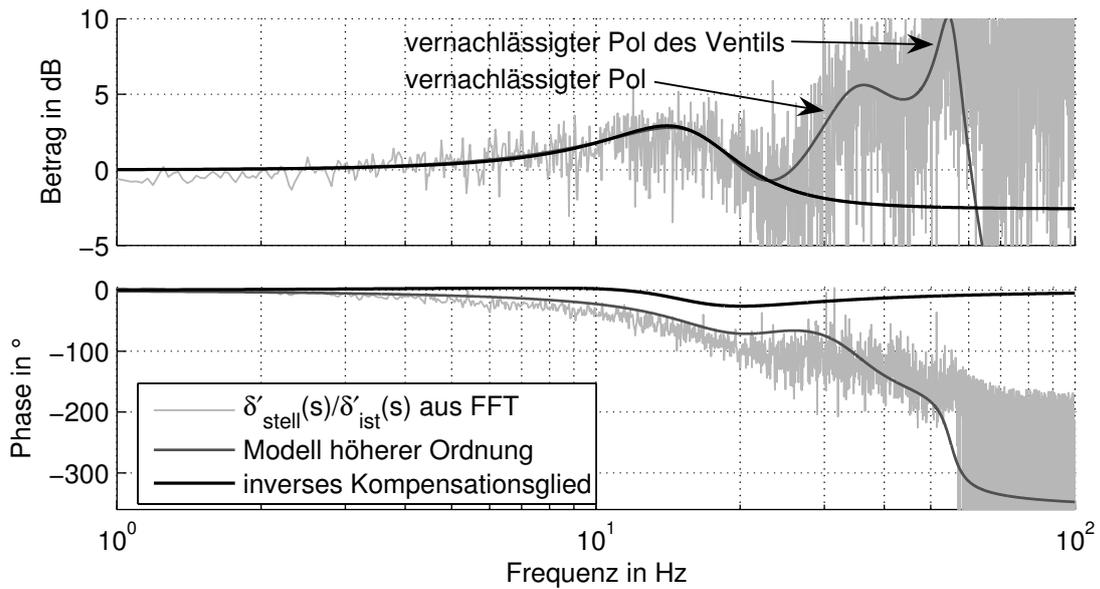


Bild 3-8: Der gemessene und der identifizierte Amplitudengang der Lenkzylinder ($\dot{\delta}_{stell}$ zu $\dot{\delta}_{ist}$)

Ohne Vorsteuerung ergibt die Rückkopplung der kompensierten Zylinderdynamik über das P-Glied ein PT1-Verhalten, das auf eine Eckfrequenz von 7 Hz eingestellt ist. Dies ist die Dynamik des Fehlers, der bei der Vorsteuerung der Lenkwinkelrate aufgrund von Störungen und Modellierungsfehlern auftritt.

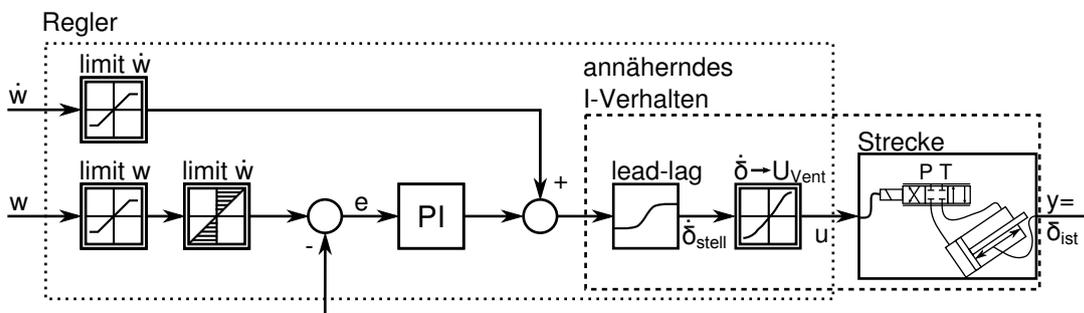


Bild 3-9: Das Diagramm der Zylinderregelung mit Vorsteuerung, Kompensation der Rohrleitungsdynamik und Geschwindigkeitskennlinie

3.3 Lineare Modelle

Die Fahrzeugdynamik wird zunächst mithilfe linearisierter Gleichungen modelliert. Die Identifikation erfolgt dann anhand der linearen Übertragungsfunktionen. Das lineare Modell 16. Ordnung ist die Grundlage der selbstoptimierenden Zustandsregelung in Kapitel 6. Ein vereinfachtes Modell 6. Ordnung wird zur Herleitung der inversen Fahrzeugdynamik benötigt, mit deren Hilfe die Trajektorienvorsteuerung realisiert wird.

Dem detaillierten Simulationsmodell, das in Abschnitt 3.6 beschrieben wird, liegen die nichtlinearen Differenzialgleichungen des Mehrkörpersystems zugrunde und es wird z. T. mit nichtlinearen Bauteilkennlinien gerechnet. Dabei werden die identifizierten linearen Parameter zugrunde gelegt und die zusätzlichen Parameter teils separat vermessen und teils aus der Literatur übernommen.

Für die linearen Modelle werden die Annahmen für ein Einspurmodell zugrunde gelegt ([PS93]):

- Die Fahrgeschwindigkeit v ist konstant.
- Das Fahrwerk hat zwei Freiheitsgrade: Gierbewegung und Schwingbewegung.
- Hub-, Nick- und Wankbewegung haben keine Radlastdifferenz zur Folge.
- Die Radaufstandspunkte, an denen die Seitenkräfte angreifen, werden achsweise in der Fahrzeugmitte zusammengefasst.
- Kleine Lenk- und Schräglaufwinkel und kleine Querbeschleunigungen ermöglichen es, mit einer linearisierten Seitenkraftkennlinie zu rechnen.
- Die Seitenkräfte werden momentan aufgebaut und unterliegen keiner verzögernden Dynamik.
- Es liegen keine Umfangskräfte an den Rädern vor (die Räder haben kein Trägheitsmoment).

Die Bewegung in Längsrichtung wird also nicht explizit betrachtet, stattdessen ist die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit (v) ein Parameter der Querdynamik. Dieses Vorgehen bedingt, dass das Modell nur für positive Geschwindigkeiten gültig ist. Es müsste daher korrekterweise von der führenden, statt von der vorderen, und von der folgenden, statt der hinteren Achse gesprochen werden. Die Indizes v und h sind jedoch kürzer. Da das Fahrzeug symmetrisch ist, werden im Regler, abhängig vom Vorzeichen der Geschwindigkeit, alle Größen, die einer Achse zugeordnet sind, vertauscht und das Vorzeichen aller Größen in Querrichtung geändert, bevor die Stellgrößen berechnet werden. Die Lenkwinkel werden dann entsprechend zurückgetauscht.

Modell 16. Ordnung

Für das detaillierte Modell 16. Ordnung wird von vier Starrkörpern mit insgesamt sieben DOF und vollkommen symmetrischer Anordnung ausgegangen (siehe auch [Mey08]): das Fahrwerk (Achsrahmen und Linearmotor), der Aufbau (Nutzlastmodul, Feder-/Neigerahmen und -Zylinder) und zwei Achsen (mit Rädern). Die Starrkörper, ihre DOF und die Koppellemente sind in Bild 3-10 dargestellt. Das Fahrwerk (m_{FW} , Θ_{FW}) bewegt sich in einer Ebene quer zur Fahrtrichtung (y_{FW}) und um die Hochachse (Gieren, ψ_{FW}). Der Aufbau (m_A , $\Theta_{A,z}$, $\Theta_{A,x}$) bewegt sich

quer (y_A), gierend (ψ_A) und wankend (um die Längsachse, ϕ_A). Sein Schwerpunkt liegt l_z über dem Fahrwerk. Die Bewegungen Längs, Nicken und Huben werden nicht betrachtet, da sie keinen Einfluss auf die Querdynamik haben. Aufgrund der angenommenen Symmetrie ist die Gierbewegung des Aufbaus von den Bewegungen in Querrichtung entkoppelt. Die Achsen (m_R) mit Achsstand l_R bewegen sich in Querrichtung (y_{Rv} und y_{Rh}), ihr Schwerpunkt liegt in der Ebene des Fahrwerks.

Die Lenkbewegung (δ_{Rv} und δ_{Rh}) wird nicht als Freiheitsgrad modelliert. Es wird davon ausgegangen, dass eine Lenkwinkelrate vorgegeben werden kann, und dass die Lenkwinkel dieser Vorgabe mit perfektem I-Verhalten folgen⁵. Dieses Verhalten kann durch eine entsprechende Regelung (siehe Abschnitt 3.2.2) der hydraulischen Lenkzylinder erreicht werden.

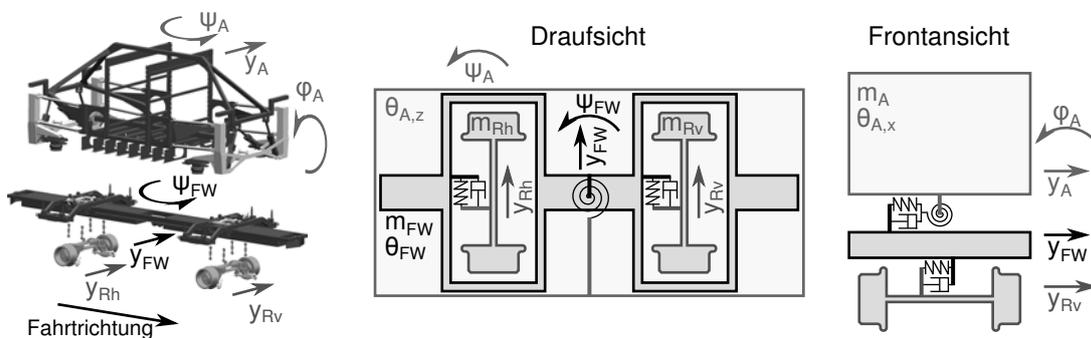


Bild 3-10: Die vier Starrkörper und die Feder-/Dämpferelemente des linearen Modells

Die Wirkung der vier Luftfedern wird in den betrachteten Bewegungsrichtungen abstrahiert. Zwischen Fahrwerk und Aufbau wirken daher die Kräfte bzw. Momente von drei Feder-/Dämpferelementen: eine Kraft in Querrichtung ($F_{FW,A}$), ein Moment um die Längsachse ($M_{FW,A,x}$) und ein Moment um die Hochachse ($M_{FW,A,z}$). Zwischen dem Fahrwerk und den Achsen wirken die Kräfte von Feder-/Dämpferelementen in Querrichtung ($F_{Rv,FW}$, $F_{Rh,FW}$).

⁵ Die Berücksichtigung der Lenkwinkelrate hat zwei Gründe: Erstens kann die Dynamik der Lenkwinkelregelung durch die Vorsteuerung der Lenkwinkelrate verbessert werden. Zweitens ist die Lenkwinkelrate eine Zielgröße der in Kapitel 6 vorgestellten optimalen Regelung und muss dafür im Regler bekannt sein.

Die Kräfte der Koppellelemente sind:

$$\begin{aligned}
 F_{Rv,FW} &= c_{R,FW} \left(y_{FW} + \psi_{FW} \frac{l_R}{2} - y_{Rv} \right) \\
 &\quad + d_{R,FW} \left(\dot{y}_{FW} + \dot{\psi}_{FW} \frac{l_R}{2} - \dot{y}_{Rv} \right) \\
 F_{Rh,FW} &= c_{R,FW} \left(y_{FW} - \psi_{FW} \frac{l_R}{2} - y_{Rh} \right) \\
 &\quad + d_{R,FW} \left(\dot{y}_{FW} - \dot{\psi}_{FW} \frac{l_R}{2} - \dot{y}_{Rh} \right) \\
 F_{FW,A} &= c_{FW,A} (y_{FW} - y_A - \phi_A l_z) + d_{FW,A} (\dot{y}_{FW} - \dot{y}_A - \dot{\phi}_A l_z) \\
 M_{FW,A,z} &= c_\psi (\psi_{FW} - \psi_A) + d_\psi (\dot{\psi}_{FW} - \dot{\psi}_A) \\
 M_{FW,A,x} &= c_\phi \phi_A + d_\phi \dot{\phi}_A + m_A g (y_{FW} - y_A - l_z \phi_A)
 \end{aligned} \tag{3-4}$$

Die externen Kräfte sind die Kräfte an den Rädern und die Schwerkraft. An den Rädern wirken die geometrischen und die Schlupfkräfte (vgl. Abschnitt 2.2.1). Aufgrund des geringen Sturzes und der zylindrischen Räder können die geometrischen Kräfte vernachlässigt werden⁶. Die Schlupfkräfte in Querrichtung resultieren aus einem Quer- und einem Bohrschlupfanteil mit den Schupfkoeffizienten c_α und c_ζ :

$$\begin{aligned}
 F_{schl,v} &= c_\alpha \left(\delta_{Rv} - \frac{\dot{y}_{Rv}}{v} + \frac{y_{Rv} - y_{Rh}}{l_R} \right) + c_\zeta \frac{\dot{\delta}_{Rv} + \dot{\psi}_A}{v} \\
 F_{schl,h} &= c_\alpha \left(\delta_{Rh} - \frac{\dot{y}_{Rv}}{v} + \frac{y_{Rv} - y_{Rh}}{l_R} \right) + c_\zeta \frac{\dot{\delta}_{Rh} + \dot{\psi}_A}{v}
 \end{aligned} \tag{3-5}$$

Die Schwerkraft hat einen Einfluss auf die Querdynamik, wenn die Fahrzeughochachse – bedingt durch eine Gleisüberhöhung ϕ_{Gl} ⁷ – nicht parallel zur Richtung der Erdbeschleunigung ist. Bei der Berücksichtigung von Überhöhungen müsste das Fahrwerk korrekterweise auch einen Wankfreiheitsgrad haben. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass sich die Überhöhung nur langsam, also quasi stationär

⁶ Nach Gleichung (2-1) ist die Rückstellsteifigkeit c_{rck} ca. 2000 N m^{-1} . Die DGL der Fahrzeugquerbewegung kann vereinfacht als $m \cdot \ddot{y} = -2 c_{rck} \cdot y - 2 c_\alpha / v \cdot \dot{y}$ angeschrieben werden. Mit einer Schräglaufsteifigkeit von 200 kN hat dieses System eine langsame Zeitkonstante von ca. $100 \text{ m}/v$. Allein durch die Gravitationsrückstellkraft ist eine Anfangsauslenkung also erst nach 100 m zu $63,2\%$ abgebaut.

⁷ Eine Gleisüberhöhung ist ein Höhenunterschied zwischen den Schienen. Eine planmäßige Überhöhung in Radien reduziert die Querkräfte auf den Gleiskörper. Gleisüberhöhungen können jedoch auch die Folge von Gleislagefehlern sein.

ändert, sodass sie durch eine „Einblendung“ der Scherkraft hinreichend genau modelliert wird. Damit ergeben sich die folgenden Bewegungsgleichungen:

$$\begin{aligned}
 m_R \ddot{y}_{Rv} &= F_{schl,v} + F_{Rv,FW} - m_R g \phi_{Gl} \\
 m_R \ddot{y}_{Rh} &= F_{schl,h} + F_{Rh,FW} - m_R g \phi_{Gl} \\
 m_{FW} \ddot{y}_{FW} &= -F_{Rv,FW} - F_{Rh,FW} - F_{FW,A} - m_{FW} g \phi_{Gl} \\
 \Theta_{FW} \ddot{\psi}_{FW} &= \frac{l_R}{2} (F_{Rh,FW} - F_{Rv,FW}) - M_{FW,A,z} \\
 m_A \ddot{y}_A &= F_{FW,A} - m_A g \phi_{Gl} \\
 \Theta_{A,x} \ddot{\phi}_A &= -M_{FW,A,x} + F_{FW,A} l_z \\
 \Theta_{A,z} \ddot{\psi}_A &= M_{FW,A,z}
 \end{aligned} \tag{3-6}$$

Aus den Bewegungsgleichungen lassen sich direkt die Dynamik- und die Eingangsmatrix für die Zustandsraumdarstellung ableiten. Es ergeben sich 16 Zustände: die sieben Bewegungskordinaten und ihre Ableitungen sowie je ein Zustand für die Dynamik der Lenkzylinder. Die Stelleingänge sind die Ableitungen der Lenkwinkel vorn und hinten. Bild 3-11 zeigt die Struktur des Modells 16. Ordnung, wie es für die Auslegung des Zustandsreglers in Abschnitt 6.5 verwendet wird. Dort ist ebenfalls das stochastische Modell der Gleislagefehler dargestellt, das in Abschnitt 3.5 beschrieben wird.

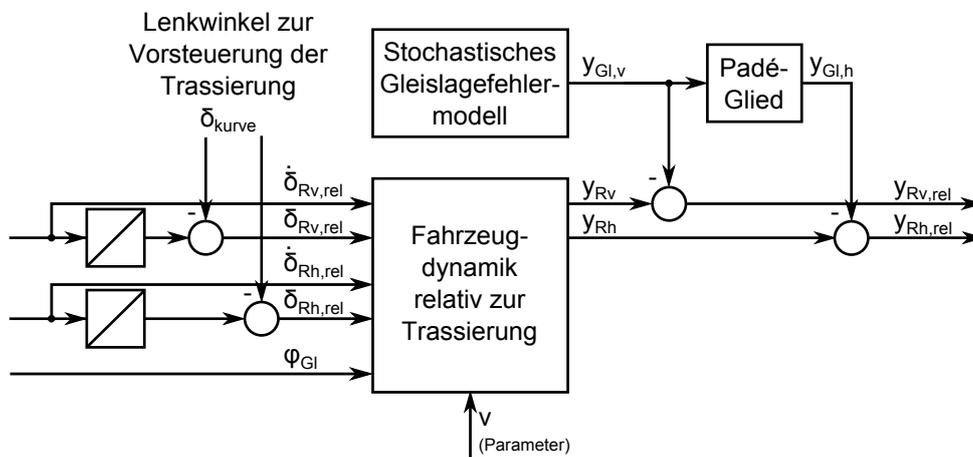


Bild 3-11: Struktur des Modells 16. Ordnung mit den Stell- und Regelgrößen und dem Modell der Störgröße

Modell zur Zustandsschätzung und zur Vorsteuerung

Da den Gleichungen (3-4) die Annahme kleiner Gierwinkel ψ_{FW} zugrunde liegt, kann das Modell 16. Ordnung keine Kurvenfahrten abbilden. Abhilfe schafft eine Transformation des Zustandsvektors:

- Die Geschwindigkeit der Achsen wird relativ zum Fahrwerk betrachtet:
 $\dot{y}_{Rv,rel} = \dot{y}_{Rv} - \dot{y}_{FW} - l_R/2\dot{\psi}_{FW}$ und $\dot{y}_{Rh,rel}$ entsprechend.
- Die Verschiebung und Verdrehung des Fahrwerks wird relativ zu den Achsen betrachtet: $y_{FW,rel} = y_{FW} - \frac{y_{Rv} + y_{Rh}}{2}$ und $\psi_{FW,rel} = \psi_{FW} - \frac{y_{Rv} - y_{Rh}}{l_R}$.
- Die Bewegung des Aufbaus wird relativ zum Fahrwerk betrachtet:
 $y_{A,rel} = y_A - y_{FW}$ und $\psi_{A,rel} = \psi_A - \psi_{FW}$ (Ableitungen entsprechend).
- Zur besseren Vergleichbarkeit mit dem klassischen Einspurmodell wird die Quergeschwindigkeit als Schwimmwinkel dargestellt: $\beta = \frac{\dot{y}_{FW}}{v} - \psi_{FW}$.

Diese Transformationen bewirken, dass alle Lagekoordinaten relativ zueinander sind. Die Absolutlage der Achsen (y_{Rv} und y_{Rh}) und insbesondere der Gierwinkel haben keinen Einfluss auf die anderen Zustände und können daher entfallen. Dadurch sind dann alle Zustände auch bei Kurvenfahrt gültig, ohne dass die für die Linearisierung gemachte Annahme kleiner Gierwinkel verletzt wird:

$$\mathbf{x}_{abs} = \left[y_{FW,rel}, \psi_{FW,rel}, \dot{\psi}_{FW}, \beta, \dot{y}_{Rv,rel}, \dot{y}_{Rh,rel}, \psi_{A,rel}, y_{A,rel}, \phi_A, \dot{\psi}_{A,rel}, \dot{y}_{A,rel}, \dot{\phi}_A \right] \quad (3-7)$$

Dieses Modell 12. Ordnung ist die Grundlage des in Abschnitt 6.5.1 beschriebenen Kalman-Filters und wird zur Berechnung der Vorsteuerungszustände in Abschnitt 4.2 verwendet. Die sehr genau gemessenen bzw. zur Vorsteuerung berechneten Lenkwinkel werden hierbei nicht mehr als Zustand aufgefasst, sondern direkt als Eingang aufgeschaltet. Zu den Lenkwinkeln, die die Stelleingänge der Regelung sind, kommt beim Beobachter die Gleisüberhöhung⁸ als weiterer Eingang hinzu. Die Struktur des Modells mit den Eingängen und Messgrößen ist in Bild 3-12 dargestellt.

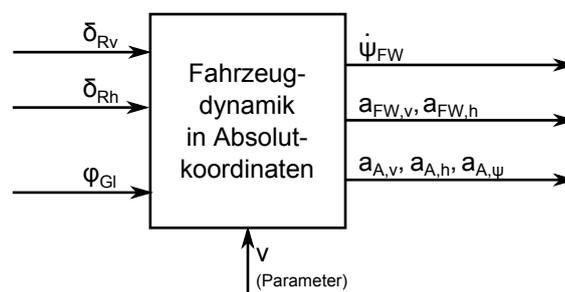


Bild 3-12: Struktur des Modells 12. Ordnung mit den Stell- und Messgrößen

⁸ Die Gleisüberhöhung wird positionsabhängig aus einer zuvor vermessenen Karte ermittelt.

Zur Auslegung des Zustandsschätzers, der als Kalman-Filter implementiert wird, müssen die Störungen bekannt sein, die das Modell anregen und die den Messgrößen überlagert sind. Da die Modellierung der physikalischen Ursachen der Störungen zu aufwendig ist, wird ersatzweise angenommen, dass die Aufbaubeschleunigungen und die Lenkwinkel stochastischen Störungen unterliegen. Dazu werden entsprechende Störeingänge definiert, deren Identifikation in Abschnitt 3.4 beschrieben wird.

Messgrößen

Zur Zustandsrekonstruktion werden die folgenden Größen gemessen:

- die Gierrate des Fahrwerks $\dot{\psi}_{FW}$
- die Querbeschleunigung des Fahrwerks über der Vorder- und Hinterachse ($a_{FW,v}$ und $a_{FW,h}$)
- die Querbeschleunigung des Aufbaus senkrecht über und unter dem Schwerpunkt ($a_{A,o}$ und $a_{A,u}$)
- die Gierbeschleunigung des Aufbaus $a_{A,\psi}$

Damit ergeben sich die folgenden Ausgangsgleichungen:

$$\begin{aligned}
 a_{FW,v} &= \ddot{y}_{FW} + \frac{l_R}{2} \ddot{\psi}_{FW} + g \phi_{Gl} \\
 a_{FW,h} &= \ddot{y}_{FW} - \frac{l_R}{2} \ddot{\psi}_{FW} + g \phi_{Gl} \\
 a_{A,o} &= \ddot{y}_A - l_{A,o} \ddot{\phi}_A + g \phi_A + g \phi_{Gl} \\
 a_{A,u} &= \ddot{y}_A - l_{A,u} \ddot{\phi}_A + g \phi_A + g \phi_{Gl} \\
 a_{A,\psi} &= \ddot{\psi}_A
 \end{aligned} \tag{3-8}$$

Flachheitsbasiertes Modell

Ein vereinfachtes Modell mit nur sechs Zuständen resultiert, wenn die Dynamik der Achsen und des Aufbaus vernachlässigt wird. Alle Massen und Massenträgheiten werden dann zu einem Gesamtfahrzeug-Starrkörper zusammengefasst. Die Vernachlässigung der Aufbaudynamik stellt eine starke Vereinfachung dar, da die Massen von Aufbau und Fahrwerk annähernd gleich sind und der Aufbau somit eine Tilgerwirkung im Frequenzbereich zwischen 2 Hz und 6 Hz hat (abhängig von der Bewegungsform und der Geschwindigkeit).

Das Modell 6. Ordnung hat die Eigenschaft, dass die Absolutlage der Achsen, also die Regelgröße, ein *flacher Ausgang* ist. Obwohl alle steuerbaren, linearen Systeme die Eigenschaft der Flachheit haben, können nicht immer flache Ausgänge mit physikalischer Bedeutung gefunden werden (siehe z. B. [FLM⁺99]). Für den

flachen Ausgang gilt, dass alle Zustände und Eingänge des Systems aus dem Ausgang und einer endlichen Anzahl seiner Ableitungen rekonstruiert werden können ([LN03]). Für die Regelung bedeutet dies, dass Systeme, deren Regelgröße ein flacher Ausgang ist, unter drei Bedingungen perfekt gesteuert werden können, ohne dass hierfür Differenzialgleichungen gelöst werden müssen⁹:

- 1) Das Modell bildet die Strecke exakt nach.
- 2) Es liegen keine Störungen der Strecke vor, und der Anfangszustand ist exakt bekannt.
- 3) Die Führungstrajektorie ist mit der entsprechenden Anzahl der Ableitungen bekannt und ist mit den Anfangszuständen konsistent.

Diese Bedingungen lassen sich bei realen Systemen nicht vollkommen erfüllen. Gleichwohl kann mit einer flachheitsbasierten Vorsteuerung in vielen Fällen eine Verbesserung des Führungsverhaltens – insbesondere bei dynamischen Führungsgrößen – erzielt werden. Für die in Abschnitt 5 vorgestellte Trajektorienvorsteuerung wird daher aus dem Modell 6. Ordnung die flachheitsbasierte Stellwertberechnung abgeleitet:

$$\begin{aligned}
 \delta_{Rv} &= \frac{y_{Rh} - y_{Rv}}{l_R} + \frac{\dot{y}_{Rv}}{v} \\
 &\quad + \frac{\ddot{y}_{Rv} (l_R^2 m_{FZ} - 4 \Theta_{FZ})}{4 c_\alpha l_R^2} + \frac{\ddot{y}_{Rh} (l_R^2 m_{FZ} + 4 \Theta_{FZ})}{4 c_\alpha l_R^2} \\
 \delta_{Rh} &= \frac{y_{Rh} - y_{Rv}}{l_R} + \frac{\dot{y}_{Rh}}{v} \\
 &\quad + \frac{\ddot{y}_{Rv} (l_R^2 m_{FZ} + 4 \Theta_{FZ})}{4 c_\alpha l_R^2} + \frac{\ddot{y}_{Rh} (l_R^2 m_{FZ} - 4 \Theta_{FZ})}{4 c_\alpha l_R^2}
 \end{aligned} \tag{3-9}$$

3.4 Identifikation

Die Parameter des linearen Modells werden mit drei unterschiedlichen Methoden identifiziert (die Parameter, ihr Wert und die Methode sind in Tabelle 3-2 aufgelistet):

Konst: Der Achsstand kann direkt aus den Konstruktionsdaten abgelesen werden.

⁹ Die Ausnutzung der Flachheit ist besonders dann sinnvoll, wenn der Verlauf der (dynamischen) Führungsgröße mit der benötigten Anzahl der Ableitungen bekannt ist. Ist die Differenzenordnung der Ausgänge größer null, müssten andernfalls die Ableitungen z. B. durch eine entsprechende Filterung berechnet werden, was indirekt auch bei einer modellbasierten Vorsteuerung mit vollständiger Entkopplung geschieht.

Schätz: Die Massen der vier Starrkörper können näherungsweise aus den Konstruktionsdaten ermittelt werden. Der Aufbau wurde zusätzlich gewogen. Das Gewicht der Linearmotoren ist sehr genau aus Herstellerdaten bekannt.

Opt: Die restlichen Parameter werden mit der folgend beschriebenen Methode identifiziert.

Tabelle 3-2: Parameters des linearen Modells und die Methode, mit der sie identifiziert werden.

Parameter	Wert	Einheit	Methode	Beschreibung
m_R	40	kg	Schätz	Masse Achse
m_{FW}	500	kg	Schätz	Masse Fahrwerk
m_A	600	kg	Schätz	Masse Aufbau
Θ_{FW}	307	kg m ²	Opt	Trägheitsmoment Fahrwerk
$\Theta_{A,z}$	255	kg m ²	Opt	z-Trägheitsmoment Aufbau
$\Theta_{A,x}$	256	kg m ²	Opt	x-Trägheitsmoment Aufbau
l_R	1,7	m	Konst	Achsstand
l_z	0,44	m	Opt	Schwerpunktlage Aufbau
c_α	269 820	N	Opt	Schräglaufsteifigkeit
$c_{\alpha(n=6)}$	162 303	N	Opt	Schräglaufsteifigkeit
c_ζ	19	N m ⁻¹	Opt	Bohrschlupfbeiwert
$c_{R,FW}$	1 866 300	N m ⁻¹	Opt	Federsteifigkeit Achse-Fahrwerk
$d_{R,FW}$	73	N s m ⁻¹	Opt	Dämpfung Achse-Fahrwerk
$c_{FW,A}$	297 270	N m ⁻¹	Opt	Federsteifigkeit Fahrwerk-Aufbau
$d_{FW,A}$	2227	N s m ⁻¹	Opt	Dämpfung Fahrwerk-Aufbau
c_ϕ	31 245	N	Opt	Drehsteifigkeit Fahrwerk-Aufbau um x
d_ϕ	1018	N s	Opt	Drehdämpfung Fahrwerk-Aufbau um x
c_ψ	183 630	N	Opt	Drehsteifigkeit Fahrwerk-Aufbau um z
d_ψ	735	N s	Opt	Drehdämpfung Fahrwerk-Aufbau um z

Die Identifikation der Parameter, die nicht direkt ermittelt oder gemessen werden können, erfolgt im Frequenzbereich mithilfe einer Standardroutine zur ableitungsfreien Minimierung einer nichtlinearen Kostenfunktion (MATLAB-Funktion `fminsearch`). Die Kostenfunktion bewertet die Abweichung zwischen den Übertragungsfunktionen eines Modells und denen des realen Systems. Die Übertragungsfunktionen werden an Stützstellen zwischen 0 Hz und 30 Hz verglichen. Bewertet wird die Summe der Beträge der Differenzen. Es werden alle Übertragungsfunktionen zwischen den Eingängen $[\delta_{Rv}, \delta_{Rh}]$ und den Ausgängen $[\dot{\psi}_{FW}, a_{FW,v}, a_{FW,h}, a_{A,\psi}, a_{A,o}, a_{A,u}]$ betrachtet. Die Übertragungsfunktionswerte des realen Systems in den Frequenzstützstellen f_i werden wie folgt aus Messdaten berechnet (MATLAB-Funktion `tfestimate`):

$$T_{uy}(f_i) = \frac{S_{uy}(f_i)}{S_{uu}(f_i)} = \frac{U^*(f_i) \cdot Y(f_i)}{U^*(f_i) \cdot U(f_i)} \quad (3-10)$$

Dabei ist S_{uy} das Kreuzleistungsdichtespektrum von Eingangs- und Ausgangssignal und S_{uu} das Autoleistungsdichtespektrum des Eingangs ($U(f_i)$ und $Y(f_i)$)

sind die diskret Fouriertransformierten des Ein- bzw. Ausgangs). Die Messdaten werden mit aktiver Spurführung bei verschiedenen Geschwindigkeiten aufgezeichnet. Die Identifikation wird für jeden Datensatz getrennt durchgeführt und die ermittelten Parameter gemittelt.

Die so ermittelten Parameter bilden das System im relevanten Frequenzbereich und bei den betrachteten Anregungen ab. Die große Datenbasis sorgt für eine ausreichende Mittelung der Nichtlinearitäten, insbesondere der Luftfedern und der Schlupfkkräfte. Die ermittelten Werte für die Trägheitsmomente und die Schwerpunktlage des Aufbaus stimmen gut mit denen aus den Konstruktionsdaten überein. Auch die die Feder- und Dämpferkonstanten des Aufbaus entsprechen in etwa den in [Hes05] identifizierten, und die Federsteifigkeit der Achse ist erwartungsgemäß sehr hoch. Lediglich die Schräglaufsteifigkeit scheint sehr gering zu sein¹⁰, zumal die Normalkraft des Antriebs zu einem im Mittel höheren Wert führen sollte.

Entscheidend ist jedoch die gute Abbildung der Dynamik, und in [Wan09] konnte gezeigt werden, dass die Sensibilität gegenüber dem Parameter c_α gering ist (für Parameterwerte im Bereich zwischen 20 000 N und 500 000 N ändert sich das Übertragungsverhalten nur unwesentlich). Die Schräglaufsteifigkeit für das Modell 6. Ordnung, $c_{\alpha,6}$, hat einen geringeren Wert, da im Gegensatz zum Modell 16. das Tilgungsverhalten der Achse fehlt und die Radkräfte direkt auf das Fahrwerk wirken.

Die Standardabweichungen des Eingangs- und Messrauschens zur Auslegung des Kalman-Filters werden in zwei Schritten bestimmt (die identifizierten Werte sind Tabelle 3-3 zusammengefasst). Zunächst wird das Ruherauschen (also das Rauschen im Stillstand) der Sensoren gemessen und daraus das Messrauschen abgeleitet. Da die Beschleunigungssensoren auch Strukturschwingungen aufnehmen, die nicht modelliert wurden, wird hier zu der Standardabweichung des Ruherauschens noch $0,1 \text{ m s}^{-2}$ addiert. Das Eingangsrauschen wird so bestimmt, dass es die Unsicherheiten in der Modellierung (Lose in der Lenkung, Nichtlinearität der Luftfedern) abbildet und gleichzeitig das resultierende Kalman-Filter ein akzeptables Vorhersageverhalten aufweist¹¹ (dieses wird visuell bewertet).

¹⁰ Nach Frederich (Gleichung (2-5)) sollte bei einem Fahrzeuggewicht von 600 kg pro Achse und einem Schlupf von $0-3,1860 \cdot 10^{-4}$ eine Schräglaufsteifigkeit zwischen 1295 kN und 1078 kN zu erwarten sein.

¹¹ Die Eingangs- und Messkovarianzen haben eine ähnliche Funktion wie die Gewichtungsmatrizen beim Riccati-Regler. Daher sind nicht ihre absoluten Werte von Bedeutung, sondern ihr Verhältnis zueinander. Bei gegebener Standardabweichung des Messrauschens kann also über das Eingangs- oder Systemrauschen festgelegt werden, ob sich die Schätzung mehr an den Messungen orientiert (große Werte), oder ob das Filter mehr dem Modell „vertraut“ (kleine Werte).

Tabelle 3-3: Die Standardabweichungen des Eingangs- und Messrauschens zur Auslegung des Kalman-Filters.

Ausgang	Wert	Einheit	Beschreibung
$\dot{\psi}_{FW}$	0,03	rad s ⁻¹	Drehrate Fahrwerk
$a_{FW,v}, a_{FW,h}$	0,25	m s ⁻²	Querbeschleunigung Fahrwerk
$a_{A,\psi}$	0,75	m s ⁻²	Gierbeschleunigung Aufbau
$a_{A,o}, a_{A,u}$	0,35	rad s ⁻²	Querbeschleunigung Aufbau
Eingang			
δ_{Rv}, δ_{Rh}	0,4	mrad	Lenkwinkel
$\dot{\psi}_A$	0,1	rad s ⁻²	Gierbeschleunigung Aufbau
\ddot{y}_A	0,1	m s ⁻²	Querbeschleunigung Aufbau
$\dot{\phi}_A$	0,1	rad s ⁻²	Wankbeschleunigung Aufbau

3.5 Trassierung und Gleislagefehler

Das Schienenpaar des Gleises begrenzt den Fahrweg, in dem sich das Schienenfahrzeug bewegen kann, und gibt damit den Verlauf des Fahrwegs vor. Bei der Planung eines Fahrwegs geht man von einer idealen Linienführung, der sogenannten Trassierung aus, die sich aus den Trassierungselementen zusammensetzt ([Fen07]). Diese Teilstücke können Geraden, Kreisbögen oder Übergangsbögen sein. Die Übergangsbögen sind meist Klothoiden, im Bahnbau auch kubische Parabeln. Sie dienen einer stetigen Krümmungsänderung und damit einem sprungfreien Verlauf der Querbeschleunigung zwischen geraden und kreisförmigen Stücken der Trasse. Die Trassierung ist die Mittellinie, um die die Schienen mit einem festen Abstand, der sogenannten Spurweite, verlegt werden. Bedingt durch die endliche Genauigkeit beim Verlegen der Schienen, durch thermische und mechanische Verformung und durch Verschleiß weicht der tatsächliche Schienenverlauf von der idealen Trassierung ab. Diese Abweichungen werden als Gleislagefehler bezeichnet (vgl. [DIN09]). Es werden Quer- und Höhenlagefehler unterschieden, wobei Letztere nur einen indirekten Einfluss auf die Spurführung haben (Anregungen in vertikaler Richtung können zu einer Verminderung der Querstabilität führen). Da die Lagefehler der rechten und linken Schiene größten Teils unabhängig voneinander auftreten, können sie in Summe sowohl zu einer Änderung der Spurweite, als auch zu einer Verschiebung der Mittellinie relativ zur Trassierung führen.

3.5.1 Trassierung

Die Versuchsstrecke der *NBP* besteht aus einem Oval (454,66 m) mit einer Weiche, die in einem Zubringer abzweigt. Der Zubringer (69,76 m ohne Garage) bildet die Zufahrt zur Fahrzeuggarage. Für die Erprobung der aktiven Spurführung wird im Folgenden nur noch das Oval betrachtet. Das doppelt achssymmetrische Oval setzt sich aus zwei Geraden (50 m), zwei Kreisbögen (40 m Radius, 77,27 m Länge) und den Übergangsbögen dazwischen, die als Klothoiden (50 m Länge) ausgeführt sind, zusammen. Das Oval ist teilweise aufgeständert, wodurch ein

Höhenunterschied von ca. 4,5 m erzielt wird. Dieser in Bild 3-13 dargestellte Berg hat an der einen Seite eine Steigung von 5,3 % und an der anderen von 2,5 %. Der Einfluss der Steigung auf die Spurführung wird jedoch vernachlässigt.

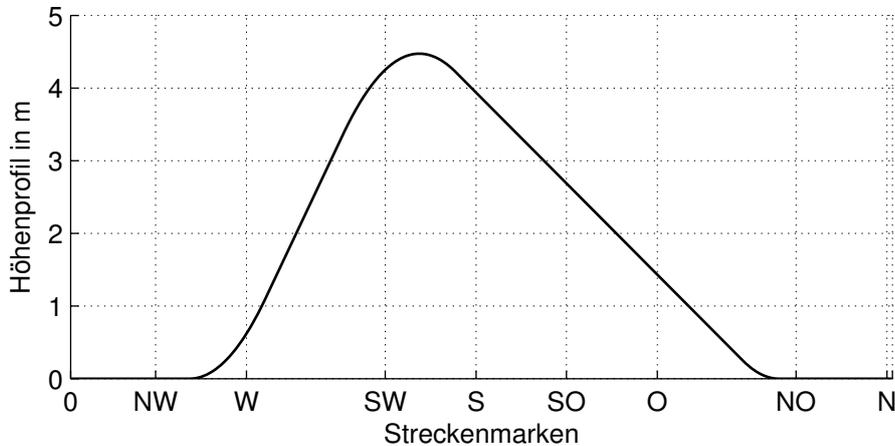


Bild 3-13: Das Höhenprofil des Ovals, aufgetragen gegen den Uhrzeigersinn

In Bild 3-14 sind die Endpunkte der Trassierungselemente entsprechend den Richtungen einer Windrose mit 8-Strich-Teilung gekennzeichnet. Dies dient später der einfachen Kennzeichnung in ortsabhängigen Graphen.

Klothoiden sind Kurven mit einer sehr einfachen mathematischen Beschreibung: Ihre Krümmung κ ändert sich linear mit der Bogenlänge s_{Pos} :

$$\kappa_{Klothoide} = \kappa_{start} + (\kappa_{ende} - \kappa_{start}) \frac{s_{Pos} - s_{start}}{s_{ende} - s_{start}} \quad (3-11)$$

Trotz dieser einfachen Beschreibung lässt sich der Funktionsgraph einer Klothoiden nicht analytisch angeben, er kann nur durch numerische Integration angenähert werden. Für die Regelung ist dies jedoch nicht von Belang, da die Ortskurve der Trassierung und auch ihre Tangente hierfür nicht benötigt werden. In die Kurvenvorsteuerung gehen lediglich der Verlauf der Krümmung, wie er in Bild 3-15 dargestellt ist, und die Geschwindigkeit ein.

3.5.2 Gleislagefehler

Die Gleislagefehler auf der Versuchsstrecke sind überwiegend auf schlecht verlegte Schienen zurückzuführen. In diesem Abschnitt sollen vornehmlich die sogenannten Quer- oder Richtungslagefehler betrachtet werden. Die Querhöhenlagefehler bzw. die Überhöhung werden für den Beobachter benötigt und dafür mit einer Wasserwaage vermessen (siehe Bild 3-16). Die Spurweitenfehler bzw. das Spurspiel werden für die Trajektorienplanung benötigt und lassen sich einfach mithilfe der Wirbelstromsensoren vermessen. Auf die Dynamik haben sie keinen Einfluss.

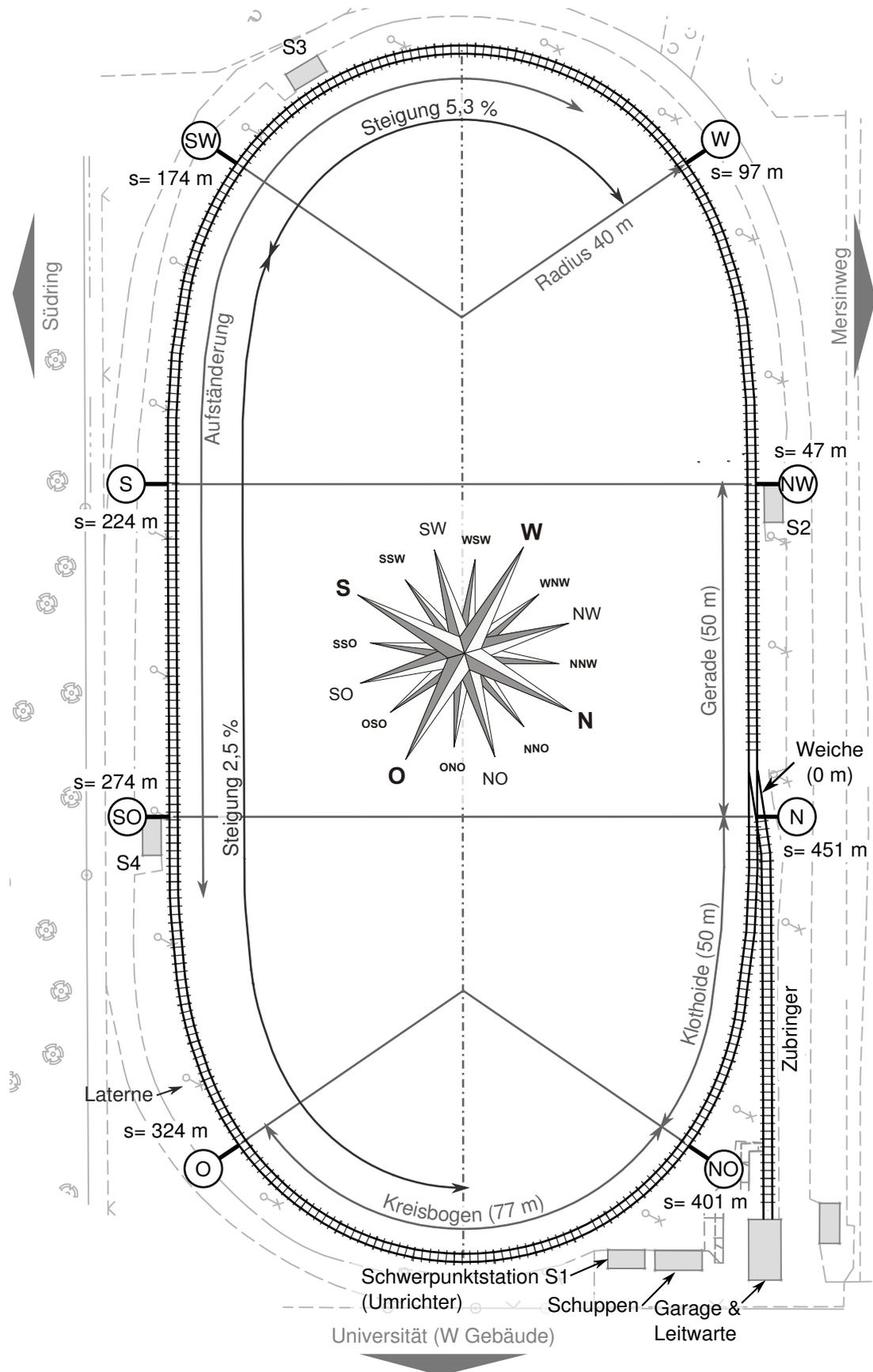


Bild 3-14: Die Karte des Vermessungsamtes des Gleisovals und des Zubringers der Versuchsstrecke sowie die Endpunkte der Trassierungselemente

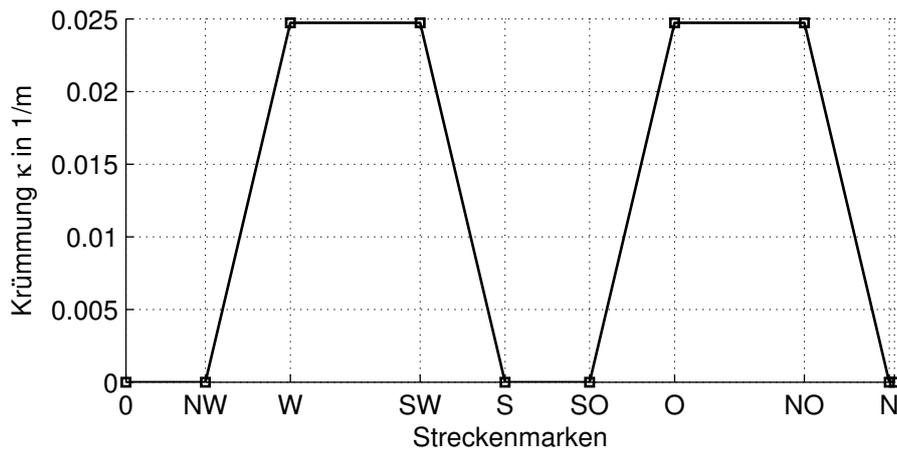


Bild 3-15: Der Krümmungsverlauf des Ovals

Die Längshöhenlagefehler werden vernachlässigt, da sie hauptsächlich Einfluss auf die Hubanregung des Fahrzeugs haben.

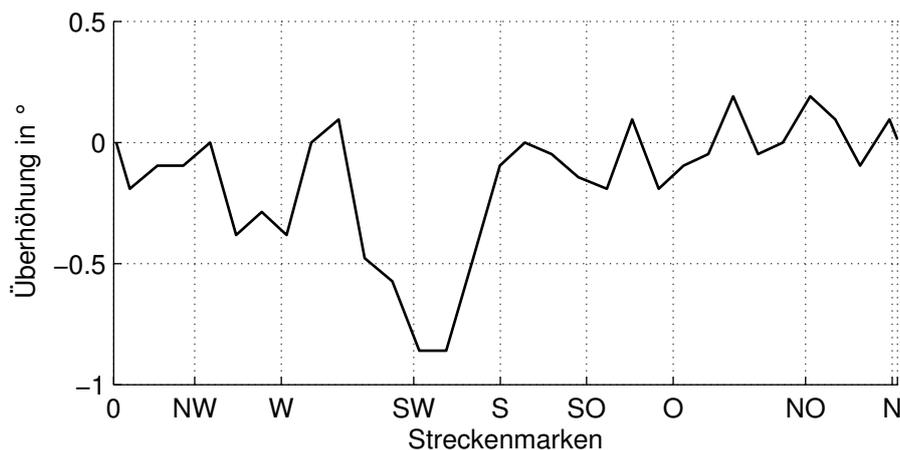


Bild 3-16: Die Überhöhung im Oval, vermessen in 15 m Abständen mit einer Wasserwaage

Die Schienen sind aus 10 m Stücken zusammengeschweißt und wurden bei Frost verlegt. Daher herrscht fast ständig eine positive Temperaturdifferenz zum Verlegzustand, die zu großen Druckspannungen führt. Durch diese thermischen Spannungen und die schlechte Ausrichtung an den Schweißstellen wellen sich die Schienen in Querrichtung. Hinzu kommt, dass in den Übergangsbögen nicht der vorgesehene Klothoidenverlauf eingehalten wurde, sondern stattdessen Stücke mit konstantem Radius verlegt wurden, die nur in den Endpunkten in der Lage und Richtung korrekt sind. Da der genaue Verlauf der verbauten Bögen nicht bekannt ist und die sprunghafte Änderung der Krümmung ohnehin zu nicht differenzierbaren Lenkwinkelverläufen führen würde, muss diese Abweichung als Gleislagefehler betrachtet werden.

Modellierung mit Splines

Eine flachheitsbasierte Vorsteuerung der Gleislagefehler setzt einen mindestens dreifach stetig differenzierbaren Verlauf ($y_{Gl}(s_{Pos}) \in C^3$) voraus, da Gleichung (3-9) für die Vorsteuerung der Lenkwinkelgeschwindigkeit ein weiteres Mal differenziert werden muss. Im Hinblick auf die begrenzten Ressourcen der Echtzeitumgebung sollten die Rechenzeit und der Speicherbedarf für die Auswertung der Funktionswerte möglichst gering sein. Unter diesen Bedingungen bieten sich kubische Splines für die Darstellung der Verlaufsfunktion an.

Ein Spline n-ten Grades ist eine Funktion, die stückweise aus Polynomen $S_i(x)$ mit maximalem Grad n zusammengesetzt ist. Dabei wird gefordert, dass der Spline an den Knotenpunkten, an denen zwei Polynomstücke zusammenstoßen, $(n - 1)$ mal stetig differenzierbar ist.

Kubische Splines sind durch eine Reihe von m Stützpunkten (x_i, y_i) , auch Knoten genannt, und zwei Endpunktbedingungen definiert (vgl. [PTV⁺07]). Die Stützpunktwerte y_i können einem äquidistanten oder einem beliebigen Raster x_i vorliegen und werden von dem Spline exakt interpoliert. Der Spline ist nur in den offenen Intervallen zwischen je zwei benachbarten Knoten definiert.

Als Randbedingung wird meist der sogenannte *freie Rand oder natürliche Spline* gewählt. Hierbei wird gefordert, dass die zweite Ableitung an den Randknoten gleich null ist ($y'' = 0$). Aus den Definitionsdaten lassen sich die zweiten Ableitungen des Splines in den Stützpunkten y_i'' durch eine Matrixoperation berechnen. Ein Funktionswert (und die ersten drei Ableitungen) des Splines wird dann mit-

hilfe der Stützpunktwerte und den zweiten Ableitungen der beiden benachbarten Knoten berechnet:

$$\begin{aligned}
 x &\in [x_i, x_{i+1}] \\
 h_i &= (x_{i+1} - x_i) \\
 a(x) &= \frac{x - x_i}{h_i} \\
 b(x) &= 1 - a \\
 c(x) &= \frac{h_i^2}{6} (a^3 - a) \\
 d(x) &= \frac{h_i^2}{6} (b^3 - b) \\
 y(x) &= a(x) y_i + b(x) y_{i+1} + c(x) y_i'' + d(x) y_{i+1}'' \\
 y'(x) &= \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} + \frac{h_i a(x) b(x)}{2} (y_i'' - y_{i+1}'') \\
 y''(x) &= a(x) y_i'' + b(x) y_{i+1}'' \\
 y'''(x) &= \frac{y_{i+1}'' - y_i''}{h_i}
 \end{aligned} \tag{3-12}$$

Da die zweiten Ableitungen vorab berechnet werden, reduziert sich der Rechenaufwand zur Laufzeit auf ein Minimum.

Für die Darstellung der Gleislagefehler wird ein äquidistantes Raster mit einer Stützstellenweite von 0,85 m gewählt. Das entspricht dem halben Achsstand. Die Vorder- und die Hinterachse befinden sich also immer an der gleichen Stelle ($a(x)$) in zwei aufeinanderfolgenden Intervallen. Die Stützstellenweite ist so gewählt, dass der Spline die identifizierten Gleislagefehler mit geringen Abweichungen annähert und gleichzeitig mit einer geringen Anzahl von 535 Stützstellen auskommt.

Da die identifizierten Gleislagefehler zunächst in einem viel engeren Raster vorliegen, werden die Stützstellenwerte mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate als Koeffizienten eines überbestimmten Gleichungssystems berechnet.

Identifikation aus Messdaten

Bei der Vermessung bzw. Identifikation der Gleislagefehler ergibt sich die Schwierigkeit, dass das Referenzsystem, in dem die Abweichungen gemessen werden sollen, also die Trassierungslinie, auf der Strecke nicht zur Verfügung steht. Eine absolute Vermessung des Gleisverlaufs in geodätischen Koordinaten, beispielsweise mithilfe eines differenziellen GPS-Systems, scheidet aufgrund der hohen Kosten und der geforderten Genauigkeit von $\pm 0,5$ mm ebenfalls aus.

Damit verbleibt nur noch die Möglichkeit, die Identifikation auf der Grundlage der Bewegungsgrößen und der relativen Messungen aus Tabelle 3-1 durchzuführen (lediglich die Streckenposition s_{Pos} , steht mit ausreichender Genauigkeit als

absoluter Wert zur Verfügung). Die Idee dabei ist es, die absolute Bahn, auf der sich das Fahrzeug bei der Messung bewegt hat, durch (doppelte) Integration der geschätzten Bewegungsgrößen des Fahrwerks ($\dot{\psi}_{FW}$, β und v) zu rekonstruieren. Die dabei unvermeidlich auftretende Drift muss mithilfe von Randbedingungen korrigiert werden.

Im ersten Schritt werden der Winkel der Abweichung der Fahrzeugachse zur Trassentangente ψ_{rel} und die relative Richtung des Geschwindigkeitsvektors ϕ_{rel} bestimmt:

$$\begin{aligned}\psi_{rel}(t) &= \int \dot{\psi}_{FW}(t) - v(t) \kappa(s_{Pos}(t)) - C \, dt \\ \phi_{rel}(t) &= \psi_{rel} + \beta\end{aligned}\tag{3-13}$$

Dabei wird C so gewählt, dass der Integrand mittelwertfrei ist. Die Trassenkrümmung ist entsprechend Bild 3-15. Die Abweichung des Fahrzeugschwerpunkts von der Trassierungslinie ergibt sich dann durch nochmalige Integration:

$$y_{FW}(t) = \int v(t) \phi_{rel}(t) \, dt\tag{3-14}$$

Die Abweichung des Fahrzeugschwerpunkts wird nun zunächst auf die Basis der Streckenposition umgerechnet ($y_{FW}(s_{Pos})$ usw.). Bei der Berechnung der Querabweichungen der Achsen wird ihre Verschiebung relativ zum Fahrwerk vernachlässigt (sie ist kleiner als 0,1 mm):

$$\begin{aligned}y_{Rv}(s_{Pos} + \frac{l_R}{2}) &= y_{FW}(s_{Pos}) + \psi_{rel}(s_{Pos}) \frac{l_R}{2} \\ y_{Rh}(s_{Pos} - \frac{l_R}{2}) &= y_{FW}(s_{Pos}) - \psi_{rel}(s_{Pos}) \frac{l_R}{2}\end{aligned}\tag{3-15}$$

Die gesuchte Abweichung des Gleisverlaufs gemessen an der Vorder- und Hinterachse ergibt sich schließlich gemäß Gleichung (3-1). Aus den beiden Schätzungen wird der Mittelwert gebildet und dieser mit einem phasenfreien Hochpass gefiltert (die MATLAB-Funktion `filtfilt` wendet ein zeitdiskretes Filter erst vorwärts und dann rückwärts auf die Daten an). Das Ergebnis ist in Bild 3-17 dargestellt. Dort ist gut zu erkennen, dass die Amplitude der Gleislagefehler im Bereich der Geraden (S-SO) sehr viel kleiner ist als in den Kurven. Dies ist auf die schlechten Toleranzen und die kurzen Teilstücke der gebogenen Schienen in den Kurven zurückzuführen.

Optische Identifikation

Zur Verifikation der dynamisch identifizierten Gleislagefehler werden Messungen mit absoluter Referenz benötigt. Diese Referenz ist in den Kurven nicht darstellbar. Daher wird die Verifikation exemplarisch im Abschnitt der Geraden S-SO durchgeführt. Um Aufwand und Kosten gering zu halten, wird die Vermessung optisch, mithilfe handelsüblicher Web-Cams (Auflösung 800×600 pixel) durchgeführt. Als Referenz wird ein sehr dünnes Kabel verwendet, das in der Mitte

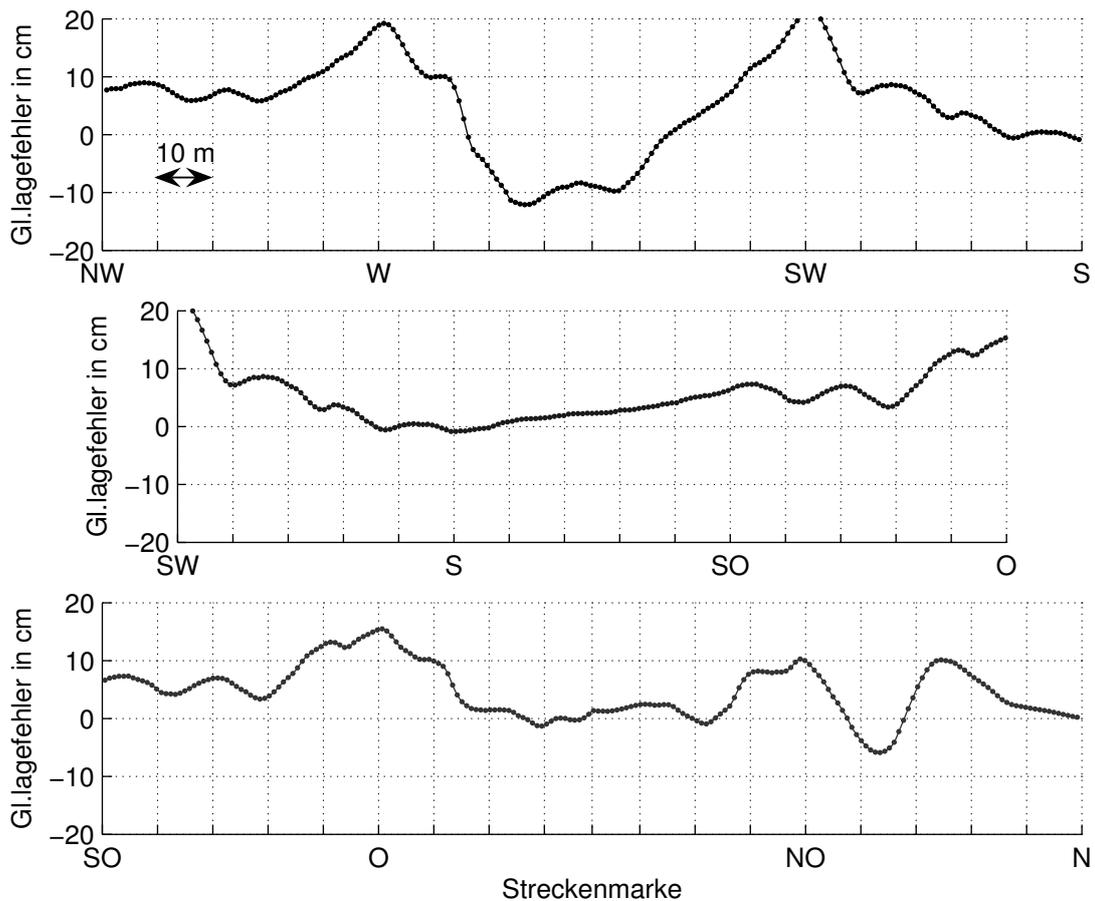


Bild 3-17: Die Stützpunkte und die Spline-Interpolation der dynamisch identifizierten Gleislagefehler in den drei wichtigen Abschnitten des Ovals (mit Überlappung: Westkurve, Südgerade und Ostkurve)

zwischen den Schienen gespannt ist. Um eine möglichst hohe Auflösung zu erhalten, werden drei Web-Cams verwendet, eine zur Aufnahme des Kabels und je eine für die rechte und linke Schiene. Die Kameras werden so niedrig geführt, dass sie einen Ausschnitt von ca. 6 cm Breite aufnehmen. Zur Aufnahme einer überlappenden Bilderserie sind die Kameras an einem speziellen Messfahrzeug montiert (siehe Bild 3-18). Der Abstand zwischen rechter und linker Schiene und der Referenz wird durch einen modifizierten Standardalgorithmus zur Kantenerkennung berechnet. Da die drei Kanten in unterschiedlichen Bildern aufgenommen werden, müssen die Kameras zuvor mit einem gemeinsamen Schachbrettmuster kalibriert werden. Die Längsposition der Bilder wird durch Interpolation zwischen den Statorlücken bestimmt, die auf den Bildern des Kabels erkannt werden. Der genaue Ablauf der Bildaquisition, Kantenerkennung und Messauswertung ist in [Bie09] beschrieben. Das Ergebnis der optischen Vermessung wird gemäß Gleichung (3-3) in die Querabweichung der Gleismittellinie und das Spurspiel umgerechnet. Bild 3-19 zeigt die gute Übereinstimmung der Identifikation auf der Grundlage der Bewegungsgrößen mit den optisch vermessenen Gleislagefehlern. Dabei ist sogar der Einfluss der Schweißnähte auf den Verlauf zu erkennen.

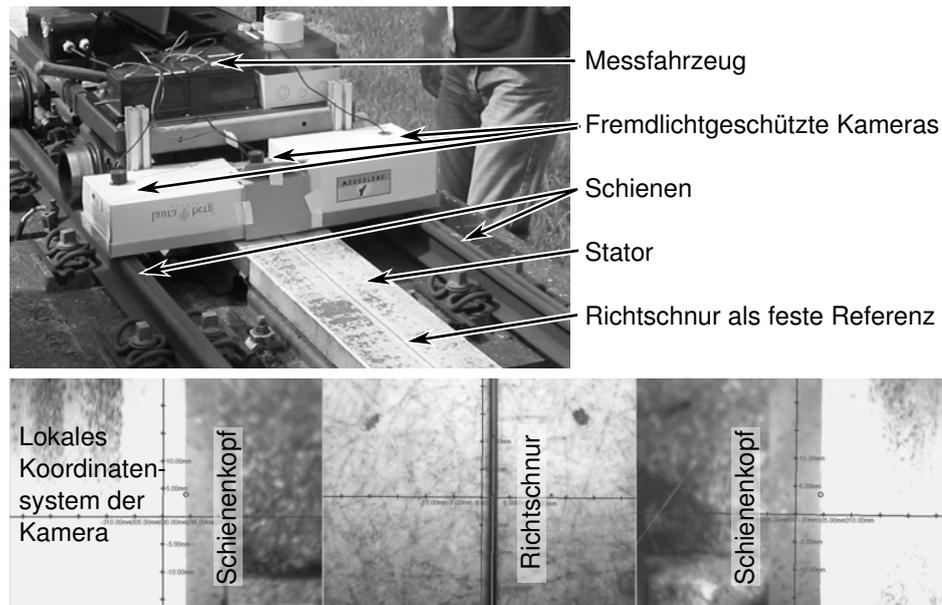


Bild 3-18: Der Messaufbau für die optische Vermessung (oben) und ein zusammengesetztes Bild der drei Kameras mit überlagerten lokalen Koordinatensystemen (unten)

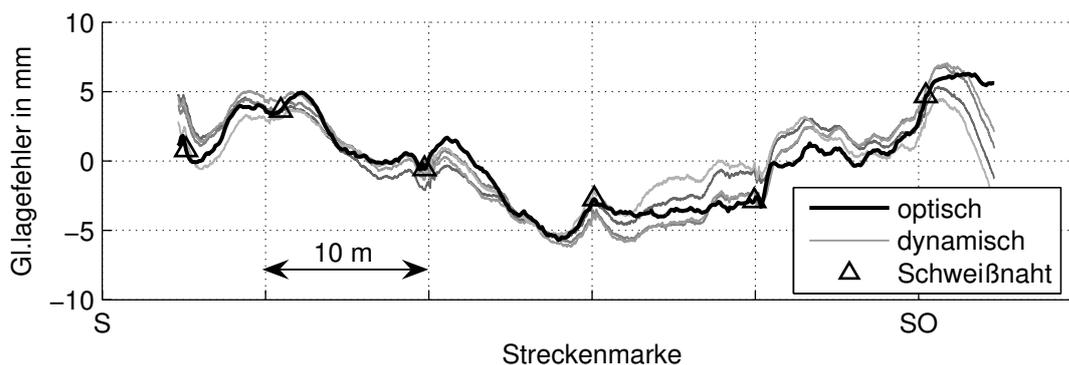


Bild 3-19: Die Überlagerung der optisch und dynamisch identifizierten Gleislagefehler

Spurspiel

Da das Spurspiel eine relative Größe ohne absoluten Bezugspunkt ist, kann es ohne großen Aufwand direkt von den Wirbelstromsensoren gemessen werden. Die unabhängigen Messungen an der Vorder- und der Hinterachse ermöglichen dabei eine gegenseitige Überprüfung der Messgüte. In Bild 3-20 ist zu erkennen, dass das Spurspiel, gemessen an den beiden Achsen, sehr gut übereinstimmt und zwischen 4 mm und 12 mm schwankt. Ebenfalls dargestellt ist das Spurspiel aus der optischen Vermessung wird mit den Werten der Wirbelstromsensoren verglichen und validiert somit die Güte der Wirbelstromsensoren.

Mehrere Messungen über einen größeren Zeitraum zeigen auch eine große Wiederholgenauigkeit, sodass sogar eine Positionsbestimmung anhand der Spurspiel-

signatur über einen kurzen Messabschnitt denkbar ist. Ein ähnlicher Ansatz auf Basis der Signatur von Weichen wird in [EML00] vorgeschlagen.

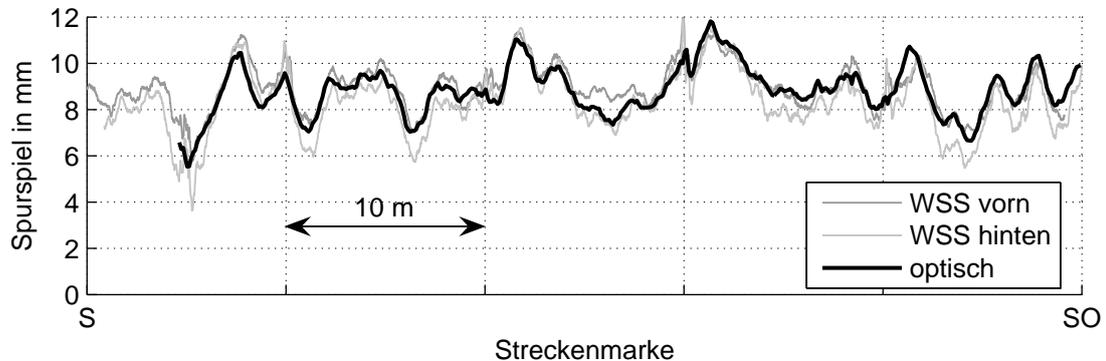


Bild 3-20: Das Spurspiel in der Südgeraden, gemessen an der Vorder- und Hinterachse und durch optische Vermessung

Stochastische Modelle

Neben der Beschreibung konkret vermessener Gleislagefehler wird auch eine allgemeine Beschreibung der stochastischen und spektralen Eigenschaften benötigt. Bei dieser Art der Modellierung wird davon ausgegangen, dass Gleislagefehler das Ergebnis eines stationären stochastischen Prozesses sind. Es wird allgemein von gefiltertem weißen Rauschen ausgegangen (vgl. [PD06] oder [Gol03]), das durch seine spektrale Leistungsdichte charakterisiert ist. Eine typische Verteilung der Gleislagefehler über das örtliche Spektrum ist in Bild 3-21 dargestellt. Diesem Frequenzgang liegt die folgende Übertragungsfunktion (im zeitlichen Frequenzbereich von der Fahrzeuggeschwindigkeit v abhängig) mit den Parametern aus Tabelle 3-4 zugrunde:

$$Y(s) = \frac{k (T_1 s + 1) (T_2^2 s^2 + 2 D_2 T_2 + 1)}{(T_3^2 s^2 + 2 D_3 T_3 + 1)^2 (T_4 s + 1) (T_5^2 s^2 + 2 D_5 T_5 + 1)^2} W(S) \quad (3-16)$$

$$w(t) \sim \mathcal{N}(0, 1)$$

Tabelle 3-4: Parameter des Filters zur Erzeugung von Gleislagefehlern.

Parameter	Wert	Einheit
k	$6,85 \cdot 10^{-6}$	–
T_1	$1/(2\pi 1/500)$	m^{-1}
T_2	$1/(2\pi 1/500)$	m^{-1}
T_3	$1/(2\pi 1/50)$	m^{-1}
T_4	$1/(2\pi 1/5)$	m^{-1}
T_5	$1/(2\pi 1/5)$	m^{-1}
D_2	0,5	–
D_3	0,5	–
D_5	0,5	–

Die einfache Form dieser Modellierung ermöglicht ihre Verwendung in der stochastischen linearen Systemtheorie also in Kalman-Filtern und Riccati-Reglern. In beiden Fällen wird das Modell des Fahrzeugs um das Modell bzw. Filter der Gleislagefehler an der Vorder- und Hinterachse erweitert. Das Kalman-Filter ermöglicht dann die Schätzung der Gleislagefehler y_{Gl} aus den gemessenen Ausgängen, insbesondere der Relativlage der Achsen $y_{R,rel}$ entsprechend der Ausgangsgleichung (3-1). Die Anwendung dieser Methode zur Gleislagefehleridentifikation in [WLG⁺07] zeigt gute Ergebnisse. In der vorliegenden Arbeit kommt diese Methode jedoch nicht zum Einsatz, da sie gegenüber einer fest einprogrammierten Gleislagefehlerkurve eine größere Fehleranfälligkeit hat.

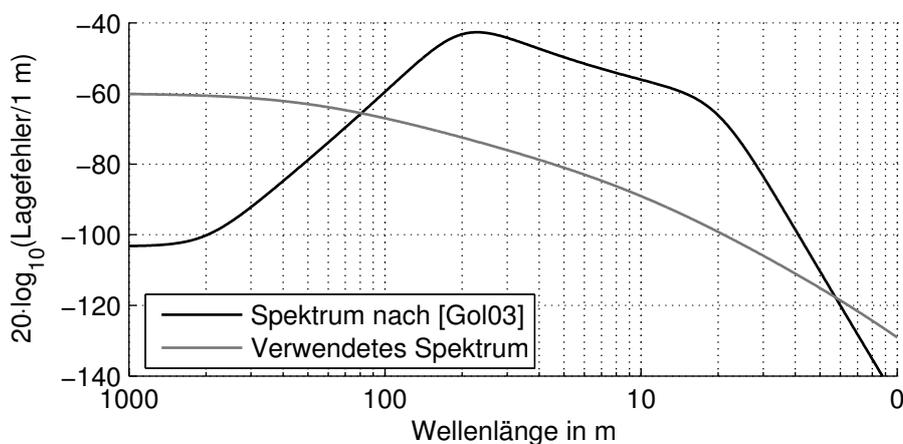


Bild 3-21: Das Spektrum der Quergleislagefehler nach [Gol03] und das zur Regelung verwendete Spektrum

Für den Riccati-Regler hat es sich als ausreichend erwiesen, ein Modell dritter Ordnung zu verwenden. Der Amplitudengang des verwendeten Filters ist ebenfalls in Bild 3-21 dargestellt.

Da die Hinterachse die gleichen Gleislagefehler passiert, über die zuvor schon die Vorderachse gefahren ist, liegt es nahe, dieses geschwindigkeitsabhängige Totzeitverhalten mit zu modellieren. Hierzu wird ein modifiziertes Padé-Glied dritter Ordnung nach [Föl05] verwendet. Der Eingang des Padé-Glieds ist der Gleislagefehler an der Vorderachse. Zusammen ergibt sich ein Modell sechster Ordnung mit einer skalaren stochastischen Anregung und zwei Ausgängen für die Gleislagefehler an den Achsen.

3.6 Detailliertes Simulationsmodell

Das Modell für die simulationsgestützte Entwicklung und Erprobung der Spurführungsregler ist so aufgebaut, dass der Simulink-Block der Regelung sowohl in der Simulationsumgebung als auch in der Gesamtstruktur der realen RailCab-Regelung eingesetzt werden kann, ohne dafür modifiziert werden zu müssen.

Dazu ist die Simulationsumgebung mit speziellen Adapterböcken so aufgebaut, dass auch die Messwerterfassung und die Bedingungen der Übergabe von der Echtzeitumgebung modelliert werden. Diese hat den Vorteil, dass der Regler nur in einer Ausprägung existiert und damit Übertragungsfehler vermieden werden. Auch wird damit garantiert, dass der Regler mit allen Sicherheits- und Sonderfunktionen, die im realen Betrieb erforderlich sind, getestet wird.

3.6.1 Aufbau des Modells

Das Simulationsmodell basiert auf dem linearen Modell aus Abschnitt 3.3 mit vier Starrkörpern, die sich in der Ebene bewegen. Die Mechanik ist jedoch als MKS mit reduzierten Koordinaten modelliert, dessen Kräfte und Massenmatrix in einer s-Funktion berechnet werden. Weiterhin weist das Simulationsmodell die folgenden Unterschiede auf:

- Die Fahrwerksmasse kann sich frei in der Ebene bewegen und erfährt eine Antriebskraft.
- Der Linearmotor wird samt Geschwindigkeitsregelung als PT1-Glied betrachtet.
- Die Luftfedern werden als lineare Feder-Dämpferelemente in den drei Raumrichtungen dargestellt.
- Der Lenkzylinder wird (wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben) als I-Glied mit Rohrleitungsdynamik, begrenzter Geschwindigkeitskennlinie und Beschleunigungsbegrenzung dargestellt. Das Trägheitsmoment der Achen wird jedoch weiterhin vernachlässigt.
- Die Schlupfkräfte wirken stets in Richtung der Achse. Eine Verschiebung des Kraftangriffspunktes, wie in [Mün03] beschreiben, wird jedoch nicht berücksichtigt.
- Die Schlupfkräfte werden anhand der Kurve nach Frederich (Abschnitt 2.2.1) berechnet und zusammen in der Achsmittle eingeleitet. Eine Beeinflussung der Querkräfte durch dynamische Aufstandskräfte wird also nicht berücksichtigt.
- Auch die geometrischen Radkräfte, die aus dem Sturz der Räder und aus Spurkranzanläufen resultieren, wirken auf die Achsmittle.
- Die Streckenposition des Fahrzeugs wird aus seiner kartesischen Absolutposition berechnet. Die Streckenposition ist die Bogenlänge der Trassierung vom Ursprung bis zu dem Trassenpunkt mit minimalem Abstand zum Fahrzeugschwerpunkt. Da das Oval wegen der Klothoiden nicht analytisch beschrieben werden kann, wird eine kubische Interpolation mit 1 m Stützstellenweite verwendet. Die Bestimmung der projizierten Fahrzeuglage ist unter diesen

Bedingungen sehr rechenintensiv. Daher wird mit einer iterativen Approximation gearbeitet, wie sie in [Ett99] beschrieben wird. Prinzipiell handelt es sich dabei um ein Prädiktor-Korrektor-Verfahren, für das neben den Streckenkoordinaten auch die Tangentialrichtung und die Krümmung benötigt werden. Ausgehend von der Streckenposition im letzten Abtastschritt wird die neue Position auf der Tangente bestimmt und mithilfe der Krümmung korrigiert. Dieses Verfahren ist konvergent.

- Die relative Achslage (bzw. die Lage der Wirbelstromsensoren) wird mithilfe der Streckenposition als kürzester Abstand zwischen Achse und Strecke bestimmt. Zu dieser Abweichung von der Idealtrasse wird noch der Gleislagengefehler addiert.
- Der Abstand zwischen Wirbelstromsensor und Schiene wird über die inverse Kennlinie (Bild 3-6) in eine Spannung umgerechnet.
- Auch alle anderen analogen Messsignale werden durch die inverse Messtransformation (vgl. Abschnitt 3.2) in Spannungswerte umgerechnet.

3.6.2 Validierung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell ist mit den Werten parametrisiert, deren Identifikation in Abschnitt 3.4 beschrieben wurde. Lediglich die Federsteifigkeit und Dämpfungsrate der Luftfedern ist [Hes06] entnommen und die Parametrierung der Schlupfkraftbeiwerte nach Gleichung (2-5) erfolgt durch Abgleich der Simulationsergebnisse mit Messungen vor allem aus Kurvenfahrten. Neben der Dynamik wird die Güte des Simulationsmodells, d. h. die Genauigkeit, mit der die Realität abgebildet wird, vor allem durch die Gleislagengefehler bestimmt. Zur Validierung wird eine simulierte Fahrt mit den Messwerten einer realen Fahrt unter gleichen Randbedingungen (gleiche Geschwindigkeit, gleiche Regelungsstrategie usw.) visuell verglichen. In Bild 3-22 ist ein repräsentativer Ausschnitt aus diesem Vergleich dargestellt (gegen den Uhrzeigersinn: die Klothoide hinter der Weiche NW-W, die Westkurve W-SW und die anschließende Klothoide SW-S). In den drei Graphen sind die drei wichtigsten und genauesten Messgrößen über der Streckenposition aufgetragen: die relative Querablage der Achsen vorn und hinten und die Gierrate des Fahrwerks. Es ist zu erkennen, wie der Verlauf der simulierten Größen sehr gut mit den Messwerten übereinstimmt. Daraus lässt sich insbesondere die gute Identifikation der Gleislagengefehler ableiten. Über die Verkopplung der Zustände wirkt sich jedoch auch die gesamte Fahrzeugdynamik auf die gezeigten Größen aus, womit diese indirekt auch auf eine gute dynamische Identifikation schließen lassen.

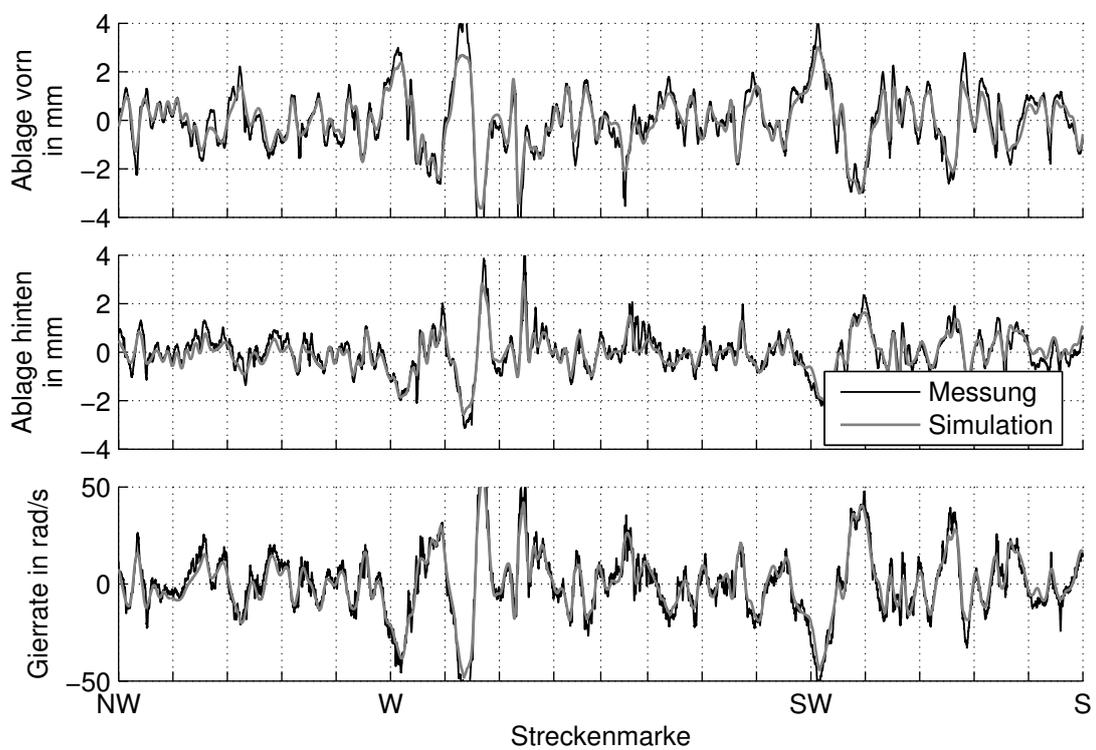


Bild 3-22: Der Vergleich der Messdaten einer Testfahrt mit dem Simulationsmodell (P-Regler, keine Vorsteuerung)

4 Selbstoptimierende Spurführungsregelung

In diesem Kapitel werden zunächst in Abschnitt 4.1 die allgemeine Struktur und der reflektorische Operator der selbstoptimierenden Spurführungsregelung beschrieben. Darauf folgt in Abschnitt 4.2 die Beschreibung der Reglerstruktur mit zwei Freiheitsgraden, die den beiden in dieser Arbeit vorgestellten Selbstoptimierungskonzepten gemeinsam ist, und die die getrennte Auslegung der Vorsteuerung und der Regelung ermöglicht. Das Kapitel endet mit der Beschreibung der Ziele, die die selbstoptimierende Regelung verfolgen soll.

Im Anschluss an dieses Kapitel werden die zwei unterschiedlichen Regler zur selbstoptimierenden Spurführungsregelung vorgestellt, die den Kern dieser Arbeit bilden. Die vorgestellten Selbstoptimierungsverfahren sind für die Fahrt auf freier Strecke ausgelegt, da das Durchfahren der passiven Weichen ein sicherheitskritischer Vorgang ist, der keinen Spielraum für Anpassungen zulässt. Das Führen der Spurkränze in den richtigen Spurkanal erfordert höchste Präzision, da nur wenige Millimeter Spiel bestehen. Alle anderen Anforderungen an die Spurführung treten in dieser Situation zurück.

4.1 Hierarchische Strukturierung

Die Regelung der RailCabs ist gemäß den mechatronischen Funktionen modular hierarchisch strukturiert. Der Hierarchiebaum der Spurführung, ausgehend vom Gesamtfahrzeug, ist in Bild 4-1 dargestellt. Darin werden die Funktionsgruppen *Antriebs-/Bremsmodul* und *Feder-/Neigetchnik* aus Platzgründen nicht im Detail gezeigt.

Die Umsetzung der beschriebenen OCM-Struktur für die gesamte RailCab-Steuerung und -Reglung ist in Simulink realisiert, wobei zeitkritische Komponenten als C-Subroutinen implementiert sind. Dies erlaubt die Verwendung der gleichen Code-Basis sowohl für den Test an Simulationsmodellen als auch zur Regelung der realen Fahrzeuge. Das Echtzeitprogramm wird dabei nach dem Prinzip des Rapid-Controller-Prototyping (RCP) automatisch aus dem Simulink-Modell erstellt. Eine aufwendige Neuprogrammierung und die damit einhergehende Fehlersuche und Validierung entfallen dadurch.

Jede Gruppe und jedes Modul hat zwei Betriebsmodi: „Aus“ und „An“. Im Modus „An“ kann zwischen automatischem und manuellem Betrieb gewechselt werden. Hinzukommen spezielle Modi, beispielsweise zur Inbetriebnahme, Wartung oder Diagnose, und Submodi, die eine feingranulare Einstellung der gewünschten Systemeigenschaften ermöglichen. Der Wechsel zwischen Betriebsmodi erfolgt

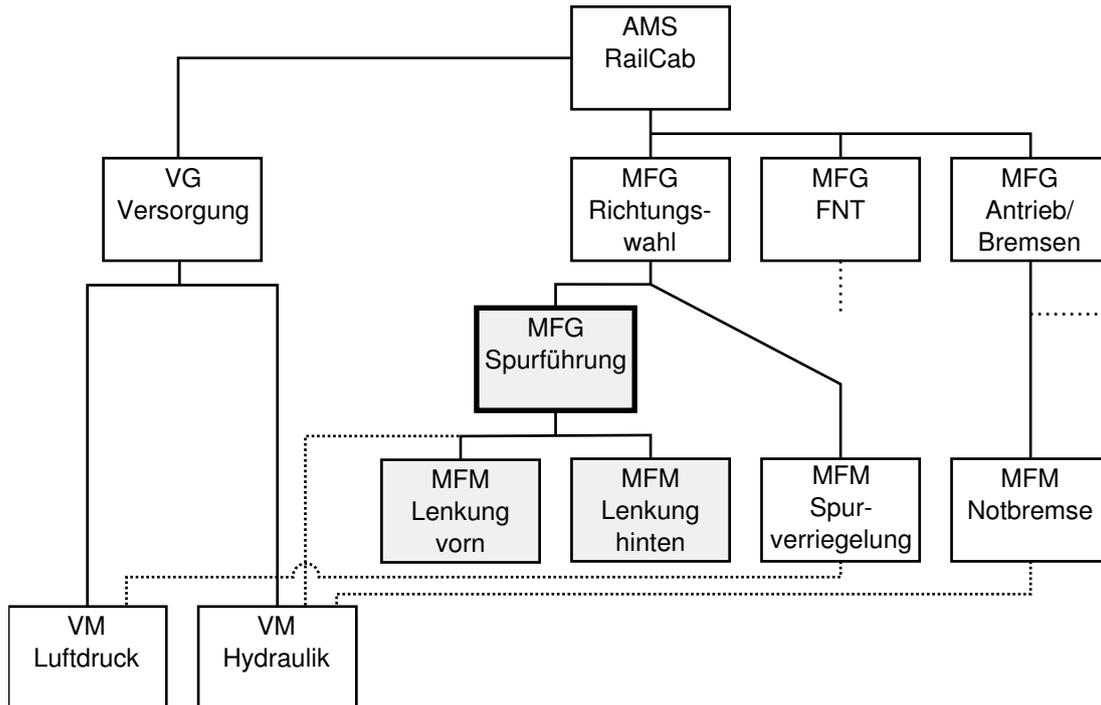


Bild 4-1: Die OCM-Struktur eines RailCabs

gesteuert nach einem vorprogrammierten Ablaufplan, der beispielsweise die Reihenfolge beim Anschalten der Aggregate und Funktionsmodule sicherstellt. Zum Teil werden Sollwerte für die Regler generiert, die das System in den betriebsbereiten Zustand überführen, bevor die Kontrolle an die übergeordnete Ebene der Reglerkaskade übergeben wird.

Richtungswahl und Spurverriegelung

Die oberste Hierarchieebene unter dem Fahrzeug bildet die *MFG Richtungswahl*. Sie steuert das Funktionsmodul *Spurverriegelung* und die Funktionsgruppe der *Spurführung*. Die Hauptaufgabe des *OCM Richtungswahl* besteht darin, das Verhalten beim Durchfahren von passiven Weichen und beim Fahren auf freier Strecke zu bestimmen. Beim Durchfahren der Weichen muss der Richtungswunsch des Benutzers sicher umgesetzt werden. Dazu gehört es, dass das Fahrzeug in einem Abstand vor der Weiche an den entsprechenden Rand gelenkt wird, um an der Verzweigungsstelle in den richtigen Spurkanal einzutreten. Gleichzeitig muss die Spurverriegelung so eingestellt werden, dass die Richtungswahl auch bei einem Versagen der Spurführung an beiden Achsen sicher erzwungen wird. Ab dem Moment, ab dem dieser Prozess eingeleitet wird, darf die Richtungswahl nicht mehr geändert werden. Sollte die Spurverriegelung nicht korrekt reagieren, muss eine Notbremsung ausgelöst werden. Nachdem die Weiche passiert wurde, wird der Spurführung wieder die Freiheit überlassen, ihr Verhalten und die Trajektorie der Achsen selbst zu bestimmen. Daneben werden vom reflektorischen Operator Warnungen und Fehlermeldungen protokolliert und dem Benutzer in zusammengefasster Form dargestellt.

Die *Spurverriegelung* ist ein Funktionsmodul, da sie die pneumatischen Zylinder kontrolliert, die die Verriegelung bewegen. Der Controller beschränkt sich darauf, das bistabile Ventil zu bestromen, bis die Endlageschalter der Verriegelung die richtige Position melden. Der reflektorische Operator überwacht die Endlageschalter und die Dauer der Schaltvorgänge und meldet jedes Fehlverhalten dem übergeordneten Operator.

Spurführung

Die Funktionsgruppe Spurführung ist für die Führung der Achsen im Gleis zuständig. Dies wird durch Einstellen entsprechender Lenkwinkel über die *MFM Lenkung* der Vorder- und der Hinterachse realisiert. Durch diese Trennung wird das nichtlineare Verhalten der Zylinder gekapselt und der Spurführung ein Akteur mit annähernd idealem I-Verhalten bereitgestellt. Neben der Möglichkeit der schrittweisen Inbetriebnahme und der separaten Überwachung wird damit die Komplexität der Regelung erheblich reduziert. (Die gleiche Strukturierung und Kapselung der Funktionen findet auch bei der aktiven Federung in [Hes06] Anwendung.) Im OCM der Spurführung finden die Auswertung der vielen Sensoren und die Weiterverarbeitung der Daten statt (Kalman-Filter, Achslageberechnung usw.). Der Controller ist strukturvariabel und ermöglicht die Umschaltung zwischen verschiedenen Regel- und Vorsteueralgorithmen. Die Stellwerte sind die Lenkwinkel und die Lenkwinkelraten, die als Sollwerte für die unterlagerten Controller der *MFM Lenkung* dienen. Der reflektorische Operator steuert die Reglerkonfiguration in Abhängigkeit von den Benutzerwünschen, dem Zustand der Sensorik und der Richtungsvorgabe von der höheren Ebene. Neben der direkten Reaktion auf Fehler in den Sensoren und den unterlagerten MFM werden die Fehler ausgewertet und in kumulierter Form an die höhere Ebene weitergeleitet. Bei einem Fehler in einer Achse wird die Spurführungsregelung deaktiviert und beide Achsen (sofern noch möglich) in Geradeausstellung gebracht. Bei Sensorfehlern wird auf einen Regler umgeschaltet, der ohne die ausgefallenen Sensoren arbeiten kann (siehe auch [SGH⁺09]). In der Hochlaufphase koordiniert das OCM *Spurführung* die unterlagerten Module und gibt die Regelung erst frei, wenn beide Achsen bereit sind.

Lenkung

Das Funktionsmodul *Lenkung*, das einen Lenkzylinder regelt, ist ein sehr einfaches OCM, dessen reflektorischer Operator den Sensor und den Akteur überwacht. Außerdem wird ein manueller Betrieb ermöglicht, der zur Vorführung der Lenkbewegung oder zur Vermessung der Dynamik dient. Die Funktion des Controllers ist abhängig von dem Betriebsmodus (Lenken oder Manuell). Im automatischen Lenk-Modus hat der Regler die in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Struktur.

Energieversorgung

Die Voraussetzung für die Betriebsfähigkeit der Funktionsmodule (und auch der Rechenhardware) ist die korrekte Energieversorgung. Für die Richtungs- wahl/Spurführung muss hydraulische, pneumatische und elektrische Energie vor- handen sein. Die Regelung dieser Energiequellen ist teilweise in Hardwarekom- ponenten integriert (elektrische Umrichter), und teilweise durch eigene Informa- tionsverarbeitung realisiert. Aufgrund der fundamentalen Bedeutung der Ener- gieversorgung für die Funktion des Systems findet eine ständige Überwachung aller beteiligten Prozesse statt. Die enge Verknüpfung zwischen den Aktoren und der Energieversorgung bedingt den besonderen Status der Versorgungsmodule. Um direkt mit den betroffenen MFM kommunizieren zu können, sind sie in einer Querschnitts- oder Matrixstruktur angeordnet. Diese durchbricht die normaler- weise streng eingehaltene hierarchische Struktur. Das wird damit gerechtfertigt, dass der Informationsfluss andernfalls immer hinauf über das AMS und dann wieder hinab durch alle MFG verlaufen würde. Zur Ablaufsteuerung beim Ein- und Ausschalten sowie zur allgemeinen Kontrolle ist die Energieversorgung jedoch dem AMS unterstellt.

4.2 Allgemeine Struktur des Spurführungsreglers

Der Controller der Spurführung ist in Anlehnung an einen Regler mit zwei Frei- heitsgraden strukturiert (siehe auch [GWT⁺08b]). Dadurch wird die Vorsteuerung der gewünschten Fahrzeugbewegung von der Ausregelung von Fehlern entkoppelt. Der Vorsteuerungsstellwert setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, die in unter- schiedlichen Frequenzbereichen aktiv sind. Zum einen wird der globale Verlauf der Trassierung vorgesteuert, um das Fahrzeug auf die ideale Trajektorie von Gera- den und Kurven zu lenken (δ_{kurve}). Ist der Verlauf der Gleislagefehler bekannt, so kann zusätzlich auch ein Lenkwinkel vorgesteuert werden, der das Fahrzeug einer entsprechenden Trajektorie folgen lässt (δ_{traj}). Die Lenkwinkel zur Kurvenvor- steuerung werden gemäß Gleichung (4-3) aus der Krümmung der Trasse und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs berechnet. Die Lenkwinkel zur Trajektorienvor- steuerung werden mithilfe des inversen Fahrzeugmodells Gleichung (3-9) aus dem Verlauf der gewünschten Trajektorie und den zeitlichen Ableitungen berechnet.

Um eine Verwechslung mit der Vorsteuerung der Lenkwinkeländerungsrate ($\dot{\delta}_{R,ref}$) zu vermeiden, soll diese Vorsteuerung *Fahrzeugvorsteuerung* ($\delta_{vor} = \delta_{kurve} + \delta_{traj}$) genannt werden. Die in Bild 4-2 dargestellte Struktur zeigt neben der Regelung mit zwei Freiheitsgraden auch das Prinzip der verallgemeinerten Kaskade, bei dem die Stellgröße der Spurführungsregelung der Sollwert der unter- lagerten Lenkwinkelregler ist (vgl. Abschnitt 2.3.3). Die beiden Lenkwinkelregler sind im Detail in Bild 3-9 dargestellt.

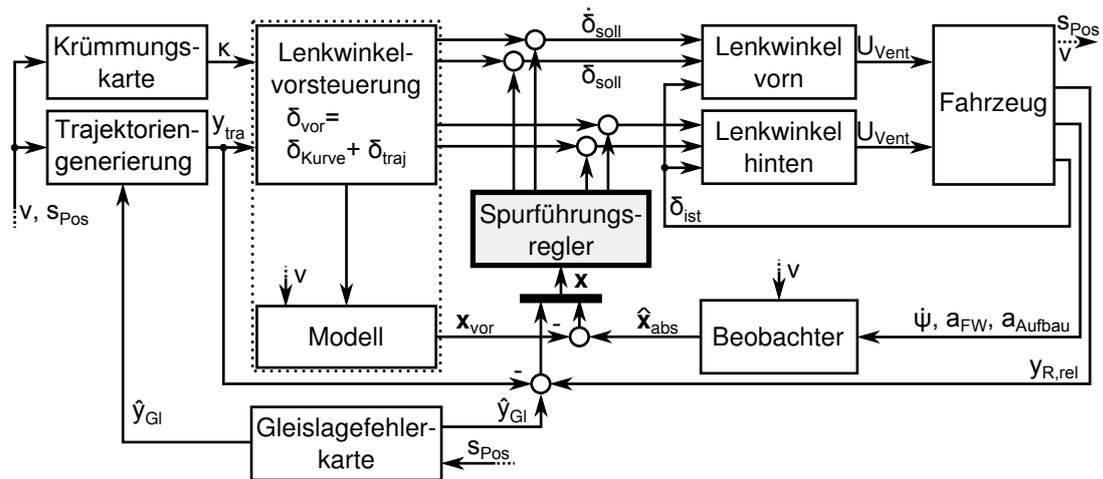


Bild 4-2: Die Struktur der Spurführungsregelung mit zwei Freiheitsgraden

Bei der Beschreibung des linearen Modells in Abschnitt 3.3 wird außer Acht gelassen, dass das Modell nur für kleine Gierwinkel gültig ist und daher keine Kurvenfahrten wiedergeben kann. Dieses Problem lässt sich jedoch durch eine geeignete Lenkwinkelvorsteuerung für die Kurvenfahrt beheben. Dazu muss bei den Zuständen für die Regelung unterschieden werden zwischen den Achslagen und den anderen Zuständen, die auch in Kurven durch ein lineares Modell beschrieben werden können.

Die Achslagen des linearen Modells sind nur gültig, wenn der Gierwinkel klein bleibt. Dazu müssen die Zustände in einem Koordinatensystem relativ zur Trassierung betrachtet werden, was durch die beschriebene Kurvenvorsteuerung in der Reglerstruktur mit zwei Freiheitsgraden erreicht wird. In dem lokalen Koordinatensystem ist die Achslage die Querabweichung von der Trasse und wird aus der gemessenen Relativlage der Achsen im Gleis und den zuvor vermessenen Gleislagefehlern berechnet: $y_R = y_{Gl} + y_{R,rel}$. Wird zusätzlich zur Trassierung auch eine Trajektorie vorgesteuert, so muss diese im Rahmen der Reglerstruktur mit zwei Freiheitsgraden natürlich wieder abgezogen werden.

Im Gegensatz zu den Achslagen werden die linear gültigen Zustände geschätzt und liegen im inertialen Koordinatensystem vor (x_{abs}). Gemäß dem Prinzip der Regelung mit zwei Freiheitsgraden muss von diesen Zuständen der Verlauf der Zustände abgezogen werden, der sich durch die Fahrzeugvorsteuerung (δ_{vor}) des idealen Systems ergibt (x_{vor}). Dieser Verlauf wird aus den Vorsteuerungswerten δ_{vor} mithilfe des Modells ohne Achsablage aus Abschnitt 3.3 berechnet. Dies ist möglich, da das Modell stabil ist. Die Simulation wird zeitdiskret mit exakter Diskretisierung durchgeführt.

4.2.1 Kurvenvorsteuerung

Die Lenkwinkel δ_{kurve} , die zur Steuerung des Fahrzeugs in der Kurve notwendig sind, werden aus den Zustandsgleichungen von Gierrate $\dot{\psi}_{FW}$ und Schwimmwinkel β des Modells ohne Aufbau- und Achsdynamik aus Abschnitt 3.3 gewonnen:

$$\begin{aligned}\ddot{\psi}_{FW} &= -\frac{c_\alpha l_R^2}{2v(\Theta_{FW} + \Theta_{A,z})} \dot{\psi}_{FW} + \frac{c_\alpha l_R}{2(\Theta_{FW} + \Theta_{A,z})} (\delta_{Rv} - \delta_{Rh}) \\ \dot{\beta} &= -\dot{\psi}_{FW} - \frac{2c_\alpha}{v(m_{FW} + m_A)} \beta + \frac{c_\alpha}{v(m_{FW} + m_A)} (\delta_{Rv} + \delta_{Rh})\end{aligned}\quad (4-1)$$

Bei der Kurvenfahrt soll der Schwimmwinkel konstant null sein und die Gierrate der der Trassierung entsprechen:

$$\begin{aligned}\dot{\psi}_{FW} &= \kappa v \\ \ddot{\psi}_{FW} &= \kappa'(s_{Pos}) v^2 + \kappa \dot{v} \\ \beta &= 0 \\ \dot{\beta} &= 0\end{aligned}\quad (4-2)$$

Durch Einsetzen von (4-2) in (4-1) und Auflösen nach δ_{Rv} und δ_{Rh} ergibt sich die Kurvenvorsteuerung zu:

$$\begin{aligned}\delta_{kurve,v} &= \kappa \frac{l_R}{2} + \kappa v^2 \frac{m_{FW} + m_A}{2c_\alpha} + (\kappa'(s_{Pos}) v^2 + \kappa \dot{v}) \frac{\Theta_{FW} + \Theta_{A,z}}{l_R c_\alpha} \\ \delta_{kurve,h} &= -\kappa \frac{l_R}{2} + \kappa v^2 \frac{m_{FW} + m_A}{2c_\alpha} - (\kappa'(s_{Pos}) v^2 + \kappa \dot{v}) \frac{\Theta_{FW} + \Theta_{A,z}}{l_R c_\alpha}\end{aligned}\quad (4-3)$$

Diese setzt sich aus drei Termen zusammen: Der erste Term ist für die Radialstellung der Achsen zuständig (Ausrichtung hin zum Momentanpol). Der zweite Term dient dem Aufbau der Zentripetalbeschleunigung. Der dritte Term tritt nur bei nicht stationärer Kreisfahrt auf und sorgt für die Gierbeschleunigung wenn sich die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit oder die Trassenkrümmung ändert. Die Ableitungen der Kurvenvorsteuerung $\dot{\delta}_{kurve}$, die zur Vorsteuerung im Lenkwinkelregler benötigt werden, werden numerisch berechnet.

4.2.2 Störgrößenaufschaltung

In der Praxis lässt sich die Geradeausstellung der Achsen nur schwer vermessen. Auch kann der Lenkwinkel für die Querbeschleunigung in Kurven nicht exakt berechnet werden, da die Schräglaufsteifigkeit und die Fahrzeugmasse nur näherungsweise bekannt sind. Um den Einfluss dieser Ungenauigkeiten stationär ausgleichen zu können, wird die Fahrzeugvorsteuerung um einen I-Anteil erweitert: $\delta_{vor} = \delta_{kurve} + \delta_{traj} + \delta_I$ (siehe Bild 4-3).

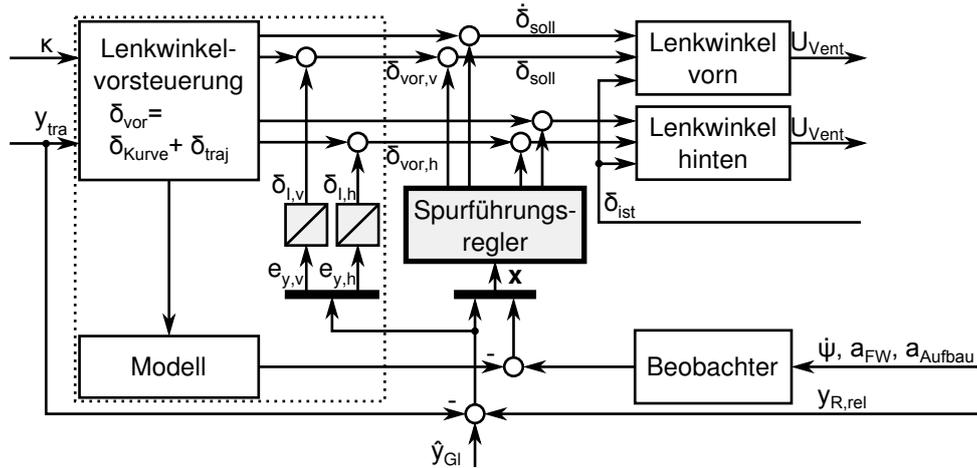


Bild 4-3: Detail der Spurführungsregelung: der I-Anteil im Lenkwinkel

Trotz der Rückführung des Regelfehlers der Achslage handelt es sich dabei konzeptionell nicht um eine Regelung. Der I-Anteil muss vielmehr als Störgrößenaufschaltung (Störung des Lenkwinkels) mit Störgrößenschätzer (Integrator) aufgefasst werden. Daher darf der Stellwert des I-Anteils auch nicht in die Berechnung der Vorsteuerungszustandswerte x_{vor} eingehen. Er kompensiert ja Abweichungen der Regelstrecke von den gemachten Annahmen und stellt damit modellkonforme Verhältnisse her. Da es sich um den Ausgleich quasi konstanter Störungen handelt, ist die Zeitkonstante dieses I-Anteils sehr langsam gewählt.

4.2.3 Regelung mit Vorsteuerung der Gleislagefehler

Ist der Verlauf der Gleislagefehler bekannt, kann er entweder direkt vorgesteuert oder, wie in Bild 4-2 dargestellt, zur Berechnung einer optimalen Trajektorie verwendet werden. Die Lenkwinkel δ_{traj} zur Vorsteuerung der Gleislagefehler Trajektorie werden mithilfe der flachheitsbasierten Inversion (Gleichung (3-9)) aus der Trajektorie und ihren Ableitungen berechnet. Diese Berechnung vernachlässigt die Dynamik des Aufbaus und der Achsen und ist damit nicht exakt. Es werden jedoch gute Ergebnisse damit erzielt (vgl. Abschnitt 5.3.3). Die Fehler, die durch die Vereinfachung gemacht werden und die sonstigen Störungen werden von dem Regler kompensiert, der dann als Störregler arbeitet.

4.2.4 Regelung bei unbekanntem Gleislagefehlern

Ist der Verlauf der Gleislagefehler unbekannt, so können die absoluten Achslagen y_R in (3-1) nicht berechnet werden. Es stehen dann nur die gemessenen relativen Achslagen $y_{R,rel}$ zur Verfügung. Bild 4-4 zeigt, dass diese fehlende Information als Störung interpretierbar ist. Im Modell des Fahrzeugs können Störeingänge eingefügt werden, sodass ein Übertragungspfad zu den Ausgängen der Achslagen

existiert, nicht aber zu den anderen Messgrößen. Dies ist möglich, da die Achslagen keine Rückwirkung auf das restliche System haben. Für diese Störeingänge gibt es mit Sicherheit Störungen z_{Gl} , die an den Ausgängen der Achslagen den Verlauf der Gleislagefehler hervorrufen (vorausgesetzt, diese sind hinreichend oft differenzierbar). Damit lässt sich die fehlende Korrektur (Addition der Gleislagefehler) der gemessenen Relativlage als Störung auffassen.

Die Forderung, dass die Achsen auf der Mittellinie zwischen den Gleisen geführt werden, entspricht einem Sollwert gleich null für die relative Achslage. Bei unbekanntem Gleislagefehler kann der Regler also als Störregler aufgefasst werden, der die Aufgabe hat, die Ausgänge $y_{Rv,rel}$ und $y_{Rh,rel}$ des gestörten Systems auf null zu regeln. Eine Selbstoptimierung ist dann jedoch nur mit dem in Abschnitt 6.5 vorgestellten Regler möglich, der auch als Störregler eingesetzt werden kann.

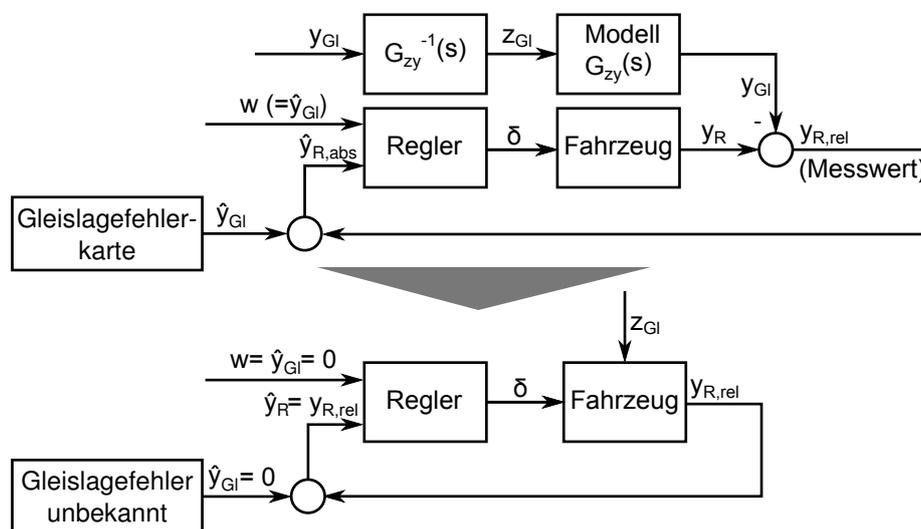


Bild 4-4: Die Wirkung der Gleislagefehler als Störgröße

4.2.5 Zustandsregler zur modellgestützten Vorsteuerung

Die Lenkwinkel sind zwar Zustände des Modells 16. Ordnung, sie werden jedoch von den beiden unterlagerten *MFM Lenkung* geregelt und sollen nur vorgesteuert werden. Ihre Rückführung in den überlagerten Regelkreis der Spurführung würde in die Dynamik der Lenkregelung aus Abschnitt 3.2.2 eingreifen. Stattdessen werden die Lenkwinkel durch ein Modell (einen Integrator) aus den Lenkwinkeländerungsraten berechnet. Es handelt sich hierbei um eine modifizierte Form der modellgestützten Vorsteuerung, welche in Bild 4-5 in der verallgemeinerten Kaskade zu sehen ist.

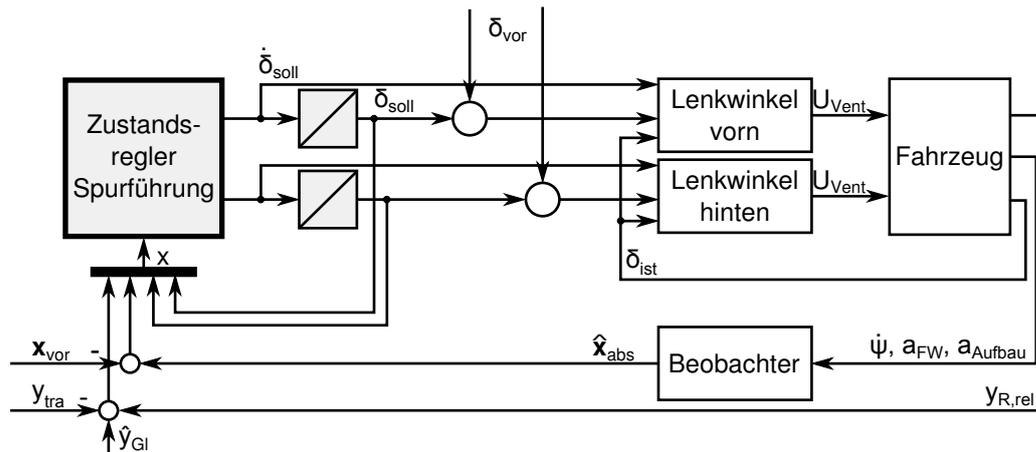


Bild 4-5: Die Vorgabe der Lenkwinkel und der Lenkwinkeländerungsrate durch den Regler und die Vorsteuerung

4.3 Ziele

Bevor eine Selbstoptimierungsstrategie gefunden werden kann, muss zunächst geklärt werden, welche Aufgaben und Ziele das System (gemeint sind sowohl das Gesamtsystem als auch einzelne Module) hat. Sollen, wie im vorliegenden Fall, mathematische Optimierungsmethoden zum Einsatz kommen, so müssen diese Ziele auch quantifizierbar und im Betrieb messbar sein. Bei der Anforderungsanalyse wird zwischen inhärenten und externen Zielen unterschieden.

4.3.1 Inhärente Ziele

Die inhärenten Ziele sind die Aufgaben, die das System zur Erfüllung seiner Grundfunktionalität verfolgt. Sie leiten sich aus dem Entwurfszweck ab und umfassen sowohl die Hauptgebrauchsfunktionen als auch allgemeinere Anforderungen. Aus der Anforderungsanalyse der RailCabs ergeben sich für die Spurführung die folgenden inhärenten Ziele:

- 1) Entgleisungssicherheit (*Sicherheit*)
- 2) Geringer Verschleiß an: a) Rad und Schiene, b) Aktor und Lagern, c) Spurrkranz und Schienenkopf (*Verschleiß*)
- 3) *Robustheit*
- 4) Geringe Bauteil- und Strukturbelastung (*Belastung*)

Der Schutz vor Entgleisung, also das garantierte Führen des Fahrzeugs in dem von den Gleisen vorgegebenen Spurkanal ist die Grundfunktion der Spurführung. Es gibt verschiedene Kriterien, mit denen sich die Entgleisungssicherheit quantifizieren lässt. Für den Fall, dass Spurrkranzanläufe unvermeidbar sind, lässt sich ein Sicherheitsfaktor gegen Aufklettern berechnen (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Im Hinblick auf das zweite Ziel ist es jedoch wünschenswert, dass es gar nicht erst zu Spurkranzanläufen kommt. Unter dieser Bedingung kann auch die Spurkranzanlauftrate (SAR) als Maß für die Entgleisungssicherheit dienen, auch wenn sie sehr viel konservativer ist. Die Spurkranzanlauftrate sei definiert als der Anteil pro Zeiteinheit (SAR_t) bzw. pro Wegstrecke (SAR_s), die sich ein Spurkranz im Kontakt mit dem Schienenkopf befindet (bei konstanter Geschwindigkeit ist $SAR_s = SAR_t$):

$$SAR_t = P \left(|y_{R,rel}(t)| \geq \frac{G(t)}{2} \right) = \frac{1}{T} \int_0^T |y_{R,rel}(t)| \geq \frac{G(t)}{2} dt \quad (4-4)$$

Die Relation wird dabei als Funktion mit der Wertemenge $\{0, 1\}$ verstanden. Sie ist größer-gleich, da sich die Achsquerposition tatsächlich jenseits des Spurkanals befinden kann, wenn nämlich der Spurkranz (zunächst mit dem Übergangsradius) beginnt, an der Schiene aufzulaufen. Unter der Annahme, dass die Systemdynamik linear ist und von weißem Rauschen angeregt wird, sind alle Systemgrößen normalverteilt, und die Wahrscheinlichkeiten (4-4) lassen sich mithilfe der Standardabweichung berechnen:

$$y_{R,rel} \sim \mathcal{N} \left(0, \sigma_{y_{R,rel}} \right) \quad (4-5)$$

$$SAR_t = 2 - 2 \Phi \left(\frac{G}{2 \sigma_{y_{R,rel}}} \right)$$

Hierbei ist Φ die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung.

Die Annahme, dass es sich bei $y_{R,rel}$ um einen linearen stochastischen Prozess handelt, ist mit Sicherheit verletzt, wenn es zu Spurkranzanläufen kommt, da die dabei auftretenden Kräfte nichtlinear sind. Da der Träger der Normalverteilung unendlich ist, bleibt nach diesem Modell immer ein Restrisiko für das Auftreten von Spurkranzanläufen. Damit ist die Annahme normalverteilter $y_{R,rel}$ jedoch selbst dann verletzt, wenn das Systemverhalten mit Ausnahme der Spurkranzanläufe tatsächlich linear wäre. Wenn jedoch durch entsprechende Maßnahmen die Standardabweichung von $y_{R,rel}$ so klein gemacht wird, dass Spurkranzanläufe praktisch ausgeschlossen sind, wird auch der Fehler bei der Berechnung der SAR mithilfe von (4-5) vernachlässigbar klein¹. Daher wird im Folgenden Gleichung (4-5) immer dann verwendet, wenn keine Messwerte vorliegen, um die tatsächliche SAR zu berechnen. Dies ist immer der Fall, wenn eine Prognose für die vorausschauende Anpassung der Regelung, also die Selbstoptimierung, benötigt

¹ Dabei wird die Linearität der Systemdynamik als vereinfachende Annahme vorausgesetzt. Wie bereits in Abschnitt 3.3 gezeigt wurde, lässt sich die Systemdynamik relativ genau durch ein lineares Modell abbilden.

wird. Speziell die mathematische Zielformulierung nimmt die Form einer probabilistischen Nebenbedingung an:

$$\sigma_{y_{R,rel}} \leq \frac{G}{2 \Phi^{-1} \left(1 - \frac{SAR_{soll}}{2} \right)} \quad (4-6)$$

Soll die Wahrscheinlichkeit von Spurkranzanläufen z. B. kleiner 0,27 % (also 2,7 m gesamte Kontaktlänge pro km Strecke) sein, so muss $\sigma_{y_{R,rel}}$ kleiner-gleich $G/6$ sein. Dieser Ansatz wird als *Wahrscheinlichkeitsrestriktion* (engl. chance constraint) bezeichnet (vgl. [SN99]).

Der Verschleiß, der durch die Spurführung verursacht wird, tritt an drei Stellen auf: im Rad-Schiene-Kontakt, im Aktor und in den Lagern der Achse. Weiterhin kann beim Verschleiß an Rad und Schiene unterschieden werden, ob er in der Lauffläche oder bei Spurkranzanläufen auftritt. Bei der Quantifizierung müssen die verschiedenen Verschleißformen sehr unterschiedlich bewertet werden. Hier spielen vor allem wirtschaftliche Faktoren eine wichtige Rolle. Der Verschleiß im Aktor und in den Lagern wird im Wesentlichen von der Frequenz und Amplitude der Lenkbewegungen beeinflusst. Durch gute Schmierung und aufgrund der guten Wartbarkeit ist der wirtschaftliche Schaden mit Sicherheit um Größenordnungen geringer als der an Rad und Schiene. Daher wird er nicht weiter betrachtet.

Der Verschleiß in der Lauffläche ist bedingt durch den Schlupf, der die Voraussetzung für die Übertragung von Querkräften ist. Die Verschleißleistung ist in erster Näherung proportional zum Betrag der Querkraft (vgl. Abschnitt 2.2.2) und damit auch der Querschleunigung. Da die aktive Führung des Fahrzeugs mithilfe der schlupfbedingten Querkräfte realisiert wird, und insbesondere auch die Zentripetalkraft kraftschlüssig aufgebaut wird, lässt sich der Verschleiß nur schwer vermeiden. Da sich die Querschleunigung in Kurven nicht vermeiden lässt, kann der Verschleiß nur durch möglichst geringe dynamische Kräfte minimiert werden². Ein Optimierungsziel müsste also die Minimierung der dynamischen Querschleunigung sein. Weniger exakt, aber fast genauso wirkungsvoll (siehe Abschnitt 5.3.1) ist es, die Eingriffe der aktiven Spurführung auf die Vermeidung von Spurkranzanläufen zu beschränken (und dabei das volle Spurspiel auszunutzen).

Der Verschleiß, der bei einem Spurkranzanlauf verursacht wird, entsteht durch Gleitreibung unter meist großen Normalkräften. Er ist damit sehr viel größer als der Verschleiß in den Laufflächen. Die großen Normalkräfte resultieren aus der hohen Steifigkeit des Systems aus Achslager, Spurkranz, Schiene und Unter-

² Da sich Querkräfte nicht vermeiden lassen, wäre es sehr viel sinnvoller, diese Kräfte formschlüssig aufzubringen, beispielsweise durch gestürzte oder konische Räder. Insbesondere der große Verschleiß in Kurven ließe sich so ganz vermeiden.

bau. Durch die größere Umfangsgeschwindigkeit des Spurkranzes kommt es zu einer Differenzgeschwindigkeit im Kontaktpunkt, sodass bei einem Spurkranzlauf Gleitreibung auftritt. Zusammen mit dem ersten inhärenten Ziel ergibt sich daher die Forderung, Spurkranzläufe möglichst ganz zu vermeiden. Dies steht im Widerspruch zum Ziel 2a), das die Ausnutzung des Spurspiels bis an die Grenzen fordert. Damit liegt bei der Spurführung ein Mehrzieloptimierungsproblem vor.

Mit Robustheit ist die Eigenschaft gemeint, dass die Spurführung auch dann ihren Entwurfszweck erfüllt, wenn große Unsicherheiten in Bezug auf die Umgebungsbedingungen herrschen. Dies können schlecht identifizierbare Systemparameter (bspw. die Schräglaufsteifigkeit c_α) sein oder unbekannte Gleislagefehler. Parameterunsicherheiten können durch entsprechende regelungstechnische Entwurfsmethoden berücksichtigt werden. Eine robuste Regelung ist auch dann noch stabil, wenn die unsicheren Parameter die ungünstigste Kombination ihrer Werte annehmen.

Die Gleislagefehler sind keine Parameter, sondern stellen eine Anregung des Systems dar. Sind die Gleislagefehler unbekannt, muss der Regler so eingestellt sein, dass keine Spurkranzläufe auftreten. Dies bedeutet, dass ein fest eingestellter Regler in Abschnitten mit geringen Gleislagefehlern viel zu konservativ ist und daher mehr Energie benötigt als nötig wäre. In Abschnitten mit besonders großen Fehlern wäre er eventuell trotzdem nicht schnell genug, um Spurkranzläufe zu vermeiden.

Robustheit ist also eine antizipatorische Kompromisslösung, die ein definiertes Verhalten im Angesicht eines bestimmten Intervalls von Unwägbarkeiten garantiert. Dafür muss ein im Durchschnitt suboptimales Verhalten (meist höherer Energieverbrauch) in Kauf genommen werden. Selbstoptimierende Regler (und auch adaptive Regelungen) dagegen können also als inhärent robust bezeichnet werden, da sie das Regelverhalten zur Laufzeit an die Einflüsse anpassen, die sonst eine Kompromisseinstellung erfordern würden.

Die Strukturbelastung ist ein wichtiger Einflussfaktor auf die Verfügbarkeit des Systems ([DHK⁺08]). Durch die explizite Berücksichtigung dieses Ziels kann die Selbstoptimierung noch einen Schritt über das heutzutage übliche Condition-Monitoring hinausgehen und die Lebensdauer der Komponenten aktiv verlängern. Die Lebensdauer von Bauteilen wird hauptsächlich durch dynamische Lasten beeinflusst (Extremlasten innerhalb der vorgesehenen Grenzen vorausgesetzt). Da diese dynamischen Lasten prinzipiell durch die gleichen Kräfte bedingt sind, wie sie im Rad-Schiene-Kontakt zum Verschleiß führen, gilt das dort Gesagte auch für die Strukturbelastung. Sie wird daher nicht gesondert betrachtet.

4.3.2 Externe Ziele

Die externen Ziele eines Systems sind dadurch gekennzeichnet, dass sie von außen durch den Menschen, die Umwelt oder andere technische Systeme an das System herangetragen werden. Bei der Spurführung kommen zwei Ziele in Betracht, die vom Menschen bzw. von anderen Teilsystemen des RailCabs vorgegeben werden:

- 1) Energieeffizienz bzw. Leistungsaufnahme (*Energie*)
- 2) Geringe Anregung des Aufbaus (*Komfort*)

Energieeffizienz ist die Forderung nach geringem Energieverbrauch bzw. geringer Leistungsaufnahme. Der Energieverbrauch ist das Integral der Leistungsaufnahme und bezieht sich also auf einen längeren Zeitraum. Der Energieverbrauch trägt zu den wirtschaftlichen Kosten bspw. einer bestimmten Wegstrecke bei. Der Leistungsbedarf dagegen ist ein Momentanwert, der im Augenblick nichts über die Wirtschaftlichkeit des Systems aussagt. Gleichwohl unterliegt die Leistungsaufnahme meist festen Grenzen, die nicht überschritten werden dürfen. Auch führt die Minimierung des Verlaufs der Leistungsaufnahme zu energieoptimalem Verhalten. Prinzipiell muss zur Optimierung des Energieverbrauchs immer ein gewisser Horizont betrachtet, also eine Planung durchgeführt werden. Die Leistungsaufnahme dagegen kann im Verlauf von Moment zu Moment neu optimiert werden.

Der Leistungsbedarf der Spurführung wird primär durch die Lenkzylinder bestimmt (die elektrische Leistungsaufnahme der Ventilregelung und Sensoren wird vernachlässigt). Die hydraulische Leistung P_{hyd} ist das Produkt aus Versorgungsdruck p_S und Volumenstrom \dot{q} :

$$P_{hyd}(t) = p_S(t) \dot{q}(t) \quad (4-7)$$

Der Volumenstrom wird hauptsächlich durch die Volumenänderung der Zylinderkammern beim Ein- und Ausfahren des Kolbens bestimmt. Da die Kolbenflächen in den beiden Zylinderkammern unterschiedlich groß sind (A_A groß, A_B klein), müsste theoretisch nach dem Vorzeichen der Kolbengeschwindigkeit unterschieden werden, ob der Zylinder ein- (Öl fließt in die kleine Kammer) oder ausfährt (Öl fließt in die große Kammer). Da der Zylinder jedoch bei fast konstantem Druck im Mittel genau so lange Wege ein wie ausfährt, und die hydraulische Leistung dem Bordnetz gegenüber durch den Druckspeicher geglättet wird, kann auch mit einer mittleren Kolbenfläche gerechnet werden. Die Leistungsaufnahme einer Achse ist dann proportional zur Kolbengeschwindigkeit des Lenkzylinders bzw. der Lenkwinkeländerungsrate (diese ist annähernd proportional zur Kolbengeschwindigkeit):

$$P_{hyd}(\dot{\delta}_R(t)) = p_S \frac{A_A + A_B}{2} v_{zyl}(\dot{\delta}_R(t)) \approx c_{P,hyd} \dot{\delta}_R(t) \quad (4-8)$$

Der Fahrkomfort wird primär durch die aktive Federung und die Neigetechnik beeinflusst. Dennoch ist es denkbar, dass die Spurführung die aktive Federung bei ihrer Aufgabe unterstützt, oder dass beide sogar gemeinsam geregelt werden, da sie ja mechanisch eng verkoppelt sind. Für den Fall, dass beide getrennt arbeiten oder die Feder-/Neigetechnik inaktiv ist, kann die Spurführung die komfortrelevante Anregung, die sie in den Aufbau einleitet, minimieren. Der Fahrgastkomfort ist nach [Hes06] das Quadrat der frequenzbewerteten Beschleunigungen. Unter Vernachlässigung des Bewertungsfilters ist der Fahrkomfort also äquivalent zum inhärenten Ziel 2a) (Verschleiß an Rad und Schiene), jedoch mit einer anderen, evtl. situations- und kundenabhängigen, wirtschaftlichen Gewichtung.

5 Selbstoptimierende Trajektorienvorsteuerung

Der erste Ansatz für den Entwurf einer selbstoptimierenden Spurführungsregelung basiert auf dem Konzept der *Modellprädiktiven Regelung*, da es sehr flexibel ist und die Möglichkeit bietet, die komplexen Anforderungen transparent und intuitiv verständlich umzusetzen.

5.1 Modellprädiktive Planung und Interpolation der Trajektorien

Die Spurführung der RailCabs hat Anteile mit sehr schneller Dynamik, und die Rechenkapazität für die Regelung ist begrenzt (die Regelung wird zusammen mit allen anderen Modulen der Fahrzeugsteuerung und -Regelung auf einem Prozessor ausgeführt). Daher ist eine Modellprädiktive Regelung nicht umsetzbar. Stattdessen wird ein Ansatz nach [MMM00] und [MFM02] verfolgt, der auf einem Regelgesetz der zweiten Variante in Abschnitt 2.4.1 beruht: die Stabilisierung des Systems wird durch ein statisches Rückführungsgesetz garantiert, und die Optimierung bestimmt die Trajektorie eines zusätzlichen Stellwertanteiles. Die optimierte Stellwerttrajektorie wird jedoch als reine Vorsteuerung ohne die Rückführung der Systemzustände berechnet. Es handelt sich daher um eine *Modellprädiktive Trajektorienplanung* (ein ähnlicher Ansatz für die Spurführung des RailCabs findet sich auch in [HMO04]). Das Stützstellenintervall der Trajektorie ist sehr groß gewählt. Dafür wird die Trajektorie jedoch zwischen den Anpassungen dreifach stetig differenzierbar interpoliert, und jede Trajektorie ist so berechnet, dass sie sich glatt an die Vorhergehende anschließt.

Die Prädiktion basiert auf dem Modell 6. Ordnung aus Abschnitt 3.3. Nach der in [PMM01] vorgeschlagenen Methode werden nicht die Trajektorien der Stellwerte optimiert, sondern die Trajektorien der Achslagen. Die Zustände und Stellwerte werden dann mithilfe der flachheitsbasierten Modellinversion Gleichung (3-9) rekonstruiert (vgl. [NM98]). Die Achstrajektorien sind örtlich diskretisiert mit einer Stützstellenweite von 0,85 m (das entspricht dem halben Achsstand). Die Optimierung der örtlich diskretisierten Achstrajektorien hat den Vorteil, dass sie auch noch bei einer Geschwindigkeitsänderung verwendet werden können. Weiterhin sind die Trajektorienstützpunkte so gewählt, dass sie mit denen der Gleislagefehler zusammenfallen. Dies ermöglicht es, die Stützstellenwerte der Gleislagefehler ohne eine Interpolation direkt in der Optimierung zu verwenden.

Eine Trajektorie mit wanderndem Horizont ist theoretisch nur dann optimal, wenn sie unendlich weit in die Zukunft optimiert wird [QB97]. Bei der Spurführung reicht jedoch ein Horizont von ca. 15 m aus. Wenn es die Bedingungen zulassen, wird die Optimierung alle 0,85 m wiederholt. Sollte dies nicht möglich sein, können auch ein oder mehrere Zyklen übersprungen werden. In diesem Fall steht

die optimale Trajektorie noch maximal für die Länge des Optimierungshorizonts zur Verfügung, bevor der reflektorische Operator in einen Modus ohne optimierte Trajektorienvorsteuerung umschalten muss. Unter normalen Bedingungen ist die Rechenkapazität so gewählt, dass dieser Fall nicht eintritt.

5.1.1 Proportionaler Störregler

Da es sich bei der optimalen Trajektorie um eine reine Vorsteuerung handelt, muss ein unterlagerter Regler die Störungen und Modellabweichungen ausgleichen. Hierzu wird ein P-Regler eingesetzt, der (unabhängig von der Geschwindigkeit) den Lenkwinkel proportional zur Abweichung zwischen Soll- und Ist-Querlage einstellt. Dieser Regler ist sehr robust, da er mit der minimalen Menge an Messgrößen arbeitet und auf keinen Zustandsschätzer angewiesen ist. Da er nicht modellbasiert ist, können auch keine Probleme mit Modellungenauigkeiten auftreten. In der Praxis ist die Regelgüte auch bei höheren Geschwindigkeiten mit der von Zustandsreglern vergleichbar. Der einzige Nachteil ist die schlechte Anpassbarkeit der Regelgüte und der Stelleistung. Dazu müsste die Pareto-Front dieser beiden Zielgrößen bekannt sein. Da die Gestalt der Pareto-Front jedoch maßgeblich von den vielfältigen Störungen beeinflusst wird (vgl. [GWT⁺08a]), ist eine Berechnung der Pareto-Front nicht möglich.

5.1.2 Differenzielle Dynamische Programmierung

Da die Trajektorienoptimierung online geschehen muss, wird die *Differenzielle Dynamische Programmierung* (DDP) verwendet, die sehr effizient arbeitet und gute Konvergenzeigenschaften hat (vgl. [LA91], [CCF⁺90] oder [DB89]). Der Algorithmus ist eine spezielle Form der *Sequenziellen Quadratischen Programmierung* (SQP, siehe [JS03]) für nichtlineare *optimale Kontroll-Probleme*. Ausgehend von einer Starttrajektorie werden iterativ quadratisch Ersatzprobleme gelöst, wobei das Systemmodell und die Zielfunktion durch eine Taylorreihenentwicklung zweiter Ordnung um die aktuelle Trajektorie approximiert werden. Die Lösung dieser Ersatzprobleme entspricht dem Vorgehen zur Berechnung von zeitdiskreten Riccati-Reglern mit endlichem Horizont (vgl. [FR94]). Wie jedes Newton-Verfahren weist auch die DDP nahe der Lösung eine quadratische Konvergenzrate auf.

Im Gegensatz zu vielen anderen Methoden (vgl. [Bet98]) hat der Algorithmus die Eigenschaft, Trajektorien zu generieren, die stets realisierbar sind (Beschränkungen werden eingehalten) und deren Zielfunktionswert mit jeder Iteration kleiner wird oder zumindest gleich bleibt. Damit ist der Algorithmus bedingt echtzeitfähig, da die Optimierung mit jedem Zwischenergebnis abgebrochen werden kann. Aufgrund des Prinzips des gleitenden Horizonts kann ein großer Teil der Trajektorie als Startwert für die folgende Optimierung übernommen werden. Somit

können die Trajektorien auch über mehrere Zyklen konvergieren, wenn nicht in jedem Zyklus genug Rechenzeit zur Verfügung steht. Die Verwendung der verschobenen Trajektorie aus dem vorherigen Zeitschritt als Startwert und der frühzeitige Abbruch der Optimierungsiterationen werden auch in [WB10] als Methode zur schnellen Berechnung eines MPC-Reglers vorgeschlagen.

5.1.3 Berücksichtigung von Beschränkungen

Die Soll-Trajektorie der Achslagen unterliegt der harten Begrenzung des Spurspiels. Damit diese Begrenzung in jedem Iterationsschritt eingehalten wird, kommt ein *Inneres-Punkt-Verfahren* mit *logarithmischer Barriere-Funktion* zum Einsatz (siehe [WH04]). Eine logarithmische Barriere-Funktion ist ein Strafterm $\phi(\mathbf{x})$ (berechnet für die Optimierungsvariablen \mathbf{x}), der die Ungleichungsnebenbedingung $g_i(\mathbf{x}) > 0$ schon vor der Verletzung bestraft und in Richtung der Grenze gegen unendlich strebt; jenseits der Grenze ist er nicht definiert: $\phi_\mu(\mathbf{x}) = -\mu \cdot \log(g_i(\mathbf{x}))$. Der Strafterm „drückt“ die Lösung von der Grenze weg. Über den Straffaktor μ kann das Übergangsverhalten bestimmt werden. Für $\mu \rightarrow 0$ nähert sich die Lösung der Optimierung mit Strafterm der Lösung des restringierten Problems an. Da das Problem dabei zunehmend schlechter konditioniert ist, muss die Optimierung in mehreren Iterationsschritten mit zunehmend kleinerem μ durchgeführt werden. Durch die Umwandlung der Nebenbedingung in einen Strafterm kann der DDP-Algorithmus einfach in einer äußeren Schleife eingebettet werden, die den Straffaktor anpasst, bis die gewünschte Genauigkeit erreicht ist. Dieses Vorgehen erleichtert die Implementation und die Fehlersuche. Die äußere Schleife hat eine lineare Konvergenzrate. Dadurch, dass der Strafterm außerhalb der Grenze nicht definiert ist, wird die generierte Trajektorie zu keinem Zeitpunkt das Spurspiel verlassen und die Echtzeiteigenschaft des DDP Algorithmus (in dem Sinne, dass stets mit einer Zwischenlösung abgebrochen werden kann) bleibt erhalten. Diese Eigenschaft ist nicht selbstverständlich: Andere moderne Methoden mit ähnlicher Effizienz (wie z. B. in [Wri93] beschrieben) müssen erst vollständig konvergieren, um sinnvolle Ergebnisse zu liefern.

5.2 Trajektoriengenerierung für die Spurführung

Die selbstoptimierende Trajektoriengenerierung basiert auf der Berücksichtigung von zwei Zielen (vgl. Abschnitt 4.3):

- 1. Entgleisungssicherheit:** Die Trajektorie der Achslagen soll möglichst in der Mitte verlaufen:

$$J_{Sicher} = \int_0^{T_{hor}} (y_{Rv}(t) - y_{Rv,Gl}(t))^2 + (y_{Rh}(t) - y_{Rh,Gl}(t))^2 dt$$

2. Energieeffizienz: Der mittlere Leistungsbedarf für die Lenkbewegungen soll über den Optimierungshorizont möglichst klein sein:

$$J_{Energie} = c_{P,hyd} \cdot \int_0^{T_{hor}} \left(\left| \dot{\delta}_{Rv}(t) \right| + \left| \dot{\delta}_{Rh}(t) \right| \right) dt$$

Zur Auflösung des Zielkonfliktes der Mehrzieloptimierung muss zur Laufzeit ein Pareto-Punkt ausgewählt werden. Dazu wird zunächst offline eine Approximation der Pareto-Front mithilfe des Programmpakets GAIO (siehe Abschnitt 2.4.4) berechnet. Bei dieser Berechnung wird als weiteres Ziel die Querbeschleunigung am Fahrwerk berücksichtigt:

3. Komfort: Die Querbeschleunigung des Fahrwerks über den Achsen soll klein sein:

$$J_{Komfort} = \int_0^{T_{hor}} \dot{y}_{FWv}(t)^2 + \dot{y}_{FWh}(t)^2 dt$$

Die berechnete Pareto-Menge für das ganze Oval wird in Abschnitt 5.3.1 vorgestellt.

Da die Werte der Zielfunktionen vom Verlauf der Gleislagefehler und der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängen, werden die Gleislagefehler in Abschnitte von 15 m Länge unterteilt und für jeden Abschnitt und für mehrere Geschwindigkeiten eine eigene Pareto-Front berechnet. Die Abschnitte werden anhand der Rauigkeit klassifiziert. Die Rauigkeit ist definiert als der quadratische Mittelwert (RMS) der zweiten Ableitung des Verlaufs der Gleislagefehler. Daraus ergibt sich eine Schar von Pareto-Fronten, die zur Laufzeit durch die Geschwindigkeit und die Rauigkeit der künftigen Gleislagefehler indiziert werden kann. Durch die Klassifizierung geht zwar die eindeutige Beziehung zwischen Gleislagefehlern und Pareto-Front verloren, es wird jedoch Speicherplatz gespart und die Möglichkeit gewonnen, auch für nicht explizit berechnete aber ähnliche Gleislagefehler eine passende Pareto-Front zu finden.

Ein ähnliches Vorgehen wird auch in [Mün12] beschrieben. Dort wird vorgeschlagen, die vorab berechneten Pareto-Fronten für verschiedene Umweltbedingungen zusammen mit den dazugehörigen Reglerparametern in einer „Wissensbasis“ zu speichern, was jedoch im Fall von Trajektorienverläufen zu einer sehr großen Datenmenge führen würde. Daher wird in dieser Arbeit zusammen mit jedem Pareto-Punkt der Gewichtungsvektor gespeichert, mit dem sich dieser Punkt rekonstruieren lässt. Der eindeutige Zusammenhang zwischen Pareto-Punkt und Gewichtungsvektor existiert, weil das Problem konvex ist (vgl. [Eic09]). Um die enorme Datenmenge zu reduzieren, werden die Pareto-Fronten und die zugehörigen Gewichtungen durch mehrdimensionale Polynome approximiert.

Zur Auflösung des Zielkonfliktes bei der Trajektoriengenerierung zur Laufzeit werden die beiden Zielfunktionen mit einer gewichteten Summe skalarisiert. Die Gewichtung wird durch ein Auswahlverfahren aus den gespeicherten Pareto-Fronten

bestimmt. Die Online-Optimierung kann daher als Rekonstruktion der Trajektorie aufgefasst werden, die schon einmal zur Berechnung der Pareto-Fronten bzw. -Mengen bekannt war, jedoch aus Platzgründen nicht gespeichert wurde. Durch die Klassifizierung der Gleislagefehler können jedoch auch Trajektorien für Abschnitte berechnet werden, die bei der Berechnung der Pareto-Fronten noch nicht bekannt waren, die aber bekannten Abschnitten ähneln.

Die Auswahl des Pareto-Punktes ist in Bild 5-1 dargestellt. Sie verfolgt das Ziel, die Trajektorie so sicher wie möglich zu planen und dabei eine externe Leistungsvorgabe (die im Gesamtfahrzeug später vom Energie-Management vorgegeben wird) einzuhalten. Es wird also der Pareto-Punkt gewählt, dessen Leistungswert gerade noch die Anforderung erfüllt und dessen Abweichung von der Mittellinie minimal ist. Dabei muss der Leistungsbedarf des P-Reglers mit berücksichtigt werden, da dieser nicht beeinflusst werden kann. Da die Trajektoriengenerierung in die Zukunft plant, wird als Vorhersage für den Bedarf des P-Reglers ein Mittelwert aus der unmittelbaren Vergangenheit verwendet. Da nur der Bedarf der Trajektorienvorsteuerung angepasst werden kann, muss sie mit der Leistung auskommen, die der P-Regler von der Vorgabe „übrig“ lässt. Ist dieser Rest negativ, kann die Vorgabe nicht eingehalten werden. Es wird dann der Pareto-Punkt mit dem kleinsten Leistungsbedarf gewählt.

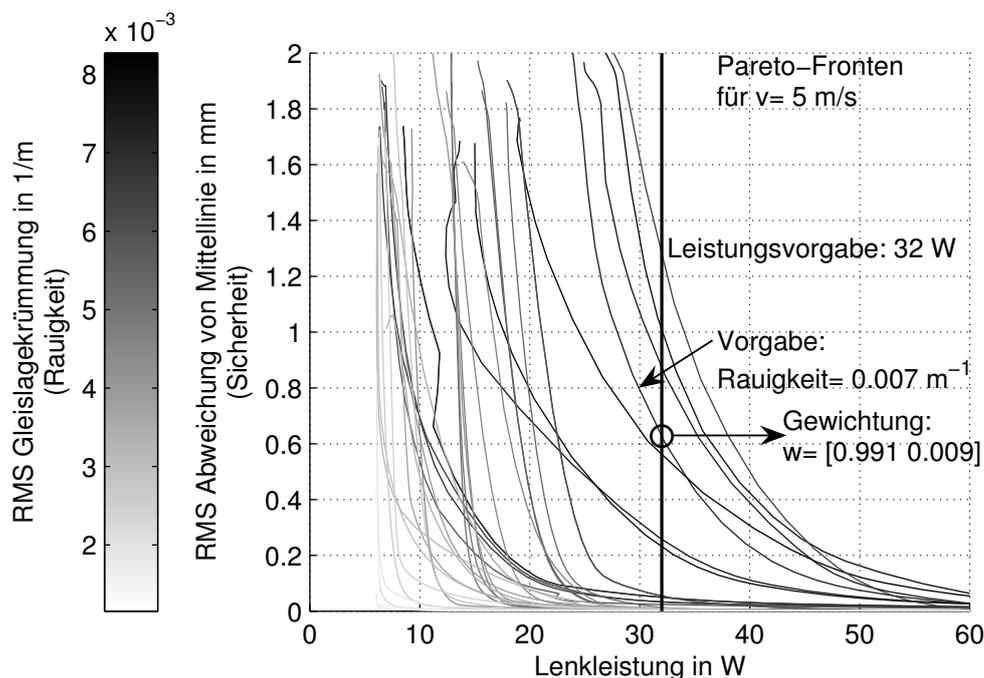


Bild 5-1: Bestimmung des gewünschten Pareto-Punktes. Die Pareto-Fronten überschneiden sich zum Teil, da sie aus einer endlichen Anzahl von Beispieltrajektorien berechnet und heuristisch nach ihrer Rauigkeit klassifiziert wurden.

Der gesamte Ablauf der selbstoptimierenden Spurführung mit Trajektorienvorsteuerung ist in Bild 5-2 dargestellt. Ausgehend von der Vorgabe der Stellwerte umfasst dieser Prozess die folgenden sechs Schritte:

- 1) Der unterlagerte P-Regler stabilisiert die Achslagen entlang der Soll-Trajektorien und gleicht Störungen und Abweichungen aus.
- 2) Die Vorsteuerung wird durch die flachheitsbasierte Modellinversion aus den Soll-Trajektorien der Achslagen berechnet.
- 3) Die Trajektorien der Achslagen vorn und hinten werden zwischen den Stützstellen der optimierten Trajektorie interpoliert.
- 4) Die Optimierung generiert die Stützstellen der Trajektorien, die die gewichtete Summe der Zielfunktionen für die aktuellen Gleislagefehler minimieren.
- 5) Die Gewichtung wird aus einer gespeicherten Approximation der Pareto-Front bestimmt, die zur aktuellen Geschwindigkeit und der Rauigkeit der Gleislagefehler im bevorstehenden Horizont passt.
- 6) Der gewünschte Pareto-Punkte wird so bestimmt, dass der Leistungsbedarf für die Vorsteuerung zusammen mit dem aktuellen Bedarf des P-Reglers die Leistungsvorgabe einhält.

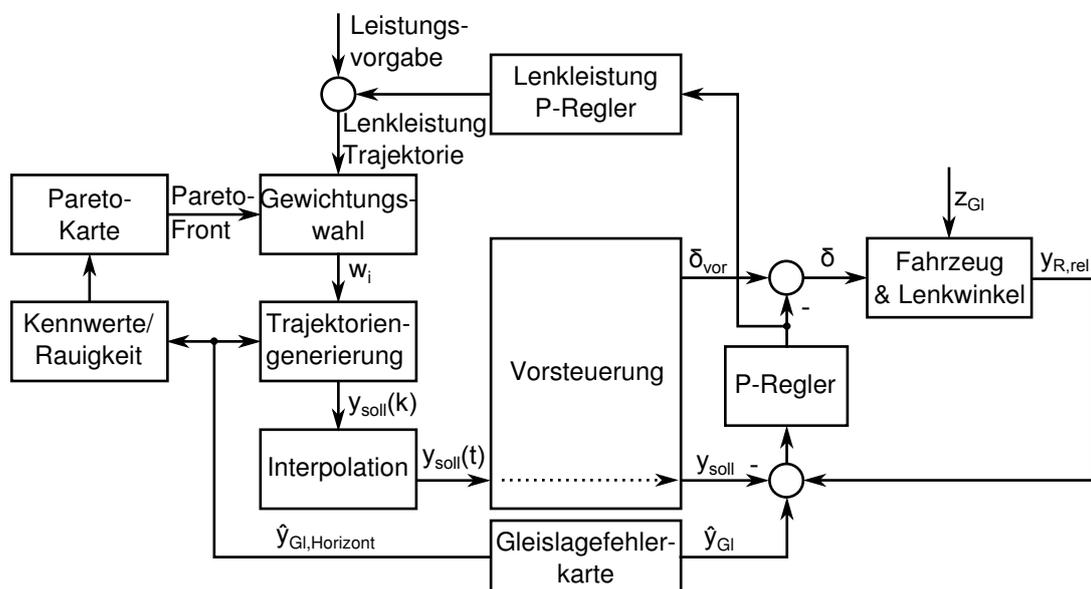


Bild 5-2: Das Blockschaltbild der selbstoptimierenden Trajektorienvorsteuerung mit Vorsteuerung und Regelung

Bei dieser Auswahl des Pareto-Punktes wird nicht berücksichtigt, dass die geplante Trajektorie nicht perfekt umgesetzt werden kann. Es können also auch Trajektorien generiert werden, die gerade noch im Spurspiel liegen. Durch die Abweichungen bei der Umsetzung der Trajektorie kommt es dann zwangsläufig

zu Spurkranzanläufen. Dies sinnvoll zu vermeiden, ist nicht einfach. Natürlich könnte der Kanal, in dem die Trajektorie verlaufen darf, so weit eingeeengt werden, dass es auch bei den momentanen Abweichungen der Ist-Trajektorie nicht zu Anläufen kommt. Dafür müsste jedoch ein erhöhter Leistungsbedarf in Kauf genommen werden, der dann die Vorgabe evtl. überschreiten würde.

Es gibt auch es Situationen, in denen es trotz der sichersten Trajektorie zu Spurkranzanläufen kommt. Hier müsste der unterlagerte Regler angepasst werden. Wird jedoch eine gleichzeitige Anpassung des Reglers in Betracht gezogen, stellt sich in jeder Situation erneut die Frage, ob es sinnvoller ist, mit einer sicheren Trajektorie und einem schwachen Regler oder mit einer sparsamen Trajektorie und einem „straffen“ Regler zu fahren. Der Schwachpunkt der vorgestellten Methode ist also die Trennung von Regelung und Trajektoriengenerierung.

5.3 Ergebnisse und Validierung

Für die Spurführung mittels selbstoptimierender Trajektorienplanung werden die folgenden Ergebnisse dargestellt: In Abschnitt 5.3.1 wird zunächst die Pareto-Front des Optimierungsproblems besprochen. In Abschnitt 5.3.2 werden dann zwei repräsentative Trajektorienverläufe vorgestellt. In Abschnitt 5.3.3 schließlich wird die Funktion der selbstoptimierenden Trajektorienplanung anhand der Ergebnisse von Messfahrten erläutert. Dabei wird auch der Mehrwert der Selbstoptimierung gegenüber Fahrten mit fest vorgegebener Zielgewichtung validiert.

5.3.1 Die Pareto-Front der optimalen Trajektorien

In Bild 5-3 sind die zweidimensionalen Projektionen der Pareto-Front des Trajektorienoptimierungsproblems dargestellt, wie sie mithilfe von *GAI0* berechnet wurden. Die Fronten sind als Wolke von Pareto-Punkten approximiert, wobei die Punkte von mehreren Streckenabschnitten übereinander abgebildet sind. Alle Punkte gelten für eine Fahrtgeschwindigkeit von 5 m s^{-1} .

Im linken Graphen sind die Werte der Zielfunktion „Komfort“ über den korrespondierenden Werten der Zielfunktion „Energie“ aufgetragen. Es ist gut zu erkennen, dass die beiden Zielfunktionen miteinander korrelieren: Bei schlechtem Komfort ist auch der Leistungsbedarf hoch und umgekehrt. Dies kann damit erklärt werden, dass „heftige“ Lenkbewegungen eine erhöhte Stelleistung erfordern und gleichzeitig auch zu einer starken Anregung von Querschleunigungen führen. Die Korrelation ist der Grund dafür, dass in den folgenden Untersuchungen und bei der Implementierung am Fahrzeug das Ziel „Komfort“ nicht explizit berücksichtigt wird, da ein fehlender Zielkonflikt auch keine Kompromissfindung erfordert.

Im rechten Graphen sind die Werte der Zielfunktion „Spurkranzanlauf vermeiden“ über den korrespondierenden Werten der Zielfunktion „Energie“ aufgetragen. Hier ist deutlich der Zielkonflikt erkennbar: „sichere“ Trajektorien erfordern das Fahren nahe der Gleismittellinie und damit (bei variierenden Gleislagefehlern mit großer Amplitude) auch eine erhöhte Lenkaktivität. Soll Lenkleistung gespart werden, so müssen „glattere“ Trajektorien gefahren werden, die eine größere Gefahr von Spurkranzanläufen aufweisen.

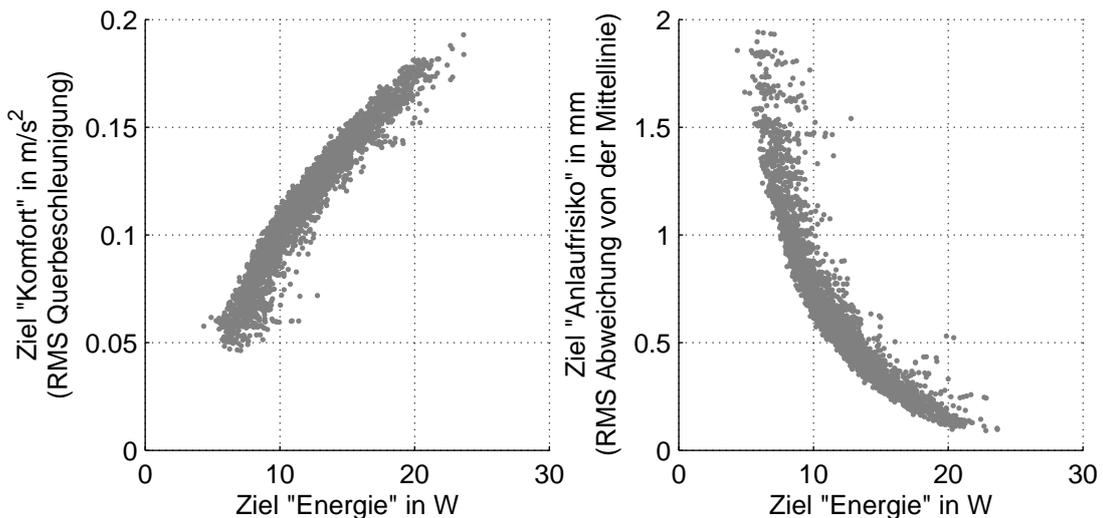


Bild 5-3: Die Pareto-Front (berechnet mit GAIO bei 5 m s^{-1}) in zweidimensionalen Projektionen, links die Ziele „Komfort“ und „Leistung“, rechts die Ziele „Spurkranzanlauf vermeiden“ und „Leistung“

5.3.2 Optimale Trajektorien

In Bild 5-4 sind im oberen Graphen die Verläufe von zwei Trajektorien für die Vorderachse dargestellt. Der unter Graph zeigt die zur Umsetzung der Trajektorien nötigen Verläufe der Änderungsrate des Lenkwinkels (die Lenkwinkelrate ist proportional zum Leistungsbedarf). Die schwarze, „sichere“ Trajektorie verläuft fast auf der Mittellinie der Gleislagefehler. Die graue, „energieeffiziente“ Trajektorie nutzt das vorhandene Spurspiel aus und „scheidet die Kurven“ um die Krümmung der Gleislagefehler möglichst zu glätten. Es ist zu erkennen, dass die „sichere“ Trajektorie besonders im Bereich der stärker gekrümmten Gleislagefehler im Abschnitt SO-O deutlich mehr Lenkleistung benötigt, als die „Energieeffiziente“.

5.3.3 Testfahrten mit optimaler Trajektorienvorsteuerung

Zur Validierung des Selbstoptimierungspotenzials wurden umfassende Simulationen und Messfahrten durchgeführt, bei denen unterschiedliche Szenarien mit

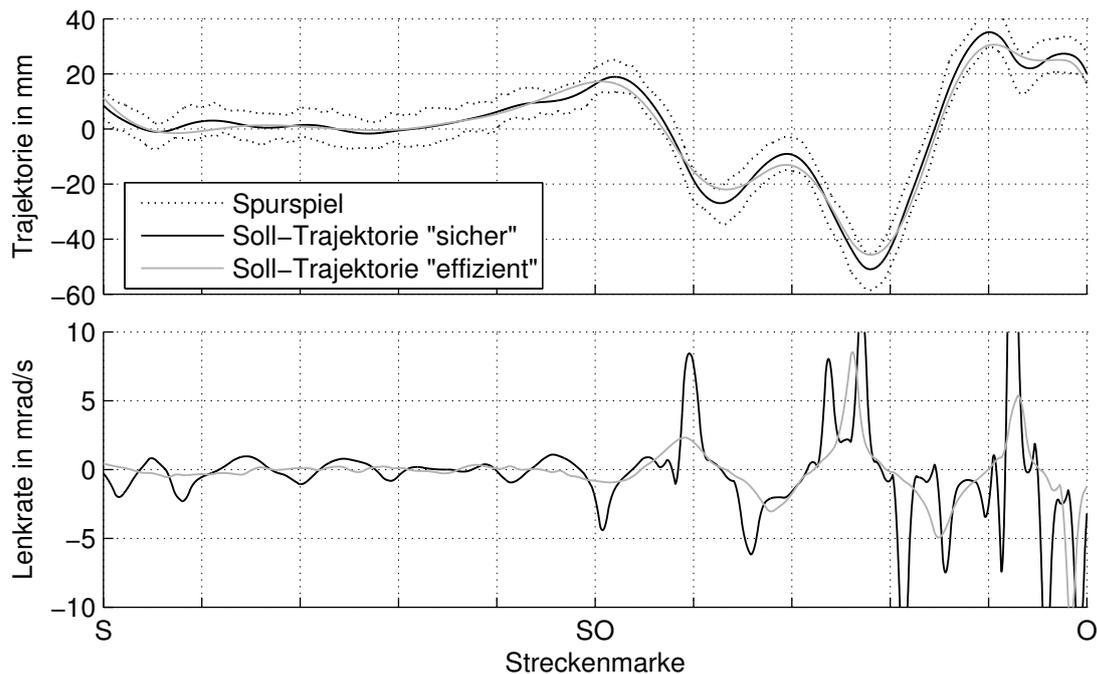


Bild 5-4: Trajektorien der Vorderachse und der Lenkwinkeländerungsrate für unterschiedliche Zielgewichtungen

verschiedenen Umweltbedingungen betrachtet wurden. Beispielfhaft sollen ein Vergleich zwischen einer Fahrt ohne Vorsteuerung und zwei Fahrten mit bzw. ohne selbstoptimierende Trajektorienvorsteuerung vorgestellt werden.

In den folgenden vier Bildern ist der Ausschnitt der Westkurve (W-S), der Südgeraden (S-SO) und der Ostkurve (SO-NO) aus den Ovalfahrten gezeigt. Dieser Ausschnitt wurde gewählt, da in ihm ein Übergang von stärkeren zu geringen und dann wieder zu stärkeren Gleislagefehlern auftritt. In den drei Bildern der einzelnen Fahrten ist im oberen Graphen der Verlauf der Soll-Trajektorie der Vorderachse dargestellt mit dem Spurspiel als Begrenzung aller möglichen Verläufe. Darunter ist die Abweichung der tatsächlich gefahrenen Trajektorie der Vorder- und der Hinterachse von der Gleismittellinie zu sehen; ebenfalls begrenzt vom Spurspiel.

Im dritten Graphen ist die mittlere gesamte Lenkleistung der beiden Achsen ($P_{ges.}$) aufgetragen, zusammen mit der Vorgabe für die Gewichtungsauswahl (P_{ref}). Weiterhin ist gestrichelt der Anteil des Störreglers an der gesamten Lenkleistung (P_{stoer}) dargestellt. Bei der Fahrt mit Selbstoptimierung ist im unteren Graphen der Verlauf der Gewichtung für das Ziel „Energie sparen“ dargestellt. Die Gewichtung ist auf eins normiert. Die Gewichtung für das Ziel „Spurkranzanläufe vermeiden“ ist gleich der Differenz zwischen eins und dem Energie-Gewicht.

In Bild 5-5 ist eine Fahrt mit 5 m s^{-1} ohne Vorsteuerung dargestellt. Wie auch bei den Fahrten mit Vorsteuerung werden Störungen durch einen P-Regler ausgeglet. Das Ergebnis dieser Fahrt soll als Referenz dienen. Es ist zu erkennen,

dass der P-Regler die Achsen größtenteils mit einem guten Sicherheitsabstand entlang der Gleismittellinie führen kann. Die gesamte Lenkleistung wird durch den P-Regler verursacht. Sie korreliert mit der Krümmung der Gleislagefehler und liegt größtenteils über der Vorgabe von 15 W, die für die Selbstoptimierung gilt und nur zum Vergleich eingezeichnet ist.

In Bild 5-6 ist das Ergebnis einer Fahrt mit Trajektorienvorsteuerung dargestellt. Die Trajektorien sind mit fester Gewichtung auf minimale Spurkranzanlauftrate optimiert, was zu einer Soll-Trajektorie entlang der Gleismittellinie führt. Bild 5-8 zeigt den Vergleich der drei vorgestellten Testfahrten. Im oberen Graphen sind die laufenden quadratischen Mittelwerte (RMS-Werte, Zeitkonstante $T_{TP} = 0,5 \text{ s}$) der Abweichung der Achstrajektorien von der Gleismittellinie (quadratische Summe beider Achsen) normiert auf das Spurspiel über der Position aufgetragen. Werte nahe oder über eins zeigen einen Spurkranzlauf einer oder beider Achsen an. Im unteren Graphen sind die Lenkleistungen aufgetragen, wie sie auch in den Einzeldarstellungen gezeigt werden.

Es ist zu erkennen, dass die Trajektorienvorsteuerung die Spurkranzlaufwahrscheinlichkeit größtenteils reduziert, jedoch dafür z. T. auch erheblich mehr Leistung benötigt. Ein großer Teil der zusätzlich benötigten Leistung wird von der Vorsteuerung beansprucht, der P-Regler benötigt durchschnittlich weniger Leistung als ohne Vorsteuerung.

Im Bild 5-7 schließlich ist die Testfahrt mit selbstoptimierender Trajektorienvorsteuerung dargestellt. Die Selbstoptimierung hat die Vorgabe, dass Vorsteuerung und P-Regler zusammen eine Lenkleistung von 15 W verbrauchen. Es ist zu erkennen, wie der Selbstoptimierungsalgorithmus an Stellen, wo die Krümmung der Gleislagefehler groß ist, die Gewichtung des Ziels „Energie sparen“ erhöht (vierter Graph). Dadurch wird eine Soll-Trajektorie generiert, die glatter verläuft, aber dafür näher an die Grenzen des Spurspiels führt. Durch die glatteren Trajektorien verbrauchen sowohl die Vorsteuerung als auch der P-Regler weniger Leistung. Dadurch kann die Vorgabe sehr gut eingehalten werden. An den Stellen, an denen die Leistungsvorgabe nicht eingehalten werden kann, ist dies darauf zurückzuführen, dass der P-Regler allein schon mehr als die Vorgabe benötigt.

Im Vergleich mit den anderen beiden Fahrten in Bild 5-8 fällt vor allem auf, dass die selbstoptimierende Spurführung mit der eingestellten Leistungsvorgabe zu sehr vielen Spurkranzläufen führt. Dies ist beabsichtigt, da ja die strikte Einhaltung der Leistungsvorgabe höchste Priorität hat. Fahrten mit einer höheren Vorgabe wurden durchgeführt und wiesen erwartungsgemäß weniger Spurkranzläufe auf. Die Einhaltung der Vorgabe konnte hierbei jedoch nicht so eindrucksvoll demonstriert werden, da die höhere Vorgabe über große Strecken auch von der nicht selbstoptimierenden Regelung eingehalten werden kann. Es muss auch beachtet werden, dass die Spurkranzläufe, die die selbstoptimierende Regelung

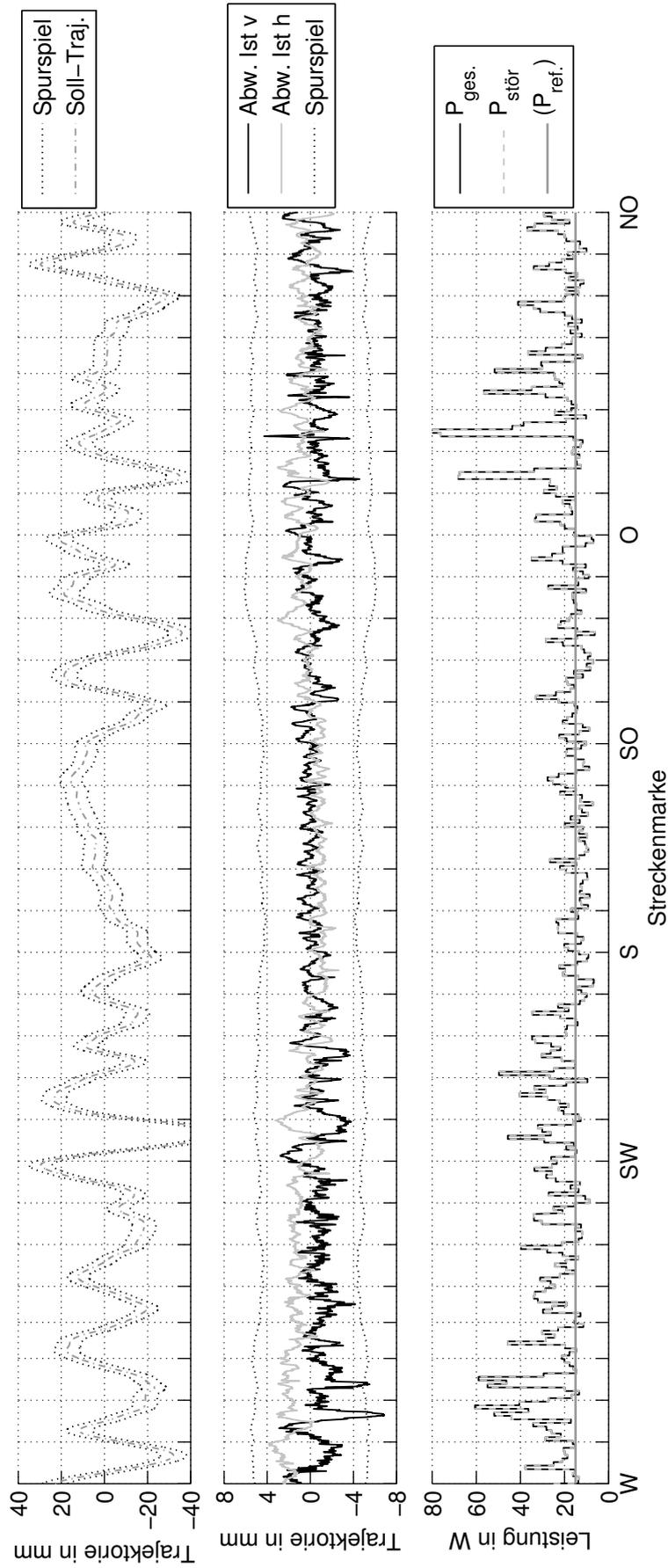


Bild 5-5: Referenztestfahrt ohne Trajektorienvorsteuerung

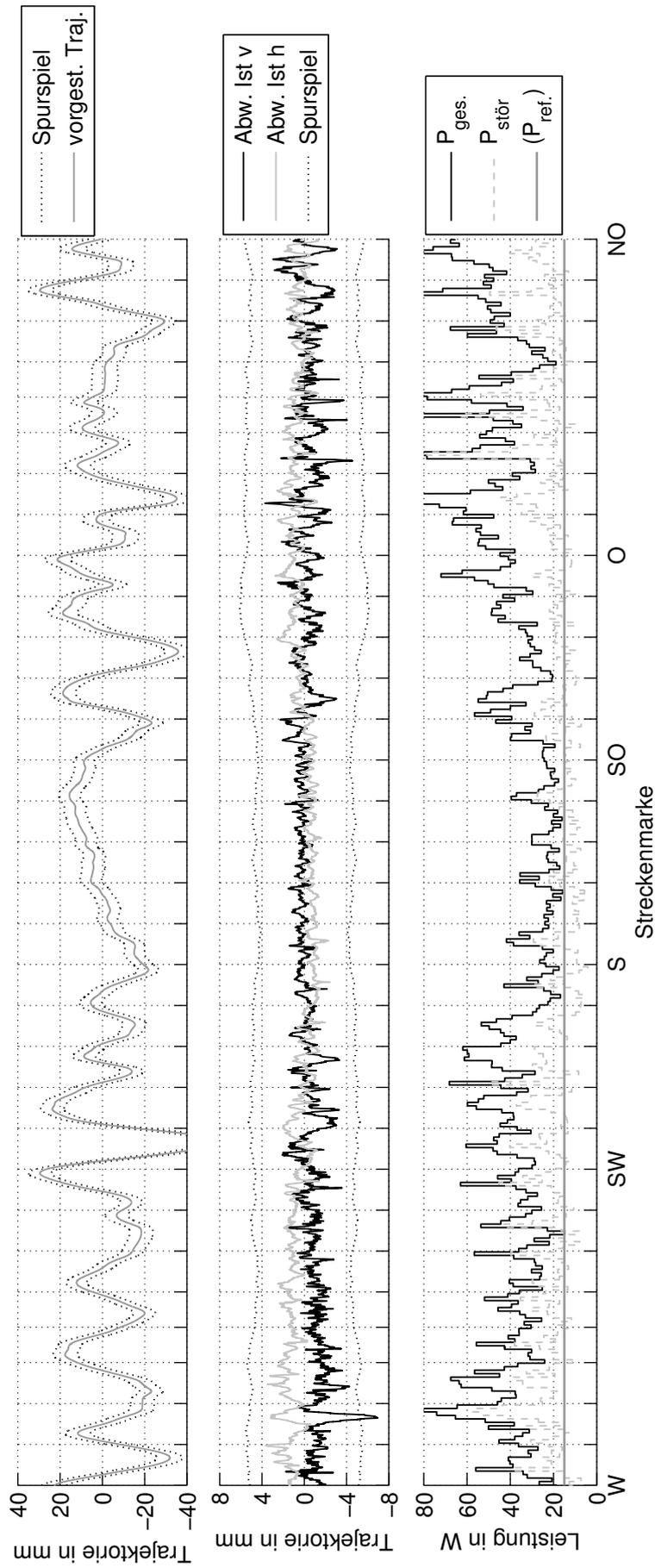


Bild 5-6: Testfahrt mit Trajektorienvorsteuerung und fester Gewichtung für wenige Spurkranzläufe

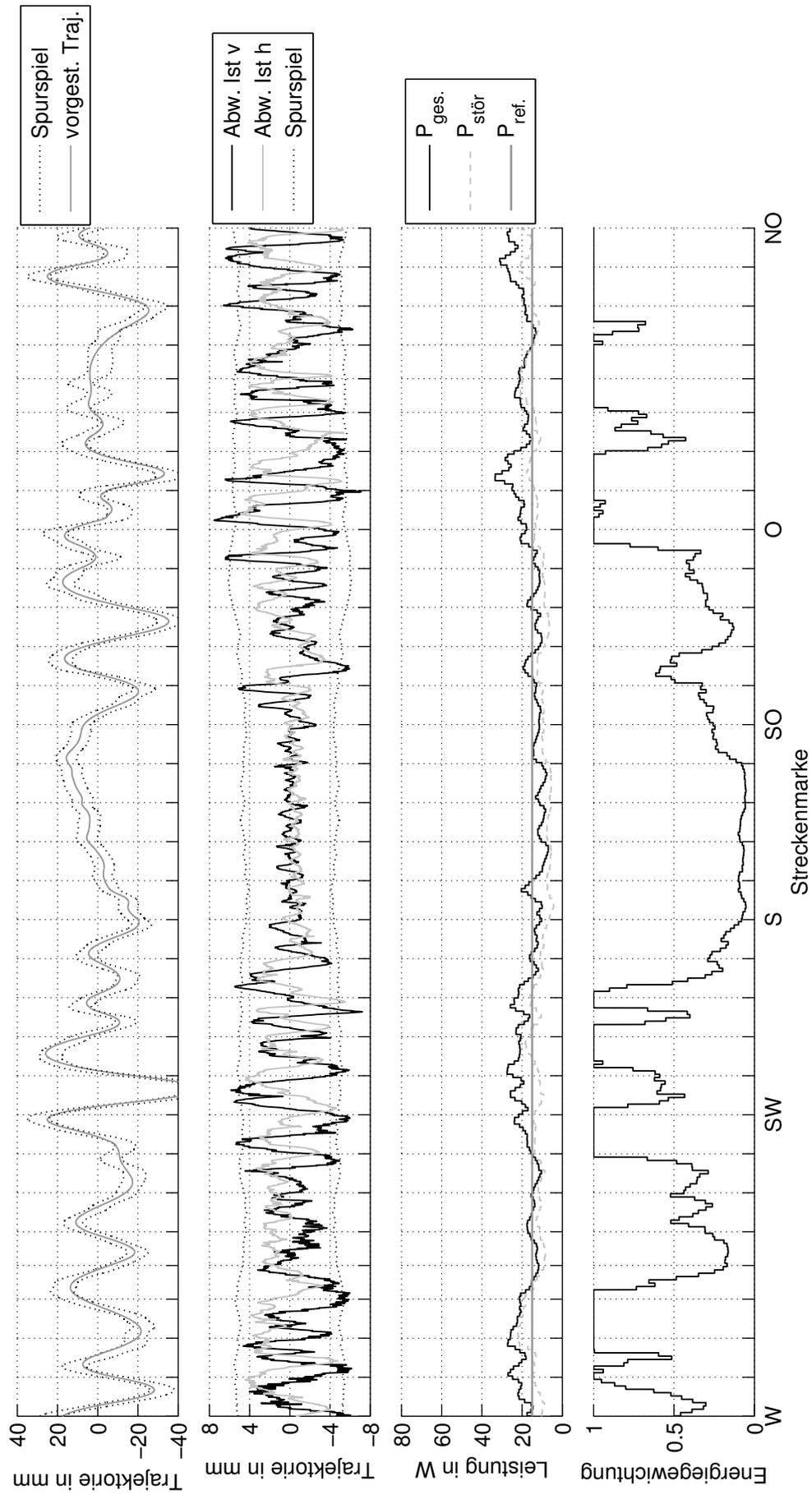


Bild 5-7: Testfahrt mit aktiver Selbstoptimierung zur Einhaltung des Energiekontingents

„verursacht“, geplant sind und somit nicht mit denen verglichen werden können, die bei unkontrolliertem Schlingern auftreten. Ganz im Gegenteil wird das Rad durch die Soll-Trajektorie in einem flachen Winkel „sanft“ an den Schienenkopf geführt. Es ist auch zu beachten, dass die Selbstoptimierung in den Bereichen, in denen die Gleislagefehler eine geringe Krümmung aufweisen, die zugeteilte Leistung zur sicheren Vermeidung von Spurkranzanläufen nutzt. Dies steht im Gegensatz zu konventionellen Regelungen, bei denen die Stellwertamplitude mit der Amplitude der Störung steigt und fällt.

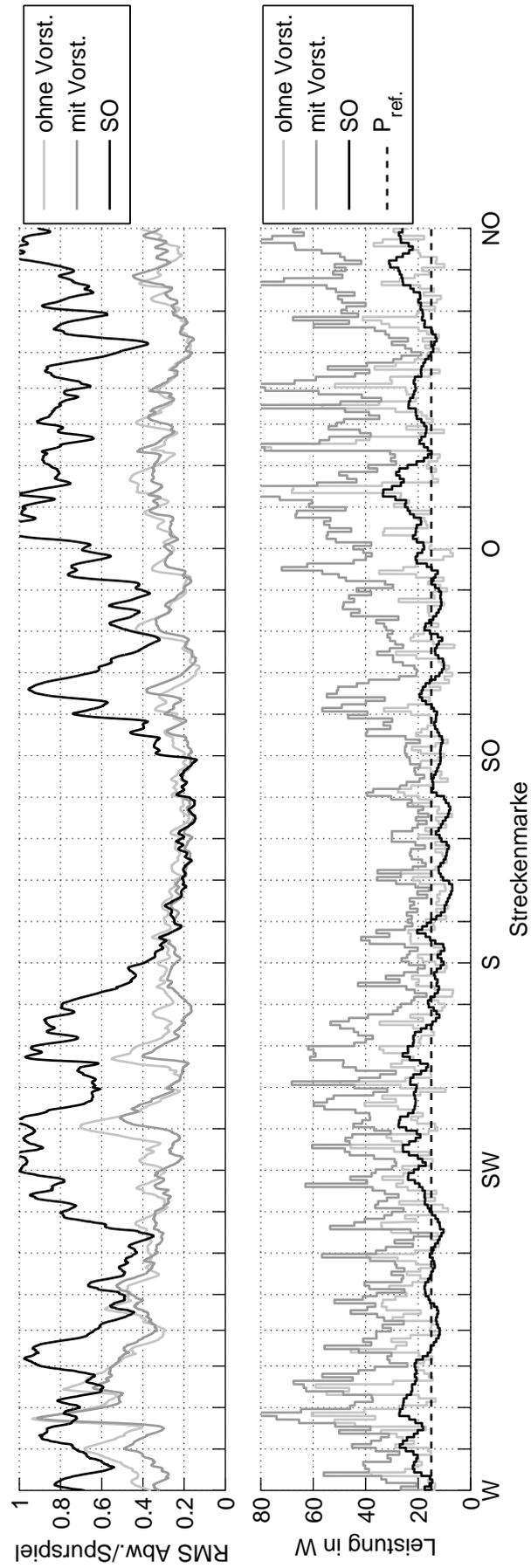


Bild 5-8: Vergleich der drei Testfahrten ohne Vorsteuerung, mit Vorsteuerung und mit Selbstoptimierung

6 Selbstoptimierende Riccati-Regler

Die Minimierung eines quadratischen Gütemaßes ist eine der bekanntesten und in unzähligen Varianten erforschten Methoden zur Reglerauslegung für lineare Mehrgrößensysteme. Die Methode kann sowohl für deterministische als auch für stochastische Systeme angewandt werden und hat in beiden Fällen die gleiche, geschlossen darstellbare Lösung (vgl. [KS72]). Betrachtet wird das stochastische System mit dem Zustandsvektor $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, dem Eingang $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p$ und dem n -dimensionalen weißen Prozessrauschen \mathbf{w} mit Kovarianzmatrix \mathbf{W}^1 :

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t) \\ \mathbf{w}(t) &\sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{W})\end{aligned}\tag{6-1}$$

Das lineare Regelungsgesetz² und die Dynamikmatrix des geregelten Systems lauten:

$$\begin{aligned}\mathbf{u}(t) &= -\mathbf{R} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{A}_R &= \mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{R}\end{aligned}\tag{6-2}$$

Die skalare Zielfunktion mit den Gewichtungsmatrizen \mathbf{Q} , \mathbf{S} und \mathbf{N} lautet:

$$\begin{aligned}J &= J(\mathbf{R}) \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{x}(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}(t)^T \mathbf{S} \mathbf{u}(t) + 2 \mathbf{x}(t)^T \mathbf{N} \mathbf{u}(t) dt \right\}\end{aligned}\tag{6-3}$$

Der Regler, der J minimiert, wird (unabhängig von \mathbf{W}) mithilfe der Lösung der Algebraischen Riccati-Gleichung (kurz ARG) berechnet:

$$\begin{aligned}\mathbf{R} = \mathbf{R}^* &= \arg \min_{\mathbf{R}} J(\mathbf{R}) = \mathbf{S}^{-1} \cdot (\mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{N}^T) \\ \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - (\mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{N}) \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{N})^T + \mathbf{Q} &= 0\end{aligned}\tag{6-4}$$

Oder äquivalent:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{A}}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \tilde{\mathbf{A}} - (\mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{N}) \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{N})^T + \tilde{\mathbf{Q}} &= 0 \\ \tilde{\mathbf{A}} &= \mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{S}^{-1} \mathbf{N}^T \\ \tilde{\mathbf{Q}} &= \mathbf{Q} - \mathbf{N} \mathbf{S}^{-1} \mathbf{N}^T\end{aligned}\tag{6-5}$$

¹ $\sim \mathcal{N}(\cdot, \cdot)$ steht für eine unabhängige Realisierung einer normalverteilten Zufallsgröße

² Alle Ergebnisse dieses Abschnitts sind auch noch gültig, wenn der Stellwert mithilfe eines geschätzten Zustandsvektors $\hat{\mathbf{x}}$ berechnet wird ([BH75]). Dies wird ausführlicher in Abschnitt 6.5.1 erläutert.

Der über (6-4) geschlossene Regelkreis ohne Störeingänge ist genau dann global asymptotisch stabil, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind ([AL84]):

- 1) (\mathbf{A}, \mathbf{B}) ist stabilisierbar.
- 2) $\mathbf{S} \succ 0^3$.
- 3) $\tilde{\mathbf{Q}} \succeq 0$.
- 4) $(\tilde{\mathbf{Q}}, \mathbf{A})$ oder auch $(\tilde{\mathbf{Q}}^{-1/2}, \mathbf{A})$ hat keine unbeobachtbaren Eigenwerte auf der imaginären Achse.

Wird das System mit dem optimalen Regler \mathbf{R}^* geregelt, nimmt die Zielfunktion den folgenden, von der Lösung der ARG \mathbf{P} und der Störkovarianz \mathbf{W} abhängigen Wert an:

$$J^* = \min_{\mathbf{R}} J(\mathbf{R}) = J(\mathbf{R}^*) = \text{spur}(\mathbf{P}\mathbf{W}) \quad (6-6)$$

Riccati-Regler zeichnen sich durch ihre Robustheit aus, die auf der unendlichen Amplitudenreserve und der garantierten Phasenreserve von mindestens 60° beruht (vgl. [JMP⁺80]). Die optimale Ausregelung von Anfangsauslenkungen, bzw. im stochastischen Fall die Minimierung der Zielfunktion, prädestiniert den Regler für den Einsatz zur Störunterdrückung, beispielsweise mit vorgesteuertem Führungsverhalten. Bei den hier betrachteten quasi-stationären stochastischen Systemen mit unendlichem Optimierungshorizont hat der Regler die herausragende Eigenschaft, dass die Optimalität unabhängig von der Art der Störung (Kovarianz \mathbf{W}) ist.

Trotz der einfachen Herleitung, der hervorragenden numerischen Lösbarkeit, und den genannten positiven Eigenschaften des Reglers hat die Methode einen entscheidenden Nachteil: Bei der praktischen Anwendung stellt sich stets die Frage nach der konkreten Wahl der Gewichtungsmatrizen \mathbf{Q} , \mathbf{S} und \mathbf{N} , die die freien Auslegungsparameter darstellen. Insbesondere die Einschränkung auf eine einzelne Zielfunktion ist in der Praxis oft nicht hinzunehmen, da ein technisches System meist mehrere widersprüchliche Anforderungen zu erfüllen hat. Oft wird diese Einschränkung dadurch umgangen, dass zunächst mehrere quadratische Zielfunktionen aufgestellt werden (bspw. ein Verlaufs- und ein Verbrauchskriterium), und diese dann durch eine gewichtete Summe zusammengefasst werden, wie es z. B. in [TM89], [KR91] oder [KL86] vorgeschlagen wird. Es gibt jedoch keine physikalischen Anhaltspunkte, die zu einer geeigneten Wahl dieser Gewichtung führen (vgl. Abschnitt 2.4.5). Daher wird in [Li93b] der Ansatz verfolgt, die gewichtete Summe nur als Zwischenschritt zu betrachten, und die Gewichtung dann mit

³ Die Matrix \mathbf{A} ist positiv definit: $\mathbf{A} \succ 0$ bzw. positiv semidefinit: $\mathbf{A} \succeq 0$.

einem iterativen Verfahren so zu bestimmen, dass eine beliebige Skalarisierungsfunktion minimiert wird (in [Li90] wird mit diesem Ansatz beispielsweise ein Min-Max-Problem gelöst). In beiden Publikationen wird das Optimierungsverfahren jedoch nur schematisch umrissen und die Zielfunktionen sind über einen endlichen Horizont definiert. Optimale Regler mit einem endlichen Horizont haben aber den Nachteil, dass sie durch Integration der Riccati-Differenzialgleichung gelöst werden müssen und ein geeignetes Endpunktkriterium erforderlich ist ([DAC00]). Der Grenzübergang zu einem unendlichen Horizont in (6-3) dagegen lässt sich mithilfe der Algebraischen Riccati-Gleichung (6-4) lösen.

In den folgenden zwei Abschnitten wird daher ein neues Verfahren zur optimalen Berechnung der Gewichtung vorgestellt. Dazu wird zunächst die Lösung der Riccati-Gleichung mit fester Gewichtung besprochen. Darauf aufbauend wird dann ein Newton-Verfahren entwickelt, mit dem die Gewichtung, ausgehend von beliebigen Startwerten, iterativ optimiert wird. Die hierfür erforderlichen Ableitungen und ihre effiziente Berechnung werden ebenfalls angegeben. Im darauf folgenden Abschnitt wird der vorgestellte Algorithmus so erweitert, dass die Gewichtung bei veränderlichen Umweltbedingungen (Störungen) kontinuierlich an die Situation anpasst wird, wodurch ein selbstoptimierender Regler entsteht. Für den Einsatz als Spurführungsregler wird dieser Algorithmus schließlich so angepasst, dass er der Vorgabe der bekannten Gleislagefehler optimal folgt.

6.1 Riccati-Regler mit mehreren Gütemaßen

Wird die Zielfunktion in Gleichung (6-3) des Riccati-Problems (6-1), (6-2) durch einen Vektor \mathbf{J} mit k gleichzeitig zu minimierenden und (teilweise) widersprüchlichen Zielfunktionen J_i ersetzt⁴, so resultiert ein Mehrzieloptimierungsproblem:

$$\min \mathbf{J} \in \mathbb{R}^k = [J_1, \dots, J_k]^T \quad (6-7)$$

$$J_i = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_i & \mathbf{N}_i \\ \mathbf{N}_i^T & \mathbf{S}_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} dt \right\}$$

⁴ Die Zeitabhängigkeit von Zustand, Eingang, Störung und allen abgeleiteten Größen wird im Folgenden nicht mehr explizit angegeben.

Die Gewichtungsmatrizen \mathbf{Q}_i , \mathbf{S}_i und \mathbf{N}_i der Zielfunktionen können dabei über den Ausgang einer zu minimierenden Größe definiert werden:

$$J_i = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{z}_i^T \cdot \mathbf{z}_i dt \right\} \quad (6-8)$$

$$\mathbf{z}_i = \mathbf{C}_i \cdot \mathbf{x} + \mathbf{D}_i \cdot \mathbf{u}$$

$$\mathbf{Q}_i = \mathbf{C}_i^T \mathbf{C}_i$$

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{D}_i^T \mathbf{D}_i$$

$$\mathbf{N}_i = \mathbf{C}_i^T \mathbf{D}_i$$

Die Zielfunktion J_i bewertet also den erwarteten Mittelwert des quadratischen Verlaufs des Ausgangs z_i , oder, bei mehrdimensionalen Ausgängen, den Mittelwert der Summe der quadratischen Verläufe. Die Zielfunktion kann also als die Kovarianz des Ausgangs betrachtet werden oder auch als (verallgemeinerter) Energiewert. Die Definition ist auch äquivalent mit dem Quadrat des in der Elektrotechnik gebräuchlichen Effektivwertes bzw. dem quadratischen Mittelwert (RMS).

Darstellung der Pareto-Menge

Da die Menge der Lösungen (Pareto-Menge) \mathcal{R}^* des Mehrziel-Riccati-Problems konvex ist, lässt sie sich mithilfe einer gewichteten Summe der Zielfunktionen J_α definieren ([Mak89]):

$$\mathcal{R}^* = \arg \min_{\mathbf{R}} \mathbf{J} \quad (6-9)$$

$$= \left\{ \mathbf{R} \in \mathbb{R}^{p \times n} \mid \right.$$

$$\left. \mathbf{R} = \arg \min_{\mathbf{R}} J_\alpha(\boldsymbol{\alpha}), \boldsymbol{\alpha} \in \mathbb{R}^k, \alpha_i > 0, \sum_{i=1}^k \alpha_i = 1 \right\}$$

$$J_\alpha(\boldsymbol{\alpha}) = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot J_i$$

Die Gewichtung unterliegt dabei einer Gleichungsbedingung, sodass J_α $(k - 1)$ Freiheitsgrade hat und somit die Pareto-Menge eine $(k - 1)$ -fache Mannigfaltigkeit ist. Weiterhin unterliegt die gewichtete Summe den nicht explizit angegebenen Bedingungen, die für alle Riccati-Regler gelten (siehe Seite 126). Um diese Bedingungen, die sich auf die Gewichtungsmatrizen des Einzielproblems bezie-

hen, überprüfen zu können, kann die gewichtete Summe auch folgendermaßen formuliert werden:

$$\begin{aligned}
 J_\alpha &= \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{x}^\top \mathbf{Q}(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{x} + \mathbf{u}^\top \mathbf{S}(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{u} + 2 \mathbf{x}^\top \mathbf{N}(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{u} dt \right\} \\
 \mathbf{Q}(\boldsymbol{\alpha}) &= \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \mathbf{Q}_i \\
 \mathbf{S}(\boldsymbol{\alpha}) &= \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \mathbf{S}_i \\
 \mathbf{N}(\boldsymbol{\alpha}) &= \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \mathbf{N}_i
 \end{aligned} \tag{6-10}$$

Da das Optimierungsproblem konvex ist, besteht für normierte $\alpha_i : \sum \alpha_i = 1$ eine eindeutige Zuordnung $\boldsymbol{\alpha} \leftrightarrow \{\mathbf{R}, \mathbf{J}\}$. Damit lassen sich die Pareto-Menge und die Pareto-Front eindeutig durch die Gewichtung parametrieren. Die Gewichtung dient also als Index, dessen Wert keine physikalische oder wirtschaftliche Bedeutung hat.

Darstellung der Pareto-Front

Für eine feste Gewichtung $\boldsymbol{\alpha}$ hat der Mehrziel-Riccati-Regler die gleiche, auf der ARG basierende Lösung (6-4) wie das Einzielproblem. Der Wert der optimalen gewichteten Summe der Zielfunktionen (J_α^*) lässt sich nach Gleichung (6-9) aus den einzelnen Zielfunktionswerten oder nach Gleichung (6-6) aus der Lösung der ARG $\mathbf{P}(\boldsymbol{\alpha})$ anschreiben (wobei \mathbf{Q} durch $\mathbf{Q}(\boldsymbol{\alpha})$ ersetzt wird, usw.):

$$J_\alpha^*(\boldsymbol{\alpha}) = \min_{\mathbf{R}} J_\alpha(\boldsymbol{\alpha}) = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot J_i^* = \text{spur}(\mathbf{P}(\boldsymbol{\alpha}) \cdot \mathbf{W}) \tag{6-11}$$

Ist \mathbf{R}^* bekannt, so lässt sich $\mathbf{P}(\boldsymbol{\alpha})$ auch durch die Lösung von k Ljapunow-Gleichungen berechnen:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}(\boldsymbol{\alpha}) &= \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \mathbf{P}_i \\
 \mathbf{P}_i(\mathbf{R}^*(\boldsymbol{\alpha})) &= \mathcal{L}_{(\mathbf{A}\mathbf{R}^*)^\top}^{-1} \left(\mathbf{Q}_i + \mathbf{R}^*(\boldsymbol{\alpha})^\top \mathbf{S}_i \mathbf{R}^*(\boldsymbol{\alpha}) - 2 \mathbf{N}_i \mathbf{R}^*(\boldsymbol{\alpha}) \right)
 \end{aligned} \tag{6-12}$$

Wobei \mathcal{L} der Ljapunow-Operator ist:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_A(\mathbf{P}) &= -\mathbf{A}\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{A}^\top = \mathbf{Q} \\
 \mathcal{L}_A^{-1}(\mathbf{Q}) &= \mathbf{P} = \int_0^\infty e^{\mathbf{A}t} \mathbf{Q} e^{\mathbf{A}^\top t} dt
 \end{aligned} \tag{6-13}$$

Damit ist auch der Wert der einzelnen Zielfunktionen analog zu Gleichung (6-6) abhängig von der Störung \mathbf{W} :

$$J_i^*(\boldsymbol{\alpha}) = \text{spur}(\mathbf{P}_i(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{W}) \quad (6-14)$$

Mit diesen Ergebnissen lässt sich schließlich auch die Pareto-Front \mathcal{J}^* des Mehrziel-Riccati-Problems mithilfe der gewichteten Summe definieren (dabei ist die Abhängigkeit der Pareto-Front von der Störkovarianz besonders hervorgehoben):

$$\mathcal{J}^*(\mathbf{W}) = \left\{ \mathbf{J} \in \mathbb{R}^k \mid \mathbf{J} = \mathbf{J}^*(\boldsymbol{\alpha}) = [\text{spur}(\mathbf{P}_i(\mathbf{R}^*(\boldsymbol{\alpha})) \cdot \mathbf{W})]^T, \right. \\ \left. \mathbf{R}^*(\boldsymbol{\alpha}) = \arg \min_{\mathbf{R}} J_{\alpha}(\boldsymbol{\alpha}), \boldsymbol{\alpha} \in \mathbb{R}^k, \alpha_i > 0, \sum_{i=1}^k \alpha_i = 1 \right\} \quad (6-15)$$

6.2 Iterative Optimierung der Gewichte

Bei der modellbasierten Selbstoptimierung durch Mehrzieloptimierung wird zur Laufzeit wiederkehrend ein Pareto-Punkt bestimmt, der das Ziel für die Auslegung des Reglers darstellt, mit dem das System dann bis zur nächsten Anpassung geregelt wird. Sind Pareto-Menge und Pareto-Front nicht im Voraus bekannt, können die Zielbestimmung und die Reglerauslegung auch in einem Schritt durchgeführt werden, indem die Verkettung von Skalarisierungsfunktion und Zielfunktionsvektor direkt über der Reglermatrix minimiert wird:

$$\mathbf{R}^s = \arg \min_{\mathbf{R}} \mathfrak{s}(\mathbf{J}(\mathbf{R})) \quad (6-16)$$

Dies hat jedoch den Nachteil, dass es sich dabei um ein nichtlineares Optimierungsproblem mit u. U. sehr vielen Optimierungsvariablen handelt. Für den Fall, dass ein Riccati-Regler ausgelegt werden soll, ist es daher sinnvoll, die Mehrzieloptimierung in zwei Schritten durchzuführen (vgl. [Li93a]). Zunächst wird die Skalarisierungsfunktion über der Pareto-Front minimiert, wobei die Pareto-Front nach (6-15) durch den Zielgewichtungsvektor $\boldsymbol{\alpha}$ parametrisiert ist⁵:

$$\boldsymbol{\alpha}^s = \arg \min_{\boldsymbol{\alpha}} \mathfrak{s}(\mathbf{J}^*(\boldsymbol{\alpha})) \quad (6-17)$$

Mit dem so bestimmten Zielgewichtungsvektor wird dann der Vektor der Zielfunktionen des Mehrziel-Riccati-Problems (6-7) skalarisiert. Daraus resultiert ein herkömmliches Riccati-Problem, das mit bekannten, effizienten Verfahren gelöst werden kann. Dies hat den Vorteil, dass in vielen Fällen $\boldsymbol{\alpha}$ sehr viel weniger Ele-

⁵ Ein ähnliches Verfahren wird auch in [Hil01] vorgeschlagen; dort wird jedoch die Pareto-Menge im Urbildraum mithilfe der Optimierungsvariablen lokal linear approximiert.

mente hat, als \mathbf{R} und damit das Optimierungsproblem (6-17) stark vereinfacht wird.

Das hier vorgestellte Verfahren zur Selbstoptimierung mit Skalarisierungsfunktion sieht die Optimierung von Gleichung (6-17) mithilfe eines Newton-Verfahrens vor. Dazu werden in jedem Optimierungsschritt der Gradient und die Hessematrix der Skalarisierungsfunktion benötigt, welche über die Kettenregel auch die Differenzierung der mit dem Gewichtungsvektor parametrisierten Pareto-Front $\mathbf{J}^*(\boldsymbol{\alpha})$ erfordern. Im Folgenden werden daher die Jacobimatrix und die zweiten Ableitungen der Pareto-Front nach dem Gewichtungsvektor hergeleitet. Dabei wird deutlich, dass die Ableitungen in jedem Pareto-Punkt von der zugehörigen Reglermatrix abhängen. Es muss also in jeder Newton-Iteration eine Riccatigleichung gelöst werden. Wird die Optimierung jedoch im Rahmen einer Selbstoptimierung quasi kontinuierlich durchgeführt, so ist zu erwarten, dass sich der Pareto-Punkt jedes Mal nur leicht ändert und die Optimierungen daher relativ schnell konvergieren.

Jacobimatrix des Pareto-Punktes $\mathbf{J}^*(\boldsymbol{\alpha})$

Die Ableitung der optimalen Zielfunktionen J_i^* bezüglich der Gewichte α_j erfolgt in zwei Schritten: aus der Ableitung der Zielfunktion nach der Reglermatrix und aus der Ableitung der Reglermatrix nach den Gewichten:

$$\frac{\partial J_i^*}{\partial \alpha_j} = \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^n \frac{\partial J_i^*}{\partial r_{k,l}} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \alpha_j} \right)_{k,l} = \text{spur} \left(\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \alpha_j} \cdot \left(\frac{\partial J_i^*}{\partial \mathbf{R}} \right)^T \right) \quad (6-18)$$

Dabei ist $[\mathbf{A}]_{k,l}$ das Element in der k -ten Zeile und der l -ten Spalte von \mathbf{A} .

Die Ableitung von \mathbf{J}^* nach der Reglermatrix wird in Anlehnung an das in [BG71] angegebene Verfahren durchgeführt. Dazu wird die Ljapunow-Gleichung für \mathbf{P}_i (6-12) um kleine Änderungen $\Delta \mathbf{R}$ und $\Delta \mathbf{P}_i$ erweitert. Nach der Subtraktion der ursprünglichen Gleichung und unter Vernachlässigung von Termen zweiter Ordnung ergibt sich:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{R})^T \Delta \mathbf{P}_i + \Delta \mathbf{P}_i (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{R}) + \\ & (\mathbf{R}^T \mathbf{S}_i - \mathbf{P}_i \mathbf{B}) \Delta \mathbf{R} + \Delta \mathbf{R}^T (\mathbf{S}_i \mathbf{R} - \mathbf{B}^T \mathbf{P}_i) - 2 \mathbf{N}_i \Delta \mathbf{R} = 0 \end{aligned} \quad (6-19)$$

Daraus lässt sich ablesen, dass $\Delta \mathbf{P}_i$ wiederum die Lösung einer Ljapunow-Gleichung ist:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{P}_i &= \mathcal{L}_{\mathbf{A}\mathbf{R}^T}^{-1}(\Delta \mathbf{P}_{i,\mathcal{L}}) \\ \Delta \mathbf{P}_{i,\mathcal{L}} &= (\mathbf{S}_i \mathbf{R} - \mathbf{B}^T \mathbf{P}_i)^T \Delta \mathbf{R} + \Delta \mathbf{R}^T (\mathbf{S}_i \mathbf{R} - \mathbf{B}^T \mathbf{P}_i) - 2 \mathbf{N}_i \Delta \mathbf{R} \end{aligned} \quad (6-20)$$

Nach Gleichung (6-14) ist dann eine kleine Änderung des Zielfunktionswertes:

$$\Delta J_i^* = \text{spur}(\Delta \mathbf{P}_i \cdot \mathbf{W}) = \text{spur}(\mathcal{L}_{\mathbf{A}\mathbf{R}^T}^{-1}(\Delta \mathbf{P}_{i,\mathcal{L}}) \cdot \mathbf{W}) \quad (6-21)$$

Auf diesen Ausdruck wird der folgende Satz zur Umformung von Ljapunow-Gleichungen angewandt. Für $\mathbf{C} \succeq 0$ gilt:

$$\text{spur} \left(\mathbf{A} \cdot \mathcal{L}_{\mathbf{B}}^{-1}(\mathbf{C}) \cdot \mathbf{D} \right) = \text{spur} \left(\mathcal{L}_{\mathbf{B}^T}^{-1} \left(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{D}^T \right) \mathbf{C} \right) \quad (6-22)$$

Gleichung (6-21) ist dann:

$$\Delta J_i^* = \text{spur}(\mathbf{X} \cdot \Delta \mathbf{P}_{i,\mathcal{L}}) \quad (6-23)$$

$$\mathbf{X} = \mathcal{L}_{\mathbf{A}\mathbf{R}}^{-1}(\mathbf{W})$$

Darin ist \mathbf{X} die Zustandskovarianz (vgl. [BH75]); eine Größe also, die zur Laufzeit (theoretisch nach unendlicher Zeit) direkt aus den bekannten Zuständen berechnet werden kann:

$$\mathbf{X} = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{x} \mathbf{x}^T dt \right\} \quad (6-24)$$

Wird nun ΔJ_i^* nach $\Delta \mathbf{R}$ abgeleitet, so folgt direkt die gesuchte Ableitung⁶:

$$\frac{\partial J_i^*}{\partial \mathbf{R}} = \frac{\partial \Delta J_i^*}{\partial \Delta \mathbf{R}} = 2 \left(\mathbf{S}_i \mathbf{R} - \mathbf{B}^T \mathbf{P}_i - \mathbf{N}_i^T \right) \cdot \mathbf{X} \quad (6-25)$$

$$= 2 \left(\mathbf{S}_i \mathbf{R} - \mathbf{S} \mathbf{R}_i \right) \cdot \mathbf{X}$$

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{S}^{-1} \left(\mathbf{B}^T \mathbf{P}_i + \mathbf{N}_i^T \right) \quad (6-26)$$

Die Ableitung der Reglermatrix nach den Gewichten lässt sich mithilfe der folgenden Beziehungen:

$$\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \alpha_i} = \mathbf{P}_i \quad (6-27a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{S}^{-1}}{\partial \alpha_i} = -\mathbf{S}^{-1} \mathbf{S}_i \mathbf{S}^{-1} \quad (6-27b)$$

und unter Anwendung der Produktregel für Matrizen direkt angeben:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \alpha_j} &= -\mathbf{S}^{-1} \left(\mathbf{S}_j \mathbf{R} - \mathbf{B}^T \mathbf{P}_j - \mathbf{N}_j^T \right) \\ &\quad - \mathbf{S}^{-1} \left(\mathbf{S}_j \mathbf{R} - \mathbf{S} \mathbf{R}_j \right) \end{aligned} \quad (6-28)$$

⁶ Bei der Ableitung der Spur nach einer Matrix gilt folgende Regel: $\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}} \text{spur}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{B}) = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{B}^T$ (siehe [GT09]).

Die Jacobimatrix ergibt sich schließlich aus den Gleichungen (6-25) und (6-28) wie folgt:

$$\frac{\partial J_i^*}{\partial \alpha_j} = -2 \operatorname{spur} \left(\mathbf{S}^{-1} (\mathbf{S}_j \mathbf{R} - \mathbf{S} \mathbf{R}_j) \cdot \mathbf{X} \cdot (\mathbf{S}_i \mathbf{R} - \mathbf{S} \mathbf{R}_i)^T \right) \quad (6-29)$$

Die Taylorreihenentwicklung erster Ordnung von $\mathbf{J}^*(\boldsymbol{\alpha})$ stellt die Tangential-Hyperebene dar, deren Normalenvektor der Gewichtungsvektor $\boldsymbol{\alpha}$ ist ([Hil01]). Erwartungsgemäß hat die Jacobimatrix einen Eigenwert in null mit Eigenvektor $\boldsymbol{\alpha}$. Da sie sich Summe von Matrixprodukten $\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T$ darstellen lässt⁷, ist die Jacobimatrix symmetrisch und negativ semidefinit. Wird also ein Gewichtungsfaktor erhöht, kann der zugehörige Zielfunktionswert dadurch nur kleiner werden oder gleich bleiben (ein Verhalten, das auch intuitiv zu erwarten ist). Aufgrund der Symmetrie müssen nur $k \cdot (k + 1) / 2$ Elemente der Jacobimatrix explizit berechnet werden.

Zweite Ableitung des Pareto-Punktes $\mathbf{J}^*(\boldsymbol{\alpha})$

Die zweite Ableitung eines Pareto-Punktes $\left[\frac{\partial^2 J_h^*}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} \right]$ wird durch erneute Differenziation der Jacobimatrix berechnet⁸. Da diese Hypermatrix ebenfalls symmetrisch ist, müssen nur $1/6 \cdot k \cdot (k + 1) \cdot (k + 2)$ spezifische Elemente berechnet werden. Aufgrund der Beziehung $\partial \operatorname{spur}(\mathbf{Y}) = \operatorname{spur}(\partial \mathbf{Y})$ treten dabei Matrizenprodukte mit überwiegend bekannten Faktoren auf. Die Ableitung von \mathbf{X} (nach der Definition in Gleichung (6-23)) wird analog zu der von \mathbf{P}_i nach Gleichung (6-19) durchgeführt. Dadurch fallen k weitere Auswertungen des inversen Ljapunow-Operators $\mathcal{L}_{(\mathbf{A} \mathbf{R}^*)}^{-1}$ an, die nach der im übernächsten Abschnitt vorgestellten Methode effizient berechnet werden können.

Da die Reihenfolge der Matrizen in der Spur beliebig ist, kann die Rechenzeit durch geschickte Anordnung minimiert werden. Durch die Anwendung der Kettenregel beim Differenzieren fallen große Teile der Berechnung schon als Zwischenergebnis der Jacobimatrix an. Der Programm-Code für die Berechnungen wird automatisch aus der Problemdefinition erstellt, sodass Produkte mit Nullmatrizen (viele \mathbf{S}_i sind null, da die zugehörigen Zielfunktionen den Stellwert nicht enthalten) gar nicht erst berechnet werden. Der gesamte Rechenaufwand steigt

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_i^*}{\partial \alpha_j} &= \sum_{l=1}^n \left[\mathbf{X}^{1/2} (\mathbf{S}_j \mathbf{R} - \mathbf{S} \mathbf{R}_j)^T \mathbf{S}^{-1/2} \right]_l \cdot \left(\left[\mathbf{X}^{1/2} (\mathbf{S}_j \mathbf{R} - \mathbf{S} \mathbf{R}_j)^T \mathbf{S}^{-1/2} \right]_l \right)^T \\ \frac{\partial \mathbf{J}^*}{\partial \boldsymbol{\alpha}} &= \sum_{l=1}^n \mathbf{Y}_l \mathbf{Y}_l^T, \quad \mathbf{Y}_l = \begin{bmatrix} \left[\mathbf{X}^{1/2} (\mathbf{S}_1 \mathbf{R} - \mathbf{S} \mathbf{R}_1)^T \mathbf{S}^{-1/2} \right]_l \\ \vdots \\ \left[\mathbf{X}^{1/2} (\mathbf{S}_n \mathbf{R} - \mathbf{S} \mathbf{R}_n)^T \mathbf{S}^{-1/2} \right]_l \end{bmatrix} \end{aligned}$$

⁸ Aus Platzgründen wird auf die Herleitung und die explizite Angabe verzichtet.

kubisch mit der Anzahl der Zielfunktionen, quadratisch mit der Anzahl der Zustände und kubisch mit den Eingängen (der Rechenaufwand zur Inversion von \mathbf{S} ist kubisch in p).

Effiziente Lösung der ARG mit dem *Kleinmann-Algorithmus*

Um die Rechenzeit für einen Online-Algorithmus zur kontinuierlichen Anpassung der Zielgewichtung zu minimieren, könnten die vom Gewichtungsvektor abhängigen Größen (der Regler \mathbf{R} , die Jacobimatrix und die zweiten Ableitungen) als Kennlinien gespeichert und geeignet interpoliert werden. Dem steht jedoch der hohe Speicherbedarf schon bei einer moderaten Anzahl von Zielfunktionen entgegen. Sollen diese Größen hingegen bei jeder Anpassung neu berechnet werden, so müssten dazu eine Riccati-Gleichung und zahlreiche Ljapunow-Gleichungen gelöst werden. Zur Berechnung der Lösung der ARG (6-5) gibt es viele Möglichkeiten (verbreitet ist z. B. der in [AL84] beschriebene Algorithmus). Es erscheint jedoch sinnvoll, einen Algorithmus zu verwenden, der die besonderen Umstände effizient ausnutzt.

Der Algorithmus nach Kleinmann, der in [Kle68] beschrieben wird, ist ein Newton-Verfahren zur iterativen Berechnung der Lösung der ARG. Ausgehend von einem beliebigen, das System stabilisierenden Regler \mathbf{R}^k , wird in jedem Iterationsschritt die Lösung einer Ljapunow-Gleichung \mathbf{P}^{k+1} berechnet, die die Lösung der ARG approximiert⁹:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{R}^k)^T \mathbf{P}^{k+1} + \mathbf{P}^{k+1} (\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{R}^k) \\ & + (\mathbf{R}^k)^T \mathbf{S} (\boldsymbol{\alpha}_{ref}^k) \mathbf{R}^k + \mathbf{Q} (\boldsymbol{\alpha}_{ref}^k) = 0 \end{aligned} \quad (6-30)$$

$$\mathbf{R}^{k+1} = \mathbf{S} (\boldsymbol{\alpha}_{ref}^k)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}^{k+1}$$

Der Zielfunktionswert dieser Näherungslösung ist in jedem Schritt garantiert kleiner als im Vorhergehenden und der resultierende Regler ist immer stabilisierend. Nahe der Lösung weist das Verfahren, wie jedes Newton-Verfahren, eine quadratische Konvergenzrate auf. Geht man von kleinen Änderungen im Gewichtungsvektor aus, so reicht oft schon eine Iteration aus, um den neuen optimalen Regler mit hinreichender Genauigkeit zu erhalten. Die iterative Lösung der ARG ist damit meist weniger rechenaufwendig als ein Verfahren ohne Startwert. Da der berechnete Regler in jedem Iterationsschritt stabilisierend (und „besser“ als der Vorhergehende) ist, kann das Verfahren auch frühzeitig abgebrochen und für eine

⁹ Die Iterationsschritte des Kleinmann-Algorithmus sind durch hochgestellte Indices markiert: $(\cdot)^k$ steht für Größen, die im aktuellen Iterationsschritt aus dem vorhergehenden Schritt bekannt sind, $(\cdot)^{k+1}$ steht für Größen, die im aktuellen Iterationsschritt neu berechnet werden und $(\cdot)^{k-1}$ ist eine Größe, die schon im vorhergehenden Schritt bekannt war.

kurze Zeit suboptimal geregelt werden (in der Hoffnung, dass das Verfahren bei der nächsten Anpassung schneller konvergiert).

In Kombination mit dem folgend beschriebenen Verfahren zur Lösung der Ljapunow-Gleichung, die in jedem Iterationsschritt gelöst werden muss, ergeben sich weitere Vorteile des *Kleinmann-Algorithmus* gegenüber den Standardverfahren für Offline-Anwendungen. Weiterhin wird in [Kat06] eine Version des *Kleinmann-Algorithmus* vorgestellt, die sich besonders gut für die Implementierung auf FPGA eignet. Zusammen mit den zahlreichen Matrizenmultiplikationen, die bei der Berechnung der Ableitungen anfallen, ergibt sich damit eine Möglichkeit, auch sehr große Systeme (mit vielen Zielfunktionen) mit vertretbarem Hardware-Einsatz zu regeln.

Effiziente Lösung der Ljapunow-Gleichung nach *Bartels und Stewart*

Es gibt viele Möglichkeiten zur Berechnung der Lösung der symmetrischen Ljapunow-Gleichung $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{Q} = 0$, bzw. des inversen Ljapunow-Operators $\mathcal{L}_{(\mathbf{A}^T)}^{-1}(\mathbf{Q})$ (vgl. [Sor03]). Eine sehr effiziente und weitverbreitete Methode ist die nach *Bartels und Stewart*, die in [BS72] beschrieben wird. Bei dieser Methode wird zunächst die Matrix \mathbf{A} mit dem QR-Algorithmus auf die untere reelle Schur-Form $\tilde{\mathbf{A}}$ (Block-Dreiecks-Form) gebracht. Dies entspricht einer orthogonalen Ähnlichkeitstransformation mit \mathbf{U} , die auch auf \mathbf{Q} angewandt wird:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{A}} &= \mathbf{U}^T \mathbf{A} \mathbf{U} \\ \tilde{\mathbf{Q}} &= \mathbf{U}^T \mathbf{Q} \mathbf{U}\end{aligned}\tag{6-31}$$

Daraus lässt sich die transformierte Lösung $\tilde{\mathbf{P}}$ effizient durch rekursive Lösung der Diagonalblöcke von $\tilde{\mathbf{A}}$ (maximale Dimension (2×2)) berechnen. Die gesuchte Lösung ergibt sich dann durch Rücktransformation:

$$\mathbf{P} = \mathbf{U} \tilde{\mathbf{P}} \mathbf{U}^T\tag{6-32}$$

Dieses Verfahren ist besonders effizient, wenn der gleiche inverse Ljapunow-Operator auf verschiedene \mathbf{Q} angewandt wird, da die aufwendige QR-Zerlegung nur einmal durchgeführt werden muss. Dies ist der Fall bei der Berechnung der \mathbf{P}_i und der Ableitung $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \alpha}$, die für die zweiten Ableitungen der Zielfunktionen benötigt wird. Weiterhin kann im *Kleinmann-Algorithmus*, Gleichung (6-30), ausgenutzt werden, dass der (inverse) Ljapunow-Operator linear ist. Die Näherungslösung der ARG \mathbf{P}^{k+1} ist dann einfach die gewichtete Summe der \mathbf{P}_i^{k+1} (siehe (6-12)).

Für die zweiten Ableitungen muss der inverse Ljapunow-Operator mit nicht transponiertem \mathbf{A}_R berechnet werden. Nach [KR78] kann hierfür die vorhandene QR-Zerlegung von \mathbf{A}_R^T verwendet werden.

Die im Abschnitt 6.4 vorgestellte Variante des selbstoptimierenden Riccati-Reglers für dynamische Führungsgrößen erfordert die Lösung von Sylvester-Gleichun-

gen $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{C} = 0$. Auch diese können nach der Methode von *Bartels und Stewart* berechnet werden, wobei ebenfalls die oben genannten Eigenschaften ausgenutzt werden können.

6.3 Algorithmus für einen Pareto-Regler

Bei stochastischen Systemen oder Systemen mit veränderlichen Parametern hängt die konkrete Gestalt der Pareto-Front von den Störungen (charakterisiert durch die Kovarianz \mathbf{W}) bzw. bei parametervarianten Systemen auch von den Parameterwerten ab. Damit sind auch der Pareto-Punkt, der durch die Minimierung der Skalarisierungsfunktion ausgewählt wird, und der zugehörige Gewichtungsvektor veränderlich. Sie müssen dann zur Laufzeit anhand der identifizierten Störungen und Parameter berechnet werden. Verfahren, bei denen ein Pareto-Punkt aus einer Approximation der Pareto-Front mithilfe von Expertenwissen ausgewählt wird (ein Beispiel hierfür findet sich in [WSD⁺08]), können hier nicht eingesetzt werden, da die Neuberechnung der Approximation der Pareto-Front zur Laufzeit zu zeitaufwendig wäre. Daher wird hier eine Methode vorgestellt, die ohne die explizite Berechnung der Pareto-Front (weder zur Laufzeit, noch offline) auskommt.

Das Verfahren basiert auf dem im vorigen Abschnitt vorgestellten Newton-Verfahren zur Minimierung einer Skalarisierungsfunktion mit quadratischen Gütemaßen und linearem Regelungsgesetz. Die Idee ist es, die Regleroptimierung zur Laufzeit periodisch neu durchzuführen und zwar unter Berücksichtigung der aktuellen Störkovarianz und Parameterwerte. Der prinzipielle Ablauf des Algorithmus (Pareto-Controller) ist in Bild 6-1 dargestellt:

- 1) Zunächst wird das System für die Zeit einer Anpassungsperiode $t \in [t_0, t_1 = t_0 + \Delta t_A)$ mit einem gegebenen Regler geregelt.
- 2) Während dieser Zeit werden die Zustände gemessen und in der nächsten Anpassungsperiode $t \in [t_1, t_2)$ wird daraus der aktuelle Wert der Zielfunktionen, die Jacobimatrix und die zweiten Ableitungen berechnet.
- 3) Mit diesen Größen wird durch Minimierung der Skalarisierungsfunktion ein neuer Gewichtungsvektor berechnet (auch in der Periode $[t_1, t_2)$).
- 4) Für den neuen Gewichtungsvektor wird ein neuer Regler berechnet (auch in der Periode $[t_1, t_2)$), mit dem dann während der übernächsten Anpassungsperiode $t \in [t_2, t_3)$ geregelt wird (die Periodendauer Δt_A muss lang genug sein, um alle Berechnungen durchführen zu können).

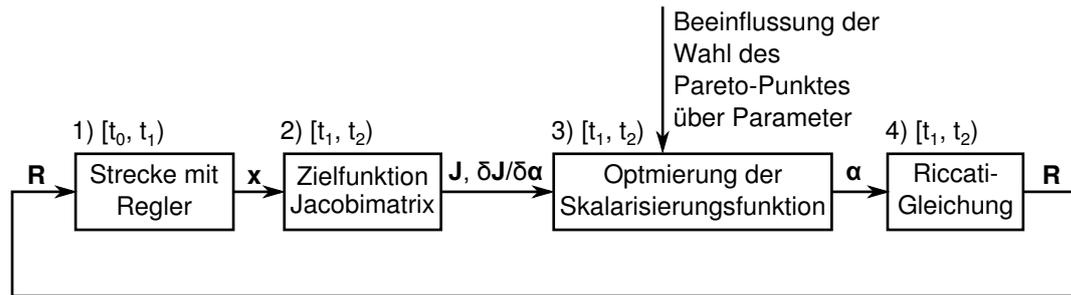


Bild 6-1: Ablaufdiagramm des PaCo-Verfahrens

6.3.1 Quasikontinuierliche Regleranpassung

Aus Bild 6-1 ist der Kreislauf des Verfahrens zu erkennen, bei dem, ausgehend von Messungen, Werte berechnet werden, mit denen dann ein Eingriff in die Systemdynamik vorgenommen wird. Dies entspricht dem Schema einer Regelung. Da u. A. der Wert des Zielfunktionsvektors gemessen wird, und der Eingriff das Ziel hat, dass die Werte der Zielfunktionen stets einen Pareto-Punkt darstellen, soll das Verfahren PaCo (engl. pareto-controller) genannt werden. Das Verfahren aus Abschnitt 6.2 muss dazu in drei Punkten modifiziert werden:

- 1) Da bisher immer über einen unendlichen Zeithorizont mit quasi stationärer Systemdynamik optimiert wurde, muss für eine Anpassung nach endlicher Zeit mit einer Approximation des Erwartungswerts der relevanten Systemgrößen gerechnet werden.
- 2) Bei der Anpassung des Reglers muss sichergestellt werden, dass dadurch die Systemstabilität nicht gefährdet wird.
- 3) Zur Verringerung der Rechenzeit wird bei den Newton-Schritten während einer Anpassung auf die Aktualisierung der Jacobimatrix und der zweiten Ableitungen verzichtet. Die Pareto-Front wird also durch die Taylorreihenapproximation zweiter Ordnung mit konstantem Entwicklungspunkt dargestellt. Die Ableitungen der Skalarisierungsfunktion dagegen werden in jedem Iterationsschritt neu berechnet.

Da sich das System durch die regelmäßige Änderung des Reglers und die angemessene Änderung der Störkovarianz nicht in einem stationären Zustand befindet, ist streng genommen eine der Grundannahmen des stochastischen Riccati-Reglers verletzt. Die praktische Erprobung zeigt jedoch, dass das Verfahren sehr wohl mit guten Ergebnissen eingesetzt werden kann, wenn berücksichtigt wird, dass sich der Regler nicht zu schnell ändert. Dabei muss einerseits berücksichtigt werden, dass das System durch die Änderung des Reglers nicht instabil wird, und dass andererseits immer wieder Phasen mit quasi stationärer Dynamik auftreten, in denen dann die Optimalitätsbedingungen (fast) erfüllt sind. Die kontinuierliche Regleranpassung mit Hilfe von Riccati-Gleichungen wird auch bei der Rege-

lung von nichtlinearen Systemen erfolgreich eingesetzt (State-Dependent Riccati Equation-Based Control, SDRE, vgl. [IT98]), obwohl hier Stationarität und Optimalitätsbedingungen durch die Linearisierung noch schlechter erfüllt sind.

Erwartungswertbildung und Einfluss der Systemdynamik

Sowohl der Wert des Zielfunktionsvektors, als auch die Zustandskovarianz (die zur Berechnung der Jacobimatrix und der zweiten Ableitungen benötigt wird) sind Erwartungswerte, die so in der Praxis nicht berechnet werden können. Als einfache und ressourcensparende Approximation bietet sich die Tiefpassfilterung der entsprechenden Größen an:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \right\} \sim \frac{1}{T_{TP,J}} \cdot \int_{-\infty}^t e^{(\tau-t)/T_{TP,J}} \cdot f(\tau) d\tau \quad (6-33)$$

Die Approximation der Zustandskovarianz ist dann beispielsweise (mit der Laplace-Transformation \mathfrak{L}):

$$\hat{\mathbf{X}}(t) = \mathfrak{L}^{-1} \left(\frac{1}{T_{TP,J} s + 1} \cdot \mathfrak{L}(\mathbf{x}(t) \cdot \mathbf{x}(t)^T) \right) \quad (6-34)$$

Bei der Wahl der Zeitkonstante $T_{TP,J}$ ist die Systemdynamik zu berücksichtigen (die sich mit der Wahl des Reglers ändern kann). Um eine einigermaßen realistische Annäherung an den Erwartungswert zu erhalten, sollte über einen Zeitraum „gemittelt“ werden, der um ein Vielfaches länger ist, als die größte Systemzeitkonstante bzw. Periodendauer.

Weiterhin muss auch berücksichtigt werden, dass das System nicht stationär ist, da der Regler ständig geändert wird. Zur Abschätzung der Dynamik der Zustandskovarianz, die aus der Anpassung des Reglers resultiert, soll das Transitionsverhalten der (Ljapunow-) Differenzialgleichung der Kovarianzmatrix bei Störungen mit konstanter Kovarianz betrachtet werden:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}_R \mathbf{X}(t) + \mathbf{X}(t) \mathbf{A}_R^T + \mathbf{W} \quad (6-35)$$

Diese DGL lässt sich mithilfe des Vektor-Operators und dem Kronecker-Produkt wie folgt ausdrücken (vgl. [PP06]):

$$\text{vec}(\dot{\mathbf{X}}(t)) = (\mathbf{I} \otimes \mathbf{A}_R + \mathbf{A}_R^T \otimes \mathbf{I}) \text{vec}(\mathbf{X}(t)) + \text{vec}(\mathbf{Q}) \quad (6-36)$$

Die Transition der Systemdynamik soll zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ stattfinden, danach ist die Systemdynamik gleichbleibend. Die Lösung der Kovarianz-DGL lautet dann:

$$\begin{aligned} \text{vec}(\mathbf{X}(t)) &= e^{(\mathbf{I} \otimes \mathbf{A}_R + \mathbf{A}_R^T \otimes \mathbf{I})t} \cdot \text{vec}(\mathbf{X}_0) \\ &\quad + \left(e^{(\mathbf{I} \otimes \mathbf{A}_R + \mathbf{A}_R^T \otimes \mathbf{I})t} - \mathbf{I} \right) (\mathbf{I} \otimes \mathbf{A}_R + \mathbf{A}_R^T \otimes \mathbf{I})^{-1} \text{vec}(\mathbf{Q}) \\ &= e^{(\mathbf{I} \otimes \mathbf{A}_R + \mathbf{A}_R^T \otimes \mathbf{I})t} \cdot \text{vec}(\mathbf{X}_0) \\ &\quad + \left(\mathbf{I} - e^{(\mathbf{I} \otimes \mathbf{A}_R + \mathbf{A}_R^T \otimes \mathbf{I})t} \right) \cdot \text{vec}(\mathbf{X}_\infty), \end{aligned} \quad (6-37)$$

wobei \mathbf{X}_∞ die Lösung der Ljapunow-Gleichung, also der Endwert, für die Zustandskovarianz mit der neuen Systemdynamik ist. Für die Eigenwerte der Dynamikmatrix der Kovarianz-DGL gilt (vgl. [Lau04]):

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{I} \otimes \mathbf{A}_R + \mathbf{A}_R^T \otimes \mathbf{I}) &= \text{vec}(\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{I}) \cdot \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{A}_R)^T + \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{A}_R) \cdot \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{I})^T) \\ \underline{\lambda}(\mathbf{I} \otimes \mathbf{A}_R + \mathbf{A}_R^T \otimes \mathbf{I}) &= 2 \cdot \underline{\lambda}(\mathbf{A}_R) \\ \bar{\lambda}(\mathbf{I} \otimes \mathbf{A}_R + \mathbf{A}_R^T \otimes \mathbf{I}) &= 2 \cdot \bar{\lambda}(\mathbf{A}_R) \end{aligned} \quad (6-38)$$

Hierin ist $\boldsymbol{\lambda}(\cdot)$ der Vektor der Eigenwerte und $\underline{\lambda}$ bzw. $\bar{\lambda}$ der kleinste bzw. größte Eigenwert. Das Spektrum der Eigenwerte der Zustandskovarianz liegt also in einem Intervall, dessen Grenzen doppelt „schnell“ sind, wie die des Intervalls der Systemeigenwerte.

Approximation der aktuellen Gewichtung

Nach der Aufschaltung eines neuen Reglers für eine gewünschte Zielgewichtung $\boldsymbol{\alpha}_{akt}$ dauert es eine Weile, bis das System wieder stationär ist und die Zielfunktionswerte der gewünschten Gewichtung entsprechen. Bei geeigneter Einstellung sollte diese Verzögerung durch die Zeitkonstante des Tiefpassfilters dominiert werden. Es erscheint daher sinnvoll, weitere Berechnung nicht mit der aktuellen (zum Regler gehörigen) Gewichtung $\boldsymbol{\alpha}_{akt}$, sondern mit tiefpassgefilterten Werten $\boldsymbol{\alpha}_{ist}$ vorzunehmen. Für dieses Tiefpassfilter sollte die gleiche Zeitkonstante gewählt werden, wie für die Zielfunktionswerte. Die Gewichtung $\boldsymbol{\alpha}_{ist}$ hat dann ungefähr die gleiche Transitionszeit, wie die zugehörigen Zielfunktionswerte.

Stabilität

Durch die periodische Änderung des Reglers entsteht ein schaltendes System. Die Stabilität solcher Systeme kann mithilfe der *direkten Methode von Ljapunow* garantiert werden (siehe [Wul05]). Da im vorliegenden Fall die Regleranpassung quasi kontinuierlich stattfindet, wird die Methode von Ljapunow in der Variante für lineare zeitvariante Systeme angewandt. Danach ist ein System dann

asymptotisch stabil, wenn eine sogenannte Ljapunow-Funktion mit den folgenden Eigenschaften existiert¹⁰:

$$\begin{aligned} V(\mathbf{x}) &= \mathbf{x}(t)^T \cdot \mathbf{P}(t) \cdot \mathbf{x}(t) > 0 \\ \dot{V}(\mathbf{x}) &\leq 0 \end{aligned} \quad (6-39)$$

Für Riccati-Regler ist \mathbf{P} genau die Lösung der ARG und in der Ableitung tritt die Zustandsgewichtungsmatrix \mathbf{Q} auf, die per Definition positiv semidefinit ist:

$$\frac{d}{dt}V(\mathbf{x}(t)) = \mathbf{x}(t)^T \left(-\mathbf{Q} + \dot{\mathbf{P}}(t) \right) \mathbf{x}(t) \quad (6-40)$$

Wird nun davon ausgegangen, dass der Regler während einer Anpassungsperiode kontinuierlich überblendet wird¹¹, kann mit dem Differenzenquotienten von \mathbf{P} gerechnet werden:

$$\dot{V} \approx \mathbf{x}(t)^T \left(-\mathbf{Q} + \frac{1}{\Delta t_A} \Delta \mathbf{P}(t) \right) \mathbf{x}(t) \quad (6-41)$$

Der Differenzenquotient von \mathbf{P} kann direkt aus dem *Kleinmann-Algorithmus* gewonnen werden:

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{P}^{k+1} - \mathbf{P}^k \quad (6-42)$$

Wenn sich der Gewichtungsvektor von einer Anpassungsperiode zur nächsten nicht ändert ($\boldsymbol{\alpha}_{ref}^k = \boldsymbol{\alpha}_{ref}^{k-1}$), dann garantiert der *Kleinmann-Algorithmus*, dass $\Delta \mathbf{P} \preceq \mathbf{0}$ ist. Daher ist es naheliegend, die Linearität des inversen Ljapunow-Operators auszunutzen, und \mathbf{P} als Summe aus zwei Termen auszurechnen, einen für eine unveränderte Gewichtung und einen nur für die Änderung der Gewichtung. Die Differenz zwischen zwei Anpassungsschritten $\Delta \mathbf{P}$ ist dann die Summe aus einem Term $\Delta_{kl} \mathbf{P}$, der garantiert negativ semidefinit ist und einem Term $\mathbf{P}_{\Delta \alpha}$, der für die Änderung der Gewichtung steht:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{P} &= \Delta_{kl} \mathbf{P} + \mathbf{P}_{\Delta \alpha} = \mathbf{P}^{k+1} \left(\boldsymbol{\alpha}_{ref}^k \right) - \mathbf{P}^k \left(\boldsymbol{\alpha}_{ref}^{k-1} \right) \\ \boldsymbol{\alpha}_{ref}^k &= \boldsymbol{\alpha}_{ref}^{k-1} + \Delta \boldsymbol{\alpha} \\ \mathbf{P}^{k+1} \left(\boldsymbol{\alpha}_{ref}^k \right) &= \mathbf{P}^{k+1} \left(\boldsymbol{\alpha}_{ref}^{k-1} \right) + \mathbf{P}^{k+1} (\Delta \boldsymbol{\alpha}) \\ \mathbf{P}^{k+1} \left(\boldsymbol{\alpha}_{ref}^k \right) - \mathbf{P}^k \left(\boldsymbol{\alpha}_{ref}^{k-1} \right) &= \Delta_{kl} \mathbf{P} \preceq 0 \\ \mathbf{P}^{k+1} (\Delta \boldsymbol{\alpha}) &= \mathbf{P}_{\Delta \alpha} \end{aligned} \quad (6-43)$$

¹⁰ Das System ist dann asymptotisch stabil, wenn \dot{V} strikt kleiner null ist.

¹¹ Dies wäre durchaus möglich, da eine Linearkombination aus zwei aufeinander folgenden Lösungen des Kleinmann-Algorithmus immer stabilisierend ist.

Die Frage nach der Stabilität lässt sich dann so formulieren, dass der größte Faktor $\rho \leq 1$ gesucht wird, sodass $\mathbf{Q} - \Delta_{kl}\mathbf{P} - \rho\mathbf{P}_{\Delta\alpha}$ noch positiv definit ist:

$$\rho\mathbf{P}_{\Delta\alpha} \preceq \mathbf{Q} - \Delta_{kl}\mathbf{P} \quad (6-44)$$

Der Faktor ρ ist also eine Skalierung der gewünschten Änderung der Gewichtung, die sicherstellt, dass das System durch die Änderung des Reglers nicht instabil wird. Für den Online-Algorithmus wird die sehr konservative Prüfung auf positive Definitheit durch den folgenden Test ersetzt:

$$\rho = \min_{t \in [t_0, t_0 + \Delta t_A)} \left(\frac{\mathbf{x}(t)^T \cdot \mathbf{P}_{\Delta\alpha} \cdot \mathbf{x}(t)}{\mathbf{x}(t)^T \cdot (\mathbf{Q} - \Delta_{kl}\mathbf{P}) \cdot \mathbf{x}(t)} \right) \quad (6-45)$$

Es wird also eine Anpassungsperiode lang getestet, zu welchem Anteil die neue Gewichtung übernommen werden kann, ohne dass das System bei den getesteten Zuständen instabil wird. Dieser momentane Test ist weniger konservativ als die Forderung, dass die Gewichtsänderung für alle möglichen \mathbf{x} zulässig ist (Gleichung (6-44)). Die praktische Erprobung zeigt sogar, dass ρ in vielen Fällen auch von Gleichung (6-45) noch zu klein gewählt wird und daher nach unten begrenzt werden kann.

Durch den Stabilitätstest ergibt sich eine Unterscheidung zwischen gewünschter Gewichtung α_{ref} und tatsächlich umgesetzter Gewichtung $\alpha_{akt} = \rho \cdot \alpha_{ref}$.

Vereinfachte Optimierung der Skalarisierungsfunktion

Bei der Optimierung der Skalarisierungsfunktion nach Gleichung (6-17) mit dem Newton-Verfahren müsste die Taylorreihenentwicklung der Pareto-Front theoretisch bei jeder Newton-Iteration neu berechnet werden. Da das System nie mit den Gewichtungen, die in den Newton-Iterationen berechnet werden, geregelt wird, stehen für diese Zwischenschritte auch keine Messwerte zur Verfügung. Da die Taylorreihenentwicklung der Pareto-Front jedoch auf Messwerten beruht, gibt es zwei Alternativen: Entweder wird in jeder Anpassungsperiode nur eine Newton-Iteration durchgeführt, oder die Optimierung wird bis zur Konvergenz mit einer quadratischen Approximation der Pareto-Front durchgeführt, (die um den Startwert der Optimierung entwickelten Taylorreihe). Bei beiden Ansätzen ist die resultierende Gewichtung zwar nur suboptimal in Bezug auf die Skalarisierungsfunktion, der resultierende Regler ist jedoch weiterhin pareto-optimal. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass sich die Systemdynamik bis zum nächsten Anpassungszeitpunkt nur ein Stück weit auf die neue Gewichtung zubewegt (eine ausreichend kurze Anpassungsperiode vorausgesetzt). Bei der nächsten Anpassung kann dann eine „Kurskorrektur“ vorgenommen werden. Der Vorteil der vollständigen Optimierung mit einer Approximation der Pareto-Front gegenüber der Variante mit einem Iterationsschritt ist, dass bei der Optimierung alle zur Verfügung stehenden Informationen, nämlich die über die Skalarisierungsfunktion, vollständig ausnutzt werden.

Durch diese vereinfachte Optimierung geht die garantierte Konvergenz im Konvergenzbereich des Newton-Verfahrens verloren. Durch die falsche Wahl der Anpassungsperiodendauer und der Filterzeitkonstanten kann das Verfahren in Schwingung geraten. Die Optimierung liefert dann abwechselnd zu große und zu kleine Gewichtungswerte. Es sollte jedoch möglich sein, diese Anpassung so langsam vorzunehmen, dass das Verfahren mit Sicherheit stabil ist. In der Praxis zeigt sich, dass sogar sehr kleine Zeitkonstanten in Bezug auf die Systemeigenwerte möglich sind.

Weitere Aspekte

Bei der Optimierung muss darauf geachtet werden, dass die Bedingungen für die Gewichtung ($0 < \alpha_i \leq 1$, $\sum \alpha = 1$) und gegebenenfalls für den Riccati-Regler (siehe Seite 126) eingehalten werden. Dies wird in der vorliegenden Arbeit mithilfe der sogenannten erweiterten Lagrange-Funktion (siehe [ACP91]) erreicht. Bei diesem Verfahren wird die Zielfunktion um Strafterme für die Nebenbedingungen erweitert. Diese erweiterte Zielfunktion wird mit dem Newton-Verfahren minimiert. Die Straffaktoren und die Multiplikatoren der Strafterme werden dann in einer äußeren Schleife mit mindestens linearer Konvergenzrate angepasst. Der Vorteil dieser Methode ist die leichte Implementierbarkeit, die einfache Fehlersuche und die gute Eignung für die automatische Generierung des problemspezifischen Programm-Codes bei gleichzeitig guten Laufzeiteigenschaften und einfacher Parametrierbarkeit.

6.3.2 Der Algorithmus im Detail

Aus den besprochenen Änderungen, die zur Umsetzung einer quasi kontinuierlichen Anpassung notwendig sind, ergibt sich das in Bild 6-2 dargestellte detaillierte Ablaufdiagramm des PaCo-Verfahrens:

- 1) Zunächst wird das System für die Zeit einer Anpassungsperiode Δt_A mit einem gegebenen Regler (aus 9)) geregelt. Während dieser Zeit werden die **Zustände gemessen** (Anpassungsperiode $[t_0, t_1]$).
- 2) Aus den gemessenen Zuständen aus 1) wird durch ein Tiefpassfilter eine **Approximation der Zustandskovarianz und der Zielfunktionswerte** berechnet (Anpassungsperiode $[t_0, t_1]$).
- 3) Aus der zum aktuellen Regler gehörigen Gewichtung aus 9) wird mit einem Tiefpassfilter die **tatsächliche Gewichtung α_{ist}** berechnet (auch Anpassungsperiode $[t_0, t_1]$).
- 4) Aus der geschätzten Zustandskovarianz aus 2) und der tatsächlichen Gewichtung aus 3) werden die **Zielfunktionswerte, die Jacobimatrix und die zweiten Ableitungen** berechnet (Anpassungsperiode $[t_1, t_2]$).

- 5) Mithilfe der tatsächlichen Gewichtung aus 3), den Zielfunktionswerten und der Jacobimatrix aus 4) wird auch in der Anpassungsperiode $[t_1, t_2)$ die **Optimierung der Skalarisierungsfunktion** durchgeführt, um den gewünschten Gewichtungsvektor α_{ref} für den nächsten Regler zu bestimmen.
- 6) Weiter wird in der Anpassungsperiode $[t_1, t_2)$ für die gewünschte Gewichtung aus 5) ein **neuer Reglerkandidat** berechnet.
- 7) Parallel zu den Berechnungen in der Anpassungsperiode $[t_1, t_2)$ wird das **System mit dem nächsten Regler** geregelt und die Zustände dabei gemessen.
- 8) In der Anpassungsperiode $[t_2, t_3)$ wird mit den gemessenen Zuständen aus 7) und den Riccati-Matrizen des neuen Reglerkandidaten aus 6) der **Anpassungsfaktor** ρ (Gleichung (6-45)) bestimmt.
- 9) Mit dem Anpassungsfaktor aus 8) wird schließlich in der Anpassungsperiode $[t_3, t_4)$ der **nächste Regler** zusammen mit der zugehörigen Gewichtung α_{akt} berechnet.

Dadurch, dass jeder neue Regler vor der Aufschaltung erst validiert werden muss, um die Stabilität zu gewährleisten, vergehen zwischen dem Ende der Messung (Ende Periode 0) und der Aufschaltung des neuen Reglers (Anfang Periode 4) 3 Anpassungsperioden.

6.4 Pareto-Regler mit dynamischen Führungsgrößen

Der bisher besprochene PaCo-Algorithmus basiert auf einem Riccati-Regler, der sich zur Kompensation von allgemeinen Störungen in Form von weißem Rauschen eignet. Für die Spurführungsregelung soll das Konzept daher speziell als Folge-regler modifiziert werden. Dazu wird der Ansatz nach [KS72] gewählt, bei dem das Systemmodell (Index sy) um das Modell einer dynamischen Führungsgröße (Index re) erweitert wird, sodass eine Zielfunktion, die sich auf das Folgeverhalten bezieht (Ausgang $z_{flg,i}$), explizit die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Verlauf bewerten kann. Im Modell wird hierbei die Dynamik des Führungsgrößenmodells durch keinen externen Eingang, sondern durch weißes Rauschen angeregt:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_{sy} \\ \dot{\mathbf{x}}_{re} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{sy} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{re} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{sy} \\ \mathbf{x}_{re} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{sy} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}_{sy} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{sy} \\ \mathbf{w}_{re} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{u}_{sy} &= - \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{sy} & \mathbf{R}_{re} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{sy} \\ \mathbf{x}_{re} \end{bmatrix} \\
 z_{flg,i} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{sy,i} & -\mathbf{C}_{re,i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{sy} \\ \mathbf{x}_{re} \end{bmatrix} + \mathbf{D}_{sy,i} \mathbf{u}_{sy}
 \end{aligned} \tag{6-46}$$

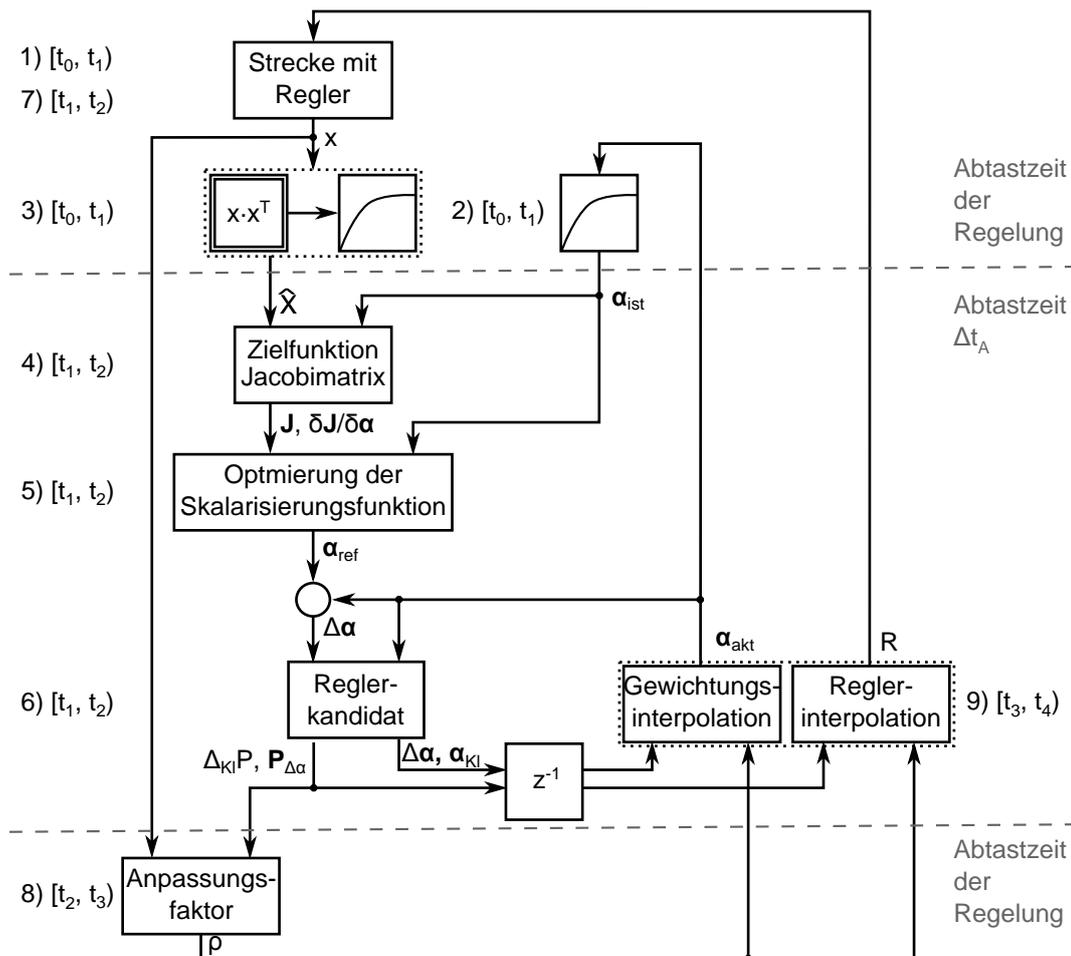


Bild 6-2: Ablaufdiagramm des PaCo-Verfahrens im Detail

Entsprechend der Struktur der erweiterten Systemmatrix wird auch die Lösung der Riccati-Gleichung als Blockmatrix angeschrieben mit den Teilmatrizen für das System (Index s, s), das Führungsmodell (Index r, r) und die Koppelmatrizen (Index s, r):

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_{flg} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{s,s} & \mathbf{P}_{s,r} \\ (\mathbf{P}_{s,r})^T & \mathbf{P}_{r,r} \end{bmatrix} \quad (6-47)$$

Durch Einsetzen und Ausmultiplizieren des derart erweiterten Systems in die Gleichung für den *Kleinmann-Algorithmus* kann die spezielle Systemstruktur ausgenutzt werden. Es stellt sich heraus, dass der Regler aus zwei Anteilen besteht: dem ursprünglichen Kompensationsregler und einem Führungsanteil:

$$\mathbf{R}^{k+1} = \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{B}_{sy})^T \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{s,s}^{k+1} & \mathbf{P}_{s,r}^{k+1} \end{bmatrix} \quad (6-48)$$

Ist der Zustand des Führungsmodells konstant gleich null, so ergibt sich die gleiche Regelungsdynamik wie ohne Führungsmodell. Der ursprüngliche Kompen-

sationsregler wird auch weiterhin auf die gleiche Weise berechnet wie ohne die Systemerweiterung:

$$\begin{aligned} & \left(\mathbf{A}_{R_{sy}}^k\right)^T \cdot \mathbf{P}_{s,s}^{k+1} + \mathbf{P}_{s,s}^{k+1} \cdot \mathbf{A}_{R_{sy}}^k \\ & + \left(\mathbf{R}_{sy}^k\right)^T \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{R}_{sy}^k + \mathbf{Q}_{s,s} = 0 \end{aligned} \quad (6-49)$$

Dabei ist $\mathbf{A}_{R_{sy}}^k = \mathbf{A}_{sy} - \mathbf{B}_{sy} \mathbf{R}_{sy}^k$ die Dynamikmatrix des geregelten Systems. Eine Änderung der Führungsdynamik hat keinen Einfluss auf diesen Regleranteil. Der Folgeregleranteil wird durch eine Sylvester-Gleichung bestimmt:

$$\begin{aligned} & \left(\mathbf{A}_{re}\right)^T \cdot \mathbf{P}_{s,r}^{k+1} + \mathbf{P}_{s,r}^{k+1} \cdot \mathbf{A}_{R_{sy}}^k \\ & + \left(\mathbf{R}_{re}^k\right)^T \cdot \mathbf{S} \cdot \left(\mathbf{R}_{sy}^k - \mathbf{R}_{sy}^{k+1}\right) - \mathbf{Q}_{r,s} = 0 \end{aligned} \quad (6-50)$$

Obwohl sie für den Regler nicht benötigt wird, muss zur Berechnung des Anpassungsfaktors ρ noch der reine Führungsanteil der Riccati-Matrix $\mathbf{P}_{r,r}$ angegeben werden:

$$\begin{aligned} & \left(\mathbf{A}_{R_{sy}}^k\right)^T \cdot \mathbf{P}_{r,r}^{k+1} + \mathbf{P}_{r,r}^{k+1} \cdot \mathbf{A}_{R_{sy}}^k \\ & - 2 \left(\mathbf{R}_{re}^k\right)^T \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{R}_{re}^{k+1} + \mathbf{R}_{re}^k \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{R}_{re}^k + \mathbf{Q}_{r,r} = 0 \end{aligned} \quad (6-51)$$

Berechnung der Zustände des Führungsmodells

Da die Anregung des Führungsgrößenmodells bei dieser Form der Modellierung unbekannt ist, müsste der Zustand geschätzt werden, z. B. indem ein Beobachter mit der gleichen Systemerweiterung aufgebaut wird. Im vorliegenden Fall mit zunächst unbekanntem Gleislagefehlern wäre dies durchaus eine brauchbare Vorgehensweise. Generell scheint es jedoch widersinnig zu sein, Führungsgrößen zu schätzen, da diese ja im Voraus bekannt sein sollten. Auch die Gleislagefehler lassen sich vorab identifizieren und stehen dann als gespeicherte Trajektorie zur Verfügung. Daher soll hier beschrieben werden, wie die Zustände des Führungsmodells direkt berechnet werden.

Jedes lineare dynamische System mit maximaler Differenzordnung hat die Eigenschaft der Flachheit. Die Zustände (und ggf. die Eingänge) lassen sich also aus den Ausgängen und ihren Ableitungen berechnen. Dazu muss eine reguläre Matrix \mathbf{Q}_{flach} aus Zeilen der kalmanschen Beobachtbarkeitsmatrix \mathbf{Q}_B gebildet und invertiert werden. Oft sind schon die ersten n Zeilen von \mathbf{Q}_B regulär. Die Inverse von \mathbf{Q}_{flach} wird dann von rechts mit einem Vektor multipliziert, der die Ausgänge

und die Ableitungen der Ausgänge $y_{i_h}^{(j_h)}$ der entsprechenden Zeile $\mathbf{C}_{i_h} \cdot \mathbf{A}^{j_h}$ von \mathbf{Q}_B enthält:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [\mathbf{C}_{i_h} \cdot \mathbf{A}^{j_h}]^{-1} \cdot [y_{i_h}^{(j_h)}] \\ i_h &\in \{1, \dots, q\}, j_h \in \{0, \dots, n-1\}, h = 1, \dots, n \\ \det [\mathbf{C}_{i_h} \cdot \mathbf{A}^{j_h}] &\neq 0 \end{aligned} \quad (6-52)$$

Die Einschränkung, dass das Modell der Führungsgrößen maximale Differenzordnung haben muss, hat sich in der Praxis als nicht zu restriktiv erwiesen, da die Nullstellen in den Übertragungsfunktionen entfernt werden können, ohne dass sich die Reglerdynamik dadurch stark ändert. Die Einschränkung gilt natürlich nicht, wenn die Führungsgrößen geschätzt werden. In diesem Fall haben die Nullstellen selbstverständlich auch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Dynamik. Die Spurführungsregelung wird jedoch mit vorab bekannten Führungsgrößen betrieben.

6.5 Pareto-Regler für die Spurführung

Die selbstoptimierende Regelung für die Spurführung der RailCabs wird nach dem Schema des PaCo-Reglers aus Abschnitt 6.4 implementiert. Sie ist eingebunden in die in Abschnitt 4.1 beschriebene Gesamtstruktur der RailCab-Regelung. Die freien Parameter der PaCo-Methode sind die einzelnen Zielfunktionen und die Skalarisierungsfunktion.

Weiterhin muss noch die Zeitkonstante für das Tiefpassfilter bestimmt werden, mit dem der Erwartungswert approximiert wird. Die Zeitkonstante wird umgekehrt-proportional zur Geschwindigkeit so eingestellt, dass sie bei 5 m s^{-1} 2 s beträgt. Theoretisch besser wäre es, sie in Abhängigkeit von den Regelungseigenwerten festzulegen. Dies würde jedoch eine Rückführung mit potenziell unvorhergesehenen Effekten bedeuten. Die geschwindigkeitsabhängige Einstellung ist durch die entsprechende Eigenschaft des Einspurmodells begründet. In der Praxis hat sich herausgestellt, dass der Betrag des kleinsten Eigenwerts bei 5 m s^{-1} stets nahe 1 liegt. Das Filter ist nach den in Abschnitt 6.3.1 genannten Kriterien also sehr schnell eingestellt. Wie bei einer klassischen Regelung stellt dies einen Kompromiss zwischen Schnelligkeit und Dämpfung dar. Da die Störungen jedoch sehr abrupte Amplitudensprünge aufweisen, ist eine schnelle Anpassung gewünscht. Die Einstellung $T_{TP,J} = 2 \text{ s}$ ist ein praktisch ermittelter Kompromiss. Bei schnelleren Werten wäre die Anpassung zu unruhig.

Die Dauer der Anpassungsperiode beträgt 80 ms . Alle Berechnungen benötigen im Schnitt ca. 25 ms . Damit steht eine ausreichende Reserve für außergewöhnliche

Systembelastungen zur Verfügung (der PaCo-Regler wird zusammen mit der gesamten RailCab-Regelung und -Steuerung auf einem Prozessor ausgeführt). Der Regler selbst wird mit 2 ms Abtastzeit ausgeführt. Da es sich um einen digitalen Regler handelt, ist die Modellannahme eines komplett kontinuierlichen Systems verletzt. Die Abtastzeit ist jedoch klein genug, um vernachlässigt zu werden. Tatsächlich sind die Abweichungen zwischen dem kontinuierlichen und dem diskreten Riccati-Regler sehr gering, und der kontinuierliche Regler erfüllt auch im Zusammenspiel mit dem diskretisierten System die Stabilitätsbedingung:

$$\begin{aligned}
 |\lambda(\mathbf{A}_d - \mathbf{B}_d \cdot \mathbf{R})| &< 1 \\
 \mathbf{A}_d &= e^{\mathbf{A} \cdot \Delta t} \\
 \mathbf{B}_d &= \left(\int_{\tau=0}^T e^{\mathbf{A} \cdot \tau} d\tau \right) \cdot \mathbf{B}
 \end{aligned} \tag{6-53}$$

Diese Bedingung ist für alle getesteten Gewichtungen und Geschwindigkeiten erfüllt. Der Grund, warum der Regler nicht direkt für das diskretisierte System berechnet wird, ist die Abhängigkeit der Dynamikmatrix von der Geschwindigkeit. Bei einer diskreten Reglerauslegung müsste die Diskretisierung bei jeder Geschwindigkeitsänderung neu durchgeführt werden, was sehr rechenaufwendig wäre. Ferner liegt die Herleitung des PaCo-Algorithmus derzeit nur in der zeitkontinuierlichen Variante vor.

Die unterlagerten Lenkwinkelregler werden mit 1 ms Abtastzeit ausgeführt, um eine möglichst präzise Umsetzung des Sollwertes zu gewährleisten (der Spurführungsregler arbeitet ja mit der Annahme, dass der Lenkwinkel ideal eingestellt wird).

Zu Beginn der Regelung wird der Kleinmann-Algorithmus mit einem offline berechneten Regler initialisiert. Die Initialisierung wird erneut durchgeführt, wenn eine Berechnung zu ungünstigen Werten führt. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Dynamikmatrix des geregelten Systems nicht negative Eigenwerte bekommt. Ein solcher instabiler Regler kann leicht erkannt werden, da die Regelungseigenwerte auf der Diagonalen QR-Zerlegung $\tilde{\mathbf{A}}$ von \mathbf{A}_R stehen ($\tilde{\mathbf{A}}$ wird zur Lösung der Ljapunow-Gleichung benötigt). Neben numerischen Fehlern kann ein solcher Fall auch auftreten, weil die Systemmatrix von der Geschwindigkeit abhängt und in jeder Anpassungsperiode neu berechnet wird. Zur Reinitialisierung nach einer Fehlberechnung wird der neue Regler aus einem Kennfeld passend zur aktuellen Geschwindigkeit bestimmt. Durch den Kleinmann-Algorithmus findet also nicht nur die Anpassung des Reglers an die neue Gewichtung statt, sondern auch eine Anpassung an die veränderliche Fahrzeuggeschwindigkeit.

6.5.1 Zustandsrekonstruktion

Der PaCo-Algorithmus basiert auf einer vollständigen Zustandsrückführung. Es sind jedoch nicht alle Zustände durch Messungen verfügbar. Zur Schätzung der Zustände wird daher ein zeitdiskretes Kalman-Filter verwendet. Ein Kalman-Filter ist von der Struktur her ein Luenberger-Beobachter (siehe [Sim06]), also ein modellbasierter Schätzer. Das dem Filter zugrundeliegende Modell ist das in Abschnitt 3.3 beschriebene Modell der Spurführung ohne Absolutlage. Die Absolutlage wird direkt aus Messungen und den gespeicherten Gleislagefehlern bestimmt (siehe auch Bild 4-2). Bei einem Kalman-Filter wird von einem stochastisch angeregten System und stochastisch gestörten Messungen ausgegangen (bei einem zeitdiskreten Kalman-Filter gelten analog die diskretisierten Gleichungen):

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} \\ \mathbf{y}_{mess} &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{v} \\ \mathbf{v} &\sim \mathcal{N}(0, \mathbf{V}), \quad \mathbf{w} \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{W})\end{aligned}\tag{6-54}$$

Der geschätzte Zustand $\hat{\mathbf{x}}$ wird aus der DGL des Systems erweitert um einen Korrekturterm berechnet. Der Korrekturterm wird mithilfe des Schätzfehlers \mathbf{e} berechnet:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{L} \cdot \mathbf{l} \\ \mathbf{l} &= \mathbf{y}_{mess} - \mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{e} + \mathbf{v} \\ \mathbf{e} &= \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\end{aligned}\tag{6-55}$$

Die Beobachterrückführung \mathbf{L} wird dual zum Riccati-Regler so ausgelegt, dass der erwartete Schätzfehler minimal wird. Im Gegensatz zum Riccati-Regler ist die Gewichtung der Schätzfehler nicht frei wählbar. Ausgehend von der Forderung, die Summe der quadratischen Schätzfehler zu minimieren, ergibt sich die Gewichtung aus den Kovarianzen des System- und Messrauschens. Es gibt zwar Methoden, die Rückführung ohne explizite Identifikation der Kovarianzen zur Laufzeit zu berechnen (siehe z. B. [Meh70]), der Einfachheit halber wird jedoch mit den in Abschnitt 3.3 identifizierten Werten gearbeitet.

Das Filter wird für ein quasi-stationäres System (Dynamik und Kovarianzen ändern sich nicht) ausgelegt. Die Rückführung \mathbf{L} ist dann konstant. Zur Berücksichtigung der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Dynamikmatrix werden die diskretisierten Systemmatrizen und die passende Rückführung offline berechnet und in einem Kennfeld mit 8 Stützstellen abgelegt. Zur Laufzeit werden die Matrizen bei jeder Änderung linear aus dem Kennfeld interpoliert. Die Filtergleichungen werden damit dann wie für ein konstantes System berechnet.

Da bei der Herleitung des PaCo-Algorithmus von einem Modell mit bekannten Zuständen ausgegangen wird (Gleichung (6-1)), muss die Auswirkung einer Regelung mit geschätzten Zuständen überprüft werden. Aus [BH75] ist bekannt, dass

sich die Kovarianz der tatsächlichen Zustände aus der Kovarianz der geschätzten Zustände $\hat{\mathbf{X}}$ und der Schätzfehlerkovarianz \mathbf{K} zusammensetzt (alle Matrizen in den folgenden Gleichungen können zeitabhängig sein):

$$\mathbf{X} = \hat{\mathbf{X}} + \mathbf{K} \quad (6-56)$$

$$\dot{\mathbf{K}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{K} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{A}^T - \mathbf{L} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{L}^T + \mathbf{W}$$

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}} = \mathbf{A}_R \cdot \hat{\mathbf{X}} + \hat{\mathbf{X}} \cdot \mathbf{A}_R^T + \mathbf{L} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{L}^T$$

Wird davon ausgegangen, dass die Kovarianz des Messrauschens klein gegenüber der Störkovarianz ist, so ist auch die Schätzfehlerkovarianz klein¹². Die Annahme geringen Messrauschens ist mit Sicherheit für alle Systemgrößen erfüllt, die in die Zielfunktionen einfließen (es wäre nicht sinnvoll, ein Ziel zu definieren, dessen Erfüllung nicht hinreichend genau gemessen werden kann). Wenn also die wichtigsten Zustände gut bekannt sind und da die Stellgrößen ohnehin aus dem geschätzten Zustand berechnet werden, liegt es nahe, die Schätzfehlerkovarianz in Gleichung (6-56) zu vernachlässigen. Dann kann die Systemgleichung (6-1), die der Herleitung des PaCo-Algorithmus zugrunde liegt, durch die Gleichung (6-55) der geschätzten Zustände ersetzt werden. Der einzige Unterschied besteht dann darin, dass das Systemrauschen \mathbf{w} durch $\mathbf{L} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{C} \cdot \mathbf{e})$ ersetzt wird (\mathbf{W} wird dann gegen $\mathbf{L} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{L}^T \approx \mathbf{W}$ ersetzt)¹³. Alle anderen Gleichungen des PaCo-Algorithmus gelten ohne Änderungen.

6.5.2 Wahl der Ziele

Das Vorgehen bei der Wahl des Pareto-Punktes für den PaCo-Regler der Spurführung lässt sich wie folgt in Worten formulieren: *Minimiere die Lenkleistung, aber nur soweit, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Spurkranzanläufe auftreten.* Ein ähnliches Ziel wird auch in [CM04] oder [CKN09] verfolgt: den Regler so einzustellen, dass die Grenzen des Prozesses möglichst gut ausgenutzt werden. In beiden Quellen wird die Störung jedoch als bekannter stationärer Prozess angenommen. Natürlich ließen sich noch komplexere Regeln definieren, wie sie in Abschnitt 2.4.5 besprochen werden, oder es könnte eine Aushandlung der Spur-

¹² $\mathbf{L} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{L}^T$ strebt gegen den Wert der Störkovarianz \mathbf{W} , da die Rückführung \mathbf{L} beim Kalman-Filter invers von der Kovarianz des Messrauschens abhängt und proportional von der Kovarianz des Schätzfehlers \mathbf{K} ($\mathbf{L} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{V}^{-1}$), welche bei kleinem \mathbf{V} ebenfalls klein wird.

¹³ $E \left\{ \mathbf{L} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{C} \cdot \mathbf{e}) \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{C} \cdot \mathbf{e})^T \cdot \mathbf{L}^T \right\} = \mathbf{L} \mathbf{V} \mathbf{L}^T + \mathbf{L} \mathbf{C} \mathbf{K} \mathbf{C}^T \mathbf{L}^T - E \left\{ \mathbf{L} \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{L}^T \right\} - E \left\{ \mathbf{L} \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{L}^T \right\}^T$, wobei $\mathbf{L} \mathbf{C} \mathbf{K} \mathbf{C}^T \mathbf{L}^T \approx 0$ und $E \left\{ \mathbf{L} \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{L}^T \right\} = 0$ sind.

kranzanlaufrate mit dem Energie-Management stattfinden. Für die Demonstration des PaCo-Algorithmus und die praktischen Belange der Spurführung ist diese einfache Formulierung jedoch ausreichend. Alles andere würde die Verständlichkeit der Wirkungsweise erschweren.

Aus dieser generellen Zielformulierung müssen zunächst die einzelnen Ziele für den Mehrziel-Riccati-Regler abgeleitet werden. Diese müssen nach Gleichung (6-8) als Quadrat der 2-Norm¹⁴ ($\|\cdot\|_2^2$) bzw. als Varianz eines Systemausgangs formuliert werden. Dies scheint zunächst eine große Einschränkung zu sein, da ja sehr viele andere Funktionsnormen existieren, die evtl. besser zur Problemstellung passen. Die Lenkleistung beispielsweise müsste definitionsgemäß mit der 1-Norm berechnet werden. Andere Normen kommen jedoch nicht in Frage, da $\|\cdot\|_2^2$ die Einzige ist, die durch lineare Regler minimiert werden kann¹⁵. Die Minimierung der 1-Norm beispielsweise führt nach [VM06] zu einem schaltenden Regler. Andererseits können, analog zum Vorgehen bei der *Differentiellen Dynamischen Programmierung*, alle zweifach differenzierbaren Normen entlang einer lokalen Trajektorie durch $\|\cdot\|_2^2$ approximiert werden. Dazu muss dann der Wert von $\|\cdot\|_2^2$ in der nichtlinearen Skalarisierungsfunktion entsprechend bewertet werden. Da gerade die beiden sehr interessanten Normen $\|\cdot\|_1$ und $\|\cdot\|_\infty$ nicht zweifach differenzierbar sind, muss hier ein anderer Ansatz gewählt werden.

Die 1-Norm ist der Betragsmittelwert. Für eine normalverteilte stochastische Variable X gilt daher:

$$\|X\|_1 = E\{|X|\} = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma_X \quad (6-57)$$

$$X \sim \mathcal{N}(0, \sigma_X^2)$$

Dieses Ergebnis ergibt sich aus dem vollständigen Integral des Betrags über die Leistungsdichtefunktion der Normalverteilung. Wird nun der Wert der Zielfunktion als Varianz σ^2 verstanden, so ist der folgende Ausdruck ein Ersatz für die 1-Norm des i -ten Zielfunktionsausgangs:

$$\|z_i\|_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{J_i} \quad (6-58)$$

¹⁴ Alle p -Normen werden hier nach [KJ08] als Norm von Leistungssignalen verstanden, also als Zeitmittelwert: $\lim_{T \rightarrow \infty} (\frac{1}{T} \int_0^\infty |s(t)|^p dt)^{\frac{1}{p}}$.

¹⁵ Obwohl der Name zunächst anderes vermuten lässt, sind auch die bekannten H_∞ -Regler auf $\|\cdot\|_2^2$ zurückzuführen. Die H_∞ -Reglerauslegung kann als Minimierung der Störverstärkung $\gamma^2 \geq \frac{\int_0^\infty \mathbf{z}^T \cdot \mathbf{z} dt}{\int_0^\infty \mathbf{d}^T \cdot \mathbf{d} dt}$ aufgefasst werden, wobei \mathbf{d} eine beliebige, energiebegrenzte, nicht stochastische Störung ist (siehe [GLX⁺07]). Derart formuliert lässt sich das H_∞ -Problem durch eine Folge von Riccati-Gleichungen mit speziellen Gewichtungsmatrizen lösen (vgl. [BH89]).

Diese „Umdeutung“, die in der Skalarisierungsfunktion vorgenommen werden muss, ändert zwar nichts an dem Ergebnis des Riccati-Reglers, in der Skalarisierung wird dieses Ziel jedoch anders bewertet. Ein Beispiel für diese Vorgehensweise ist die Lenkleistung, die im nächsten Abschnitt aus den beiden Lenkwinkeländerungsraten berechnet wird.

Die ∞ -Norm ist der maximale Betragswert des Signals. Dieser ist bei normalverteilten Signalen jedoch stets unendlich. Daher muss entsprechend der Diskussion in Abschnitt 4.3 mit einem probabilistischen Maximum gerechnet werden.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, dass zum Teil für ein Ziel zunächst mehrere Riccati-Gütemaße definiert werden müssen. So auch im vorliegenden Fall der Lenkleistung und der Spurkranzanlaufrate: Sie müssen getrennt für jede Achse definiert werden. Die Lenkleistung an der Vorder- und an der Hinterachse wird, wie in Abschnitt 4.3 besprochen, aus den Lenkwinkeländerungsraten ($\dot{\delta}_{Rv}$ und $\dot{\delta}_{Rh}$), also aus den Stellwerten berechnet. Die Spurkranzanlaufrate wird aus den relativen Achslagen ($y_{Rv,rel}$ und $y_{Rh,rel}$), also aus den Absolutlagen minus den Gleislagefehlern berechnet (vgl. Bild 3-4). Damit werden die folgenden vier Einzelziele definiert:

1. Achsabweichung vorn:

$$J_{y_{Rv,rel}} = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T y_{Rv,rel}(t)^2 dt \right\} = \sigma (y_{Rv,rel}(t))^2$$

2. Achsabweichung hinten:

$$J_{y_{Rh,rel}} = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T y_{Rh,rel}(t)^2 dt \right\} = \sigma (y_{Rh,rel}(t))^2$$

3. Lenkwinkeländerungsrate vorn:

$$J_{u,v} = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \dot{\delta}_{Rv}(t)^2 dt \right\} = \sigma (\dot{\delta}_{Rv}^2)$$

4. Lenkwinkeländerungsrate hinten:

$$J_{u,h} = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \dot{\delta}_{Rh}(t)^2 dt \right\} = \sigma (\dot{\delta}_{Rh}^2)$$

6.5.3 Wahl des Pareto-Punktes

Die mathematische Interpretation der Zielformulierung „Minimiere ... aber nur soweit, [dass eine Begrenzung eingehalten wird]“ führt zu einer ε -Constraint Skalarisierung mit dem Ziel, die Lenkleistung zu minimieren. Die Lenkleistung ist die Summe der Leistung an der Vorder- und Hinterachse. Die Leistung an den Achsen wird nach der Diskussion im vorigen Abschnitt und in Abschnitt 4.3 proportional zur Wurzel der Riccati-Zielfunktionen definiert:

$$J_{P,hyd} = c_{P,hyd} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \left(\sqrt{J_{u,v}} + \sqrt{J_{u,h}} \right) \quad (6-59)$$

Dabei ist $c_{P,hyd}$ der hydraulische Leistungsfaktor aus Gleichung (4-8). Bei der Optimierung ist es wichtig, dass das Argument der Quadratwurzel nicht negativ

werden darf. Dies ist zwar in der Realität nicht möglich, kann durch die Approximation der Pareto-Front während der Optimierung jedoch eintreten. Daher wird nach [CM96] die differenzierbare Plus-Funktion p_ϵ definiert, die sich für große Werte dem Argument annähert und für kleine Werte gegen null strebt. Das Übergangsverhalten kann durch den Parameter ϵ bestimmt werden:

$$p_\epsilon(x) = \frac{1}{2} \left(x + \sqrt{x^2 + \epsilon} \right) \quad (6-60)$$

Die mathematisch sichere Form der Leistungs-Zielfunktion lautet dann:

$$J_{P,hyd} = c_{P,hyd} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \left(\sqrt{p_\epsilon(J_{u,v})} + \sqrt{p_\epsilon(J_{u,h})} \right) \quad (6-61)$$

Der Einfluss der Wurzel in der Definition der Leistung kann anhand der Höhenlinien in Bild 6-3 beschrieben werden. Auf den Konturlinien hat die Skalarisierungsfunktion einen konstanten Wert. Pareto-Punkte auf der gleichen Höhenlinie werden also gleich bewertet. Das Konturlinien-Diagramm einer Skalarisierungsfunktion ist also ein Hilfsmittel zum Verständnis des „Auswahlverhaltens“ der Funktion.

Die Konturlinien von $J_{P,hyd}$ zeigen, dass diese Funktion nicht konvex ist und damit nicht immer ein eindeutiges Minimum existiert. Ob ein eindeutiges Minimum existiert oder nicht, hängt von der Krümmung der Pareto-Front ab. In Bild 6-3 sind drei in Simulationen aufgetretene Pareto-Fronten dargestellt, für die ein Minimum existiert. Es ist zu erkennen, wie die Skalarisierungsfunktion dazu tendiert, Pareto-Punkte zu wählen, bei denen der Wert der Zielfunktion der Hinterachse sehr viel kleiner ist als der der Vorderachse. Dies ist damit zu erklären, dass die Wurzel in der Zielfunktion die Wirkung des Quadrats in den einzelnen Zielfunktionen aufhebt: Bei quadratischen Zielfunktionen werden große Werte überproportional und kleine Werte unterproportional bewertet. Angestrebt wird aber ein linearer Zusammenhang zwischen Zielfunktionswert und Bewertung (Betragsfunktion). Daher muss die Wurzel kleine Werte überproportional bewerten, also noch kleiner machen.

Die Minimierung der Lenkleistung ist der Beschränkung unterworfen, dass die Trajektorie der Achse im Spurkanal verläuft. Dabei werden die Zielfunktionswerte $J_{y_{Rv,rel}}$, $J_{y_{Rh,rel}}$ als Varianz σ^2 verstanden, und entsprechend Gleichung (4-6) wird gefordert, dass diese Varianz kleiner als ein bestimmter Wert bleibt. Hier muss nicht mit der Standardabweichung gerechnet werden (was die Radizierung der Zielfunktion erfordern würde), da (4-6) auf beiden Seiten quadriert werden kann:

$$J_{SKA,v/h} = \frac{J_{y_{R,rel},v/h}}{(G/2)^2} - \frac{1}{\Phi^{-1} \left(1 - \frac{SAR_{soll}}{2} \right)^2} \leq 0 \quad (6-62)$$

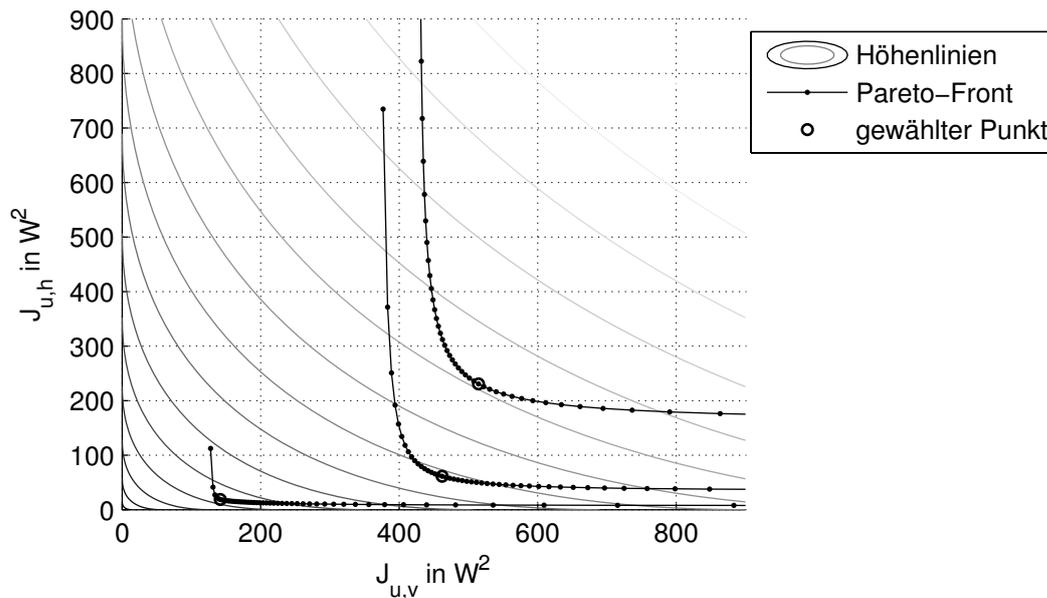


Bild 6-3: Konturlinien der Skalarisierungsfunktion für die Lenkleistungen der Vorder- und Hinterachse

Aufgrund der oft abrupten Sprünge in der Amplitude der Gleislagefehler wird nicht auf das volle Spurspiel begrenzt, sondern mit einem Sicherheitsabstand gerechnet. Die Trajektorie soll in einem Kanal $\pm 2\text{ mm}$ um die Mittellinie liegen: $G/2 = 2\text{ mm}$. In diesem Kanal soll sich die Trajektorie mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9973 % aufhalten: $\Phi^{-1}\left(1 - \frac{SAR_{soll}}{2}\right) = 3$.

Aus Gründen der Recheneffizienz soll die Beschränkung nicht als explizite Nebenbedingung bei der Minimierung der Skalarisierungsfunktion auftreten. Stattdessen wird ein Ansatz nach [Ber96] verfolgt, der die Erweiterung der Zielfunktion mit einem Strafterm vorsieht. Dabei wird die Überschreitung des Grenzwerts stark gewichtet (bestraft). Die Verletzung der Spurkanal-Bedingung kann mit der Plus-Funktion wie folgt definiert werden:

$$J_{Spur} = p_{\epsilon} (J_{SKA,v}) + p_{\epsilon} (J_{SKA,h}) \quad (6-63)$$

Diese ist (fast) null, solange die Trajektorie erlaubt ist, und steigt linear mit der Verletzung der Bedingung. Um die Verletzung effektiv zu unterdrücken, wird sie der eigentlichen Zielfunktion mit einer hohen Gewichtung w_{Spur} angehängt:

$$J_{skalar} = J_{P,hyd} + w_{Spur} \cdot J_{Spur} \quad (6-64)$$

Je größer die Gewichtung des Strafterms ist, desto geringer fällt die Verletzung der Nebenbedingung aus. Eine zu große Wahl führt jedoch zu einem zunehmend schlechter konditionierten Optimierungsproblem (vgl. [JS03]). Praktische Versuche ergeben einen guten Kompromiss mit $w_{Spur} = 50$. In allen Plus-Funktionen wird $\epsilon = 1 \times 10^{-4}$ gewählt. Auch hier gilt es, einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Konditionierung zu finden.

Einen Eindruck von der Wirkung des Strafterms vermitteln die Konturlinien der Skalarisierungsfunktion in Bild 6-4. Der enge Verlauf der Höhenlinien ab dem Grenzwert zeigt, dass ab dort hauptsächlich die Abweichung der Achslage minimiert wird.

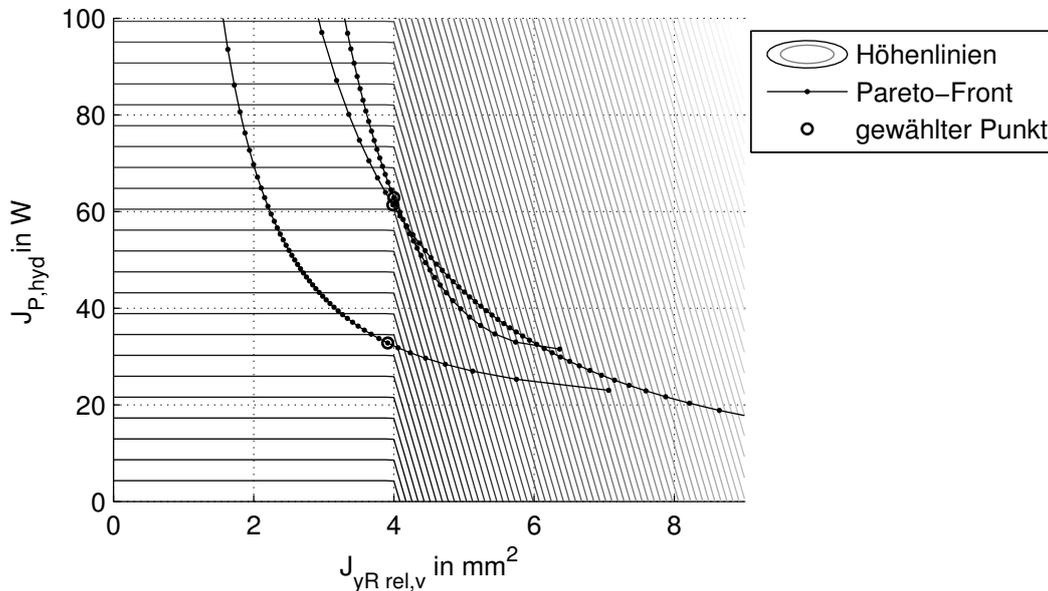


Bild 6-4: Konturlinien der Skalarisierungsfunktion für Lenkleistung und relative Achslage

Bei der Optimierung müssen weiterhin die Bedingungen für die Gewichtung eingehalten werden:

$$\begin{aligned} \alpha_i &> \alpha_{min} \\ \sum \alpha_i &= 1 \end{aligned} \tag{6-65}$$

Die letzte Bedingung wird erfüllt, indem nur $(k - 1)$ Gewichte als Optimierungsvariablen betrachtet werden. Die Ungleichungsbedingungen werden mithilfe der Methode der erweiterten Lagrange-Funktion nach [Ber76] erfüllt. Der Wahl von α_{min} liegt die Überlegung zugrunde, dass das Verhältnis der Gewichtungen dem Kompromiss-Verhältnis (siehe Abschnitt 2.4.5) entspricht. Bei gut skalierten Zielfunktionen ist ein Kompromiss-Verhältnis jenseits von 50 sicher nicht mehr sinnvoll (eine Verbesserung in einem Zielfunktionswert um eine Einheit durch die Verschlechterung eines anderen um 50 Einheiten zu „erkaufen“ ist in den meisten Situationen unverhältnismäßig). Wird von dem Extremfall ausgegangen, dass ein Gewicht groß ist und alle anderen minimal, so ergibt sich für ein Kompromiss-Verhältnis $\partial\alpha_{max}$ die folgende Beziehung: $\alpha_{min} = \frac{1}{\partial\alpha_{max} + k - 1}$. Natürlich könnte auch $\alpha_{min} = 0$ gewählt und die einzelnen Kompromiss-Verhältnisse explizit durch weitere Nebenbedingungen formuliert werden. Da die Rechenzeit für die Optimierung

jedoch stark mit Anzahl der Nebenbedingungen steigt, wird die einfache Variante mit $\alpha_{min} > 0$ verwendet.

6.6 Ergebnisse und Validierung

Die Funktion des vorgestellten PaCo-Reglers wird zunächst an einem einfachen Beispiel verdeutlicht und validiert. Danach folgt die Präsentation der Ergebnisse für die Spurführungsregelung.

6.6.1 PaCo-Regelung für ein einfaches Beispiel

Als anschauliches Beispiel wird das einfache Modell eines doppelten Integrators gewählt, der beispielsweise die eindimensionale Lagerregelung eines Massepunktes darstellen könnte:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6-66)$$

Die beiden Zielfunktionen ergeben sich nach Gleichung (6-8) aus den Ausgängen z_1 (Lagezustand) und z_2 (Stellkraft):

$$\begin{aligned} z_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}, \\ z_2 &= \begin{bmatrix} 2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u} \end{aligned} \quad (6-67)$$

Für das Tiefpassfilter zur Approximation des Erwartungswertes wird die Zeitkonstante $T_{TP,J} = 20$ s gewählt. Als Skalarisierung wird eine ∞ -Norm gewählt, die so gewichtet ist, dass für die ersten 200 s die Bedingung $J_2 = 4 J_1$ vorgegeben wird. Danach wird die Vorgabe geändert und es wird $J_2 = J_1$ gefordert. Das System wird die ersten 100 s von einer Störung mit der Kovarianz W_1 angeregt. Danach wird eine Störung mit der Kovarianz W_2 aufgeschaltet.

$$\mathbf{W}_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 3 \end{bmatrix}, \mathbf{W}_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 \\ 1 & 9 \end{bmatrix} \quad (6-68)$$

Insgesamt werden 300 s simuliert. Nach 100 s ändert sich die Störung (Umwelteinfluss) und es wird demonstriert, wie der PaCo-Algorithmus darauf reagiert und für die Einhaltung der Vorgabe sorgt. Nach 200 s ändert sich die Vorgabe, womit demonstriert wird, dass der Algorithmus auch zur Umsetzung von variablen Benutzeranforderungen eingesetzt werden kann.

In Bild 6-5 ist der Verlauf des Pareto-Punktes in der Bildebene (Zielfunktionsraum) dargestellt. Zur Orientierung sind auch die Pareto-Fronten gezeichnet, die im stationären Fall mit den Störungen W_1 und W_2 erreicht werden können. Die

beiden Geraden, die die vorgegebenen Gleichungsbedingungen beschreiben, sind ebenfalls dargestellt. Idealerweise sollte sich die Trajektorie des Zielfunktionsvektors jeweils im Schnittpunkt von Vorgabe und Pareto-Front aufhalten: startend unten links auf der Pareto-Front von W_1 (Phase 1), dann entlang der Vorgabe $J_2 = 4 J_1$ wandernd, in den Schnittpunkt mit der Pareto-Front von W_2 (Phase 2), um schließlich auf die Vorgabe $J_2 = J_1$ zu wechseln (Phase 3).

Es ist gut zu erkennen, wie das System nach den Änderungen bei 100 s und 200 s auf den gewünschten Pareto-Punkt eingeregelt wird. Bei der Vorgabe $J_2 = J_1$ weicht der Pareto-Punkt allerdings stärker von der vorhergesagten Lage auf der Pareto-Front von W_2 ab. Dies ist auf eine zu kleine Zeitkonstante der Erwartungswertbildung zurückzuführen. Das stärker minimierte Energiekriterium J_2 führt zu langsameren Systemeigenwerten, sodass die kurzzeitig gemittelten Zielfunktionswerte größeren Schwankungen unterliegen.

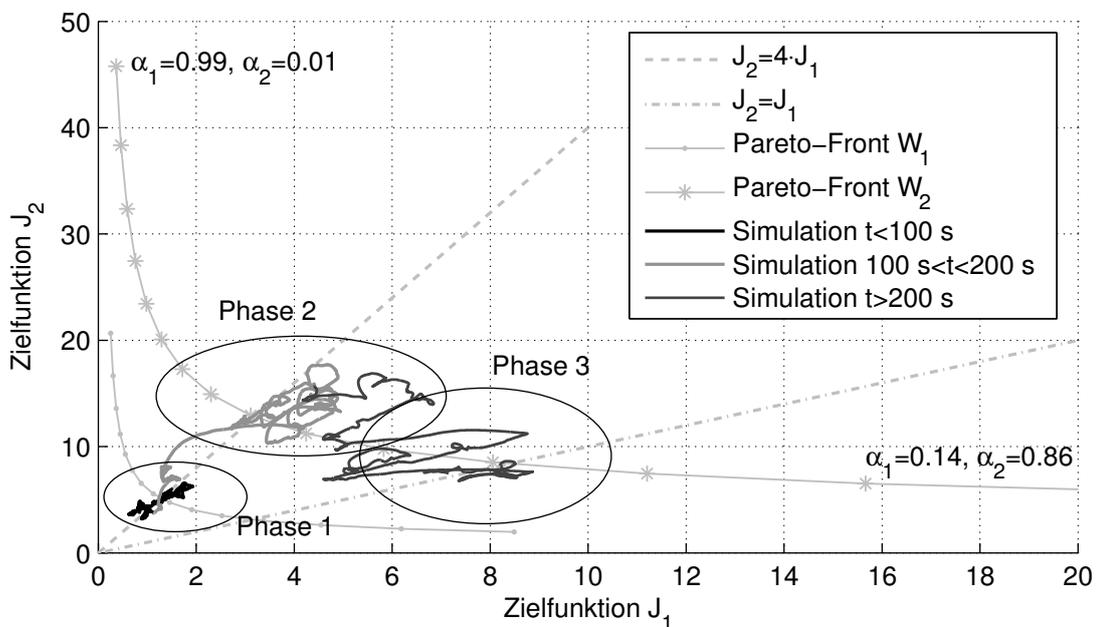


Bild 6-5: Verlauf des regulierten Pareto-Punktes im Bildbereich während der drei unterschiedlichen Phasen

In Bild 6-6 sind der Zeitverlauf der Zielfunktionswerte und ihr Quotient dargestellt. Auch hier ist die gute Einregelung der Vorgabe zu erkennen, aber auch die starken Schwankungen der Zielfunktionswerte. Es ist besonders zu beachten, dass die gewählte Skalarisierung die Schwankung der Zielfunktionswerte unter dem Einfluss der Störung zulässt, ihren Quotienten jedoch auf einen vorgegebenen Wert einstellt. Der Verlauf der vom PaCo-Algorithmus bestimmten Gewichtung entspricht sehr gut den Werten, die im stationären Fall nötig wären, um die entsprechenden Vorgaben einzuhalten.

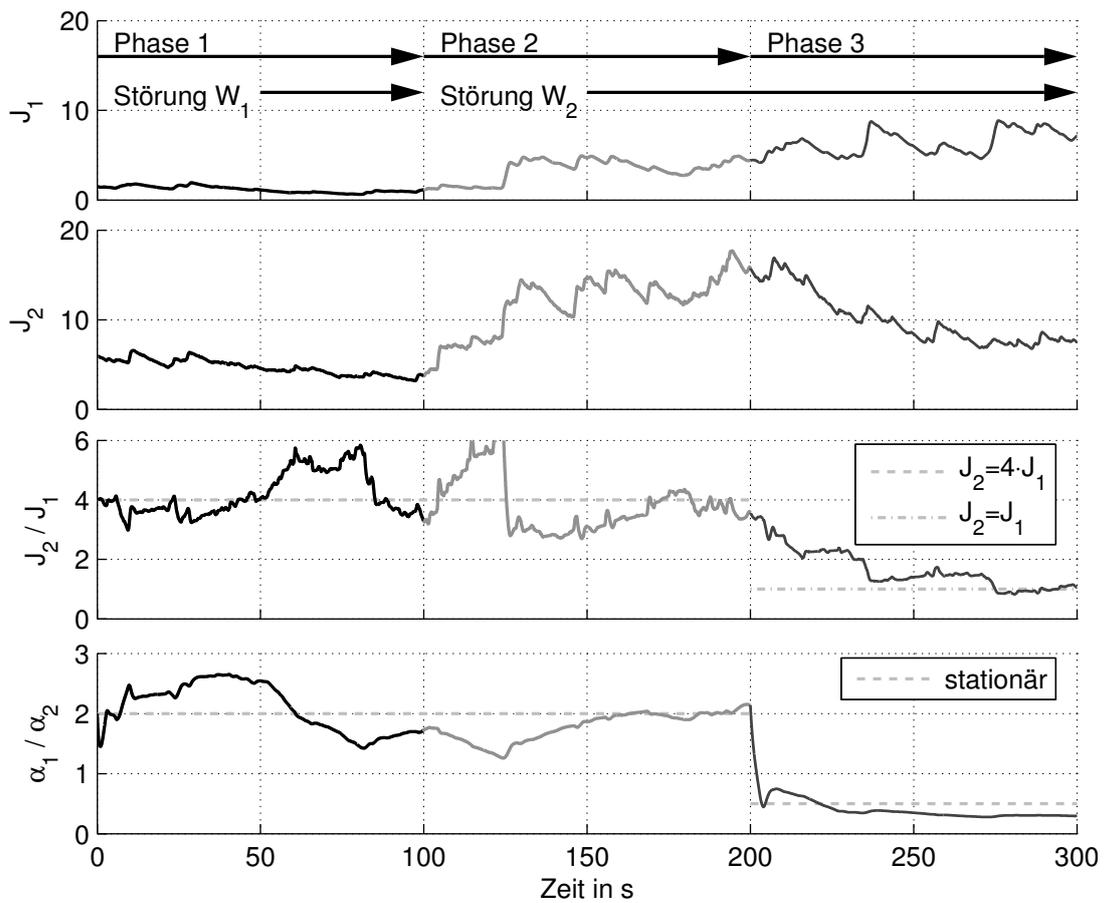


Bild 6-6: Zeitverlauf der Zielfunktionswerte, ihres Quotienten und des Quotienten der Gewichte

6.6.2 Funktion der selbstoptimierenden Spurführung mit PaCo-Regler

Zur Demonstration der mit dem PaCo-Algorithmus umgesetzten selbstoptimierenden Spurführung werden die Ergebnisse von Testfahrten mit verschiedenen (jeweils konstanten) Geschwindigkeiten und verschiedenen Vorgaben vorgestellt. Ferner wird demonstriert, wie die vorgestellte Reglerstruktur zur Folgeregelung in der Lage ist, sowohl bei bekannten als auch bei unbekanntem Gleislagefehler zu arbeiten. Bei unbekanntem Gleislagefehler wird einfach ein gerader Verlauf (gespeicherte Gleislagefehler gleich null) vorgegeben, sodass der Regler aus Abschnitt 6.4 effektiv wie der Störregler aus Abschnitt 6.3 arbeitet. Der überlagerte PaCo-Regelkreis bleibt von dieser Änderung unbeeinflusst. Das Fehlen der Information über die Gleislagefehler stellt sich hier lediglich als veränderter Umfeldeinfluss dar, der über die approximierten Zielfunktionswerte und die Zustandskovarianz Eingang in die Anpassung der Gewichte findet.

In den folgenden Bildern ist der Ausschnitt der Westkurve (W-S), der Südgeraden (S-SO) und der Ostkurve (SO-NO) aus den Ovalfahrten gezeigt. Im oberen Graphen ist die Rauheit der Gleislagefehler, dargestellt. Die Rauheit ist definiert als der quadratische Mittelwert (RMS) der Krümmung, also die zweite Ableitung der Lagefehler nach der Streckenposition. Die Rauheit dient als Referenz zur Beurteilung der Anforderung an die Spurführung: Raue Abschnitte erfordern stärkere Lenkeingriffe.

In Bild 6-7 und Bild 6-8 sind zwei Fahrten jeweils mit 5 m s^{-1} , einmal mit und einmal ohne Kenntnis der Gleislagefehler dargestellt. Bei beiden ist die Selbstoptimierung aktiv. Bei diesen Bildern ist im zweiten Graphen die Abweichung der tatsächlich gefahrenen Trajektorie der Vorder- und der Hinterachse von der Gleismittellinie zu sehen. Ebenfalls ist die Begrenzung durch das Spurspiel eingezeichnet, sowie gestrichelt die dreifache laufende Standardabweichung (Tiefpassfilter mit $T_0 = 5 \text{ s}$) oben für die Vorderachse und unten für die Hinterachse. Dieser Wert ist das Maß für die Spurrücklaufzeit, die durch die Regelung auf eine bestimmte Vorgabe begrenzt werden soll.

Im dritten Graphen sind die gesamte Lenkleistung und die der beiden Achsen aufgetragen. Im untersten Graphen ist der Verlauf der vier Gewichtungen dargestellt. Die Summe der Gewichtungen ist auf eins normiert. Die Kurven sind übereinandergestapelt, die einzelnen Gewichtungswerte entsprechen der vertikalen Ausdehnung der eingefärbten Flächen.

Es ist zu erkennen, wie der PaCo-Regler in der Lage ist, die Vorgabe von 2 mm Abweichung von der Mittellinie in beiden Fällen gut einzuhalten. Dazu wird bei Kenntnis der Gleislagefehler jedoch viel weniger Lenkleistung benötigt, da die Vorsteuerung eine vorausschauende Reaktion ermöglicht. Es ist zu sehen, wie die Vorgabe dadurch eingehalten wird, dass die Gewichtung für die Abweichung von der Mittellinie ($\alpha_{y,v/h}$) bei fehlender Kenntnis der Gleislagefehler und in Bereichen

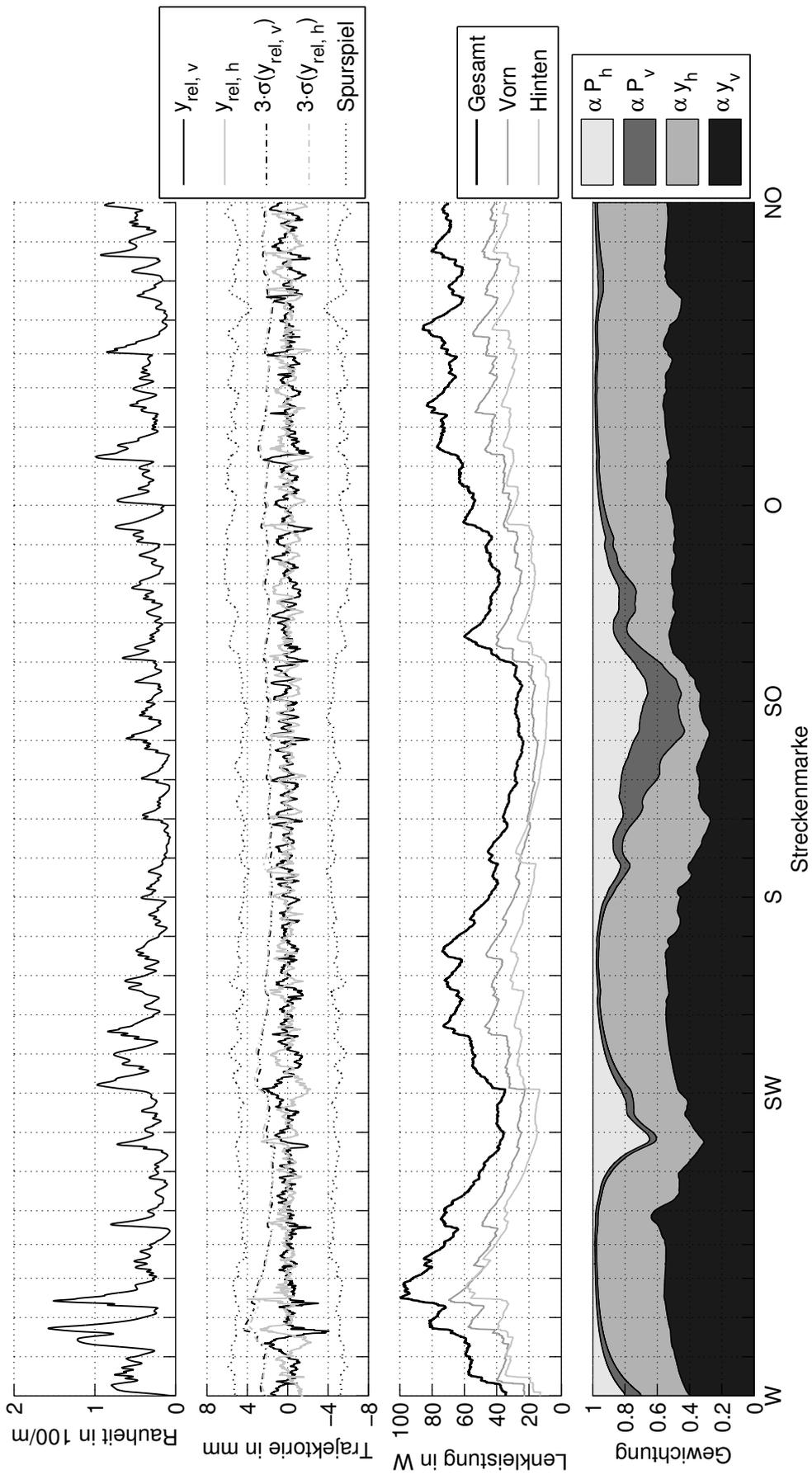


Bild 6-7: Testfahrt mit unbekanntem Gleislagefehlern bei 5 m s^{-1} und einer Vorgabe von 2 mm Abweichung

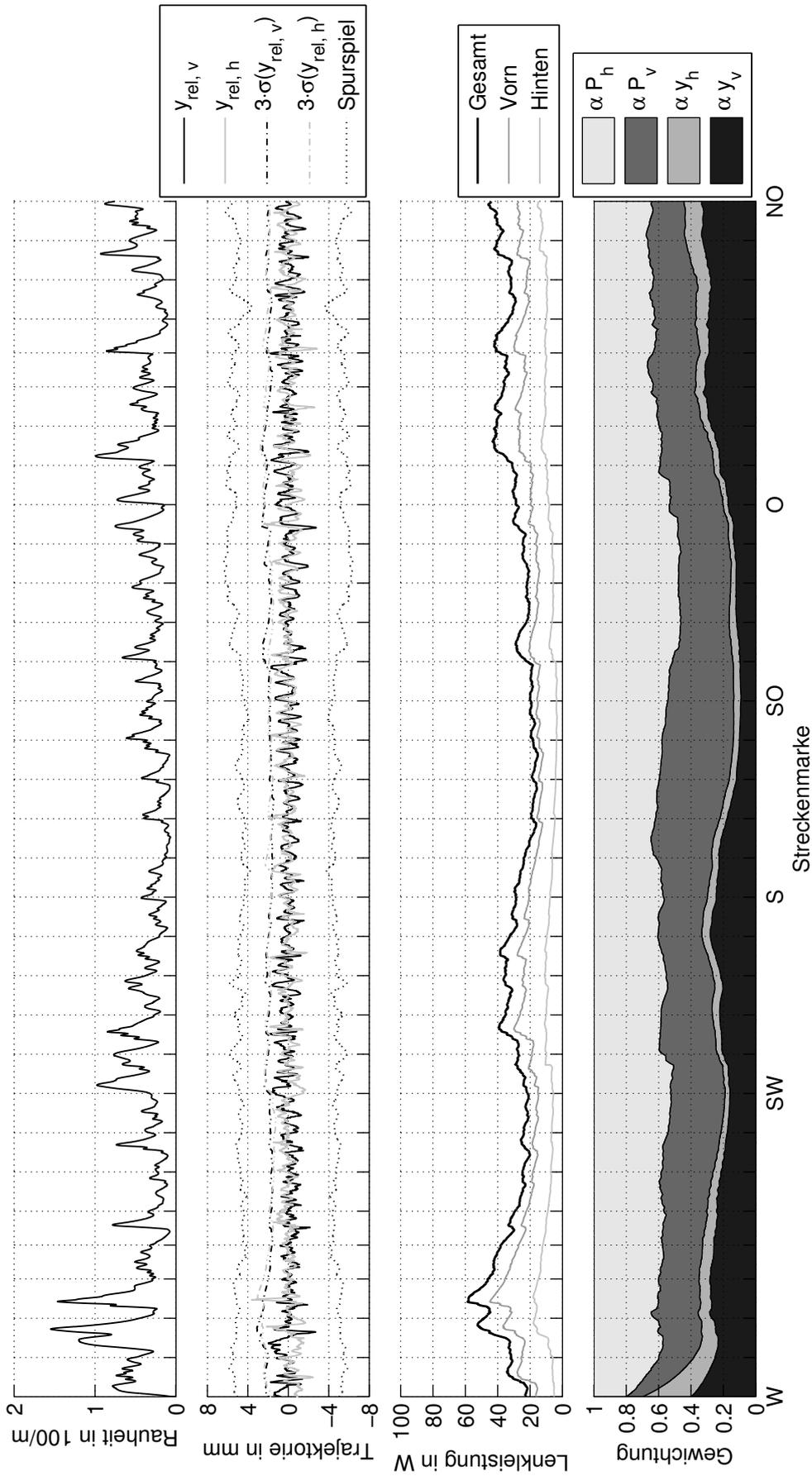


Bild 6-8: Testfahrt mit bekannten Gleislagefehlern 5 m s^{-1} und einer Vorgabe von 2 mm Abweichung

großer Rauigkeit angehoben wird. Ebenfalls wird deutlich, dass die Gewichtung für die Vorderachse meist größer ist als die für die Hinterachse. Das ist damit zu erklären, dass die Vorderachse instabil ist und die Hinterachse ihr stabil folgt.

6.6.3 Validierung der Funktion durch Vergleich mit fester Gewichtung

In den folgenden drei Vergleichsbildern ist im zweiten und dritten Graphen die bereits bei den Einzelfahrten dargestellte dreifache laufende Standardabweichung der Achsabweichung aufgetragen. Ebenfalls ist gestrichelt das halbe Spurspiel eingezeichnet, sowie mit Strichpunkten die vorgegebene Begrenzung für die dreifache Standardabweichung. Im unteren Graphen ist die Lenkleistung aufgetragen, wie sie bei den Einzeldarstellungen im dritten Graphen gezeigt ist.

In Bild 6-9 werden die Funktion und der Mehrwert der Selbstoptimierung validiert. Dazu werden die beiden Fahrten mit selbstoptimierender Gewichtungsanpassung aus Bild 6-7 und Bild 6-8 und zwei Fahrten mit fester Zielgewichtung miteinander verglichen. Die beiden Fahrten wurden ebenfalls mit 5 m s^{-1} und einmal mit und einmal ohne Kenntnis der Gleislagefehler durchgeführt. Wie bereits beobachtet, ist zu erkennen, dass die beiden selbstoptimierten Fahrten die Vorgabe gut einhalten. Die feste Gewichtung dagegen führt dazu, dass es bei fehlender Kenntnis der Gleislagefehler vermehrt zu Spurkranzanläufen kommt, dafür aber die Lenkleistung gering bleibt. Bei bekannten Gleislagefehlern führt die feste Gewichtung dazu, dass die Abweichung der Achstrajektorien von der Mittellinie in Bereichen großer Gleislagerauheit über der Vorgabe liegt und auf der Südgeraden (S-SO), wo die Gleislagefehler eine geringe Amplitude haben, darunter fällt. Damit ist gezeigt, dass die Anpassung der Zielgewichtung in der Tat die gewünschte Wirkung zeigt.

Zur Validierung gehört auch, zu prüfen, ob die Begrenzung für die Trajektorie der Achsen eingehalten wird. In den Bildern 6-9, 6-10 und 6-11 ist zu erkennen, dass dies nicht immer gelingt. Der Grund dafür ist die Funktionsweise des PaCo-Algorithmus, der von einem stochastisch gestörten System mit relativ langsamer Änderung der Störkovarianz ausgeht. Die Störkovarianz wird jedoch maßgeblich von den Gleislagefehlern beeinflusst, und diese ändern sich oft abrupt. Es ist gut zu erkennen, dass jede Verletzung der Begrenzung von einem plötzlichen Anstieg der Gleislagefehlerrauigkeit hervorgerufen wird. Die Geschwindigkeit, mit der der Regler an diese neue Situation angepasst wird, ist jedoch durch die Funktionsweise des PaCo-Algorithmus begrenzt und wird primär durch die Zeitkonstante $T_{TP,J}$ des Tiefpassfilters zur Approximation der Erwartungswerte bestimmt.

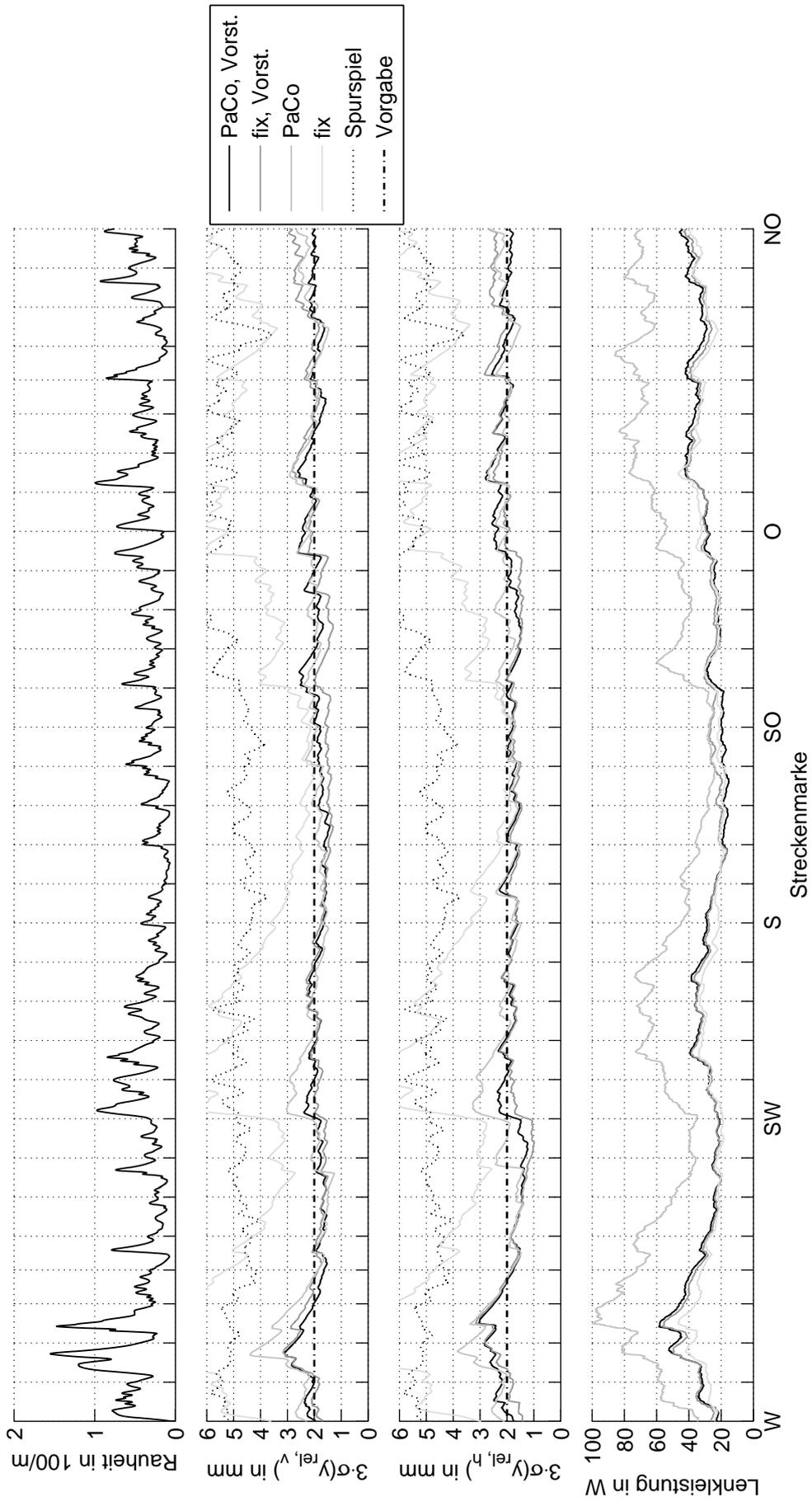


Bild 6-9: Testfahrten mit 5 m s^{-1} mit Selbstoptimierung und mit festen Gewichten bei bekannten und bei unbekanntem Gleislagefehlern

6.6.4 Fahrten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Bild 6-10 ist genauso aufgebaut, wie das Vergleichsbild aus dem vorigen Abschnitt. Hier soll die Wirkung der Fahrtgeschwindigkeit gezeigt werden. Diese kann als Umfeldeinfluss für den Regler aufgefasst werden, da sie die Systemdynamik beeinflusst und die Frequenz vorgibt, mit der die Gleislagefehler das Fahrzeug anregen. Dabei gilt generell, dass höherfrequente Anregungen mehr Leistung zur Kompensation erfordern. Dies ist auch gut im dargestellten Vergleich zu erkennen. Der PaCo-Algorithmus ist also in der Lage, den Regler so anzupassen, dass die vorgegebenen Ziele bei unterschiedlichen Anregungen und veränderlichen Systemparametern erfüllt werden können.

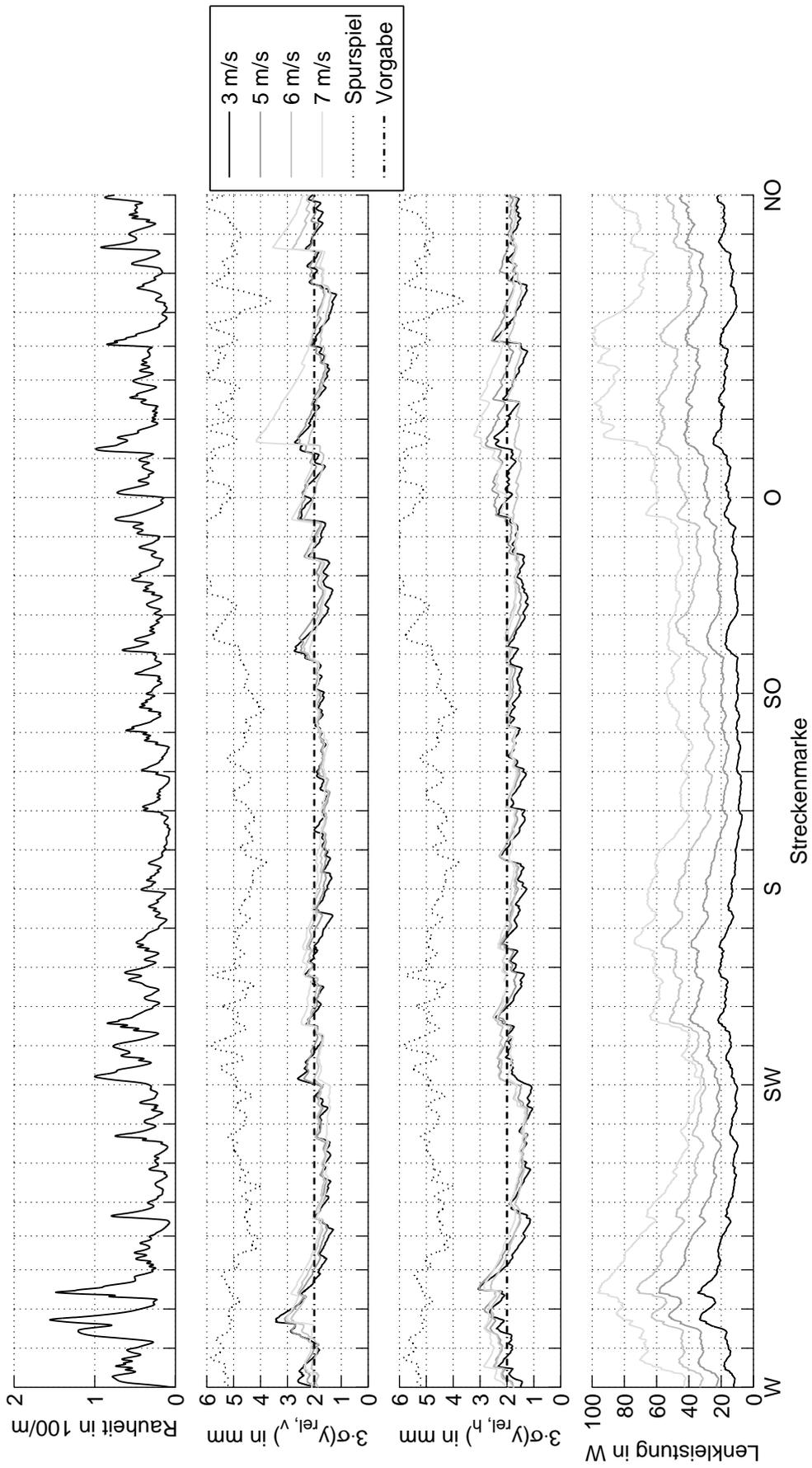


Bild 6-10: Testfahrten mit 3 m s^{-1} , 5 m s^{-1} , 6 m s^{-1} , 7 m s^{-1} und einer Vorgabe von 2 mm Abweichung

6.6.5 Fahrten mit unterschiedlichen Vorgaben

Das letzte Vergleichsbild 6-11 zeigt, dass der PaCo-Regler auch eine flexible Parametrierung der Zielvorgabe ermöglicht: Es wird die bereits in der Einzeldarstellung Bild 6-8 gezeigte Fahrt mit einer Testfahrt verglichen, bei der die Abweichungsvorgabe auf 3 mm erhöht wurde. Es ist zu sehen, wie der Regler die Vorgabe umsetzt und erwartungsgemäß für die „lockerere“ Führung weniger Leistung benötigt. Dabei fällt auf, dass die Einhaltung der Vorgabe einer größeren Schwankung unterliegt. Dies ist, wie auch schon im Beispiel aus Abschnitt 6.6.1, darauf zurückzuführen, dass die „weichere“ Reglereinstellung auch nur langsamer auf Änderungen in der Anregung reagieren kann. Ebenfalls fällt auf, dass die Abweichung der Hinterachse im Bereich der Südgeraden unter die Vorgabe fällt. Dies lässt sich durch die Begrenzung der möglichen Gewichtungsverhältnisse (Kompromiss-Verhältnis) erklären: Die Leistungsreduzierung, die durch eine weitere Anhebung der Abweichung der Hinterachse erzielt werden kann, ist unverhältnismäßig klein. Evtl. ist es sogar unmöglich, die Abweichung der Hinterachse anzuheben, ohne sie aktiv anzuregen, da die Hinterachse ja stabil der Vorderachse folgt.

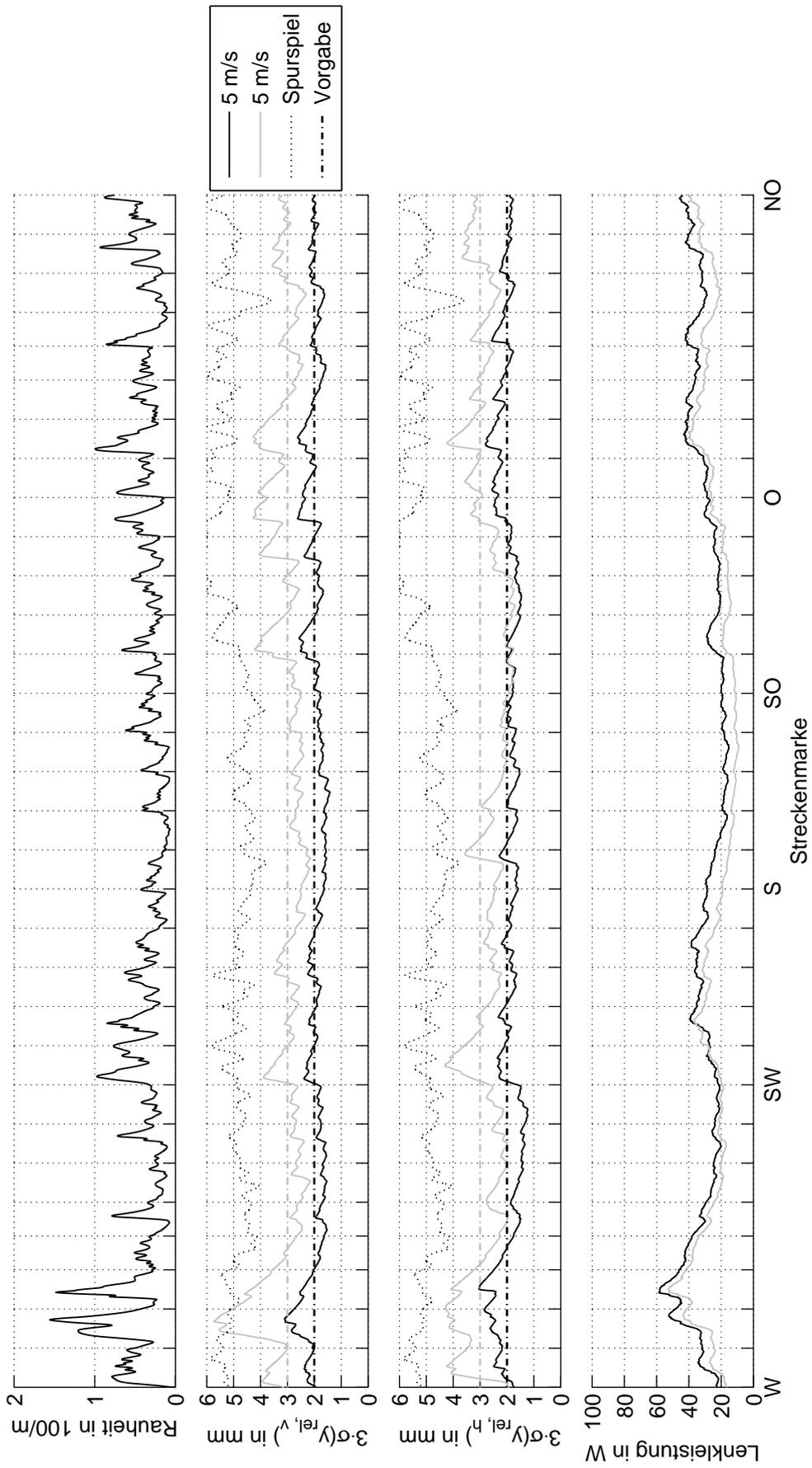


Bild 6-11: Testfahrten mit 5 m s^{-1} und einer Vorgabe von 2 mm bzw. 3 mm Abweichung

7 Ausblick

In den letzten beiden Kapiteln wurden zwei Ansätze zur selbstoptimierenden Spurführungsregelung für das innovative Schienenfahrzeug RailCab vorgestellt. Die erste Methode basiert auf der Generierung von optimalen Trajektorien, die vorgesteuert und mit einem konstanten Regler stabilisiert werden. Bei der zweiten Methode wird die Rückführungsmatrix eines vollständigen Zustandsreglers situationsabhängig optimiert. Bei beiden Methoden werden die Zielfunktionen zunächst mit einer gewichteten Summe skalarisiert. Da die Optimierungsprobleme konvex sind, lässt sich die gesamte Pareto-Front bzw. -Menge über die Gewichtung eindeutig parametrisieren. In einem zweiten Schritt wird die Gewichtung dann so bestimmt, dass eine beliebige Skalarisierungsfunktion optimiert wird. Da diese Skalarisierungsfunktion über die aktuellen Zielfunktionswerte von dem Zustand des Systems abhängt, findet eine situationsabhängige Optimierung, also Selbstoptimierung statt.

Da nach Abschnitt 5.1.2 die Optimierung der Trajektorien mit einem Algorithmus zur nichtlinearen Optimierung erfolgt, wäre es nicht nötig, die Zielfunktionen mit einer gewichteten Summe zu skalarisieren. Statt dessen wäre es möglich gewesen, direkt eine Skalarisierungsfunktion zu formulieren, die die Einhaltung der Anforderungen (Energievorgabe) gewährleistet. Dieser Ansatz wurde nicht verfolgt, um eine Anwendung für das Mehrzieloptimierungsprogramm GAIO zu schaffen.

Der große Nachteil bei der Optimierung der Vorsteuerung ist die fehlende Kontrolle über die Eigenschaften der Regelung, die die Werte der Zielfunktionen mit beeinflusst. Wie bereits in Abschnitt 5.1 diskutiert, ist die gemeinsame Optimierung von Trajektorien und Rückführungsgesetzen zwar möglich, jedoch enorm rechenintensiv (siehe auch [WK06]). Eine spezielle Form der gemeinsamen Optimierung, die darüber hinaus auch Störungen berücksichtigt, ist die *nichtlineare stochastische optimale Regelung*. Ähnlich der MPC wird dabei modellbasiert und unter Berücksichtigung eines gewählten Regelungsgesetzes die Distribution der Zustände vorhergesagt und daraus dann der Erwartungswert der Zielfunktionen berechnet (vgl. [KD92] oder [TL05]). Durch einen geeigneten Algorithmus werden dann das Regelungsgesetz und die Vorsteuerungstrajektorien iterativ optimiert. Bei nichtlinearen Modellen, Zielfunktionen und Störungen mit beliebigen Distributionen ist die Prädiktion nicht exakt möglich. Zur Lösung muss der Zustandsraum diskretisiert werden. Daher ist auch dieses Verfahren sehr rechenaufwendig und speicherintensiv. Mit der in Zukunft zu erwartenden Steigerung der Leistungsfähigkeit von Digitalrechnern werden auch zunehmend derart komplexe Verfahren Anwendung finden, da sie eine bessere Vorhersage und damit bessere Regelungsergebnisse ermöglichen.

Die Optimierung linearer Zustandsrückführungen ist seit langem Gegenstand der Forschung. Daher existiert eine Vielzahl von Abwandlungen des Riccati-Reglers, der die Grundlage der vorgestellten PaCo-Regelung ist. Viele dieser Varianten lassen sich daher auch auf den selbstoptimierenden Regler übertragen:

Dynamische Regler: Durch Zustandserweiterung lässt sich ein dynamischer Regler beliebiger Ordnung realisieren. Dazu kann die Dynamikmatrix mit einer Null-Matrix der gewünschten Ordnung blockdiagonal erweitert werden, und die Eingangsmatrix mit einer entsprechenden Einheitsmatrix (vgl. [KS72]). Die konkrete Reglerdynamik wird dann durch die Optimierung bestimmt. Natürlich können auch Zustandserweiterungen mit vorgegebener Dynamik durchgeführt werden. Die wichtigsten Möglichkeiten, die hier zu nennen sind, sind: Zustands-PI-Regler (vgl. [Föl05]), Eingangsfiler und dynamisch gewichtete Zielfunktionen (vgl. [Lev96]).

Ausgangsrückführung: Es gibt eine Vielzahl von Arbeiten, die den Entwurf von optimalen Reglern mit Ausgangsrückführung betrachten (siehe z. B. [GSS98], [KS74] oder [LA70]). Wenn das System über einen gewählten Ausgang stabilisierbar ist (Kriterien dafür werden in [OG97] oder [SAD94] angegeben), so gibt es verschiedene Möglichkeiten, die optimale Ausgangsrückführung zu berechnen. Dabei ist insbesondere die in [Yu04] beschriebene Methode von Interesse, da sie auf dem Kleinmann-Algorithmus basiert und sich somit leicht in den PaCo-Algorithmus integrieren lässt. Weitere interessante Möglichkeiten ergeben sich durch die Kombination einer Ausgangsrückführung mit einer Zustandserweiterung.

Allgemeine Strukturbeschränkung: In [MC85] wird eine Methode beschrieben, die es erlaubt, beliebige Strukturbeschränkungen mithilfe des Kleinmann-Algorithmus zu realisieren. Damit ist es denkbar, ausgehend von einer vollständigen Zustandsrückführung, zur Laufzeit bestimmte Ein- oder Ausgangspfade zu unterdrücken, z. B. bei Aktor- oder Sensorausfällen.

H_∞ : In [LFA⁺08] oder [MA71] wird gezeigt, dass sich der bekannte H_∞ -Regler durch eine Folge von Riccati-Gleichungen lösen lässt. Wird nicht die maximal mögliche Robustheit gefordert, sondern nur eine bestimmte Dämpfung der Störung, so genügt sogar die Lösung einer einzigen Riccati-Gleichung (vorausgesetzt, die gewünschte Dämpfung ist kleiner als die maximal Mögliche). Damit sind auch suboptimale H_∞ -Regler mit dem PaCo-Algorithmus realisierbar. Für optimale H_∞ -Regler müsste eine iterative Anpassung der gewünschten Dämpfung vorgenommen werden, bis das Optimum erreicht ist.

Adaptive Regelung: In [VPA⁺09] wird eine Methode beschrieben, mit der Riccati-Regler auch für Strecken berechnet werden können, deren Dynamikmatrix nicht bekannt ist. Dabei wird der Regler iterativ angepasst, ohne eine explizite Identifikation vorzunehmen. Es handelt sich also um eine implizite

adaptive Regelung. Das Vorgehen bei dieser Methode eignet sich zur Integration in den PaCo-Algorithmus. Ein derartiger Regler hätte adaptive und selbstoptimierende Eigenschaften und wäre nahezu universell einsetzbar. Ein ähnliches Verfahren wird auch in [LC02] vorgeschlagen. Leider existieren keine Angaben zur praktischen Realisierbarkeit der vorgeschlagenen Algorithmen.

Es wurde bereits angesprochen, dass bei dem PaCo-Verfahren die Annahme eines stationären Reglers verletzt wird. Daraus resultiert, dass die Erwartungswertbildung durch ein Tiefpassfilter ersetzt werden muss. Weiterhin wird auch vernachlässigt, dass der Erwartungswert aufgrund des zeitvarianten Reglers nicht stationär ist. Daraus ergibt sich die Frage, unter welchen Bedingungen die Anpassung der Zielgewichtung konvergiert. Die Stabilität der äußeren Schleife des PaCo-Reglers wird in der vorliegenden Arbeit nicht bewiesen. Es werden zwar Anhaltspunkte für die Wahl der Zeitkonstanten gegeben und es wird auch gezeigt, dass die Stabilität in der Praxis nicht gefährdet ist, dennoch ist eine weitere Erforschung dieser Zusammenhänge zu empfehlen.

Bei vielen regelungstechnischen Problemen sind Informationen über den Sollgrößenverlauf bekannt. Überall dort, wo dies der Fall ist, ist auch eine Trajektorien-generierung sinnvoll; getreu dem Motto: *Steuern, was steuerbar ist, und nur das regeln, was stabilisiert werden muss*. Die Infrastruktur für dieses Vorgehen stellt die Struktur mit zwei Freiheitsgraden bereit, die damit den Kern einer jeden komplexeren Regelung bilden sollte.

Ein Nachteil der PaCo-Methode ist die fehlende Berücksichtigung von Informationen über den zukünftigen Führungsgrößen-Verlauf. Zwar ist es über das Dynamikmodell der Führungsgrößen möglich, Informationen über die Ableitungen der Führungsgrößen in die Regelung einfließen zu lassen, eine Trajektorienplanung findet jedoch nicht statt. Es liegt daher nahe, den PaCo-Regler zur Störunterdrückung zu verwenden und gemeinsam mit einer Trajektorie zu optimieren. Für diese „hybride“ Optimierung wäre jedoch weder der Kleinmann-Algorithmus noch die DDP geeignet. Daher ist davon auszugehen, dass ein allgemeinerer Optimierungsalgorithmus mit deutlich höherer Rechenzeit eingesetzt werden müsste. Auch müsste zur Prädiktion der Zustandskovarianz unter einem beliebigen Regler die Kovarianz des Prozessrauschens identifiziert werden, was den Aufwand weiter erhöht.

Die beiden vorgestellten Selbstoptimierungsmethoden lassen sich auf viele regelungstechnische Problemstellungen übertragen. Insbesondere die *PaCo-Methode* ist sehr flexibel und überall dort einsetzbar, wo auch klassische Zustandsregler Anwendung finden. Die Methode kann sowohl zur Folgeregelung als auch zur Störunterdrückung, z. B. bei der Regelung einer aktiven Federung, eingesetzt werden.

Die Grundlage der beiden vorgestellten Methoden ist das in Abschnitt 2.4.5 beschriebene Konzept der *Selbstoptimierung durch Mehrzieloptimierung*. Das Konzept ist:

intuitiv: Alle Anforderungen (regelungstechnische, ökonomische und sonstige) können zunächst in natürlicher Sprache formuliert werden. Sofern es sich dabei um technisch sinnvolle Anforderungen handelt, sollte es dann möglich sein, diese Anforderungen mathematisch als Gleichung, Ungleichung oder Minimalitätsbedingung zu formulieren und sodann mithilfe von Messgrößen zu quantifizieren. Die Skalarisierung erfolgt nach dem gleichen Schema und bietet durch eine beliebige Parametrierung die Möglichkeit, den Einfluss der Zielsituationsabhängig zu festzulegen. Es ist sogar denkbar, situationsabhängig eine von mehreren Skalarisierungsfunktionen zu wählen.

transparent: Der technische oder ökonomische Bezug der Zielfunktionswerte geht im Lauf der Entwicklung nicht verloren und bleibt auch noch bei der numerischen Optimierung erhalten. Damit ist das Systemverhalten leicht nachzuvollziehen, Fehler können leicht entdeckt und aufgespürt werden und die Leistungsfähigkeit ist einfach zu validieren. In interdisziplinären Arbeitsgruppen wird die Kommunikation durch die Anschaulichkeit der physikalisch motivierten Größen erleichtert.

flexibel: Das Konzept ist sehr allgemein und beschränkt sich nicht auf ein bestimmtes regelungstechnisches Verfahren (Vorsteuerung, Zustandsregelung, flachheitsbasierte nichtlineare Regelung o. a.). Auch die Art der Optimierung ist nicht festgelegt (Wahl der Optimierungsvariablen, Optimierungsalgorithmus). Das Verfahren beschreibt lediglich das generelle Vorgehen beim Entwurf einer mehrzielbasierten selbstoptimierenden Regelung. Damit sind viele verschiedene Ausprägungen und eine Anpassung an nahezu jede Problemstellung möglich.

Mit dem Konzept der *Selbstoptimierung durch Mehrzieloptimierung* steht eine Vorgehensweise zur Verfügung, die sich auch auf viele andere Regelungskonzepte übertragen lässt. Durch die klare Trennung von Zielformulierung, Skalarisierung, Optimierungsmodell (Regler, Strecke und Optimierungsvariablen) und Optimierungsalgorithmus ist auch eine Arbeitsteilung möglich, wie sie in größeren Projekten meist vorzufinden ist. Wird diese Trennung auch bei der Umsetzung des Projektes eingehalten, so ist eine schnelle Änderung einzelner Aspekte (z. B. einer Zielfunktion) möglich und jede Entwicklungsiteration kann auf der Vorhergehenden aufbauen. Im Hinblick auf die Integration ist jedoch stets zu beachten, dass das resultierende Optimierungsproblem auch in der vorgegebenen Zeit lösbar ist. Die vorgestellten Methoden erzielen die (weiche) Echtzeitfähigkeit dadurch, dass ein Optimierungsalgorithmus gewählt wird, der iterativ die Lösung verbessert,

und zwar so, dass jede, wenn auch suboptimale, Zwischenlösung zur Regelung verwendet werden kann.

Die noch junge Disziplin des Entwurfs selbstoptimierender Regelungen ist eine konsequente Weiterentwicklung adaptiver Regelungen. Sie wird durch die fortschreitende Verbreitung von preiswerter und leistungsfähiger Mikroelektronik (Prozessoren, Multiprozessorsysteme, FPGA, usw.) getragen. Selbstoptimierung ist die Übertragung des allgegenwärtigen *Paradigmas der Optimalität* auf das Verhalten von Maschinen. Die vorliegende Arbeit soll – über die konkrete Anwendung in der Spurführung der RailCabs hinaus – einen Beitrag zur Entwicklung solcher Systeme leisten.

Verwendete Formelzeichen

Darstellung von Skalaren, Vektoren und Matrizen

Skalare: normale Buchstaben, groß und klein (x, X)

Vektoren: fette Kleinbuchstaben (\boldsymbol{x})

Matrizen: fette Großbuchstaben (\boldsymbol{X})

Skalare Größen

Zeichen	Beschreibung	Einheit
a	Beschleunigung	m s^{-2}
A	Fläche	m^2
c	Federsteifigkeit	N m^{-1}
c_α	Schräglaufsteifigkeit	N
c_ζ	Bohrschlupfbeiwert	N
d	Dämpferkonstante	N s m^{-1}
f	Schlupfkraftbeiwert	–
F	Kraft	N
G	Spurspiel	m
J	Zielfunktionswert	–
k	Anzahl der Ziele	–
l	Länge, Abstand	m
m	Masse	kg
M	Moment	N m
n	Anzahl der Zustände	–
n_{opt}	Anzahl der Optimierungsvariablen	–
p	Anzahl der Eingänge	–
p_S	Versorgungsdruck	N m^{-2}
P_{hyd}	Hydraulische Leistung	W
P_{reib}	Reibleistung	W
\dot{q}	Volumenstrom	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Q	Radaufstandskraft	N
s	Schlupf	–
s_{Pos}	Position entlang des Gleisverlaufs	m

Skalare Größen (fortgesetzt)

Zeichen	Beschreibung	Einheit
T	Tangentialkraft	N
T	Zeitkonstante	s
W_{reib}	Reibarbeit	J
y	Querposition Achse oder Gleis	m
Y	Querkraft	N
α	Gewichtungsfaktor	–
β	Schwimmwinkel	rad
γ_{SK}	Spurkranzwinkel	rad
δ	Lenkwinkel	rad
Θ	Massenträgheitsmoment	kg m ²
κ	Krümmung, inverser Radius	m ⁻¹
μ	Reibkoeffizient	–
ϕ	Winkel um die x-Achse	rad
ψ	Gierwinkel	rad

Vektoren und Matrizen

Zeichen	Beschreibung
A	Systemmatrix
B	Eingangsmatrix
C	Ausgangsmatrix
D	Durchgriff
I	Einheitsmatrix
J	Zielfunktionsvektor
N	Kreuzgewichtungsmatrix Zustand-Eingang
P	Lösung der algebraischen Riccati-Gleichung
Q	Zustandsgewichtungsmatrix
R	Reglermatrix
S	Eingangsgewichtungsmatrix
u	Eingangsvektor
W	Störkovarianzmatrix
x	Zustandsvektor
x	Vektor der Optimierungsvariablen
X	Zustandskovarianzmatrix
z, z	Störgröße
α	Gewichtungsvektor

Operatoren und Funktionen

Zeichen	Beschreibung
E	Erwartungswert
λ	Eigenwert
\mathcal{J}	Pareto-Front
\mathcal{L}	Ljapunow-Operator
\mathfrak{L}	Laplace-Operator
\mathcal{R}	Pareto-Menge
\mathfrak{s}	Skalarisierungsfunktion
\mathcal{N}	Realisierung einer normalverteilten Zufallsgröße

Indizes

Index	Bedeutung
<i>abs</i>	Größe im inertialen Koordinatensystem
<i>akt</i>	Aktuelle Größe
<i>A</i>	Aufbaugröße bzw. große Zylinderkammer
<i>B</i>	Kleine Zylinderkammer
<i>flg</i>	Zur Folgeregelung verwendet
<i>FZ</i>	Fahrzeuggröße
<i>FW</i>	Fahrwerkgröße
<i>Gl</i>	Gleisgröße
<i>h</i>	Hinterachse bzw. folgende Achse
<i>i</i>	Zielfunktionsindex
<i>ist</i>	Istwert, tatsächliche Größe
<i>kurve</i>	Zur Kurven-Vorsteuerung verwendet
<i>lin</i>	Linearisiert
<i>o</i>	Oben
<i>ref, re, r</i>	Vorgabe, Sollgröße
<i>reg</i>	Zur Regelung verwendet
<i>rel</i>	Relativ zur Gleismittellinie
<i>R</i>	Rad- bzw. Achsgröße
<i>R</i>	Auf das geregelte System bezogen
<i>schl</i>	Schlupfgröße
<i>sys, sy, s</i>	Systemgröße
<i>traj</i>	Zur Trajektorien-Vorsteuerung verwendet
<i>u</i>	Unten oder Stellwert (Lenkwinkelrate)
<i>v</i>	Vorderachse bzw. führende Achse
<i>vor</i>	Zur Vorsteuerung verwendet

Indizes (fortgesetzt)

Index	Bedeutung
<i>x</i>	In x-Richtung (längs)
<i>y</i>	In y-Richtung (quer)
<i>z</i>	In z-Richtung (senkrecht)
<i>zyl</i>	Zylindergröße
ψ	Um die Hochachse

Hochgestellte Indizes**Index** **Bedeutung**

T Transponiert

★ Optimaler Wert

Literaturverzeichnis

- [ACP91] ARORA, J. S. ; CHAHANDE, A. I. ; PAENG, J. K.: Multiplier methods for engineering optimization. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 32 (1991), Nr. 7, S. 1485–1525
- [ADG⁺08] ADEL, P. ; DONOTH, J. ; GAUSEMEIER, J. ; GEISLER, J. ; HENKLER, S. ; KAHL, S. ; KLÖPPER, B. ; KRUPP, A. ; MÜNCH, E. ; OBERTHÜR, S. ; PAIZ, C. ; PODLOGAR, H. ; PORRMANN, M. ; RADKOWSKI, R. ; ROMAUS, C. ; A. SCHMIDT, A. ; SCHULZ, B. ; VÖCKING, H. ; WITKOWSKI, U. ; WITTING, K. ; ZNAMENSHCHYKOV, O. ; GAUSEMEIER, J. (Hrsg.) ; RAMMIG, F. J. (Hrsg.) ; SCHÄFER, W. (Hrsg.): *Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte*. Bd. 234. Paderborn : HNI-Verlagsschriftenreihe, 2008. – ISBN 978-3-939350-53-8
- [AL84] ARNOLD, W. F. ; LAUB, A. J.: Generalized eigenproblem algorithms and software for algebraic Riccati equations. In: *Proceedings of the IEEE* 72 (1984), Nr. 12, S. 1746–1754. – ISSN 0018-9219
- [And78] ANDERSON, J. E.: *Transit System Theory*. Lexington, MA : Lexington Books, 1978
- [ATA03] ADVANCED TRANSIT ASSOCIATION: Personal Automated Transportation: Status and Potential of Personal Rapid Transit. 2003. – Bericht
- [Bat04] BATINA, I.: *Model predictive control for stochastic systems by randomized algorithms*, Technische Universiteit Eindhoven, Diss., 2004
- [Böc06] BÖCKER, J.: Aktive Lenkung der Achsen eines Straßenbahndrehgestells mit Einzelradantrieben. In: *Workshop Entwurf mechatronischer Systeme*. Paderborn : Heinz-Nixdorf-Institut, 2006
- [Ber76] BERTSEKAS, D. P.: Multiplier methods: A survey. In: *Automatica* 12 (1976), Nr. 2, S. 133–145. – ISSN 0005-1098
- [Ber96] BERTSEKAS, D. P.: *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*. Massachusetts : Athena Scientific, 1996. – ISBN 1886529043
- [Bet98] BETTS, J. T.: Survey of numerical methods for trajectory optimization. In: *Journal of Guidance control and dynamics* 21 (1998), Nr. 2, S. 193–207
- [BG71] BOBROVSKY, B. ; GRAUPE, D.: Analysis of optimal-cost sensitivity to parameter changes. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 16 (1971), Nr. 5, S. 487–488
- [BH75] BRYSON, A. E. Jr. ; HO, Y.-C.: *Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control*. New York : Taylor & Francis, 1975. – ISBN 0891162283
- [BH89] BERNSTEIN, D. S. ; HADDAD, W. M.: LQG control with an H_∞ performance bound: a Riccati equation approach. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 34 (1989), Nr. 3, S. 293–305. – ISSN 0018-9286
- [Bie09] BIELAWNY, D.: *Optische Vermessung von Gleislagefehlern*, Universität Paderborn, RtM, Studienarbeit, November 2009
- [BLM04] BUREIKA, G. ; LINGAITIS, L. P. ; MIKALIUNAS, S.: Investigation of dynamic models of independently rotating wheels of wagons. In: *Transport (Gediminas Technical University)* 19 (2004), Nr. 1, S. 28–31. – ISSN 1648-4142
- [BM99] BEMPORAD, A. ; MORARI, M.: Robust model predictive control: A survey. In: *Robustness in identification and control*. Berlin : Springer, 1999, S. 207–226

- [BP09] BEMPORAD, A. ; PENA, D. M. d.: Multiobjective model predictive control. In: *Automatica* 45 (2009), Nr. 12, S. 2823–2830. – ISSN 0005–1098
- [BS72] BARTELS, R. H. ; STEWART, G. W.: Solution of the Matrix Equation $AX+XB=C$ [F4] (Algorithm 432). In: *Commun. ACM* 15 (1972), Nr. 9, S. 820–826
- [BSK⁺06] BÖCKER, J. ; SCHULZ, B. ; KNOKE, T. ; FRÖHLEKE, N.: Self-Optimization as a Framework for Advanced Control Systems. In: *The 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06)*. Paris, France, 2006
- [BSW02] BATINA, I. ; STOORVOGEL, A. A. ; WEILAND, S.: Optimal control of linear, stochastic systems with state and input constraints. In: *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control* Bd. 2, 2002, S. 1564–1569
- [BTG09] BORZYKH, M. ; TRÄCHTLER, A. ; GEISLER, J.: Aufbau und Regelung eines sturzvariablen Bahnfahrwerks mit Einzelradlenkung. In: *6. Paderborner Workshop „Entwurf mechatronischer Systeme“ (EMS), 2.-3. April, 2009*
- [BV04] BOYD, S. ; VANDENBERGHE, L.: *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004. – ISBN 9780521833783
- [CB99] CERVANTES, A. ; BIEGLER, L. T.: Optimization Strategies for Dynamic Systems. In: FLOUDAS, C. (Hrsg.) ; PARDALOS, P. (Hrsg.): *Encyclopedia of Optimization*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1999, S. 216–226
- [CB04] CAMACHO, E. F. ; BORDONS, C.: *Model Predictive Control*. Berlin : Springer, 2004. – ISBN 3540762418
- [CCF⁺90] CHANG, S. ; CHEN, C. ; FONG, I. ; LUH, P.: Hydroelectric generation scheduling with an effective differential dynamic programming algorithm. In: *IEEE Transactions on Power Systems* 5 (1990), Nr. 3, S. 737–743. – ISSN 0885–8950
- [CGG⁺98] CABALLERO, R. ; GÓMEZ, T. ; GONZÁLEZ, M. ; REY, L. ; RUIZ, F.: Goal programming with dynamic goals. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 7 (1998), Nr. 4, S. 217–229
- [CKN09] CANNON, M. ; KOUVARITAKIS, B. ; NG, D.: Probabilistic tubes in linear stochastic model predictive control. In: *Systems & Control Letters* 58 (2009), Nr. 10-11, S. 747–753. – ISSN 0167–6911
- [CM96] CHEN, C. ; MANGASARIAN, O. L.: A class of smoothing functions for nonlinear and mixed complementarity problems. In: *Computational Optimization and Applications* 5 (1996), Nr. 2, S. 97–138
- [CM04] CHMIELEWSKI, D. J. ; MANTHANWAR, A. M.: On the Tuning of Predictive Controllers: Inverse Optimality and the Minimum Variance Covariance Constrained Control Problem. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 43 (2004), Nr. 24, S. 7807–7814
- [CP07] CHINCHULUUN, A. ; PARDALOS, P.: A survey of recent developments in multiobjective optimization. In: *Annals of Operations Research* 154 (2007), Nr. 1, S. 29–50
- [DAC00] DORATO, P. ; ABDALLAH, C. T. ; CERONE, V.: *Linear Quadratic Control: An Introduction*. Malabar, Florida : Krieger Pub. Co., 2000. – ISBN 1575241560
- [DB89] DUNN, J. C. ; BERTSEKAS, D. P.: Efficient dynamic programming implementations of Newton's method for unconstrained optimal control problems. In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 63 (1989), Nr. 1, S. 23–38
- [Del06] DELL'AERE, A.: Multi-Objective Optimization in Self-Optimizing Systems. In: *IEEE 32nd Annual Conference on Industrial Electronics, IECON*, 2006. – ISBN

- 1553–572X, S. 4755–4760
- [DF06] DELLMANN, T. ; FRANK, M.: Radprofilgestaltung für Losradfahrzeuge. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 55 (2006), Nr. 11, S. 788–797
- [DHK⁺08] DELL'AERE, A. ; HIRSCH, M. ; KLÖPPER, B. ; KOESTER, M. ; KRÜGER, M. ; KRUPP, A. ; MÜLLER, T. ; OBERTHÜR, S. ; POOK, S. ; PRIESTERJAHN, C. ; ROMAUS, C. ; SCHMIDT, A. ; SONDERMANN-WÖLKE, C. ; TICHY, M. ; VÖCKING, H. ; ZIMMER, D.: *Verlässlichkeit selbstoptimierender Systeme – Potenziale nutzen und Risiken vermeiden*. Bd. 235. Paderborn : HNI-Verlagsschriftenreihe, 2008
- [DIN05] Norm DIN EN 14363 Oktober 2005. *Bahnanwendungen – Fahrtechnische Prüfung für die Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen – Prüfung des Fahrverhaltens und stationäre Versuche; Deutsche Fassung EN 14363:2005*
- [DIN09] Norm DIN EN 13848-1 März 2009. *Bahnanwendungen – Oberbau – Gleislagequalität – Teil 1: Beschreibung der Gleisgeometrie; Deutsche Fassung EN 13848-1:2003+A1:2008*
- [DSO92] DUKKIPATI, R. V. ; SWAMY, S. N. ; OSMAN, M.: Independently Rotating Wheel Systems for Railway Vehicles – A State of the Art Review. In: *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* 21 (1992), Nr. 1, S. 297. – ISSN 0042–3114
- [EHL⁺01] ETTINGSHAUSEN, C. ; HESTERMEYER, T. ; LÜCKEL, J. ; SCHLAUTMANN, P.: Entwurfs- und Modellierungsstruktur der Mechatronik am Beispiel der Neuen Bahntechnik Paderborn. In: *15. Symposium Simulationstechnik der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM), 11.-14. September*. Paderborn, 2001
- [EHO03] ETTINGSHAUSEN, C. ; HESTERMEYER, T. ; OTTO, S.: Aktive Spurführung und Lenkung von Schienenfahrzeugen. In: *6. Magdeburger Maschinenbautage: Intelligente technische Systeme und Prozesse – Grundlagen, Entwurf, Realisierung, 24.-26. September*. Magdeburg, 2003
- [Eic09] EICHFELDER, G.: Scalarizations for adaptively solving multi-objective optimization problems. In: *Computational Optimization and Applications* 44 (2009), Nr. 2, S. 249–273
- [ELS⁺08] ERDEGHEM, P. M. V. ; LOGIST, F. ; SMETS, I. Y. ; IMPE, J. F. V.: Efficiently solving multiple objective optimal control problems. In: *Proceedings of the 17th IFAC World Congress, 6.-11. Juli*. Seoul, Süd Korea, 2008, S. 7802–7807
- [EML00] ENGELBERG, T. ; MESCH, F. ; LEON, F.: Bordautonome Identifikation von Eisenbahnweichen mit Wirbelstrom-Sensoren. In: *VDI-Berichte : Sensoren und Meßsysteme 2000, 10. GMA/ITG-Fachtagung, Ludwigsburg, 13. und 14. März* Bd. 1530, VDI, 2000, S. 891–900
- [ES97] ELKINS, J. A. ; SHUST, W. C.: Wheel forces during flange climb Part II – NUCARS simulations. In: *Proceedings of the 1997 IEEE/ASME Joint Railroad Conference*, 1997, S. 149–156
- [Ett99] ETTINGSHAUSEN, C.: *Modellierung und Analyse der Antriebs- und Spurführungseinheit für ein neues Bahnsystem*, Universität Paderborn, MLaP, Diplomarbeit (H II), Dezember 1999
- [FD06] FRANK, M. ; DELLMANN, T.: Aktive Spurführung als Mittel zur Reduzierung des Verschleißes von Rad und Schiene. In: *ZEVrail Glasers Annalen* 130 (2006), Nr. 10, S. 446–460
- [Fen07] FENDRICH, L. (Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Berlin : Springer, 2007. – ISBN 978–3–540–29581–5

- [Föl05] FÖLLINGER, O.: *Regelungstechnik – Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. 8. Aufl. Heidelberg : Hüthig, 2005. – ISBN 3778529153
- [FLE95] FORCHTNER, H. ; LUGNER, P. ; ENDLICHER, K.-O.: Untersuchungen zum Laufverhalten von Schienenfahrzeugen mit selbstzentrierenden Losradsätzen bei der Fahrt in der Geraden. In: *ZEV, DET, Glasers Annalen, Die Eisenbahntechnik* 119 (1995), Nr. 5, S. 151–156. – ISSN 0941–0589
- [FLM⁺99] FLIESS, M. ; LEVINE, J. ; MARTIN, P. ; ROUCHON, P.: A Lie-Backlund approach to equivalence and flatness of nonlinear systems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 44 (1999), Nr. 5, S. 922–937
- [FR94] FÖLLINGER, O. ; ROPPENECKER, G.: *Optimale Regelung und Steuerung*. 3 Aufl. München : Oldenbourg, 1994. – ISBN 3486231162
- [Fra04] FRANK, M.: Radsatz/Radpaar: Ein Prinzipvergleich passiver Spurführung. In: *ZEV rail Glasers Annalen* 128 (2004), Nr. 4, S. 132–139. – ISSN 1618–8330
- [FRE99] FREDERICH, F.: Nullebenen-Konzept der Spurführung : Prinzip, Ausführung, Ergebnisse. In: *ZEV, DET, Glasers Annalen, Die Eisenbahntechnik* 123 (1999), Nr. 7-8, S. 269–278. – ISSN 0941–0589
- [GBM06] GOODALL, R. M. ; BRUNI, S. ; MEI, T. X.: Concepts and prospects for actively controlled railway running gear. In: *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* 44 (2006), Nr. 1 supp 1, S. 60. – ISSN 0042–3114
- [GFS⁺07] GAUSEMEIER, J. ; FRANK, U. ; SCHMIDT, A. ; ZIMMER, D.: Von der Mechatronik zur Selbstoptimierung. In: *3. Internationales Forum Mechatronik (IFM)*, 2007
- [GK02] GOODALL, R. M. ; KORTÜM, W.: Mechatronic developments for railway vehicles of the future. In: *Control Engineering Practice* 10 (2002), Nr. 8, S. 887–898
- [GKM06] GOULART, P. J. ; KERRIGAN, E. C. ; MACIEJOWSKI, J. M.: Optimization over state feedback policies for robust control with constraints. In: *Automatica* 42 (2006), Nr. 4, S. 523–533
- [GL00] GOODALL, R. ; LI, H.: Solid Axle and Independently-Rotating Railway Wheelsets - A Control Engineering Assessment of Stability. In: *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* 33 (2000), Nr. 1, S. 57. – ISSN 0042–3114
- [GLX⁺07] GADEWADIKAR, J. ; LEWIS, F. L. ; XIE, L. ; KUCERA, V. ; ABU-KHALAF, M.: Parameterization of all stabilizing H_∞ static state-feedback gains: application to output-feedback design. In: *Automatica* 43 (2007), Nr. 9, S. 1597–1604
- [GM01] GOODALL, R. ; MEI, T. X.: Mechatronic strategies for controlling railway wheelsets with independently rotating wheels. In: *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 8-12 July*. Como, Italy, 2001
- [Gol03] GOLDSCHMIDT, S.: *Anwendung mengenorientierter numerischer Methoden zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme am Beispiel der Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen*, Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Diss., 2003
- [GPM89] GARCIA, C. E. ; PRETT, D. M. ; MORARI, M.: Model predictive control: Theory and Practice. In: *Automatica* 25 (1989), Nr. 3, S. 335–348
- [Gra12] GRAICHEN, K.: Nichtlineare modellprädiktive Regelung basierend auf Fixpunktiterationen. In: *at - Automatisierungstechnik* 60 (2012), August, Nr. 8, S. 442–451. – ISSN 0178–2312

- [GSS98] GEROMEL, J. C. ; SOUZA, C. C. ; SKELTON, R. E.: Static output feedback controllers: stability and convexity. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 43 (1998), Nr. 1, S. 120–125. – ISSN 0018–9286
- [GT09] GEISLER, J. ; TRÄCHTLER, A.: Control of the Pareto Optimality of Systems with Unknown Disturbances. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Control and Automation (ICCA09)*. Christchurch, New Zealand : IEEE, Dezember 2009. – ISBN 978–1–4244–4707–7, S. 695–700
- [GWT⁺08a] GEISLER, J. ; WITTING, K. ; TRÄCHTLER, A. ; DELLNITZ, M.: Multiobjective Optimization of Control Trajectories for the Guidance of a Rail-Bound Vehicle. In: *Proceedings of the 17th IFAC World Congress, 6.-11. Juli*. Seoul, Süd Korea, 2008. – ISBN 978–1–1234–7890–2, S. 4380–4386
- [GWT⁺08b] GEISLER, J. ; WITTING, K. ; TRÄCHTLER, A. ; DELLNITZ, M.: Self-Optimization of the Guidance Module of a Rail-bound Vehicle. In: GAUSEMEIER, J. (Hrsg.) ; RAMMIG, F. J. (Hrsg.) ; SCHÄFER, W. (Hrsg.): *7th International Heinz Nixdorf Symposium: Self-optimizing Mechatronic Systems – Designing the Future* Bd. 223. Paderborn : HNI-Verlagsschriftenreihe, Februar 2008. – ISBN 978–3–939350–42–2, S. 85–100
- [Hai02] HAIGERMOSER, A.: Schienenfahrzeuge / Universität Graz. 2002. – Vorlesungsskriptum zur Lehrveranstaltung 310.214
- [Har95] HARSY, G.: Fahrwerke mit gesteuerten Radsätzen. In: *ZEV, DET, Glasers Annalen, Die Eisenbahntechnik* 119 (1995), Nr. 9-10, S. 286–500. – ISSN 0941–0589
- [HD07] HERMANN, M. ; DELLMANN, T.: Betrachtungen zu spurführungstechnischen Rückfallebenen eines mechatronischen Fahrwerks. In: *ZEVrail Glasers Annalen* 131 (2007), Nr. 11/12, S. 456–466
- [Hes05] HESTERMEYER, T.: Beschreibung des Federungsreglers / MLaP. Paderborn, Juli 2005. – intern
- [Hes06] HESTERMEYER, T.: *Strukturierte Entwicklung der Informationsverarbeitung für die aktive Federung eines Schienenfahrzeugs*, Universität Paderborn, RtM, Diss., 2006
- [HF98] Schutzrecht DE 19702409A1: Verfahren zur Erkennung der Position von Rädern spurgeführter Fahrzeuge im Spurkanal (30. Juli 1998). HINÜBER, E. von ; FELDMANN, W. E. (Erfinder).
- [HFB06] HENKE, C. ; FROHLEKE, N. ; BOCKER, J.: Advanced convoy control strategy for autonomously driven railway vehicles. In: *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2006, S. 1388–1393
- [Hil01] HILLERMEIER, C.: *Nonlinear multiobjective optimization – A Generalized Homotopy Approach*. Basel : Birkhäuser, 2001. – ISBN 376436498X, 9783764364984
- [HMO04] HESTERMEYER, T. ; MÜNCH, E. ; OBERSCHELP, O.: Sollbahn-Planung für schienengebundene Fahrzeuge. In: *VDI-Tagung Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, 29.-30. September 2004, Würzburg*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2004
- [HMS04] HESTERMEYER, T. ; MÜNCH, E. ; SCHÄFER, E.: Modelbased Online Parameter Optimization. In: *3rd IFAC Symposium on Mechatronic Systems, Maly Beach, Sydney, Australia*, 2004
- [HOG04] HESTERMEYER, T. ; OBERSCHELP, O. ; GIESE, H.: Structured information processing for self-optimizing mechatronic systems. In: *Proc. of 1st International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*. Setubal, Portugal, 2004, S. 230–237

- [HRS⁺07] HENKE, C. ; RUSTEMEIER, C. ; SCHNEIDER, T. ; BÖCKER, J. ; TRÄCHTLER, A.: RailCab – Ein Schienenverkehrssystem mit autonomen, Linearmotor getriebenen Einzelfahrzeugen. In: *Internationaler ETG-Kongress 2007 – Kundennutzen durch neue Technologien in der Bahntechnik, 23.-24. Oktober*. Karlsruhe, 2007
- [HSE02] HESTERMEYER, T. ; SCHLAUTMANN, P. ; ETTINGSHAUSEN, C.: Active suspension system for railway vehicles-system design and kinematics. In: *2nd IFAC Conference on mechatronic systems, 9.-11. Dezember*. Berkeley, California, USA, 2002
- [HSN⁺97] HONEKMAP, U. ; STOLPE, R. ; NAUMANN, R. ; LÜCKEL, J.: Structuring approach for complex mechatronic systems. In: *30th International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA)*. Florence, Italy, 1997, S. 165–172
- [HTS⁺08] HENKE, C. ; TICHY, M. ; SCHNEIDER, T. ; BÖCKER, J. ; SCHÄFER, W.: Organization and Control of Autonomous Railway Convoys. In: *9th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC), 6.-9. Oktober*. Kobe, Japan, 2008
- [IBO⁺87] IRVING, J. H. ; BERNSTEIN, H. ; OLSON, C. L. ; BUYAN, J.: *Fundamentals of personal rapid transit*. Lexington, MA : Lexington Books, 1987
- [IM99] ISHIDA, H. ; MATSUO, M.: Safety Criteria for Evaluation of Railway Vehicle Derailment. In: *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) 40 (1999), Nr. 1, S. 18–25*. – ISSN 0033–9008
- [IT98] IMAE, J. ; TORISU, R.: A Riccati-equation-based algorithm for nonlinear optimal control problems. In: *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control* Bd. 4, 1998
- [Iwn03] IWNICKI, S.: Simulation of wheel-rail contact forces. In: *Fatigue and fracture of engineering materials and structures 26 (2003), Nr. 10, S. 887–900*
- [Iwn06] IWNICKI, S.: *Handbook of railway vehicle dynamics*. New York : CRC Press, 2006. – ISBN 9780849333217
- [JMP⁺80] *Kapitel* Linear-quadratic optimal control. In: JACOBSON, D. H. ; MARTIN, D. H. ; PACHTER, M. ; GEVECI, T.: *Extensions of Linear-Quadratic Control Theory*. Bd. 27. Berlin : Springer, 1980, S. 60–83
- [JS03] JARRE, F. ; STOER, J.: *Optimierung*. Berlin : Springer, 2003. – ISBN 3540435751
- [Kat06] KATSEV, S.: *Streamlining of the state-dependent Riccati equation controller algorithm for an embedded implementation*. Rochester, New York, Rochester Institute of Technology, Masterarbeit, November 2006
- [KD92] KUSHNER, H. J. ; DUPUIS, P. G.: *Numerical methods for stochastic control problems in continuous time*. Berlin : Springer-Verlag, 1992. – ISBN 0–387–97834–8
- [KJ08] KIENCKE, U. ; JÄKEL, H.: *Signale und Systeme*. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2008. – ISBN 9783486587340
- [KJM12] KASTSIAN, M. ; JOST, M. ; MÖNNIGMANN, M.: Ansätze zur Berechnung und schnellen Auswertung expliziter modellprädiktiver Regelgesetze. In: *at - Automatisierungstechnik 60 (2012), August, Nr. 8, S. 433–441*. – ISSN 0178–2312
- [KK91] KISIŁOWSKI, J. ; KNOTHE, K.: *Advanced railway vehicle system dynamics*. Warschau : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1991
- [KL86] KOUSSOULAS, N. T. ; LEONDES, C. T.: The multiple linear quadratic gaussian problem. In: *International Journal of Control 43 (1986), Nr. 2, S. 337–349*. – ISSN 0020–7179

- [Kle68] KLEINMAN, D.: On an iterative technique for Riccati equation computations. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 13 (1968), Nr. 1, S. 114–115. – ISSN 0018–9286
- [Kli83] KLINGEL, J.: Über den Lauf der Eisenbahnwagen auf gerader Bahn. In: *Organ Fortschritt des Eisenbahnwesens* 20 (1883), S. 113–123
- [Koh08] KOHL, S.: *Lageregelung eines hydraulischen Zylinders bei variablem Versorgungsdruck*, Universität Paderborn, RtM, Studienarbeit, August 2008
- [KR78] KLEINMAN, D. ; RAO, P.: Extensions to the Bartels-Stewart algorithm for linear matrix equations. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 23 (1978), Nr. 1, S. 85–87. – ISSN 0018–9286
- [KR91] KHARGONEKAR, P. P. ; ROTEVA, M. A.: Multiple objective optimal control of linear systems: the quadratic norm case. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 36 (1991), Nr. 1, S. 14–24. – ISSN 0018–9286
- [Kra98] KRAFT, D.: *Sensoren zur elektronisch unterstützten Spurführung von Schienenfahrzeugen*, RWTH Aachen, Diss., 1998
- [KRB⁺06] KNOKE, T. ; ROMAUS, C. ; BÖCKER, J. ; DELL‘AERE, A. ; WITTING, K.: Energy Management for an Onboard Storage System Based on Multi-Objective Optimization. In: *32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 06), November 7-10*. Paris, 2006. – ISSN 1553–572X, S. 4677–4682
- [KS72] KWAKERNAAK, H. ; SIVAN, R.: *Linear optimal control systems*. New York : Wiley-Interscience, 1972
- [KS74] KURTARAN, B.-Z. ; SIDAR, M.: Optimal instantaneous output-feedback controllers for linear stochastic systems. In: *International Journal of Control* 19 (1974), Nr. 4, S. 797–816. – ISSN 0020–7179
- [KS79] KREISSELMEIER, G. ; STEINHAUSER, R.: Systematische Auslegung von Reglern durch Optimierung eines vektoriiellen Gütekriteriums. In: *Regelungstechnik* 27 (1979), Nr. 3, S. 76–79
- [KS83] KREISSELMEIER, G. ; STEINHAUSER, R.: Application of vector performance optimization to a robust control loop design for a fighter aircraft. In: *International Journal of Control* 37 (1983), S. 251–284
- [KS07] KNOTHE, K. ; STICHEL, S.: *Schienenfahrzeugdynamik*. Berlin : Springer, 2007. – ISBN 3–540–43429–1
- [LA70] LEVINE, W. ; ATHANS, M.: On the determination of the optimal constant output feedback gains for linear multivariable systems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 15 (1970), Nr. 1, S. 44–48. – ISSN 0018–9286
- [LA91] LIN, T. C. ; ARORA, J. S.: Differential dynamic programming technique for constrained optimal control. In: *Computational Mechanics* 9 (1991), Nr. 1, S. 27–40
- [Lau04] LAUB, A.: *Matrix analysis for scientists and engineers*. Society for Industrial Mathematics, 2004. – 143 S.
- [LC02] LEVANONY, D. ; CAINES, P.: Stochastic Lagrangian Adaptive LQG Control. In: PASIK-DUNCAN, B. (Hrsg.): *Stochastic Theory and Control* Bd. 280. Berlin : Springer, 2002, S. 283–300
- [LEH⁺02] LÜCKEL, J. ; ETTINGSHAUSEN, C. ; HESTERMEYER, T. ; SCHLAUTMANN, P.: Neue Bahntechnik Paderborn – Eine Anwendung der verallgemeinerten Kaskade. In: *Innovative Antriebssysteme – Erstes Internationales Symposium für Mechatronik (ISOM'02), 21.-22. März*. Chemnitz, 2002

- [Lev96] LEVINE, W. S.: *The control handbook*. New York : CRC Press, 1996. – ISBN 9780849385704
- [LFA⁺08] LANZON, A. ; FENG, Y. ; ANDERSON, B. ; ROTKOWITZ, M.: Computing the Positive Stabilizing Solution to Algebraic Riccati Equations With an Indefinite Quadratic Term via a Recursive Method. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 53 (2008), Nr. 10, S. 2280–2291. – ISSN 0018–9286
- [LGH⁺08] LÜCKEL, J. ; GROSTOLLEN, H. ; HENKE, M. ; HESTERMEYER, T. ; LIU-HENKE, X.: RailCab System: Engineering Aspects. In: *Dynamical Analysis of Vehicle Systems* Bd. 497. Wien : Springer, 2008, S. 237–281
- [LHL01] LÜCKEL, J. ; HESTERMEYER, T. ; LIU-HENKE, X.: Generalization of the cascade principle in view of a structured form of mechatronic systems. In: *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Como, Italy, 2001, S. 123–128
- [Li90] LI, D.: On the minimax solution of multiple linear-quadratic problems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 35 (1990), Nr. 10, S. 1153–1156. – ISSN 0018–9286
- [Li93a] LI, D.: On general multiple linear-quadratic control problems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 38 (1993), Nr. 11, S. 1722–1727. – ISSN 0018–9286
- [Li93b] LI, D.: On-line adjustment in general multiple linear-quadratic control. In: *Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Decision and Control* Bd. 4, 1993, S. 3331–3332
- [LMP⁺02] LI, H. ; MEI, T. X. ; PEARSON, J. T. ; GOODALL, R. M.: Non-Linear Kalman Filter Estimation for Active Steering of Profiled Rail-Wheels. In: *15th IFAC World congress*. Barcelona, Spain, Juli 2002
- [LN03] LEVINE, J. ; NGUYEN, D. V.: Flat output characterization for linear systems using polynomial matrices. In: *Systems and control Letters* 48 (2003), Nr. 1, S. 69–75
- [Log08] LOGES, A.: *Bewertung der Sensorsicherheit und Analyse der Redundanzen zur Fehlererkennung an einem mechatronischen Schienenfahrzeug*, Universität Paderborn, RtM, Studienarbeit, November 2008
- [LXZ09] LI, D. ; XI, Y. ; ZHENG, P.: Constrained robust feedback model predictive control for uncertain systems with polytopic description. In: *International Journal of Control* 82 (2009), Nr. 7, S. 1267–1274. – ISSN 0020–7179
- [MA71] MEDANIC, J. ; ANDJELIC, M.: On a class of differential games without saddle-point solutions. In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 8 (1971), Nr. 6, S. 413–430
- [Mak89] MAKILA, P. M.: On multiple criteria stationary linear quadratic control. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 34 (1989), Nr. 12, S. 1311–1313. – ISSN 0018–9286
- [MC85] MOERDER, D. ; CALISE, A.: Convergence of a numerical algorithm for calculating optimal output feedback gains. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 30 (1985), Nr. 9, S. 900–903. – ISSN 0018–9286
- [MD95] MÜLLER, R. ; DIENER, M.: Verschleisserscheinungen an Radlaufflächen von Eisenbahnfahrzeugen. In: *ZEV+DET, Glasers Annalen* 119 (1995), Nr. 6, S. 177–192
- [Meh70] MEHRA, R.: On the identification of variances and adaptive Kalman filtering. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 15 (1970), Nr. 2, S. 175–184. – ISSN 0018–9286

- [Mei99] MEINDERS, T.: Einfluß des Rad-Schiene-Kontakts auf Dynamik und Verschleiß eines Radsatzes / Institut B für Mechanik, Universität Stuttgart. Stuttgart, August 1999. – Zwischenbericht ZB116
- [Mey08] MEYER, T.: *Entwurf eines Mehrgrößenreglers für die Bahnfolgeregelung eines zweiachsig gelenkten Schienenfahrzeugs*, Universität Paderborn, RtM, Studienarbeit, Juni 2008
- [MFM02] MILAM, M. B. ; FRANZ, R. ; MURRAY, R. M.: Real-time constrained trajectory generation applied to a flight control experiment. In: *Proc. of the 15th IFAC World Congress, 21. -26. Jul.* Barcelona, Spain, 2002, S. 175–180
- [MG00] MEI, T. X. ; GOODALL, R. M.: Wheelset control strategies for a two-axle railway vehicle. In: *Vehicle System Dynamics* 33 (2000), S. 653–664
- [MG01] MEI, T. X. ; GOODALL, R. M.: Robust control for independently rotating wheelsets on a railway vehicle using practical sensors. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 9 (2001), Nr. 4, S. 599–607
- [MG03a] MEI, T. X. ; GOODALL, R. M.: Practical Strategies for Controlling Railway Wheelsets Independently Rotating Wheels. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 125 (2003), Nr. 3, S. 354–360
- [MG03b] MEI, T. X. ; GOODALL, R. M.: Recent Development in Active Steering of Railway Vehicles. In: *Vehicle System Dynamics* 39 (2003), Nr. 6, S. 415–436. – ISSN 0042–3114
- [MGL99] MEI, T. X. ; GOODALL, R. M. ; LI, H.: Kalman Filter for the state estimation of a 2-axle railway vehicle. In: *5th European Control Conference*. Karlsruhe, Germany, 1999
- [Möh07] MÖHL, C.: *Implementierung und Inbetriebnahme eines iterativen Lernverfahrens am Spurführungsmodul des Railcabs zur Beobachtung der Absolutlage*, Universität Paderborn, RtM, Diplomarbeit, Juli 2007
- [MHJ⁺02] MURRAY, R. M. ; HAUSER, J. ; JADBABAIE, A. ; MILAM, M. B. ; PETIT, N. ; DUNBAR, W. B. ; FRANZ, R.: Online Control Customization via Optimization-Based Control. In: *Software-enabled control: information technology for dynamical systems*, Wiley-Interscience, 2002, S. 149–174
- [Mie04] MIETTINEN, K.: *Nonlinear multiobjective optimization*. 4 Aufl. Dordrecht : Kluwer, 2004 (International Series in Operations Research and Management Science). – ISBN 0–7923–8278–1
- [MMM00] MILAM, M. ; MUSHAMBI, K. ; MURRAY, R.: A new computational approach to real-time trajectory generation for constrained mechanical systems. In: *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, 2000, S. 845–551
- [Mün03] MÜNCH, E.: *Mehrgrößenoptimierung – Algorithmusentwicklung und Anwendung an der Spurführung der NBP (Neue Bahntechnik Paderborn)*, Universität Paderborn, MLaP, Diplomarbeit (H II), September 2003
- [Mün12] MÜNCH, E.: *Selbstoptimierung verteilter mechatronischer Systeme auf Basis paretooptimaler Systemkonfigurationen*, Universität Paderborn, RtM, genehmigte Dissertation, Dezember 2012
- [Mor94] MORARI, M.: Model Predictive Control: Multivariable Control Technique of Choice in the 1990s? In: CLARKE, D. (Hrsg.): *Advances in model-based predictive control*. New York : Oxford University Press, 1994, S. 22–37
- [MRR⁺00] MAYNE, D. Q. ; RAWLINGS, J. B. ; RAO, C. V. ; SCOKAERT, P. O.: Constrained model predictive control: Stability and optimality. In: *Automatica* 36 (2000),

S. 789–814

- [MRW08] *Kapitel* Introduction to Multiobjective Optimization: Interactive Approaches. In: MIETTINEN, K. ; RUIZ, F. ; WIERZBICKI, A.: *Multiobjective Optimization*. Berlin : Springer, 2008, S. 27–57
- [MT06] MÜNCH, E. ; TRÄCHTLER, A.: Observation of Gradients, by Means of Algorithmic Differentiation. In: *IEEE IES 32nd Annual Conference on the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*. Paris, France, 2006, S. 4743–4748
- [MW08] MARTENSSON, K. ; WERNRUD, A.: Dynamic Model Predictive Control. In: *Proceedings of the 17th IFAC World Congress, 6.-11. Juli*. Seoul, Süd Korea, 2008, S. 13182–13187
- [Ng08] NG, W.: A special class of multiple-criterion LQ control. In: *Proceedings of the 12th WSEAS international conference on Systems*. Heraklion, Greece : World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2008. – ISBN 978–960–6766–83–1, S. 91–97
- [NM98] NIEUWSTADT, M. J. V. ; MURRAY, R. M.: Real-time trajectory generation for differentially flat systems. In: *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 8 (1998), Nr. 11, S. 995–1020
- [OG97] OLIVEIRA, M. C. ; GEROMEL, J. C.: Numerical comparison of output feedback design methods. In: *Proceedings of the 1997 American Control Conference, 4.-6. Juni* Bd. 1. Albuquerque, New Mexico, 1997, S. 72–76
- [OHK⁺02] OBERSCHELP, O. ; HESTERMAYER, T. ; KLEINJOHANN, B. ; KLEINJOHANN, L.: Design of Self-Optimizing Agent-Based Controllers. In: *CfP Workshop 2002 - Agent-Based Simulation 3*. Passau, April 2002
- [OMH⁺08] OSMIC, S. ; MÜNCH, E. ; HENKLER, S. ; SCHÄFER, W. ; GIESE, H. ; HIRSCH, M.: Safe Online-Reconfiguration of Self-Optimizing Mechatronic Systems. In: *7th International Heinz Nixdorf Symposium* Bd. 223. Paderborn : HNI-Verlagsschriftenreihe, 2008, S. 411–428
- [PAB⁺04] PENA, P. M. de la ; ALAMO, T. ; BEMPORAD, A. ; CAMACHO, E. F.: A dynamic programming approach for determining the explicit solution of linear MPC controllers. In: *IEEE Conference on Decision and Control, 14.-17. Dezember* Bd. 3, 2004. – ISBN 0–7803–8682–5, S. 2479–2484
- [PB06] PENI, T. ; BOKOR, J.: Robust Model Predictive Control for Controlling Fast Vehicle Dynamics. In: *14th Mediterranean Conference on Control and Automation, 28.-30. Juni*. Ancona, Italien : IEEE Computer Society, 2006. – ISBN 0–9786720–1–1, S. 1–5
- [PBG02] PEREZ, J. ; BUSTURIA, J. M. ; GOODALL, R. M.: Control strategies for active steering of bogie-based railway vehicles. In: *Control Engineering Practice* 10 (2002), Nr. 9, S. 1005–1012. – ISSN 0967–0661
- [PD06] PASIK-DUNCAN, B. (Hrsg.): *Stochastic Theory and Control*. Bd. 280. Berlin : Springer, 2006. – ISBN 978–3–540–43777–2
- [PMM01] PETIT, N. ; MILAM, M. B. ; MURRAY, R. M.: Inversion based constrained trajectory optimization. In: *5th IFAC Symposium on nonlinear control systems, 4.-6. Juli*. St. Petersburg, Russland, 2001
- [Pot06] POTTHARST, A.: *Energieversorgung und Leittechnik einer Anlage mit Linearmotor getriebenen Bahnfahrzeugen*, Universität Paderborn, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Dissertation, März 2006

- [Pow98] POWELL, A. J.: On The Dynamics of Actively Steered Railway Vehicles. In: *Vehicle System Dynamics* 29 (1998), S. 506–520. – ISSN 0042–3114
- [PP06] PETERSEN, K. B. ; PEDERSEN, M. S.: *The matrix cookbook*. Citeseer, 2006
- [PS93] POPP, K. ; SCHIEHLEN, W. O.: *Fahrzeugdynamik. Eine Einführung in die Dynamik des Systems Fahrzeug - Fahrweg*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 1993. – ISBN 3519023733
- [PTV⁺07] PRESS, W. H. ; TEUKOLSKY, S. A. ; VETTERLING, W. T. ; FLANNERY, B. P.: *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*. 3. Aufl. Cambridge University Press, 2007. – ISBN 0521880688
- [QB97] QIN, S. J. ; BADGWELL, T. A.: An Overview Of Industrial Model Predictive Control Technology. In: *AIChE symposium series* 93 (1997), S. 232–256
- [Ric04] RICKEN, W.: Lineare Optimierung von Parametern eines Wirbelstrom-Sensors am Beispiel der Abstandsmessung (Linear Optimisation of Parameters of an Eddy Current Sensor Used for a Displacement Measurement). In: *tm-Technisches Messen/Sensoren, Geräte, Systeme* 71 (2004), Nr. 9, S. 460–465
- [Rie07] *Kapitel Das Zusammenwirken von Rad und Schiene*. In: RIESSBERGER, K.: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007. – ISBN 978–3–540–29581–5, S. 359–393
- [RSF⁺01] RONCO, E. ; SRINIVASAN, B. ; FAVEZ, J. Y. ; BONVIN, D.: Predictive control with added feedback for fast nonlinear systems. In: *European Control Conference, 4.-7. September*. Porto, Portugal, 2001, S. 3167–3172
- [SAD94] SYRMOS, V. L. ; ABDALLAH, C. ; DORATO, P.: Static output feedback: a survey. In: *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control, 14.-16. Dez.*, 1994, S. 837–842
- [Sch01] SCHITTKOWSKI, K.: *Mathematische Grundlagen von Optimierungsverfahren / Universität Bayreuth*. 2001. – Vorlesungsskript
- [Sch06] SCHLAUTMANN, P.: *Entwicklung eines neuartigen dreidimensionalen aktiven Federungssystems für ein Schienenfahrzeug*, Universität Paderborn, RtM, Dissertation, September 2006
- [SE97] SHUST, W. C. ; ELKINS, J. A.: Wheel forces during flange climb I - Track loading vehicle tests. In: *Proceedings of the 1997 IEEE/ASME Joint Railroad Conference, 18.-20. März*. Boston, MA, USA, 1997, S. 137–147
- [Sei83] SEIFERT, A.: The experimental tilt wheel system for rail roading. In: *Proc. of the economics and performance of freight car trucks conference*. Montreal, Kanada : Railway Association of Canada, 1983, S. 307–315
- [SFB04] SFB614: *Selbstopoptimierende Systeme des Maschinenbaus / Universität Paderborn*. 2004 (2. Halbjahr 2005 bis 1. Halbjahr 2009). – DFG Finanzierungsantrag
- [SFB08] SFB614: *Selbstopoptimierende Systeme des Maschinenbaus / Universität Paderborn*. 2008 (2. Halbjahr 2009 bis 1. Halbjahr 2013). – DFG Finanzierungsantrag
- [SGH⁺09] SONDERMANN-WÖLKE, C. ; GEISLER, J. ; HIRSCH, M. ; HEMSEL, T.: Verlässlichkeit im aktiven selbstopoptimierenden Spurführungsmodul eines schienengebundenen Fahrzeugs. In: GAUSEMEIER, J. (Hrsg.) ; RAMMIG, F. J. (Hrsg.) ; SCHÄFER, W. (Hrsg.) ; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): *Entwurf mechatronischer Systeme, 2. und 3. April* Bd. 250. Paderborn : HNI-Verlagsschriftenreihe, 2009, S. 231–243
- [SGM⁺08] SONDERMANN-WÖLKE, C. ; GEISLER, J. ; MÜLLER, T. ; TRÄCHTLER, A. ; BÖCKER, J.: The active guidance module of a rail-bound vehicle as an application

- of dependability oriented design in self-optimizing systems. In: *Proceedings of the ASME 2008 - International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)*. New York, USA, August 2008, S. 1–8
- [SH09] SCHNEIDER, D. R. ; HIMMELSTEIN, D. G.: BOMBARDIER FLEXX TRONIC WAKO & ARS. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 2009 (2009), Nr. 11, S. 657–661
- [Sim06] SIMON, D.: *Optimal state estimation*. Hoboken, New Jersey : John Wiley and Sons, 2006. – ISBN 978–0–471–70858–2
- [SN99] SCHWARM, A. T. ; NIKOLAOU, M.: Chance-constrained model predictive control. In: *AIChE Journal* 45 (1999), Nr. 8, S. 1743–1752
- [Sor03] SORENSEN, D. C.: Direct methods for matrix Sylvester and Lyapunov equations. In: *Journal of Applied Mathematics* 2003 (2003), Nr. 6, S. 277–303
- [SSH⁺09] SCHNEIDER, T. ; SCHULZ, B. ; HENKE, C. ; WITTING, K. ; STEENKEN, D. ; BOCKER, J.: Energy transfer via linear doubly-fed motor in different operating modes. In: *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2009, S. 598–605
- [TL05] TODOROV, E. ; LI, W.: A generalized iterative LQG method for locally-optimal feedback control of constrained nonlinear stochastic systems. In: *Proceedings of the 2005 American Control Conference, 14.-16. Juni* Bd. 1. Minneapolis, Minnesota, 2005. – ISBN 0743–1619, S. 300–306
- [TM89] TOIVONEN, H. T. ; MÄKILÄ, P. M.: Computer-aided design procedure for multi-objective LQG - control problems. In: *International Journal of Control* 49 (1989), Nr. 2, S. 655–666. – ISSN 0020–7179
- [TMV06] TRÄCHTLER, A. ; MÜNCH, E. ; VÖCKING, H.: Iterative Learning and Self-Optimization Techniques for the Innovative Railcab-System. In: *IEEE 32nd Annual Conference on Industrial Electronics (IECON)*, 2006. – ISBN 1553–572X, S. 4683–4688
- [Toi84] TOIVONEN, H.: A multiobjective linear quadratic Gaussian control problem. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 29 (1984), Nr. 3, S. 279–280. – ISSN 0018–9286
- [Trä06] TRÄCHTLER, A.: Railcab – mit innovativer Mechatronik zum Schienenverkehrssystem der Zukunft. In: *VDE-Kongress*, 2006
- [VM06] VOSSEN, G. ; MAURER, H.: On L_1 -minimization in optimal control and applications to robotics. In: *Optimal Control Applications and Methods* 27 (2006), Nr. 6, S. 301–321
- [VPA⁺09] VRABIE, D. ; PASTRAVANU, O. ; ABU-KHALAF, M. ; LEWIS, F. L.: Adaptive optimal control for continuous-time linear systems based on policy iteration. In: *Automatica* 45 (2009), Nr. 2, S. 477–484
- [Wan09] WANG, S.: *Entwurf eines Beobachters für ein Schienenfahrzeug*, Universität Paderborn, RtM, Bachelorarbeit, Juli 2009
- [WB10] WANG, Y. ; BOYD, S.: Fast Model Predictive Control Using Online Optimization. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 18 (2010), Nr. 2, S. 267–278. – ISSN 1063–6536
- [WGL06] WICKENS, A. H. ; GOODALL, R. M. ; LI, J.: Re-evaluation of the limitations of the railway wheelset: passive and active. In: *Vehicle System Dynamics* 44 (2006), Nr. 1, S. 14–23. – ISSN 0042–3114

- [WH04] WILLS, A. G. ; HEATH, W. P.: Barrier function based model predictive control. In: *Automatica* 40 (2004), Nr. 8, S. 1415–1422
- [Wie80] *Kapitel A methodological guide to multiobjective optimization.* In: WIERZBICKI, A.: *Optimization Techniques*. Bd. 22. Berlin : Springer, 1980, S. 99–123
- [WK06] WILLIGENBURG, L. G. V. ; KONING, W. L. D.: On the synthesis of time-varying LQG weights and noises along optimal control and state trajectories. In: *Optimal Control Applications and Methods* 27 (2006), Nr. 3, S. 137–160
- [WLG⁺07] WESTON, P. ; LING, C. ; GOODMAN, C. ; ROBERTS, C. ; LI, P. ; GOODALL, R.: Monitoring lateral track irregularity from in-service railway vehicles. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 221 (2007), Nr. 1, S. 89–100. – ISSN 0954–4097
- [Wri93] WRIGHT, S. J.: Interior point methods for optimal control of discrete time systems. In: *J. Optim. Theory Appl.* 77 (1993), Nr. 1, S. 161–187
- [WSD⁺08] WITTING, K. ; SCHULZ, B. ; DELLNITZ, M. ; BÖCKER, J. ; FRÖHLEKE, N.: A new approach for online multiobjective optimization of mechatronical systems. In: *International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)* 10 (2008), Nr. 3, S. 223–231
- [Wul05] WULFF, K.: *Quadratic and Non-Quadratic Stability Criteria for Switched Linear Systems*. Maynooth, Ireland, Hamilton Institute, NUI, Diss., 2005
- [Yu04] YU, J.: A convergent algorithm for computing stabilizing static output feedback gains. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 49 (2004), Nr. 12, S. 2271–2275. – ISSN 0018–9286
- [Zob97] ZOBORY, I.: Prediction of Wheel/Rail Profile Wear. In: *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* 28 (1997), Nr. 2, S. 221. – ISSN 0042–3114

Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut acht Professoren mit insgesamt 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Etwa ein Viertel der Forschungsprojekte der Universität Paderborn entfallen auf das Heinz Nixdorf Institut und pro Jahr promovieren hier etwa 30 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: Enroute to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrows economy.

Today eight Professors and 200 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. The Heinz Nixdorf Institute accounts for approximately a quarter of the research projects of the University of Paderborn and per year approximately 30 young researchers receive a doctorate.

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 1 FAHRWINKEL, U.: Methoden zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 1, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-00-0
- Bd. 2 HORNBOSTEL, D.: Methode zur Modellierung der Informationsverarbeitung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 2, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-01-9
- Bd. 3 STEMANN, V.: Contention Resolution in Hashing Based Shared Memory Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 3, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-02-7
- Bd. 4 KETTERER, N.: Beschreibung von Datenaustausch eines verteilten Fertigungssteuerungssystems. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 4, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-03-5
- Bd. 5 HARTMANN, T.: Spezifikation und Klassifikation von Methoden zur Definition hierarchischer Abläufe. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 5, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-04-3
- Bd. 6 WACHSMANN, A.: Eine Bibliothek von Basisdiensten für Parallelrechner: Routing, Synchronisation, gemeinsamer Speicher. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 6, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-05-1
- Bd. 7 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Die Szenariotechnik – Werkzeug für den Umgang mit einer multiplen Zukunft. 1. Paderborner Szenario-Workshop, 14. November 1995, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 7, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-06-X
- Bd. 8 CZUMAJ, A.: Parallel Algorithmic Techniques: PRAM Algorithms and PRAM Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 8, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-07-8
- Bd. 9 HUMPERT, A.: Methodische Anforderungsverarbeitung auf Basis eines objektorientierten Anforderungsmodells. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 9, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-08-6
- Bd. 10 AMEUR, F.: Space-Bounded Learning Algorithms. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 10, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-09-4
- Bd. 11 PAUL, M.: Szenariobasiertes Konzipieren neuer Produkte des Maschinenbaus auf Grundlage möglicher zukünftiger Technologieentwicklungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 11, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-10-8
- Bd. 12 HOLL, F.: Ordnungsmäßigkeit von Informations- und Kommunikationssystemen. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 12, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-11-6
- Bd. 13 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): First European Workshop on Global Engineering Networking - organized by GLENNet e.V., HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 13, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-12-4
- Bd. 14 PETRI, K.: Vergleichende Untersuchung von Berechnungsmodellen zur Simulation der Dynamik von Fahrleitung-Stromabnehmer-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 14, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-13-2
- Bd. 15 LESCHKA, S.: Fallbasiertes Störungsmanagement in flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 15, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-14-0
- Bd. 16 SCHNEIDER, U.: Ein formales Modell und eine Klassifikation für die Fertigungssteuerung - Ein Beitrag zur Systematisierung der Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 16, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-15-9

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 17 FELSER, W.: Eine Methode zur Erstellung von Fertigungssteuerungsverfahren aus Bausteinen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 17, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-16-7
- Bd. 18 GAUSEMEIER, J.; ALEXANDER FINK, A.: Neue Wege zur Produktentwicklung – Erfolgspotentiale der Zukunft. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 18, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-17-5
- Bd. 19 DANGELMAIER, W.; GAUSEMEIER, J.: Fortgeschrittene Informationstechnologie in der Produktentwicklung und Fertigung. 2. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 19, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-18-3
- Bd. 20 HÜLLERMEIER, E.: Reasoning about Systems based on Incomplete and Uncertain Models. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 20, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-19-1
- Bd. 21 GAUSEMEIER, J.: International Symposium on Global Engineering Network - Antwerp, Belgium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 21, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-20-5
- Bd. 22 BURGER, A.: Methode zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in die Rechnerintegrierte Produktion. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 22, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-21-3
- Bd. 23 GAUSEMEIER, J.: Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik - Paderborner Workshop TransMechatronik. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 23, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-22-1
- Bd. 24 GERDES, K.-H.: Architekturkonzeption für Fertigungsleitsysteme der flexiblen automatischen Fertigung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 24, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-23-X
- Bd. 25 EBBESMEYER, P.: Dynamische Texturwände - Ein Verfahren zur echtzeitorientierten Bildgenerierung für Virtuelle Umgebungen technischer Objekte. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 25, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-24-8
- Bd. 26 FRANK, G.: Ein digitales Hardwaresystem zur echtzeitfähigen Simulation biologischer neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 26, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-25-6
- Bd. 27 DITTRICH, W.: Communication and I/O Efficient Parallel Data Structures. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 27, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-26-4
- Bd. 28 BÄUMKER, A.: Communication Efficient Parallel Searching. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 28, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-27-2
- Bd. 29 PINTASKE, C.: System- und Schaltungstechnik neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 29, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-28-0
- Bd. 30 HENKEL, S.: Ein System von Software-Entwurfsmustern für die Propagation von Ereignissen in Werkzeugen zur kooperativen Fabrikmodellierung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 30, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-29-9
- Bd. 31 DANGELMAIER, W.: Vision Logistik – Logistik wandelbarer Produktionsnetze. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 31, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-30-2
- Bd. 32 BREXEL, D.: Methodische Strukturmodellierung komplexer und variantenreicher Produkte des integrativen Maschinenbaus. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 32, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-31-0

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Bd. 33 HAHN, A.: Integrationsumgebung für verteilte objektorientierte Ingenieursysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 33, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-32-9</p> <p>Bd. 34 SABIN, A.: Semantisches Modell zum Aufbau von Hilfsorientierungsdiensten in einem globalen Engineering Netzwerk. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 34, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-33-7</p> <p>Bd. 35 STROTHMANN, W.-B.: Bounded Degree Spanning Trees. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 35, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-34-5</p> <p>Bd. 36 MÜLLER, W.; RAMMIG, F.-J.: Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 36, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-35-3</p> <p>Bd. 37 SCHNEIDER, W.: Anwenderorientierte Integration von CAE-Systemen. Ein Verfahren zur Realisierung eines durchgehenden Informationsflusses entlang des Produktentwicklungsprozesses. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 37, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-36-1</p> <p>Bd. 38 DEMEL, W.; SCHMITZ, G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Aachener Workshop TransMechatronik, 26. Juni 1998, Technologiezentrum am Europaplatz Aachen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 38, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-37-X</p> <p>Bd. 39 GROBBEL, R.; LANGEMANN, T.: Leitfaden PPS-Systeme: Auswahl und Einführung in der Möbelindustrie. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 39, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-38-8</p> <p>Bd. 40 REHBEIN, P.: Tribologische Untersuchung von hochfrequent schwingenden Gleitkontakten für den Einsatz in Reibkraftschlüssigen Antrieben. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 40, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-39-6</p> | <p>Bd. 41 DANGELMAIER, W.: KOMNET – Kommunikationsplattform für KMU-Netzwerke. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 41, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-40-X</p> <p>Bd. 42 KALLMEYER, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 42, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-41-8</p> <p>Bd. 43 TRAPP, R.: Stereoskopische Korrespondenzbestimmung mit impliziter Detektion von Okklusionen. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 43, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-42-6</p> <p>Bd. 44 GAUSEMEIER, J.; FINK, A.; SCHLAKE, O.: Grenzen überwinden - Zukünfte gestalten. 2. Paderborner Konferenz für Szenario-Management, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 44, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-43-4</p> <p>Bd. 45 nicht erschienen!</p> <p>Bd. 46 VÖCKING, B.: Static and Dynamic Data Management in Networks. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 46, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-45-0</p> <p>Bd. 47 SCHEKELMANN, A.: Materialflußsteuerung auf der Basis des Wissens mehrerer Experten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 47, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-46-9</p> <p>Bd. 48 GECK-MÜGGE, K.: Herleitung und Spezifikation generischer Bausteine zur einheitlichen Modellierung von Fertigungsinformationen für die Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 48, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-47-7</p> <p>Bd. 49 WALLASCHEK, J.; LÜCKEL, J.; LITTMANN, W.: Heinz Nixdorf Symposium on Mechatronics and Advanced Motion Control. 3. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 49, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-48-5</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Bezugsadresse:
 Heinz Nixdorf Institut
 Universität Paderborn
 Fürstenallee 11
 33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 50 FINK, A.: Szenariogestützte Führung industrieller Produktionsunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 50, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-49-3
- Bd. 51 HOLTkamp, R.: Ein objektorientiertes Rahmenwerk zur Erstellung individueller, verteilter Fertigungslenkungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 51, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-50-7
- Bd. 52 KUHN, A.: Referenzmodelle für Produktionsprozesse zur Untersuchung und Gestaltung von PPS-Aufgaben. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 52, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-51-5
- Bd. 53 SIEBE, A.: Systematik der Umsetzung von IT-orientierten Veränderungsprojekten in dynamischen Umfeldern. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 53, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-52-3
- Bd. 54 KLAHOLD, R. F.: Dimensionierung komplexer Produktionsnetzwerke. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 54, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-53-1
- Bd. 55 SCHÜRHOlz, A.: Synthese eines Modells zur simulationsgestützten Potentialanalyse der Distribution. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 55, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-54-X
- Bd. 56 GEHNEN, G.: Integriertes Netzwerk zur Fertigungssteuerung und –automatisierung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 56, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-55-8
- Bd. 57 KRESS, S.: Architektur eines workflow-basierten Planungsinstruments für die technische Auftragsbearbeitung unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes der Telearbeit. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 57, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-56-6
- Bd. 58 THIELEMANN, F.: Integrierte Methodik zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen mittels Workflowmanagement. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 58, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-57-4
- Bd. 59 KROME, J.: Modelle zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Statoren für piezoelektrische Ultraschall-Wanderwellen-Motoren. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 59, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-58-2
- Bd. 60 DEMEL, W.; SCHMITZ, G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Krefelder Workshop TransMechatronik, 24. August 1999 Fachhochschule Niederrhein, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 60, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-59-0
- Bd. 61 LANGEMANN, T.: Modellierung als Kernfunktion einer systemorientierten Analyse und Bewertung der diskreten Produktion. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 61, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-60-4
- Bd. 62 KÜMMEL, M.: Integration von Methoden und Werkzeugen zur Entwicklung von mechatronischen Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 62, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-61-2
- Bd. 63 LUKOVszKI, T.: New Results on Geometric Spanners and Their Applications. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 63, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-62-0
- Bd. 64 LÖFFLER, A.; MONDADA, F.; RÜCKERT, U. (Hrsg.): Experiments with the Mini-Robot Khepera, Proceedings of the 1st International Khepera Workshop. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 64, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-63-9
- Bd. 65 SCHÄFERMEIER, U.; BISCHOFF, C.: KMU-net - Ein Konzept zur ablauforganisatorischen Gestaltung der Lieferanteneinbindung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 65, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-64-7

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 66 HOLTHÖFER, N.: Regeln in einer Mengenplanung unter Ausbringungsgrenzen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 66, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-69-8
- Bd. 67 SCHLAKE, O.: Verfahren zur kooperativen Szenario-Erstellung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, 67, Paderborn, Band 2000 – ISBN 3-931466-66-3
- Bd. 68 LEWANDOWSKI, A.: Methode zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 68, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-67-1
- Bd. 69 SCHMIDTMANN, A.: Eine Spezifikations-sprache für die Fertigungslenkung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 69, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-68-X
- Bd. 70 GROBBEL, R.: Eine Referenzarchitektur für Kooperationsbörsen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 70, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-69-8
- Bd. 71 WESSEL, R.: Modelocked Waveguide Lasers in Lithium Niobate. Dissertation, Fachbereich für Physik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 71, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-70-1
- Bd. 72 LÖFFLER, A.: Energetische Modellierung neuronaler Signalverarbeitung. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 72, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931433-71-X
- Bd. 73 LUDWIG, L. A.: Computational Intelligence in der Produktionswirtschaft. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 73, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-72-8
- Bd. 74 WENSKI, R.: Eine objektorientierte Systemkomponente zur Workflow-Modellierung und -Ausführung unter besonderer Berücksichtigung der Telekooperation. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 74, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-73-6
- Bd. 75 GRASMANN, M.: Produktkonfiguration auf Basis von Engineering Data Management-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 75, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-74-4
- Bd. 76 DITZE, C.: Towards Operating System Synthesis. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 76, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-75-2
- Bd. 77 KÖRNER, T.: Analog VLSI Implementation of a Local Cluster Neural Network. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 77, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-76-0
- Bd. 78 SCHEIDELER, C.: Probabilistic Methods for Coordination Problems. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 78, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-77-9
- Bd. 79 GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.-P.: Kooperatives Produktengineering - Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-78-7
- Bd. 80 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.: Entwicklungsumgebungen Mechatronik - Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 80, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-79-5
- Bd. 81 RIEPING, I.: Communication in Parallel Systems-Models, Algorithms and Implementations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 81, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-80-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 82 GAUSEMEIER, J; LÜCKEL, J.: Auf dem Weg zu den Produkten für die Märkte von morgen. 4. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 82, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-81-7
- Bd. 83 DEL CASTILLO, G.: The ASM Workbench - A Tool Environment for Computer-Aided Analysis and Validation of Abstract State Machine Models. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 83, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-82-5
- Bd. 84 SCHÄFERMEIER, U.: Eine Methode zur systemorientierten organisatorischen Gestaltung der Zweckaufgabenverrichtung in kooperativen Verbänden; Klassifikation, Aufgabenzuordnung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 84, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-83-3
- Bd. 85 KRÜGER, J.: Ganzheitliche Beherrschung von Abläufen in und zwischen soziotechnischen Systemen: Ein Beitrag zur Modellbildung und zum paradigmatischen Verständnis von Industrieunternehmen zur Integration von Mensch und Maschine; Prozess und Struktur. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 85, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-84-1
- Bd. 86 BARTSCHER, T.: Methoden des Integrierten Workflowmanagements (IWFm). Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 86, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-85-X
- Bd. 87 QUINTANILLA, J.: Ein Verifikationsansatz für eine netzbasierte Modellierungsmethode für Fertigungssteuerungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 87, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-86-8
- Bd. 88 PREIS, R.: Analyses and Design of Efficient Graph Partitioning Methods. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 88, Paderborn, 2001 – ISBN 3-931466-87-6
- Bd. 89 nicht erschienen!
- Bd. 90 WESTERMANN, M.: Caching in Networks: Non-Uniform Algorithms and Memory Capacity Constraints. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 90, Paderborn, 2001 – ISBN 3-931466-89-2
- Bd. 91 LEMKE, J.: Nutzenorientierte Planung des Einsatzes von CAD- / CAE-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 91, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-00-X
- Bd. 92 VON BOHUSZEWICZ, O.: Eine Methode zur Visualisierung von Geschäftsprozessen in einer virtuellen Umgebung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 92, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-01-8
- Bd. 93 BÖRNCHEN, T.: Zur Entwicklung dynamischer Komponenten für variables Kraftfahrzeug-Scheinwerferlicht. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 93, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-02-6
- Bd. 94 WINDELER, I.: Auswahl von Restrukturierungsprojekten in Forschungs- und Entwicklungsorganisationen der Automobilindustrie. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 94, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-03-4
- Bd. 95 WOLFF, C.: Parallele Simulation großer pulscodierter neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 95, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-04-2
- Bd. 96 HENKE, A.: Modellierung, Simulation und Optimierung piezoelektrischer Stellsysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 96, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-05-0
- Bd. 97 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U. (Hrsg.): Autonomous Minirobots for Research and Edutainment AMiRE2001. 5. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 97, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-06-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 98 LI, P.: Datenkonversion für den Datenaustausch in verteilten Fertigungslenkungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 98, Paderborn, 2001 – ISBN 9-935433-07-7
- Bd. 99 BRANDT, C.: Eine modellbasierte Methode zum strukturierten Entwurf virtueller Umgebungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 99, Paderborn, 2001 – ISBN 9-935433-08-5
- Bd. 100 WLEKLINSKI, C.: Methode zur Effektivitäts- und Effizienzbewertung der Entwicklung maschinenbaulicher Anlagen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 100, Paderborn, 2001 – ISBN-3-935433-09-3
- Bd. 101 HEMSEL, T.: Untersuchung und Weiterentwicklung linearer piezoelektrischer Schwingungsantriebe. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 101, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-10-7
- Bd. 102 MAUERMANN, H.: Leitfaden zur Erhöhung der Logistikqualität durch Analyse und Neugestaltung der Versorgungsketten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 102, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-11-5
- Bd. 103 WAGENBLAßT, D.: Eine Analysemethode zur Beurteilung der Funktionssicherheit von gemischt analog-digitalen Schaltungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 103, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-12-3
- Bd. 104 PORRMANN, M.: Leistungsbewertung eingebetteter Neurocomputersysteme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 104, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-13-1
- Bd. 105 SEIFERT, L.: Methodik zum Aufbau von Informationsmodellen für Electronic Business in der Produktentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 105, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-14-X
- Bd. 106 SOETEBEER, M.: Methode zur Modellierung, Kontrolle und Steuerung von Produktstrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 106, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-15-8
- Bd. 107 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 107, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-16-6
- Bd. 108 FLATH, M.: Methode zur Konzipierung mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 108, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-17-4
- Bd. 109 AVENARIUS, J.: Methoden zur Suche und Informationsbereitstellung von Lösungselementen für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 109, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-18-2
- Bd. 110 HELMKE, S.: Eine simulationsgegestützte Methode für Budgetentscheidungen im Kundenbindungsmanagement. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 110, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-19-0
- Bd. 111 CZUBAYKO, R.: Rechnerinterne Repräsentation von informationsverarbeitenden Lösungselementen für die verteilte kooperative Produktentwicklung in der Mechatronik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 111, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-20-4
- Bd. 112 GOLDSCHMIDT, S.: Anwendung mengenorientierter numerischer Methoden zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme am Beispiel der Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 112, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-21-2

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 113 LEHMANN, T.: Towards Device Driver Synthesis. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 113, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-22-0
- Bd. 114 HÄRTEL, W.: Issueorientierte Frühaufklärung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 114, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-23-9
- Bd. 115 ZIEGLER, M.: Zur Berechenbarkeit reeller geometrischer Probleme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 115, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-24-7
- Bd. 116 SCHMIDT, M.: Neuronale Assoziativspeicher im Information Retrieval. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 116, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-25-5
- Bd. 117 EL-KEBBE, D. A.: Towards the MaSHReC Manufacturing System under Real-Time Constraints. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 117, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-26-3
- Bd. 118 PUSCH, R.: Personalplanung und -entwicklung in einem integrierten Vorgehensmodell zur Einführung von PDM-Systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 118, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-27-1
- Bd. 119 SOHLER, C.: Property Testing and Geometry. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 119, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-28-X
- Bd. 120 KESPOHL, H.: Dynamisches Matching – Ein agentenbasiertes Verfahren zur Unterstützung des Kooperativen Produktengineering durch Wissens- und Technologietransfer. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 120, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-29-8
- Bd. 121 MOLT, T.: Eine domänenübergreifende Softwarespezifikationstechnik für automatisierte Fertigungsanlagen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 121, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-30-1
- Bd. 122 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 122, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-31-X
- Bd. 123 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 123, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-32-8
- Bd. 124 LITTMANN, W.: Piezoelektrische resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler mit nichtlinearen mechanischen Randbedingungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 124, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-33-6
- Bd. 125 WICKORD, W.: Zur Anwendung probabilistischer Methoden in den frühen Phasen des Systementwurfs. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 125, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-34-4
- Bd. 126 HEITTMANN, A.: Ressourceneffiziente Architekturen neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 126, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-35-2
- Bd. 127 WITKOWSKI, U.: Einbettung selbstorganisierender Karten in autonome Miniroboter. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 127, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-36-0
- Bd. 128 BOBDA, C.: Synthesis of Dataflow Graphs for Reconfigurable Systems using Temporal Partitioning and Temporal Placement. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 128, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-37-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 129 HELLER, F.: Wissensbasiertes Online-Störungsmanagement flexibler, hoch automatisierter Montagesysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 129, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-38-7
- Bd. 130 KÜHN, A.: Systematik des Ideenmanagements im Produktentstehungsprozess. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 130, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-39-5
- Bd. 131 KEIL-SLAWIK, R.; BRENECKE, A.; HOHENHAUS, M.: ISIS -Installationshandbuch für lernförderliche Infrastrukturen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 131, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-40-9
- Bd. 132 OULD HAMADY, M.: Ein Ansatz zur Gestaltung des operativen Fertigungsmanagements innerhalb der Lieferkette. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 132, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-41-7
- Bd. 133 HOLTZ, C.: Theoretical Analysis of Unsupervised On-line Learning through Soft Competition. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 133, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-42-5
- Bd. 134 UEBEL, M.: Ein Modell zur Steuerung der Kundenbearbeitung im Rahmen des Vertriebsmanagements. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 134, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-43-3
- Bd. 135 BRINKMANN, A.: Verteilte Algorithmen zur Datenplatzierung und zum Routing in gegnerischen Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 135, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-44-1
- Bd. 136 FRÜND, E.: Aktive Kompensation von periodischen Schwingungen an rotierenden Walzen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 136, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-45-X
- Bd. 137 KEIL-SLAWIK, R. (Hrsg.): Digitale Medien in der Hochschule: Infrastrukturen im Wandel. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 137, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-46-8
- Bd. 138 STORCK, H.: Optimierung der Kontaktvorgänge bei Wanderwellenmotoren. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 138, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-47-6
- Bd. 139 KALTE, H.: Einbettung dynamisch rekonfigurierbarer Hardwarearchitekturen in eine Universalprozessorumgebung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 139, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-48-4
- Bd. 140 ISKE, B.: Modellierung und effiziente Nutzung aktiver Infrarotsensorik in autonomen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 140, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-49-2
- Bd. 141 BÄTZEL, D.: Methode zur Ermittlung und Bewertung von Strategiealternativen im Kontext Fertigungstechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 141, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-50-6
- Bd. 142 BÖKE, C.: Automatic Configuration of Real-Time Operating Systems and Real-Time Communication Systems for Distributed Embedded Applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 142, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-51-4
- Bd. 143 KÖCKERLING, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 143, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-52-2
- Bd. 144 HENZLER, S.: Methodik zur Konzeption der Struktur und der Regelung leistungsverzweigter Getriebe mit Toroidvariator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 144, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-53-0

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 145 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 145, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-54-9
- Bd. 146 LESSING, H.: Prozess zur multivariaten Prognose von Produktionsprogrammen für eine effiziente Kapazitätsplanung bei typisierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 146, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-55-7
- Bd. 147 HAMOUDIA, H.: Planerische Ablaufgestaltung bei prozessorientierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 147, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-56-5
- Bd. 148 BUSCH, A.: Kollaborative Änderungsplanung in Unternehmensnetzwerken der Serienfertigung – ein verhandlungsbasierter Ansatz zur interorganisationalen Koordination bei Störungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 148, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-57-3
- Bd. 149 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 149, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-58-1
- Bd. 150 MEYER, B.: Value-Adding Logistics for a World Assembly Line. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 150, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-59-X
- Bd. 151 GRIENITZ, V.: Methodik zur Erstellung von Technologieszenarien für die strategische Technologieplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 151, Paderborn, 2004 – ISBN 3-9354 33-60-3
- Bd. 152 FRANKE, H.: Eine Methode zur unternehmensübergreifenden Transportdisposition durch synchron und asynchron kommunizierende Agenten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 152, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-61-1
- Bd. 153 SALZWEDEL, K. A.: Data Distribution Algorithms for Storage Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 153, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-62-X
- Bd. 154 RÄCKE, H.: Data Management and Routing in General Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 154, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-63-8
- Bd. 155 FRANK, U.; GIESE, H.; KLEIN, F.; OBERSCHELP, O.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITTING, K.; GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 155, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-64-6
- Bd. 156 MÖHRINGER, S.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Habilitation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 156, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-65-4
- Bd. 157 FAHRENTHOLZ, M.: Konzeption eines Betriebskonzepts für ein bedarfsgesteuertes schienengebundenes Shuttle-System. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 157, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-66-2
- Bd. 158 GAJEWSKI, T.: Referenzmodell zur Beschreibung der Geschäftsprozesse von After-Sales-Dienstleistungen unter besonderer Berücksichtigung des Mobile Business. Dissertation Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 158, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-67-0
- Bd. 159 RÜTHER, M.: Ein Beitrag zur klassifizierenden Modularisierung von Verfahren für die Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 159, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-68-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 160 MUECK, B.: Eine Methode zur benutzerstimulierten detaillierungsvarianten Berechnung von diskreten Simulationen von Materialflüssen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, , Band 160, Paderborn 2004 – ISBN 3-935433-69-7
- Bd. 161 LANGEN, D.: Abschätzung des Ressourcenbedarfs von hochintegrierten mikroelektronischen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 161, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-70-0
- Bd. 162 ORLIK, L.: Wissensbasierte Entscheidungshilfe für die strategische Produktplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 162, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-71-9
- Bd. 163 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 163, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-72-7
- Bd. 164 FISCHER, M.: Design, Analysis, and Evaluation of a Data Structure for Distributed Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 164, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-73-5
- Bd. 165 MATYSCZOK, C.: Dynamische Kantenextraktion - Ein Verfahren zur Generierung von Tracking-Informationen für Augmented Reality-Anwendungen auf Basis von 3D-Referenzmodellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 165, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-74-3
- Bd. 166 JANIA, T.: Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 166, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-75-1
- Bd. 167 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-76-X
- Bd. 168 VOLBERT, K.: Geometric Spanners for Topology Control in Wireless Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 168, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-77-8
- Bd. 169 ROSLAK, J.: Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraumes. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-78-6
- Bd. 170 EMMRICH, A.: Ein Beitrag zur systematischen Entwicklung produktorientierter Dienstleistungen für. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 170, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-79-4
- Bd. 171 NOWACZYK, O.: Explorationen: Ein Ansatz zur Entwicklung hochgradig interaktiver Lernbausteine. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 171, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-80-8
- Bd. 172 MAHMOUD, K.: Theoretical and experimental investigations on a new adaptive duo servo drum brake with high and constant brake shoe factor. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 172, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-81-6
- Bd. 173 KLIEWER, G.: Optimierung in der Flugplanung: Netzwerkentwurf und Flottenzuweisung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 173, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-82-4
- Bd. 174 BALÁŽOVÁ, M.: Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 174, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-83-2
- Bd. 175 FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-84-0

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 176 BERGER, T.: Methode zur Entwicklung und Bewertung innovativer Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 176, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-85-9
- Bd. 177 BERSSENBRÜGGE, J.: Virtual Nightdrive - Ein Verfahren zur Darstellung der komplexen Lichtverteilungen moderner Scheinwerfersysteme im Rahmen einer virtuellen Nachtfahrt. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 177, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-86-7
- Bd. 178 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 1. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 3. und 4. November 2005, Schloß Neuhardenberg, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 178, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-87-5
- Bd. 179 FU, B.: Piezoelectric actuator design via multiobjective optimization methods. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 179, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-88-3
- Bd. 180 WALLASCHEK, J.; HEMSEL, T.; MRACEK, M.: Proceedings of the 2nd International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 180, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-89-1
- Bd. 181 MEYER AUF DER HEIDE, F.; MONIEN, B. (Hrsg.): New Trends in Parallel & Distributed Computing. 6. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 17. und 18. Januar 2006, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 181, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-00-1
- Bd. 182 HEIDENREICH, J.: Adaptierbare Änderungsplanung der Mengen und Kapazitäten in Produktionsnetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 182, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-01-X
- Bd. 183 PAPE, U.: Umsetzung eines SCM-Konzeptes zum Liefermanagement in Liefernetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 183, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-02-8
- Bd. 184 BINGER, V.: Konzeption eines wissensbasierten Instruments für die strategische Vorausschau im Kontext der Szenariotechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 184, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-03-6
- Bd. 185 KRIESEL, C.: Szenarioorientierte Unternehmensstrukturoptimierung – Strategische Standort- und Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 185, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-04-4
- Bd. 186 KLEIN, J.: Efficient collision detection for point and polygon based models. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 186, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-05-2
- Bd. 187 WORTMANN, R.: Methodische Entwicklung von Echtzeit 3D-Anwendungen für Schulung und Präsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 187, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-06-0
- Bd. 188 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 188, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-07-9
- Bd. 189 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 189, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-08-7
- Bd. 190 DAMEROW, V.: Average and Smoothed Complexity of Geometric Structures. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 190, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-09-5
- Bd. 191 GIESE, H.; NIGGEMANN, O. (Hrsg.): Postworkshop Proceedings of the 3rd Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER 3), HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 191, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-10-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 192 RADKOWSKI, R.: Anwendung evolutionärer Algorithmen zur Unterstützung des Entwurfs selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 192, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-11-7
- Bd. 193 SHEN, Q.: A Method for Composing Virtual Prototypes of Mechatronic Systems in Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 193, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-12-5
- Bd. 194 REDENIUS, A.: Verfahren zur Planung von Entwicklungsprozessen für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 194, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-13-3
- Bd. 195 KUHL, P.: Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichtes an den vertikalen Straßenverlauf. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 195, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-14-1
- Bd. 196 MICHELS, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 196, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-15-X
- Bd. 197 RIPS, S.: Adaptive Steuerung der Lastverteilung datenparalleler Anwendungen in Grid-Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 197, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-16-8
- Bd. 198 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 2. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 9. und 10. November 2006, Schloß Neuhardenberg, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 198, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-17-6
- Bd. 199 FRANKE, W.: Wiederverwendungsorientierte Herleitung von Inter-Fachkomponentenkonzepten für Lagerverwaltungssysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 199, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-18-7
- Bd. 200 SCHEIDELER, P.: Ein Beitrag zur erfahrungsbasierten Selbstoptimierung einer Menge technisch homogener fahrerloser Fahrzeuge. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 200, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-19-4
- Bd. 201 KÖSTERS, C.: Ein ontologiebasiertes Modell zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem unter besonderer Berücksichtigung einer diskreten Produktion. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 201, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-20-0
- Bd. 202 HALFMEIER, S.: Modellierung und Regelung von Halbtoroidvariationen in leistungsverzweigten Getriebestrukturen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 202, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-21-7
- Bd. 203 RÜHRUP, S.: Position-based Routing Strategies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 203, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-22-4
- Bd. 204 SCHMIDT, A.: Wirkmuster zur Selbstoptimierung – Konstrukte für den Entwurf selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 204, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-23-1
- Bd. 205 IHMOR, S.: Modeling and Automated Synthesis of Reconfigurable Interfaces. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 205, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-24-8
- Bd. 206 ECKES, R.: Augmented Reality – basiertes Verfahren zur Unterstützung des Anlaufprozesses von automatisierten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 206, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-25-5

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 207 STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 207, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-26-2
- Bd. 208 LAROQUE, C.: Ein mehrbenutzerfähiges Werkzeug zur Modellierung und richtungsoffenen Simulation von wahlweise objekt- und funktionsorientiert gegliederten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 208, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-27-9
- Bd. 209 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 209, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-28-6
- Bd. 210 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 210, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-29-3
- Bd. 211 KAUSCHKE, R.: Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 211, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-30-9
- Bd. 212 DU, J.: Zellen-basierte Dienst-Entdeckung für Roboternetzwerke. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 212, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-31-6
- Bd. 213 DANNE, K.: Real-Time Multitasking in Embedded Systems Based on Reconfigurable Hardware. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 213, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-32-3
- Bd. 214 EICKHOFF, R.: Fehlertolerante neuronale Netze zur Approximation von Funktionen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 214, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-33-0
- Bd. 215 KÖSTER, M.: Analyse und Entwurf von Methoden zur Ressourcenverwaltung partiell rekonfigurierbarer Architekturen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 215, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-34-7
- Bd. 216 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U.: Proceedings of the 4th International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment – AMiRE2007. Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 216, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-35-4
- Bd. 217 PHAM VAN, T.: Proactive Ad Hoc Devices for Relaying Real-Time Video Packets. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 217, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-36-1
- Bd. 218 VIENENKÖTTER, A.: Methodik zur Entwicklung von Innovations- und Technologie-Roadmaps. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 218, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-37-8
- Bd. 219 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 3. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 29. und 30. November 2007, Miele & Cie. KG Gütersloh, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 219, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-38-5
- Bd. 220 FRÜND, J.: Eine Architekturnkonzeption für eine skalierbare mobile Augmented Reality Anwendung für die Produktpräsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 220, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-39-2
- Bd. 221 PEITZ, T.: Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 221, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-40-8

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 222 MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): The European Integrated Project "Dynamically Evolving, Large Scale Information Systems (DELIS)", Proceedings of the Final Workshop, Barcelona, February 27-28, 2008, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 222, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-41-5
- Bd. 223 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Self-optimizing Mechatronic Systems: Design the Future. 7. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 20. und 21. Februar 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 223, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-42-2
- Bd. 224 RATH, M.: Methode zur Entwicklung hybrider Technologie- und Innovationsstrategien – am Beispiel des Automobils. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 224, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-43-9
- Bd. 225 GRÜNEWALD, M.: Protokollverarbeitung mit integrierten Multiprozessoren in drahtlosen Ad-hoc-Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 225, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-44-6
- Bd. 226 STRAUSS, S.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 226, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-45-3
- Bd. 227 ZEIDLER, C.: Systematik der Materialflussplanung in der frühen Phase der Produktionssystementwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 227, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-46-0
- Bd. 228 PARISI, S.: A Method for the intelligent Authoring of 3D Animations for Training and Maintenance. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 228, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-47-7
- Bd. 229 DITTMANN, F.: Methods to Exploit Reconfigurable Fabrics. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 229, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-48-4
- Bd. 230 TONIGOLD, C.: Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung als Bestandteile der Anpassungsplanung von spanenden Fertigungssystemen in der Fließfertigung von Aggregaten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 230, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-49-1
- Bd. 231 BRANDT, T.: A Predictive Potential Field Concept for Shared Vehicle Guidance. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 231, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-50-7
- Bd. 232 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 232, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-51-4
- Bd. 233 CHANG, H.: A Methodology for the Identification of Technology Indicators. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 233, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-52-1
- Bd. 234 ADEL, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; TSCHUSCHNER, T.; VÖCKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSHCHYKOV, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-53-8

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 235 DELL'AERE, A.; HIRSCH, M.; KLÖPPER, B.; KOESTER, M.; KRÜGER, M.; KRUPP, A.; MÜLLER, T.; OBERTHÜR, S.; POOK, S.; PRIESTERJAHN, C.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; TICHY, M.; VÖCKING, H.; ZIMMER, D.: Verlässlichkeit selbstoptimierender Systeme – Potenziale nutzen und Risiken vermeiden. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 235, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-54-5
- Bd. 236 GEHRKE, M.; GIESE, H.; STROOP J.: Proceedings of the 4th Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER4), Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 236, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-55-2
- Bd. 237 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 4. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 30. und 31. Oktober 2008, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 237, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-56-9
- Bd. 238 BRÖKELMANN, M.: Entwicklung einer Methodik zur Online-Qualitätsüberwachung des Ultraschall-Drahtbondprozesses mittels integrierter Mikrosensorik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 238, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-57-6
- Bd. 239 KETTELHOIT, B.: Architektur und Entwurf dynamisch rekonfigurierbarer FPGA-Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 239, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-58-3
- Bd. 240 ZAMBALDI, M.: Concepts for the development of a generic Multi-Level Test Bench covering different areas of applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 240, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-59-0
- Bd. 241 OBERSCHELP, O.: Strukturierter Entwurf selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 241, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-60-6
- Bd. 242 STOLLT, G.: Verfahren zur strukturierten Vorausschau in globalen Umfeldern produzierender Unternehmen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 242, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-61-3
- Bd. 243 WENZELMANN, C.: Methode zur zukunftsorientierten Entwicklung und Umsetzung von Strategieoptionen unter Berücksichtigung des antizipierten Wettbewerbsverhaltens. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 243, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-62-0
- Bd. 244 BRÜSEKE, U.: Einsatz der Bibliometrie für das Technologiemanagement. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 244, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-63-7
- Bd. 245 TIMM, T.: Ein Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 245, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-64-4
- Bd. 246 GRIESE, B.: Adaptive Echtzeitkommunikationsnetze. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 246, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-65-1
- Bd. 247 NIEMANN, J.-C.: Ressourceneffiziente Schaltungstechnik eingebetteter Parallelrechner. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 247, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-66-8
- Bd. 248 KAISER, I.: Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 248, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-67-5

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 249 GANS, J. E.: Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 249, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-68-2
- Bd. 250 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 250, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-69-9
- Bd. 251 LESSMANN, J.: Protocols for Telephone Communications in Wireless Multi-Hop Ad Hoc Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 251, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-70-5
- Bd. 252 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 252, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-71-2
- Bd. 253 KLÖPPER, B.: Ein Beitrag zur Verhaltensplanung für interagierende intelligente mechatronische Systeme in nicht-deterministischen Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 253, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-72-9
- Bd. 254 Low, C. Y.: A Methodology to Manage the Transition from the Principle Solution towards the Controller Design of Advanced Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 254, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-73-6
- Bd. 255 XU, F.: Resource-Efficient Multi-Antenna Designs for Mobile Ad Hoc Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 255, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-74-3
- Bd. 256 MÜLLER, T.: Integration von Verlässlichkeitsanalysen und -konzepten innerhalb der Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 256, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-75-0
- Bd. 257 BONORDEN, O.: Versatility of Bulk Synchronous Parallel Computing: From the Heterogeneous Cluster to the System on Chip. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 257, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-76-7
- Bd. 258 KORTENJAN, M.: Size Equivalent Cluster Trees - Rendering CAD Models in Industrial Scenes. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 258, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-77-4
- Bd. 259 SCHOMAKER, G.: Distributed Resource Allocation and Management in Heterogeneous Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 259, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-78-1
- Bd. 260 MENSE, M.: On Fault-Tolerant Data Placement in Storage Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 260, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-79-8
- Bd. 261 LÜRWER-BRÜGGEMEIER, K.: Mächtigkeit und Komplexität von Berechnungen mit der ganzzahligen Division. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 261, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-80-4
- Bd. 262 ALTEMEIER, S.: Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie unter expliziter Berücksichtigung des Unterstützereinsatzes und unterschiedlicher Planungszeiträume. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 262, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-81-1

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 263 MAHAJAN, K.: A combined simulation and optimization based method for predictive-reactive scheduling of flexible production systems subject to execution exceptions. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 263, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-82-8
- Bd. 264 CHRISTIANSEN, S. K.: Methode zur Klassifikation und Entwicklung reifegradbasierter Leistungsbewertungs- und Leistungssteigerungsmodelle. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 264, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-83-5
- Bd. 265 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 5. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 19. und 20. November 2009, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 265, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-84-2
- Bd. 266 KAULMANN, T.: Ressourceneffiziente Realisierung Pulsmoderter Neuronaler Netze. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 266, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-85-9
- Bd. 267 WEHRMEISTER, M. A.: An Aspect-Oriented Model-Driven Engineering Approach for Distributed Embedded Real-Time Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 267, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-86-6
- Bd. 268 DANNE, C.: Assessing the Cost of Assortment Complexity in Consumer Goods Supply Chains by Reconfiguration of Inventory and Production Planning Parameters in Response to Assortment Changes. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 268, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-87-3
- Bd. 269 AUFENANGER, M.: Situativ trainierte Regeln zur Ablaufsteuerung in Fertigungssystemen und ihre Integration in Simulationssysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 269, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-88-0
- Bd. 270 STOLL, K.: Planung und Konzipierung von Marktleistungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 270, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-89-7
- Bd. 271 IHMELS, S.: Verfahren zur integrierten informationstechnischen Unterstützung des Innovationsmanagements. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 271, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-90-3
- Bd. 272 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-91-0
- Bd. 273 PURNAPRAJNA, M.: Run-time Reconfigurable Multiprocessors. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 273, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-92-7
- Bd. 274 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 274, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-93-4
- Bd. 275 WEDMAN, S.: Lebensdauerüberwachung in mechatronischen Systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 275, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-94-1
- Bd. 276 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 6. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 28. und 29. Oktober 2010, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 276, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-95-8

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 277 HUBER, D.: Geregelt Vereinfachung hierarchischer Partitionen von Modellen in der Materialflusssimulation. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 277, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-96-5
- Bd. 278 DEGENER, B.: Local, distributed approximation algorithms for geometric assignment problems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 278, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-97-2
- Bd. 279 WARKENTIN, A.: Systematik zur funktionsorientierten Modellierung von Elektrik/Elektronik-Systemen über den Produktlebenszyklus. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 279, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-98-9
- Bd. 280 BRINK, V.: Verfahren zur Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 280, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-99-6
- Bd. 281 SAMARA, S.: Adaptable OS Services for Distributed Reconfigurable Systems on Chip. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 281, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-00-7
- Bd. 282 BIENKOWSKI, M.: Page migration in dynamic networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 282, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-01-4
- Bd. 283 MAHLMANN, P.: Peer-to-peer networks based on random graphs. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 283, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-02-1
- Bd. 284 DYNIA, M.: Collective graph exploration. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 284, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-03-8
- Bd. 285 POHL, C.: Konfigurierbare Hardwarebeschleuniger für selbst-organisierende Karten. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 285, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-04-5
- Bd. 286 DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-05-2
- Bd. 287 MEHLER, J.: Power-Aware Online File Allocation in Dynamic Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 287, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-06-9
- Bd. 288 HARCHENKO, J.: Mechatronischer Entwurf eines neuartigen aktiven Fahrzeuffederungssystems für PKW unter Verwendung einer reversierbaren Flügelzellenpumpe. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 288, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-07-6
- Bd. 289 KORZENIOWSKI, M.: Dynamic Load Balancing in Peer-to-Peer Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 289, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-08-3
- Bd. 290 FRAHLING, G.: Algorithms for Dynamic Geometric Data Streams. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 290, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-09-0
- Bd. 291 REYES PÉREZ, M.: A Specification Technique for the Conceptual Design of Manufacturing Systems. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 291, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-10-6

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 292 STEHR, J.: On the design and implementation of reliable and economical telematics software architectures for embedded systems: a domain-specific framework. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 292, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-11-3
- Bd. 293 KRÖL, R.: Eine Reduktionsmethode zur Ableitung elektromechanischer Ersatzmodelle für piezoelektrische Wandler unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 293, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-12-0
- Bd. 294 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-13-7
- Bd. 295 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): 10. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 295, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-14-4
- Bd. 296 POOK, S.: Eine Methode zum Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 296, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-15-1
- Bd. 297 MRACEK, M.: Untersuchung des dynamischen Verhaltens gekoppelter piezoelektrischer Ultraschallmotoren mit Stoßkontakt. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 297, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-16-8
- Bd. 298 GEHWEILER, J.: Peer-to-Peer Based Parallel Web Computing. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 298, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-17-5
- Bd. 299 BRUNS, T.: Trajektorienplanung mittels Diskretisierung und kombinatorischer Optimierung am Beispiel des autonomen Kreuzungsmanagements für Kraftfahrzeuge. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 299, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-18-2
- Bd. 300 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 7. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 24. und 25. November 2011, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 300, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-19-9
- Bd. 301 SALFELD, M.: Konzeption eines Regelungssystems zur gezielten Beeinflussung der Fahrdynamik in Unfallsituationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 301, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-20-5
- Bd. 302 KEMPKES, B.: Local Strategies for Robot Formation Problems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 302, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-21-2
- Bd. 303 DELIUS, R.: Sicherstellen der Abrufe bei Automotive-Zulieferern mit minimalen Kosten unter besonderer Berücksichtigung von Liquiditäts-, Beschäftigungs-, Knowhow- und IT-Restriktionen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 303, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-22-9
- Bd. 304 NORDSIEK, D.: Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinzipiöfung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 304, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-23-6
- Bd. 305 KREFT, S.: Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 305, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-24-3

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 306 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 8. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 6. und 7. Dezember 2012, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 306, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-25-0
- Bd. 307 REYMANN, F.: Verfahren zur Strategieentwicklung und -umsetzung auf Basis einer Retropolation von Zukunftsszenarien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 307, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-26-7
- Bd. 308 KAHL, S.: Rahmenwerk für einen selbst-optimierenden Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 308, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-27-4
- Bd. 309 WASSMANN, H.: Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 309, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-28-1
- Bd. 310 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-29-8
- Bd. 311 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): 11. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 311, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-30-4
- Bd. 312 BENSIEK, T.: Systematik zur reifegradbasierten Leistungsbewertung und -steigerung von Geschäftsprozessen im Mittelstand. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 312, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-31-1
- Bd. 313 KOKOSCHKA, M.: Verfahren zur Konzipierung imitationsgeschützter Produkte und Produktionssysteme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 313, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-32-8
- Bd. 314 VON DETTEN, M.: Reengineering of Component-Based Software Systems in the Presence of Design Deficiencies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 314, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-33-5
- Bd. 315 MONTEALEGRE AGRAMONT, N. A.: Immunorepairing of Hardware Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 315, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-34-2
- Bd. 316 DANGELMAIER, W.; KLAAS, A.; LAROQUE, C.: Simulation in Produktion und Logistik 2013. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 316, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-35-9
- Bd. 317 PRIESTERJAHN, C.: Analyzing Self-healing Operations in Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 317, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-36-6
- Bd. 318 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 9. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 5. und 6. Dezember 2013, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 318, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-37-3
- Bd. 319 GAUSEMEIER, S.: Ein Fahrerassistenzsystem zur prädiktiven Planung energie- und zeitoptimaler Geschwindigkeitsprofile mittels Mehrzieloptimierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 319, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-38-0