

Methoden und Implementierung einer vorausschauenden Fahrwerksregelung für aktive und semi-aktive Federungssysteme

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte
Abhandlung

von

Christoph Göhrle
geboren in Marktoberdorf

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann

Tag der mündlichen Prüfung: 03.03.2014

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2014

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 19

Christoph Göhrle

**Methoden und Implementierung einer voraus-
schauenden Fahrwerksregelung für aktive und
semi-aktive Federungssysteme**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2746-4

ISSN 1863-9046

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart und innerhalb eines dreijährigen Kooperationsprojektes mit der AUDI AG entstanden.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Oliver Sawodny für die zielorientierte Betreuung am Institut für Systemdynamik sowie für die schnelle Korrektur meiner Doktorarbeit. Dasselbe gilt ebenso für Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann, ebenfalls herzlichen Dank für die Begleitung über die gesamte Projektdauer.

Während den drei Jahren konnte ich die halbe Woche das hervorragende und produktive Arbeitsklima am Institut für Systemdynamik genießen und möchte neben den weiteren Mitarbeitern Dr.-Ing. Eckhard Arnold für die Unterstützung bei der Optimierung, Dr.-Ing. Ronny Feuer für die Nachhilfe in Statistik, Dr.-Ing. Alexander Lutz und Dipl.-Ing. Axel Lachmeyer für die Diskussionen über verschiedene Filterverfahren sowie Dipl.-Ing. Marcus Sonntag für das Korrekturlesen des Manuskripts danken. Des Weiteren gilt mein herzlicher Dank den von mir betreuten Studenten für das motivierte und gewissenhafte Anfertigen von Studienarbeiten.

Außerdem war es mir vergönnt, von einem hervorragenden und freundschaftlichen Team bei der AUDI AG betreut und unterstützt zu werden. Hierbei gilt mein besonderer Dank meinem Betreuer Dr.-Ing. Andreas Schindler für das hochinteressante und für eine Promotion hervorragend geeignete Forschungsprojekt, für die Betreuung während den drei Jahren und für die Organisation der notwendigen Rahmenbedingungen. Des Weiteren gilt mein herzlicher Dank den Regelungsexperten Dipl.-Ing. Uli Schaaf und Dr.-Ing. Andreas Unger für die jederzeit offene und sehr hilfreiche fachliche Unterstützung. Zudem herzlichen Dank an Dipl.-Ing. Heiner Beringer für das sukzessive Einbauen immer weiterer neuer Rechner und das stetige und zuverlässige Reparieren des guten alten Testfahrzeugs. Mein herzlicher Dank gilt des Weiteren meinem Abteilungsleiter im Bereich Vorentwicklung Fahrwerk, Dr.-Ing. Andreas Wagner, und dem Leiter der Vorentwicklung Fahrwerk, Dr.-Ing. Armin Schöpfel, für die mir überlassenen Freiheiten zur Durchführung meines Promotionsprojektes. Es waren drei interessante und abwechslungsreiche Jahre als Doktorand in der Vorentwicklung Fahrwerk.

Zudem möchte ich mich herzlich bei meinen Eltern und meinen Geschwistern für die allzeitige Unterstützung auf meinem Lebensweg bedanken.

Et finalement, merci beaucoup à toi, Myriam. Ton esprit positif m'a toujours aidé et nos vacances étaient toujours une bonne diversion pendant ma thèse.

Und nun freue ich mich, wenn Sie in meiner Dissertation lesen.

Ingolstadt, im März 2014

Christoph Göhrle

Kurzfassung

Die Automobilindustrie ist für den Wirtschaftsstandort Deutschland und auch innerhalb der Europäischen Union ein wichtiger Arbeitgeber und mitverantwortlich für wirtschaftliche Stärke und Wohlstand in Deutschland und Europa. Vor allem die deutschen Hersteller sind international anerkannt für hochwertige und innovative Fahrzeuge im Oberklasse-Segment. Um diesen Vorsprung zu erhalten, ist es notwendig, durch ständige Innovationen das Fahrerlebnis für den Kunden immer weiter zu verbessern. Schon seit Anbeginn der Automobilentwicklung ist die Steigerung des Fahrkomforts und der Fahrdynamik ein großes Ziel der Automobilfirmen. Gleichzeitig werden moderne Fahrzeuge mit immer fortschrittlicheren Umfoldsensoren ausgerüstet, um durch Assistenzfunktionen den Fahrer zu unterstützen und zu entlasten.

In dieser Arbeit werden neue Methoden entwickelt, um mithilfe im Fahrzeug verbauter Sensoren das Straßenhöhenprofil vor dem Fahrzeug zu ermitteln und eine verbesserte Ansteuerung von semi-aktiven und aktiven Fahrwerkselementen durchzuführen. Diese Fahrwerkselemente können an jedem Rad vertikale Kräfte zwischen dem Rad und dem Fahrzeugaufbau erzeugen und somit den Fahrkomfort über Bodenunebenheiten, durch Beruhigung des Fahrzeugaufbaus, erhöhen. Durch die Vorausschau ist es möglich, nicht nur auf Bodenunebenheiten zu reagieren, sondern das Fahrwerk proaktiv, unter Beachtung der Aktordynamik, im gewünschten Frequenzbereich und für das erkannte Straßenhöhenprofil in einer geeigneten Weise anzusteuern.

Hierfür werden Regelungsverfahren für ein Fahrwerk mit Federfußpunktverstellung, ein Fahrwerk mit Verstelldämpfern und ein Fahrwerk mit einer Kombination aus beiden Aktoren entworfen. Dies sind zum einen zwei Varianten einer modellprädiktiven Regelung, wobei bei der ersten Variante die Aktorstellgrößen und bei der zweiten Variante Trajektorien für den Fahrzeugaufbau über einen Vorausschauhorizont optimiert werden. Die Beschränkungen der Aktorik sind jeweils explizit berücksichtigt. Zum anderen wird ein invertiertes Fahrzeugmodell hergeleitet und mit diesem eine Vorsteuerung aus den vorausschauend bekannten Straßenhöhenwerten berechnet. Diese Vorsteuerung wird mit einem Regler ohne Vorausschau kombiniert.

Nachdem ein gewünschtes Höhenprofil als Eingangssignal für die entworfenen Regelungsverfahren definiert wurde, werden Verfahren entwickelt, um aus den Messwerten eines karosseriefest montierten Sensors das gewünschte Höhenprofil zu erzeugen. Hierzu werden ein sensorfestes, ein profilbezogenes und ein inertiales Koordinatensystem zur Erstellung des Straßenhöhenprofils vorgeschlagen und Verfahren weiterentwickelt, um die aufgrund der Fahrzeugeigenbewegung notwendige Transformation der Sensordaten zwischen zwei Zeitschritten durchzuführen. Des Weiteren werden Filterverfahren entwickelt, um das Straßenhöhenprofil im gewünschten Frequenzbereich zu erhalten. Es wird vorgeschlagen, definierte Unebenheiten im Höhenprofil zu erkennen und nur an diesen Stellen die vorausschauende Fahrwerksansteuerung durchzuführen.

Zum Testen der entwickelten Algorithmen wird eine Simulationsumgebung entworfen, womit bei Überfahrt einer gegebenen Straße Messdaten des fahrzeugfesten Sensors berechnet und der gesamte Ablauf, bestehend aus Aufbereitung der Sensorrohdaten und der Fahrwerksansteuerung, simuliert wird. Die Effektivität der entwickelten Verfahren für die unterschiedlichen Fahrwerksaktoren wird somit dargestellt und die Sensitivität hinsichtlich eines nicht exakt mes-

senden Sensors analysiert.

Darauf aufbauend werden die entwickelten Verfahren in einem Testfahrzeug mit einer Federfußpunktverstellung implementiert. In einem ersten Schritt wird das Höhenprofil der Straße, durch Lokalisierung mithilfe eines GPS-basierten Systems, aus einer Höhenkarte ausgelesen und mit den entwickelten Konzepten zur Fahrwerksregelung eine Potentialabschätzung im Fahrzeug dargestellt. In einem zweiten Schritt wird eine seriennahe Umfeldsensorik verwendet, womit die vorgeschlagenen Konzepte zur Erstellung des Straßenhöhenprofils und der Fahrwerksansteuerung im Fahrzeug umgesetzt werden. Zudem wird ein Beobachter entwickelt, um das Straßenhöhenprofil unter den Rädern anhand der Fahrzeugreaktion zu ermitteln und um somit das Signal der Umfeldsensorik zu plausibilisieren.

Zum Abschluss werden die entworfenen Ansätze zur Ansteuerung des Fahrwerks und zur Erstellung des Straßenhöhenprofils unter Berücksichtigung des Stands der Technik bewertet und eine Empfehlung für eine serienmäßige Umsetzung gegeben.

Mit diesem entwickelten Gesamtkonzept wird eine deutlich spürbare Verbesserung des Fahrkomforts über Bodenunebenheiten in der Fahrzeugimplementierung dargestellt.

Abstract

The automotive industry is fundamental for economic wealth in Germany and Europe as well as being an important employer. The German manufacturers are particularly well-known internationally for innovative and high-quality vehicles in the upper-class segment. To maintain this reputation, it is necessary to constantly improve the driving experience for the customer. Since the beginning of car manufacturing, the improvement of ride comfort and handling characteristics has been an important ambition of automotive companies. In addition, there are constantly more sophisticated sensors, which detect the surroundings of the car, in modern vehicles, to support the driver with advanced driver assistance systems.

In this study, new methods are developed to detect the road height profile in front of the car using vehicle sensors for an improved control of semi-active and active suspension systems. These semi-active and active suspensions can apply a vertical force between the wheel and vehicle body in order to reduce vehicle body motion over road obstacles and, hence, to enhance ride comfort. It is possible, using preview, not only to react to road disturbances but to incorporate actuator dynamics and to proactively control the actuators in the desired frequency range in an adapted manner for the known road profile.

Therefore, control strategies for a low bandwidth active suspension system, for a system with continuously variable dampers and for a low bandwidth active suspension system combined with continuously variable dampers are designed. First, two approaches for a model predictive control, one optimizing the actuator signal, and the other optimizing trajectories for the vehicle body over a preview horizon, are derived. Actuator constraints are incorporated in both approaches. Second, a model inversion is deduced to calculate a feed forward control from the measured road profile. This is combined with a feedback control loop without preview.

After defining the desired road profile as input for the designed control algorithms, methods to generate the desired profile from the measurement of a sensor, which is mounted on the vehicle body, are developed. Therefore, a sensor-fixed, a profile-fixed, and an earth-fixed coordinate system to generate the road height profile are proposed. Furthermore, a method to transform the sensor data from one time step to another, which is necessary due to vehicle body motion, is enhanced. Filtering techniques are developed to shape the road signal and extracting obstacles from the road profile in order to conduct the preview control at these instances is proposed.

A simulation environment is designed to test the algorithms. For this purpose, measurements of a vehicle body fixed sensor are calculated for the drive over a defined road and the algorithms to generate the road profile and to control the suspension are simulated. Hence, the performance of the proposed controllers is evaluated for the different semi-active and active suspension systems, and the impact of the preview sensor inaccuracy is analyzed.

Based on the results, the designed algorithms are implemented in a test vehicle with a low bandwidth active suspension. In a first step, a recorded road height profile, employing an accurate GPS-based system in the car, is used for the designed controllers to show the potential of preview control. In a second step, production-oriented vehicle sensors are used to realize the proposed concepts of generating the road height profile and controlling the suspension in the

vehicle. In addition, an observer is derived to determine the road height profile from vehicle motion in order to validate the signal from the preview sensor.

Finally, the different proposed methods to control the suspension system and to generate the road height profile are evaluated taking the state of the art into consideration, and a recommendation for series implementation is given.

A major improvement in ride comfort over road obstacles is shown in this work using the overall concept developed here.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	11
1.1	Aufbau der Arbeit	13
1.2	Stand der Technik	15
1.2.1	Aktive und semi-aktive Fahrwerke	15
1.2.2	Regelungskonzepte ohne Vorausschau	19
1.2.3	Regelungskonzepte mit Vorausschau	22
1.2.4	Sensoren und Algorithmen zur Ermittlung des Straßenhöhenprofils	30
2	Modellbildung	35
2.1	Dynamisches Modell der Fahrzeugvertikaldynamik	35
2.1.1	Herleitung der Bewegungsgleichungen	36
2.1.2	Modellreduktion	40
2.1.3	Modellinvertierung	41
2.1.4	Kompensation der nichtlinearen Dämpferkennlinie	43
2.1.5	Berücksichtigung der Aktordynamik	44
2.2	Experimentelle Modellvalidierung	44
2.2.1	Referenzierung auf höhenprofilvermessenen Strecken	45
2.2.2	Vergleich von Fahrzeugmessungen mit Simulationsergebnissen	46
3	Regelungsentwurf	51
3.1	Modellprädiktiver Optimierungsalgorithmus für die Stellsignale	51
3.1.1	Formulierung des Optimierungsproblems	52
3.1.2	Berücksichtigung der Aktorbeschränkungen	53
3.1.3	Erweiterung auf nicht-äquidistante Schritte	57
3.2	Modellprädiktiver Optimierungsalgorithmus für Referenztrajektorien des Aufbaus	58
3.2.1	Nicht-äquidistante B-Splines	59
3.2.2	Aufstellen des Gütemaßes	59
3.2.3	Quadratisches Programm mit Beschränkungen	61
3.3	Störgrößenkompensation mit einem inversen Modell	63
3.4	Gesamtkonzept der Regelung	64
4	Erstellung und Aufbereitung des Straßenhöhenprofils	67
4.1	Definition des gewünschten Straßenhöhenprofils	67
4.2	Konzepte zur Erstellung des Straßenhöhenprofils	68
4.2.1	Höhenprofil durch Transformation der älteren Sensordaten in die jeweils aktuellen Sensormesswerte	68
4.2.2	Höhenprofil im inertialen Koordinatensystem	71
4.3	Simulation zur Erstellung des Straßenhöhenprofils	72
4.4	Algorithmen zur Akkumulation der Höhenprofildaten	76

4.5	Transformation der Sensordaten	80
4.5.1	Transformation durch <i>Matching</i> der Sensordaten	81
4.5.2	Prädiktor-Korrektor Verfahren zur Ermittlung der Transformation der Sensordaten	83
4.6	Methoden zur Filterung des Straßensignals	86
4.6.1	Kontinuierliche Filterung	86
4.6.2	Erkennung definierter Unebenheiten	90
4.7	Gesamtkonzept Höhenprofilschätzung und Regelung	94
5	Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen	97
5.1	Aufbau der Simulation	97
5.2	Simulation mit gegebenem Höhenprofil	97
5.2.1	Reglermodell entspricht Streckenmodell	98
5.2.2	Simulation mit nichtlinearem Simulationsmodell	103
5.3	Gesamtsimulation der Erstellung des Höhenprofils und der Fahrwerksansteuerung	115
6	Ergebnisse der Fahrzeugimplementierung	121
6.1	Fahrzeugimplementierung mit GPS-basiertem Höhenprofil	121
6.2	Fahrzeugimplementierung mit Umfeldsensordaten	127
6.3	Entwurf eines Beobachters des Straßenhöhenprofils	131
7	Schlussfolgerung und Zusammenfassung	137
7.1	Bewertung der entwickelten Konzepte und Empfehlung	137
7.2	Zusammenfassung	139
A	Erweitertes Gütemaß für optimalen vorausschauenden Regler	141
B	Berechnung der Matrizen zur Prädiktion der Systemzustände	143
C	Herleitung der B-Spline Darstellung in Matrix Form	145
D	Berechnung der Fouriertransformation	147
	Abbildungsverzeichnis	149
	Abkürzungsverzeichnis	153
	Literaturverzeichnis	161

1 Einführung

Für die deutsche Wirtschaft ist die Automobilindustrie sowohl als Arbeitgeber als auch wegen den im Ausland gefragten Produkten von großer Bedeutung. So betrug im Jahr 2012 der Umsatz der deutschen Automobilindustrie 357 Mrd. Euro, zwei Drittel hiervon entfallen auf den Umsatz in den Auslandsmärkten. In China sind 22 % der verkauften Fahrzeuge von deutschen Herstellern. Der Weltmarktanteil beträgt rund ein Fünftel von 68 Mio. Fahrzeugen. Des Weiteren ist die Automobilindustrie für Deutschland ein wichtiger Arbeitgeber. Im Jahr 2012 sind 742 Tsd. Mitarbeiter in diesem Sektor beschäftigt (alle Daten siehe VDA Jahresbericht 2013 [134]). Der weltweite Erfolg der deutschen Fahrzeuge wird durch hochwertige und innovative Produkte im Oberklasse-Segment sowie ein gutes Image der Marken ermöglicht. Um diese positive Wahrnehmung der Fahrzeuge als *Premium*-Produkte fortzuführen, ist es notwendig durch Innovationen und neue Technik eine beständige Verbesserung des Fahrerlebnisses für den Kunden zu realisieren.

Ein wichtiges Ziel in der Automobilentwicklung ist die Erhöhung des Fahrkomforts für den Kunden. Dies ist insbesondere auch für den mit über 13 Mio. verkauften Pkw im Jahr 2012 [134] zweitgrößten Einzelmarkt und auch für die Zukunft wichtigen Automobilmarkt in China der Fall. Dort wird der Kunde oft chauffiert und möchte dabei möglichst komfortabel gefahren werden. Eine Möglichkeit den Fahrkomfort zu erhöhen, besteht im Einsatz semi-aktiver bzw. aktiver Federungssysteme, welche vertikal zwischen Rad und Fahrzeugaufbau wirken, um Unebenheiten der Fahrbahn auszugleichen. Eine schematische Übersicht der unterschiedlichen Varianten ist in Abbildung 1.1 gezeigt.

Ein semi-aktives Fahrwerk nach Abbildung 1.1a besteht aus einem verstellbaren Dämpfer, der parallel zur Fahrwerksfeder angeordnet ist, wobei die Dämpfungskraft innerhalb eines Kennfeldes angepasst werden kann. Es kann hiermit eine Kraft entgegen der Relativbewegung zwischen Rad und Aufbau gestellt werden. Solche Systeme sind bei den meisten Fahrzeugherstellern erhältlich.

Im Gegensatz hierzu können aktive Fahrwerke in jeder Fahrsituation vertikale Kräfte in beiden Richtungen zwischen Rad und Fahrzeugaufbau realisieren. Sie können in langsam aktive und vollaktive Fahrwerke eingeteilt werden. Langsam aktive Fahrwerke (Abbildungen 1.1b und 1.1c) mit einer Frequenz bis ca. 5 Hz sind als Federfußpunktverstellung ausgeführt. Die Fahrwerksfeder bleibt somit in ihrer Funktion erhalten und es kann aktiv auf den Federfußpunkt gedrückt werden. Des Weiteren ist eine Feder parallel zum Aktor hilfreich, um mit dem Aktor nur Differenzkräfte zum Stationärzustand zu stellen. Diese Feder kann je nach Funktionsprinzip auch entfallen (siehe Abbildung 1.1b). Eine Federfußpunktverstellung kann mit einem passiven oder einem verstellbaren Dämpfer (Abbildung 1.1d) kombiniert werden, solche Systeme sind bisher bei den meisten Fahrzeugherstellern nicht auf dem Markt erhältlich.

Eine weitere Möglichkeit besteht in einem vollaktiven System, siehe Abbildung 1.1e, mit einem Eingriff bis ca. 30 Hz. Das System ist direkt zwischen Rad und Aufbau angebracht. Eine Fahrwerksfeder und der Dämpfer entfallen hierbei. Es ist wie bei der Federfußpunktverstellung jedoch eine Feder parallel zum Aktor hilfreich, um im Stationärzustand den Aktor zu entlasten.

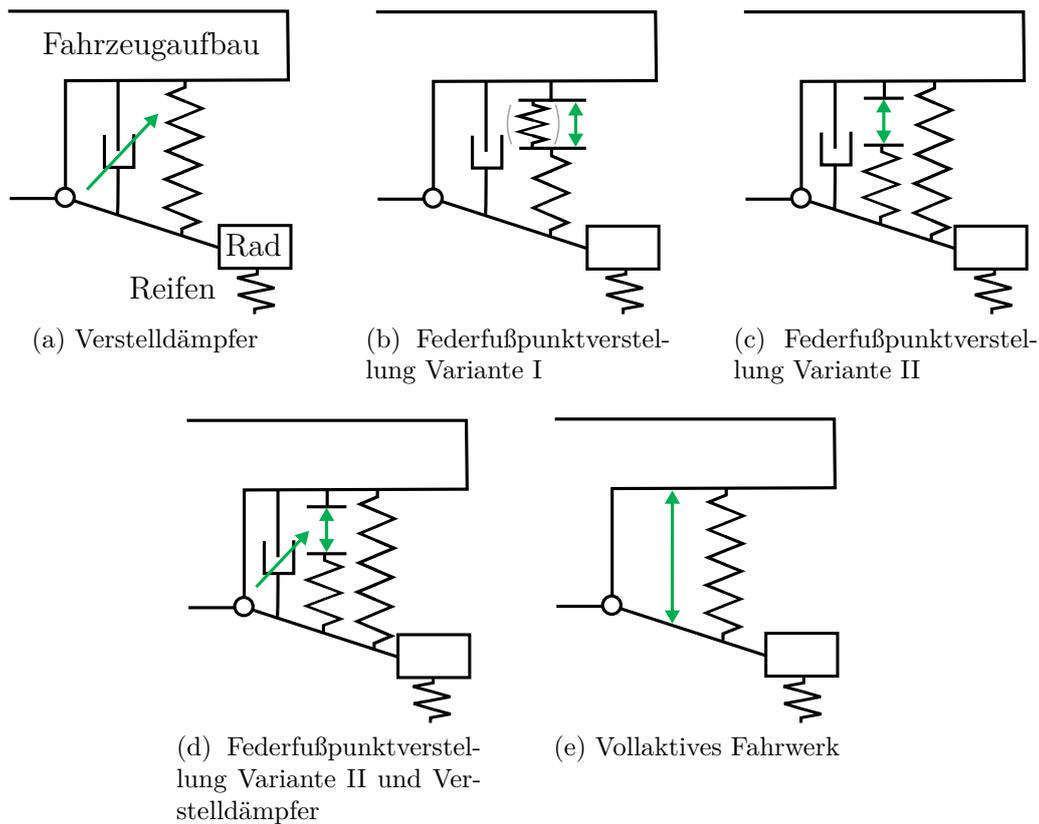


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Fahrwerksaktoren

Für die schematische Darstellung der Fahrwerksaktoren in Abbildung 1.1 sind die Federn als Linearfedern gezeichnet, diese können auch als Drehfedern ausgeführt sein.

Ein wichtiger Trend in der aktuellen und zukünftigen Automobilentwicklung ist zudem der Einsatz von immer leistungsfähigeren Sensoren zur Erkennung des Fahrzeugumfeldes. Die damit darstellbaren Fahrerassistenzfunktionen entlasten den Fahrer und gestalten das Fahren sicherer. So ist bei den meisten Fahrzeugherstellern in aktuellen Modellen, neben weiteren Umfeldsensoren, eine Mono- oder Stereokamera hinter der Frontscheibe vor dem Rückspiegel eingebaut. Mit dieser Kamera können Objekte, wie z.B. andere Fahrzeuge und Fußgänger, erkannt und über deren Größe die ungefähre Entfernung bestimmt werden. Des Weiteren können Straßenschilder und Spurlinien detektiert werden [138].

Dies wird in modernen Fahrzeugen für unterschiedliche Fahrerassistenzfunktionen genutzt. So können dem Fahrer die von Straßenschildern angezeigten Hinweise eingeblendet werden, das Frontlicht kann bei Gegenverkehr automatisch abblenden. Je nach Ausprägung der automatischen Querführung kann bei Verlassen der Spur zur Warnung eine Lenkradvibration erfolgen oder durch automatisches, aktives Lenken die Spur gehalten werden. Eine weitere Möglichkeit besteht im automatischen Lenken analog zum Vorderfahrzeug. Ein Abstandsregeltempomat, auch als Adaptive Cruise Control (ACC) bezeichnet, stellt die Geschwindigkeit passend zum Vorderfahrzeug ein. Des Weiteren werden immer mehr Sicherheitsfunktionen, basierend auf den Kamerainformationen, in modernen Fahrzeugen eingesetzt. So kann bei drohender Kollision mit Fahrzeugen oder Fußgängern automatisch gebremst und gelenkt werden. Neben den videobasierten Kamerasystemen werden in der Automobilindustrie für zukünftige Anwendungen auch

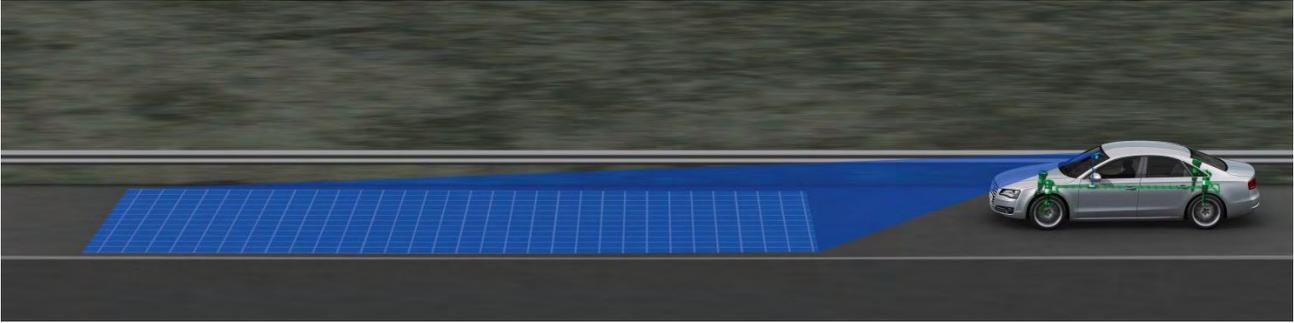


Abbildung 1.2: Fahrzeug mit vorausschauender Fahrwerksregelung

Laserscanner untersucht.

Die immer stärkere Verbreitung und Akzeptanz dieser Fahrerassistenzfunktionen und die fortschreitende Entwicklung zum, falls vom Fahrer gewünscht, autonomen Fahren wird auch in Zukunft zu immer leistungsfähigeren Sensoren in Serienfahrzeugen führen. Diese Sensoren können auch genutzt werden, um fahrwerksrelevante Informationen zu messen und Unebenheiten der Straße vor dem Fahrzeug zu erkennen.

In bisherigen Fahrzeugen werden die erwähnten semi-aktiven und aktiven Fahrwerke basierend auf den im Fahrzeug vorhandenen Messgrößen angesteuert. Dies sind vor allem gemessene Drehraten und Beschleunigungen des Fahrzeugaufbaus sowie die gemessenen Radeinfederungen. Hierdurch kann auf Bodenunebenheiten nur reagiert werden. Durch die Bereitstellung des Straßenhöhenprofils vor dem Fahrzeug mithilfe der Umfoldsensorik kann eine verbesserte Ansteuerung der Aktorik realisiert werden (Abbildung 1.2). Durch die vorausschauende Ansteuerung sind folgende Vorteile umsetzbar:

1. Durch die Vorausschau kann die Aktorik unter Berücksichtigung der Aktordynamik und unter Berücksichtigung der Aktorbeschränkungen geeignet proaktiv angesteuert werden.
2. Es können im Voraus die ungewünschten Frequenzen des Straßensignals herausgefiltert werden. Zu hochfrequente Straßenanregungen können die Aktoren nicht kompensieren und zu niederfrequente Anregungen sind im Fahrzeug nicht spürbar.

Das Ziel einer aktiven bzw. semi-aktiven Fahrwerksregelung besteht darin, Vertikalkräfte zwischen Rad und Aufbau derart zu stellen, dass die Bodenunebenheiten ausgeglichen werden und der Fahrzeugaufbau möglichst ruhig bleibt. Hierdurch wird der Fahrkomfort erhöht, was sich durch eine Reduktion der Beschleunigungen im Fahrzeugaufbau erfassen lässt. Ein weiteres Ziel besteht in der Verbesserung der Fahrdynamik und der Fahrsicherheit. Dies kann durch einen guten Reifen-Boden Kontakt und somit durch geringe dynamische Radlastschwankungen quantifiziert werden.

1.1 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird im Abschnitt 1.2 eine Übersicht über die betrachteten Fahrwerksaktoren und die in der Literatur verwendeten Regelungsverfahren gegeben. In Kapitel 2 werden die, den modellbasierten Reglern zugrundeliegenden, vertikaldynamischen Fahrzeugmodelle allgemein für die betrachteten Aktoren hergeleitet. Des Weiteren wird eine Modellinvertierung vorgeschlagen und

durchgeführt. Daraufhin werden in Kapitel 3 Regelungsverfahren entworfen, um das Potential zur Verbesserung des Fahrkomforts unter Beibehaltung der Fahrdynamik darzustellen. Hierbei werden zum einen modellprädiktive Verfahren mit einer Online-Optimierung, zum anderen ein Ansatz basierend auf einer Vorsteuerung hergeleitet. Die Gesamtfunktionalität einer vertikal-dynamischen Fahrwerksregelung ist in Abbildung 1.3 gezeigt. Der Hauptfokus dieser Arbeit liegt in der Entwicklung neuer Methoden für die Verbesserung des Vertikalkomforts mit Vorausschau und wie die Kombination mit Regelungsansätzen zur Verbesserung des Vertikalkomforts ohne Vorausschau erfolgen kann.

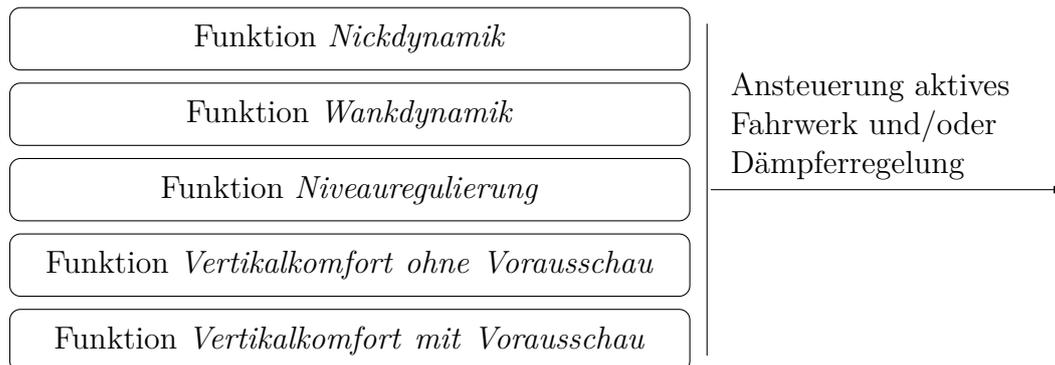


Abbildung 1.3: Zielfunktionalität einer Fahrwerksansteuerung mit Vorausschau

Die Funktionen zur Beeinflussung der Nick- und Wankdynamik sorgen für ein gewünschtes Nickverhalten beim Bremsen und Beschleunigen sowie ein gewünschtes Wankverhalten bei Kurvenfahrt. Die Niveauregulierung stellt das Fahrzeugniveau bei Zuladung, zusätzlichen Passagieren oder Anhängerlast in gewünschter Weise ein.

Im Kapitel 4 wird das gewünschte Straßenhöhenprofil für die entworfenen Regler definiert. In einem nächsten Schritt werden unterschiedliche Möglichkeiten untersucht, aus den Sensorrohdaten ein Straßenhöhenprofil zu erzeugen. Hierfür wird eine Simulationsumgebung erstellt, womit Sensordaten bei Überfahrt einer gegebenen Straße ermittelt werden und darauffolgend mithilfe der vorgeschlagenen Algorithmen ein Straßenhöhenprofil erzeugt wird. Zudem werden Verfahren zur Filterung des Höhenprofils entwickelt, um das hochfrequente Sensorrauschen und niederfrequente Trends des Höhenprofils zu eliminieren. Des Weiteren wird eine Erkennung von definierten Unebenheiten vorgeschlagen, um dort die Vorausschau zu aktivieren. Abschließend werden Gesamtkonzepte aus den vorgestellten Regelungsansätzen und den entworfenen Ansätzen zur Erstellung des Straßenhöhenprofils vorgeschlagen.

In Kapitel 5 werden in einem ersten Schritt Simulationsergebnisse der vorgestellten Regelungsansätze bei exakter Kenntnis des Straßenhöhenprofils präsentiert. Die Regelungsverfahren werden für die unterschiedlichen Aktoren angewendet und mit den Verfahren aus dem Stand der Technik verglichen. Im folgenden Schritt werden Ergebnisse der simulierten Straßenhöhenprofilerzeugung kombiniert mit den Regelungsverfahren vorgestellt und eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich Ungenauigkeiten im Straßenhöhenprofil erstellt.

In Kapitel 6 werden die Regelungsverfahren in einem Testfahrzeug mit Federfußpunktverstellung implementiert und die Ergebnisse aus der Simulation verifiziert. Hierbei werden zunächst vorher vermessene Profile bestimmter Strecken verwendet. In einem zweiten Schritt werden Fahrzeugmessungen der vorausschauenden Fahrwerksansteuerung mithilfe im Fahrzeug verbauter Umfeldsensorik präsentiert.

Im abschließenden Kapitel 7 werden die vorgestellten Algorithmen zur Regelung und zur Erstellung des Straßenhöhenprofils bewertet und ein favorisiertes Gesamtkonzept benannt.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Aktive und semi-aktive Fahrwerke

In Abbildung 1.1 wurde die prinzipielle Funktionsweise gängiger aktiver und semi-aktiver Federungskonzepte beschrieben. Nun soll ein kurzer Überblick über den Aufbau und die mechanische Funktionsweise realisierter Konzepte gegeben werden.

Semi-aktive Fahrwerke besitzen einen verstellbaren Dämpfer, womit in einstellbarem Maße Energie dissipiert werden kann. Ein solcher Verstelldämpfer kann schnell innerhalb eines Kennfeldes die Dämpfungskraft variieren, diese wirkt jedoch immer entgegen der Geschwindigkeit des Dämpfers. Hierbei sind zwei prinzipielle Funktionsweisen gebräuchlich:

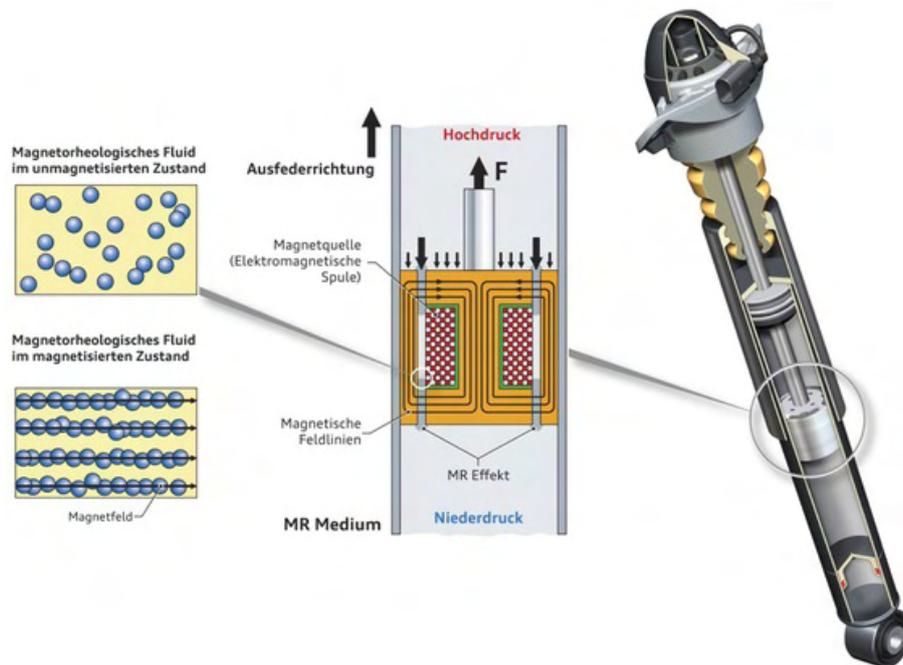
1. Es besteht die Möglichkeit, den Dämpfer mit einem magnetorheologischen Fluid zu füllen (Abbildung 1.4a). Ein beeinflussbares magnetisches Feld richtet die Metallpartikel im Fluid entlang der Feldlinien aus und verändert die Viskosität des Fluids und somit die nötige Energie, um das Fluid durch die Bohrungen im Dämpfer zu pressen. Es kann also die Dämpfung durch Veränderung des Stromes am Elektromagneten verändert werden.
2. Eine zweite Möglichkeit besteht im Einsatz elektronisch regelbarer Proportionalventile, welche den Öldurchfluss im Dämpfer verengen oder erweitern (Abbildung 1.4b). Somit kann ebenfalls elektronisch gesteuert die Dämpfungskraft variiert werden.

Ein geregelter Dämpfer kann mit einer Luftfeder oder einer Stahlfeder kombiniert werden. Dies ist oft als eine Einheit in einem Feder-Dämpferbein ausgeführt, wobei der Dämpfer innerhalb der Wicklungen der Feder montiert ist. Fahrwerke mit geregelten Dämpfern sind bei den bekannten Fahrzeugherstellern als Zusatz- oder Serienausstattung erhältlich.

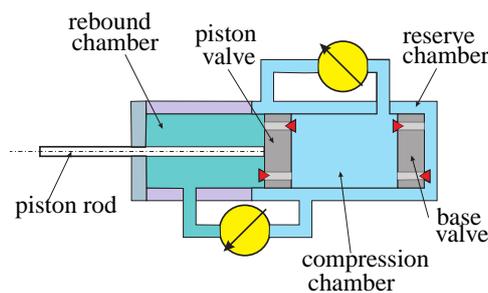
Eine Federfußpunktverstellung kann schematisch als Variation des vertikalen Aktorverstellweges in Serie zur Fahrwerksfeder dargestellt werden. Bei Mercedes ist ein solches System seit der Einführung in der S-Klasse 1998 in den Oberklassefahrzeugen als *Active Body Control* (ABC) erhältlich. Hierbei drückt ein einseitig wirkender Hydraulikzylinder auf den Federfußpunkt; das Einziehen des Rades erfolgt durch die Schwerkraft des Fahrzeugaufbaus [110]. Ein solches System entspricht der schematischen Darstellung aus Abbildung 1.1b, eine Feder parallel zur Aktorik ist nicht vorhanden. Die Aktorik ist somit volltragend und das System ist als Feder-Dämpferbein ausgeführt (Abbildung 1.5a). Die Federfußpunktverstellung wird aktiv bis zu einer Frequenz von ca. 5 Hz eingesetzt, durch die Serienschaltung einer Feder werden höherfrequente Straßenanregungen durch das passive Feder-Dämpfersystem gedämpft. Mit der S-Klasse im Jahr 2013 ersetzt Mercedes den passiven Dämpfer mit einem Verstelldämpfer in Kombination mit dem hydraulischen ABC [136].

Eine Federfußpunktverstellung kann auch mit elektrischen Motoren realisiert werden. Ein solches *electromechanical Active Body Control* (eABC) kann als Feder-Dämpfereinheit ausgeführt werden (Abbildung 1.5d). Dieses Konzept ist bisher noch in keinem Serienfahrzeug verfügbar; es entspricht der schematischen Darstellung aus Abbildung 1.1b mit Feder parallel zur Aktorik.

Eine weitere Möglichkeit für ein eABC besteht in der Verwendung von Elektromotoren, welche über eine Drehfeder und einen Hebel eine vertikale Verstellung des Querlenkers bewirken. Ein



(a) Magnetorheologischer Verstelldämpfer (Bild AUDI AG)



(b) Zweirohrdämpfer mit verstellbaren Ventilen (Bild aus [101])

Abbildung 1.4: Funktionsprinzipien von Verstelldämpfern

solches System ist in Abbildung 1.5b abgebildet und entspricht der schematischen Darstellung aus Abbildung 1.1c, wobei die Drehfeder durch eine äquivalente Längsfeder dargestellt ist. Eine elektrische Federfußpunktverstellung mit Drehfeder nach Abbildung 1.5c wurde von Toyota ab 1989 in Testfahrzeugen eingebaut [17]. Nach [17] beträgt mit diesem System die Eigenfrequenz des Fahrzeugaufbaus ohne Aktoransteuerung 2 Hz. Diese ist verhältnismäßig hoch, was an dem kurzen und somit steifen Drehstab liegt. Der Komfort kann zwar für geringere Frequenzen verbessert werden, für höhere Frequenzen würde eine solche steife Feder jedoch für eine spürbare Komfortverschlechterung gegenüber Oberklassefahrzeugen mit passiver weicherer Luft- oder Stahlfeder führen. [17] schreibt zudem, dass dieses Konzept der vier elektrischen Drehsteller nicht weiterverfolgt und stattdessen eine elektrische Wankstabilisierung 2005 im Lexus GS eingeführt wurde.

Im Gegensatz zur langsam aktiven Federfußpunktverstellung sind auch vollaktive Systeme bis ca. 30 Hz denkbar. Die Firma Bose hat ein solches System mit Linearmotoren zwischen Rad

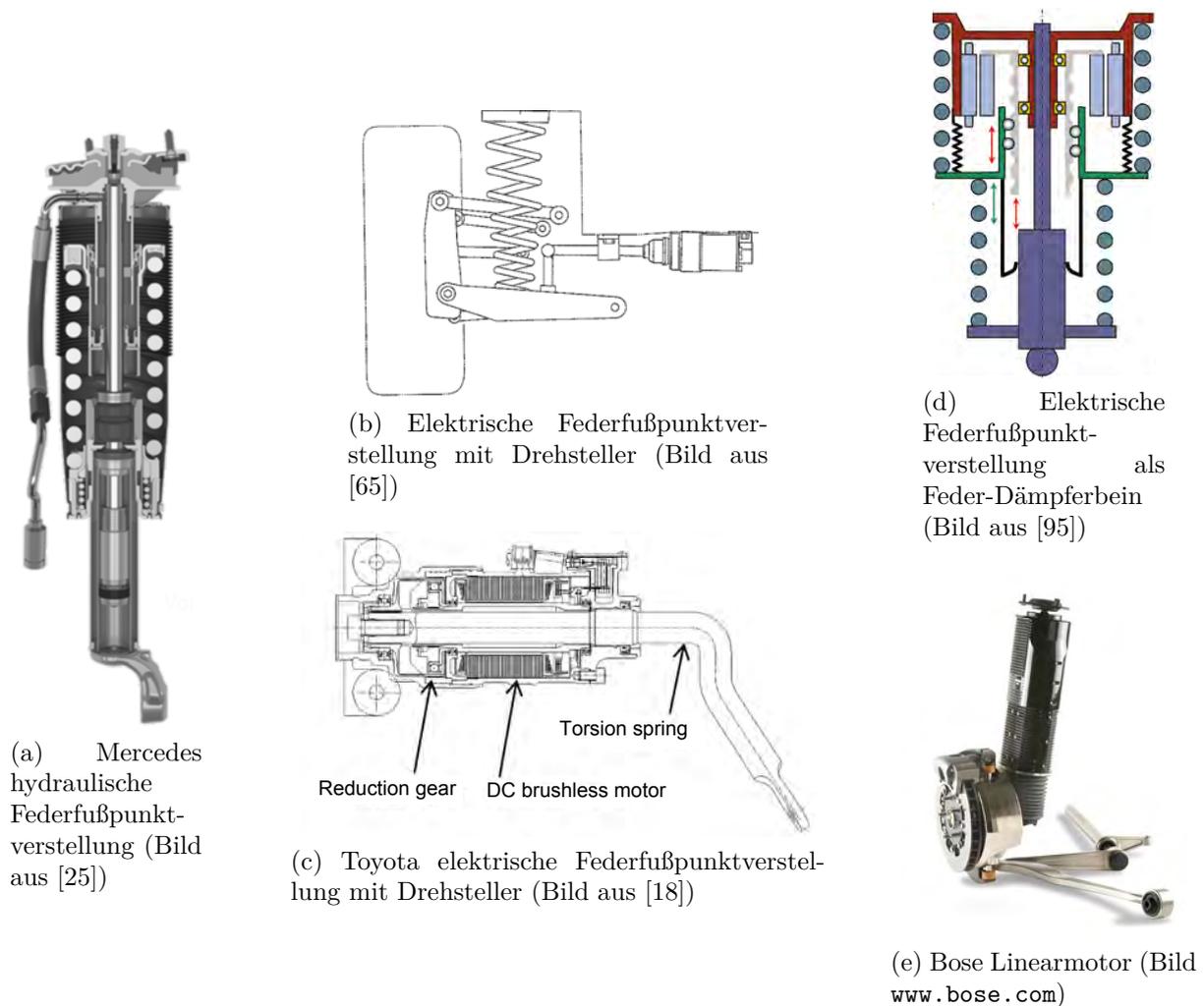
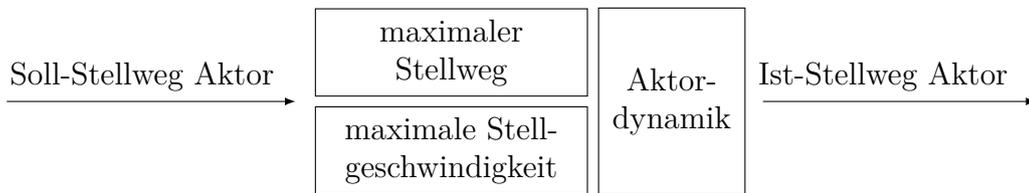


Abbildung 1.5: Funktionsprinzipien aktiver Fahrwerke

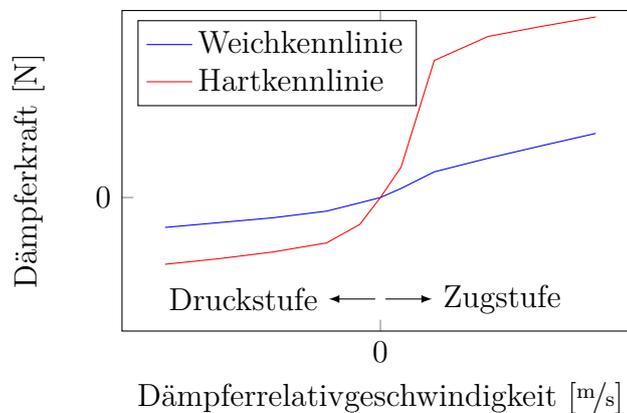
und Karosserie prototypisch vorgestellt [64]. Das System ist in Abbildung 1.5e dargestellt und entspricht der schematischen Darstellung aus Abbildung 1.1e. In Serienfahrzeugen ist es bisher nicht erhältlich. Ein Dämpfer entfällt hierbei und eine Torsionsfeder parallel zur Aktorik trägt die Stationärlast [56]. Somit muss die Aktorik nur Differenzkräfte zum Stationärzustand stellen. Die Aktorik ist direkt zwischen Rad und Aufbau, ohne in Serie befindliche Feder, angebracht. Um den Komfort über hochfrequente Unebenheiten sicherzustellen, müssen diese entweder mit der Aktorik ausgeglichen werden oder die Aktorik muss für die hochfrequenten Anregungen freigängig sein. Ansonsten gehen diese Anregungen ohne Federungswirkung über den Aktor in die Fahrzeugkarosserie ein. Bei der hochfrequenten Regelung ergeben sich Herausforderungen wegen der Phasenverzögerungen gefilterter Eingangssignale, nicht exakter Vorausschaudaten und wegen des Energieverbrauchs. Somit dürfte es bei diesem System vor allem interessant sein, ob im höherfrequenten Bereich der Komfort eines passiven Fahrwerks mit weicher Feder erreicht oder übertroffen werden kann. In einem Video von Bose ist sichtbar, dass ausgeprägte Bodenunebenheiten durch das schnelle System gut ausgeglichen werden können. Des Weiteren wird gezeigt, dass mit einem solchen System das Springen des Fahrzeuges und Abheben aller vier Räder durch Einsatz der Aktorik möglich ist.

In der vorliegenden Arbeit wird eine in beiden Richtungen verstellbare, elektrische Federfußpunktverstellung betrachtet. Diese ist gegenüber der hydraulischen Variante energieeffizienter und hat den Vorteil, dass Energie gut rekuperiert werden kann. Des Weiteren entfällt der, im Fehlerfall und bei Montage und Reparatur, ungünstige Ölhaushalt.

Für eine solche elektrische Federfußpunktverstellung bietet es sich an, eine unterlagerte Positionsregelung auszuführen. Aus diesem Grund ist in der folgenden Arbeit der vertikale Verstellweg die Sollgröße für die Aktorik. Die Grenzen der Federfußpunktverstellung liegen in dem mechanisch begrenzten maximalen Verstellweg und der begrenzten maximalen Verstellgeschwindigkeit. Diese kommt durch die maximale Drehzahl des elektrischen Motors zustande. Das Einregeln der Soll-Position der unterlagerten Motorregelung erfolgt schnell und kann als PT-1 Verhalten ausgelegt werden. Diese Begrenzungen der Federfußpunktverstellung resultieren in einem sinnvollen Arbeitsbereich bis ca. 5 Hz und sind in Abbildung 1.6a dargestellt. Die Angabe einer maximalen Frequenz der Aktorik ist von der Amplitude des Verstellweges abhängig. Bei kleinen Amplituden können auch größere Frequenzen erreicht werden, da die Verstellgeschwindigkeit die limitierende Grenze darstellt. Die angegebenen Frequenzen sind jedoch ein guter Anhaltswert für realistische Straßenanregungen.



(a) Grenzen einer Federfußpunktverstellung



(b) Grenzen eines Verstelldämpfers

Abbildung 1.6: Grenzen der Fahrwerksaktorik

Ein Verstelldämpfer kann in einem semi-aktiven Fahrwerk oder in Kombination mit einer Federfußpunktverstellung eingesetzt werden. Der mögliche Verstellbereich der Dämpfungskraft in Abhängigkeit der Dämpferrelativgeschwindigkeit bewegt sich zwischen der Weichkennlinie und der Hartkennlinie des Dämpfers und ist in Abbildung 1.6b dargestellt. Es ist ersichtlich, dass ein Verstelldämpfer in zwei Quadranten eine variable Kraft aufbringen kann. Für ein aktives System ist dies in allen vier Quadranten möglich.

In Abbildung 1.7 ist der prinzipielle Einfluss einer passiven Feder und eines passiven Dämpfers auf den Fahrkomfort und die Fahrdynamik gezeigt. Zunächst wird ein Fahrzeug mit weicher

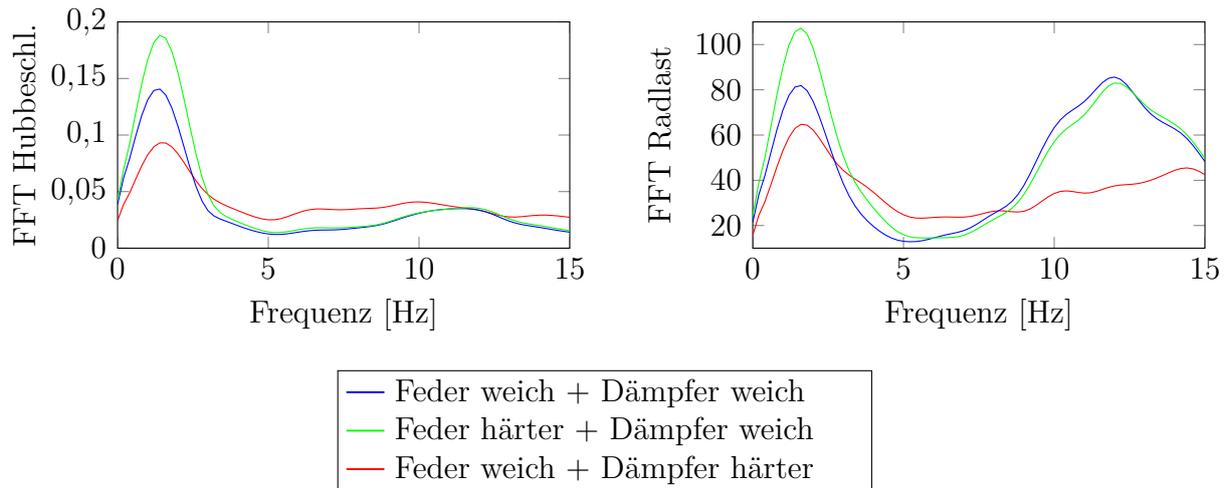


Abbildung 1.7: Prinzipieller Einfluss der Feder und des Dämpfers auf Fahrkomfort und Fahr- dynamik; beispielhaft simuliert auf einer schlechten Landstraße

Feder und weichem Dämpfer simuliert, beispielsweise ein Oberklassefahrzeug mit Luftfeder und Verstelldämpfer in der Weichkenlinie (siehe blaue Linie in Abbildung 1.7). Im linken Diagramm ist die Aufbaueigenfrequenz bei ca. 1,5 Hz ausgeprägt sichtbar. Die erste Erkenntnis lautet, dass eine härtere Feder den Komfort im Bereich der Aufbaueigenfrequenz verringert (siehe grüne Linie in Abbildung 1.7). Das Ziel besteht also darin, die Feder möglichst weich auszulegen. Eine zweite Erkenntnis bezüglich des Komforts betrifft den Dämpfer. Wird dieser verhärtet, erhöht sich der Komfort für geringe Frequenzen bis ca. 2,5 Hz, da der Aufbau nicht ins Schwingen gerät (siehe rote Linie in Abbildung 1.7). Der Komfort verschlechtert sich jedoch für höhere Frequenzen.

Bei der Betrachtung der dynamischen Radlastschwankungen im rechten Diagramm von Abbildung 1.7 ist die Radeigenfrequenz bei ca. 12 Hz zu beachten. Der Dämpfer soll die Rad- schwingung in diesem Frequenzbereich zur Sicherstellung von Fahrdynamik und Fahrsicherheit unterdrücken. Es wird sichtbar, dass eine Verhärtung des Dämpfers eine deutliche Verbesserung erzielt.

Diese grundlegenden Einflüsse der Feder und des Dämpfers müssen auch bei der Auslegung und Regelung semi-aktiver und aktiver Fahrwerke berücksichtigt werden.

1.2.2 Regelungskonzepte ohne Vorausschau

Zunächst soll ein Überblick über Regelungskonzepte für semi-aktive und aktive Fahrwerke ohne Vorausschau gegeben werden. Wie in Abbildung 1.3 dargestellt, muss im Laufe dieser Arbeit eine gute Kombination zwischen einem Fahrwerksregler ohne Vorausschau und einem Fahr- werksregler mit Vorausschau gefunden werden. In der Literatur werden lineare Viertel, Halb- und Gesamtfahrzeugmodelle der Vertikaldynamik verwendet. Die Aktorik wird meist durch einen Kraftsteller modelliert. Diese Modelle sind in Abbildung 1.8 veranschaulicht.

Skyhook-Ansatz

Ein Pionier auf dem Gebiet der Fahrwerksregelung war Karnopp [69–73]. Er führte 1974 den *Skyhook*-Regler für ein Viertelfahrzeugmodell ein [68]. Darunter ist ein modellfreier Regelungs-

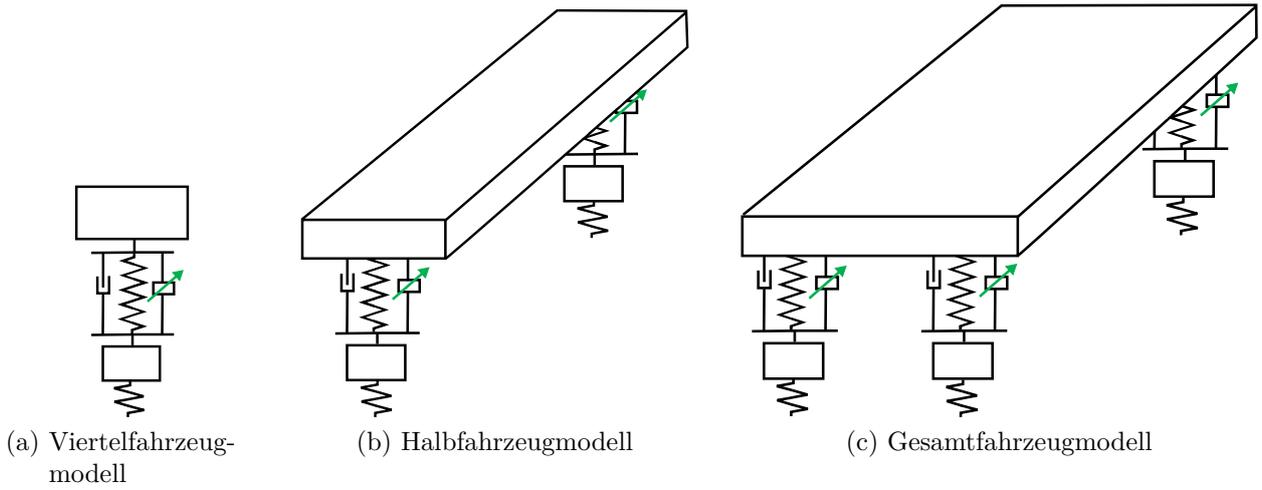


Abbildung 1.8: Lineare Fahrzeugmodelle der Vertikaldynamik in der Literatur

ansatz zu verstehen, welcher derart Kräfte stellt, als wäre der Fahrzeugaufbau an einem virtuellen Dämpfer am Himmel befestigt. Angewendet auf die Freiheitsgrade eines Gesamtfahrzeuges werden für eine *Skyhook*-Regelung die Eingangsgrößen Hubgeschwindigkeit \dot{z}_A , Nickgeschwindigkeit $\dot{\eta}$ und Wankgeschwindigkeit $\dot{\omega}$ des Fahrzeugaufbaus benutzt. Die Hubgeschwindigkeit kann durch Filterung und Integration aus der Hubbeschleunigung ermittelt werden. Diese ist, ebenso wie die beiden weiteren Größen, in modernen Fahrzeugen durch verbaute Inertialsensoren messbar. Es werden drei Proportionalitätsfaktoren b_z, b_η, b_ω appliziert, wodurch aus den gemessenen und ermittelten Aufbaugeschwindigkeiten Sollkräfte und Momente berechnet werden [130]:

$$\begin{pmatrix} F_{z,\text{soll}} \\ M_{\eta,\text{soll}} \\ M_{\omega,\text{soll}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -b_z & 0 & 0 \\ 0 & -b_\eta & 0 \\ 0 & 0 & -b_\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{z}_{A,\text{filt}} \\ \dot{\eta}_{\text{filt}} \\ \dot{\omega}_{\text{filt}} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Diese Kraft und die Momente können über die geometrischen Beziehungen auf Sollkräfte für die Aktoren an den vier Eckpunkten des Fahrzeugaufbaus umgerechnet werden [130]:

$$\begin{pmatrix} F_{vl,\text{soll}} \\ F_{vr,\text{soll}} \\ F_{hl,\text{soll}} \\ F_{hr,\text{soll}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{l_h}{2(l_v+l_h)} & -\frac{1}{2(l_v+l_h)} & \frac{1}{4t_v} \\ \frac{l_h}{2(l_v+l_h)} & -\frac{1}{2(l_v+l_h)} & -\frac{1}{4t_v} \\ \frac{l_v}{2(l_v+l_h)} & \frac{1}{2(l_v+l_h)} & \frac{1}{4t_h} \\ \frac{l_v}{2(l_v+l_h)} & \frac{1}{2(l_v+l_h)} & -\frac{1}{4t_h} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{z,\text{soll}} \\ M_{\eta,\text{soll}} \\ M_{\omega,\text{soll}} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

Die Parameter l_v und l_h bezeichnen den Abstand zwischen dem Schwerpunkt und der Vorder- bzw. der Hinterachse. Die Parameter t_v und t_h bezeichnen die halbe Spurweite vorne und hinten. Es wird angenommen, dass der Schwerpunkt des Fahrzeuges mittig zwischen rechter und linker Spur liegt. Ist das Fahrzeug mit einem semi-aktiven Fahrwerk ausgestattet, kann nur Kraft entgegen der Dämpferrelativbewegung gestellt werden. Befindet sich die berechnete Sollkraft außerhalb des möglichen Kennfeldes (Abbildung 1.6b), wird die maximal bzw. minimal mögliche Kraft des Verstelldämpfers bei der vorliegenden Relativgeschwindigkeit gestellt. Der *Skyhook*-Ansatz reagiert somit auf die auftretenden Geschwindigkeiten des Fahrzeugaufbaus.

Analog hierzu existiert das Konzept des *Groundhook*-Reglers [132]. Dieser stellt Kräfte um einen virtuellen Dämpfer zwischen Rad und Straße nachzubilden. Dies reduziert die dynamischen Radlastschwankungen und verbessert somit Fahrsicherheit und Fahrdynamik. Eine *Skyhook*-Regelung lässt sich mit einer *Groundhook*-Regelung kombinieren [60, 143]. Unger schreibt in seiner Dissertation [130], dass bei Serienfahrzeugen mit Verstelldämpfersystemen vorwiegend der *Skyhook*-Ansatz, kombiniert mit einer situativen Verhärtung des Dämpfers zur Verbesserung der Fahrdynamik und Fahrsicherheit, verwendet wird. Er beruft sich dabei auf Artikel der Hersteller in der Automobiltechnischen Zeitschrift (ATZ) und Pressemitteilungen und nennt als Beispiele den Audi A4 [111], Q3 [46], Q5 [112]; BMW 7er [63], X5 [99]; Mercedes C-Klasse [92], E-Klasse [40]; Opel Astra; Porsche Panamera; Volvo S60, S80, V70, XC60 und den VW Touareg [7]. Für semi-aktive Fahrwerke wird in der Literatur auch eine Erweiterung des *Skyhook*-Prinzips durch die Rückführung der Aufbaubeschleunigung vorgeschlagen und als Acceleration Driven Damper (ADD) bezeichnet [29, 108].

Im Jahr 2008 veröffentlichen Buma und Kajino von Toyota drei Artikel über die Fahrwerksregelung für eine Federfußpunktverstellung. Diese ist realisiert durch elektrische Steller mit Drehfeder (siehe Abbildung 1.5c) und kombiniert mit einem passiven Dämpfer. Hierbei wird als Einsatzgebiet des aktiven Fahrwerks die Wankkompensation und die Komforterhöhung im Frequenzbereich von 3 bis 8 Hz benannt [17]. Dies schließt die Eigenfrequenz des Fahrzeugaufbaus nicht mit ein. So wird der passive Dämpfer mit analytischen Untersuchungen derart ausgelegt, dass Fahrsicherheit und Fahrdynamik im Bereich der Aufbaueigenfrequenz gewährleistet sind. Als Ziel-Wankwinkel wird 1° pro 5 m/s^2 Querbeschleunigung festgelegt und als Zielwert für den Komfort ein Verhältnis von 0,8 zwischen Huben des Fahrzeuges und Vertikalweg der Straße genannt. Es wird ein Konzept aus Regler und Vorsteuerung verwendet, wobei ein *Skyhook*-Regler die auftretenden Aufbaugeschwindigkeiten reduziert. Basierend auf der ermittelten Radbewegung wird zudem eine Vorsteuerung berechnet, um diese Radbewegung nicht in die Karosserie einwirken zu lassen. Neben Simulationsergebnissen wird die Wirkungsweise dieser kombinierten Strategie im Versuchsfahrzeug präsentiert und der Leistungsbedarf bei 12 V mit durchschnittlich 378 W, wobei 10 % rekuperiert wurden, angegeben. Der Leistungsbedarf wird somit auf ein Sechstel gegenüber einem vergleichbaren hydraulischen System beziffert. In [18, 66] untersuchen Buma und Kajino zusätzlich die menschliche Reaktion bei Slalom- und Kurvenfahrt bei ein- und ausgeschalteter Wankkompensation. Des Weiteren vergleichen sie die Ergebnisse aus dem Versuchsfahrzeug mit einem Wanksimulator. Hierbei wird die menschliche Korrekturbewegung des Kopfes bei wankendem Fahrzeug bewertet, mit der Schlussfolgerung dass die Horizontierung des Fahrzeuges den Fahrkomfort erhöht.

Weitere Ansätze

Des Weiteren gibt es theoretische Veröffentlichungen zur semi-aktiven und aktiven Fahrwerksregelung basierend auf sämtlichen denkbaren Regelungskonzepten. Ein weit verbreiteter Ansatz in der Literatur besteht in der Verwendung eines linear-quadratischen Reglers (LQR) basierend auf Rückführung des Zustandsvektors, welcher von Thompson 1976 [125] vorgestellt wurde. Der gängige Ansatz für Verstelldämpfer besteht wiederum in einem Begrenzen der optimalen Kraft, falls diese außerhalb des möglichen Dämpferkennfeldes liegt, auf die maximal bzw. minimal mögliche Kraft. Dies ist als *clipped optimal control* bekannt [75, 129]. Einen Überblick über Modelle und optimale Regelungskonzepte gibt Hrovat [58].

Ein weiterer in der Literatur gängiger Ansatz ist die H_∞ -Regelung. Für Viertelfahrzeugmodel-

le mit einem aktiven und semi-aktiven Fahrwerk verwendet dies Sun [123]; Do [28] optimiert zudem die Gewichtungsfaktoren mit einem genetischen Algorithmus. Wang [135] und Smith [115] verwenden ebenfalls die H_∞ -Methodik und entkoppeln hierfür das Gesamtfahrzeugmodell in jeweils ein Modell für Huben und Nicken sowie Wanken und Verspannung. Yamashita [140] verwendet ebenfalls einen H_∞ -Regler für ein Gesamtfahrzeugmodell und implementiert, in Zusammenarbeit mit Toyota, diesen in einem Fahrzeug mit aktiver Federung. Diese basiert auf einer Luftfeder mit Feder- und Dämpfungseigenschaften, wobei Luft aktiv zugeführt und entnommen werden kann. Er berichtet, dass im Fahrzeugeinsatz Fahrkomfort und Fahrdynamik verbessert werden konnte.

Canale [19] und Giorgetti [44, 45] verwenden eine modellprädiktive Regelung ohne Vorausschau für semi-aktive Fahrwerke basierend auf Viertelfahrzeug- und Halbfahrzeugmodellen. Savaresi gibt einen Überblick über Regelungskonzepte für semi-aktive Fahrwerke [107]. Braghin [16] entwirft einen modalen Regelungsansatz, bei welchem die auftretende Hub, Nick- und Wankbewegung entkoppelt reduziert wird. Koch [77–79] betrachtet adaptive linear-quadratische Regler für Viertelfahrzeugmodelle und insbesondere für Fahrwerke mit Federfußpunktverstellung und Verstelldämpfer. Er kommt zu dem Schluss, dass diese eine vergleichbare Verbesserung von Fahrkomfort und Fahrdynamik wie vollaktive Fahrwerke ermöglichen.

1.2.3 Regelungskonzepte mit Vorausschau

Wird als zusätzliche Eingangsgröße für den Fahrwerksregler das Straßenhöhenprofil vor dem Fahrzeug als bekannt vorausgesetzt, ist eine Modifikation der zuvor genannten Ansätze möglich und es ergeben sich neue Möglichkeiten.

Ansätze basierend auf Übertragungsfunktionen und Erweiterung des Zustandsraums

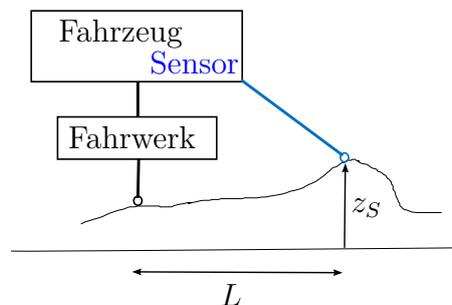


Abbildung 1.9: Vorausschauende Fahrwerksregelung bei Bender [12]

Die erste Veröffentlichung über eine vorausschauende vertikaldynamische Fahrwerksregelung ist von Bender [12] und datiert aus dem Jahr 1968. Die Annahme ist hierbei, dass ein Sensor die Höhe z_S der Straße in einer Entfernung L erkennen kann. Dies ist schematisch in Abbildung 1.9 dargestellt. Um ein Straßenhöhenprofil für die Simulation zu generieren, wird eine statistische Beschreibung des Profils mit einer geschwindigkeitsabhängigen spektralen Leistungsdichte angenommen. Das Straßenhöhenprofil über der Zeit lässt sich somit als Ausgang des linearen Systems $\dot{z}_S(t) = w(t)$ beschreiben, mit $w(t)$ als weißes Rauschen und der definierten Leistungsdichte. Bender entwirft einen Filter, um mit dem Eingang z_S das Fahrwerk hinsichtlich minimaler Aufbaubeschleunigungen und minimalem Federwegs optimal anzusteuern. Hierbei

muss in dem kontinuierlichen Filter der Zeitversatz kompensiert werden, indem die Höhe z_S im Voraus vor dem Rad gemessen wird. Die Übertragungsfunktion ist jedoch schwierig zu realisieren, da einige Pole in der rechten komplexen Halbebene liegen.

Frühauf [41] entwickelt einen Regler, der die Straßenanregung unter dem Vorderrad für die Ansteuerung des Hinterrades nutzt. Dies wird in dieser Arbeit als radstands-basierte Vorausschau¹ bezeichnet. Die Totzeit T zwischen Vorder- und Hinterachse kann mit der Übertragungsfunktion $G(s) = e^{-sT}$ dargestellt werden. Er schlägt vor, die Totzeit mit einer linearen Padé-Approximation vierten Grades abzubilden. So kann ein linearer optimaler Regelungsansatz durch Lösen der Riccati-Gleichung berechnet werden. Ein Padé-Filter besteht aus folgender Übertragungsfunktion:

$$G(s) = \frac{a_0 - a_1s + a_2s^2 - \dots + a_n s^n}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_n s^n} \quad (1.3)$$

Eine Padé-Approximation zur Beschreibung der Totzeit, eine stochastische Beschreibung der Straße und ein linear-quadratischer Regelungsentwurf (LQR) in kontinuierlicher Zeit für eine vorausschauende Regelung oder eine radstands-basierte Vorausschau wird auch von Crolla [24], Abdel Hady [1], Sharp [114] und El-Demerdash [32] verwendet. Im Gegensatz hierzu entwirft Louam [84] einen zeitdiskreten linearen optimalen Regler. Hierfür wird der diskrete lineare Zustandsraum erweitert, wobei der Eingang an der Vorderachse immer einen Zustand weitergeschoben wird, bis er an der Hinterachse wirkt. Yan [141] verwendet ebenfalls die Erweiterung des diskreten Zustandsraums für eine radstands-basierte Vorausschau; Roh [105] zudem noch einen Kalman-Bucy Filter als Beobachter.

Akbari [5] geht auch von dem Messen eines diskreten Höhenwertes vor dem Fahrzeug zu jedem Zeitschritt aus. Er verwendet ebenso eine Erweiterung des diskretisierten Zustandsraums, in dem dieser Eingang bis zum Eingriff ins System weitergeschoben wird. Er entwirft eine H_∞ /GH₂-Regelung für ein Halbfahrzeugmodell. Das Vorgehen soll kurz skizziert werden. Die H_2 -Norm einer Übertragungsfunktion T_1 ist definiert durch

$$\|T_1\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |T_1(jw)|^2 dw}, \quad (1.4)$$

die H_∞ -Norm durch

$$\|T_1\|_\infty = \sup_{\omega \in \mathcal{R}} |T_1(jw)|. \quad (1.5)$$

Die H_∞ -Norm ist somit im Frequenzbereich definiert und gibt den root mean square (RMS) des Ausgangs für die ungünstigste Eingangsfrequenz an. Die H_2 -Norm gibt den RMS-Wert des Ausgangs an, falls ein weißes Rauschen am Eingang anliegt. Die GH₂-Norm (Generalized H₂) ist im Zeitbereich durch

$$\|T_2\|_{\text{GH}_2} := \sup_{0 \leq \omega \leq \infty} \frac{\|z_2\|_\infty}{\|\omega\|_2} \quad (1.6)$$

für den Ausgang z_2 und den Eingang w definiert. Diese Norm misst den Spitzenwert des Ausgangs für die ungünstigste Eingangsfrequenz. Akbari entwirft hiermit durch Lösen von linearen Matrixungleichungen (LMIs) einen Regler, der Ausgänge z_1 minimiert und Ausgänge z_2 beschränkt. Zu minimieren sind hierbei die Aufbaubeschleunigungen zur Komforterrhöhung, die Radlastschwankungen zur Verbesserung der Fahrsicherheit und die Stellgröße zur Energieminimierung. Zu beschränken ist der Federweg. Da der Eingang der Höheninformation zu einem

¹engl. wheelbase preview

bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft in das Zustandsraummodell eingeht, ist dieser Regler zunächst nur für eine Geschwindigkeit gültig. Dies ist ein generelles Problem der Erweiterung des diskreten Zustandsraums. Akbari zeigt, dass ein Regler, der für 25 km/h ausgelegt wird, robust für Geschwindigkeiten von 20 km/h bis 30 km/h ist. Er schlägt eine Parameterumschaltung² vor, um den gesamten Geschwindigkeitsbereich abzudecken. Der Regler wird an einem Viertelfahrzeugprüfstand validiert [4] und mit dem klassischen LQG-Regler verglichen [6].

Foag [38, 39] verwendet ein Halbfahrzeugmodell mit modelliertem Fahrersitz zur Komfortbewertung und betrachtet eine hydraulische Federfußpunktverstellung. Die Ziele der Regelung sind die Reduktion der Maximalwerte der dynamischen Radlastschwankung sowie die Minimierung der Aufbaubeschleunigung und der Radeinfederung bei Überschreiten einer bestimmten Grenze. Es werden zudem Beschränkungen der Aktorkraft und des Öldurchflusses berücksichtigt. Er entwirft zum einen PT-1 Übertragungsfunktionen basierend auf Rückführung der ersten Ableitung der Radeinfederungen zur Stabilisierung und Dämpfung. Des Weiteren wird eine Struktur vorgeschlagen, um aus dem gemessenen Straßenhöhenwert in konstanter Distanz vor dem Fahrzeug über eine, die Totzeit beachtende, Übertragungsfunktionen eine Vorsteuerung für die Vorder- und Hinterräder zu berechnen. Da die Annahme aus Abbildung 1.9 verwendet wird, und die Totzeit für die Übertragungsfunktion konstant sein muss, wird vorgeschlagen den Sensorwinkel abhängig von der Fahrgeschwindigkeit entsprechend zu verändern. Die Parameter der Übertragungsfunktionen werden mit einer multikriteriellen Optimierung hinsichtlich der Regelziele für zwei Straßenprofile bestimmt.

Fazit Ansätze basierend auf Padé-Approximation oder Erweiterung des Zustandsraums zur Kompensation der Totzeit des gemessenen Höhenwertes bis zum Eintreffen am Rad haben den Nachteil, dass hierbei das Signal verfälscht wird beziehungsweise dies nur für eine Fahrzeuggeschwindigkeit funktioniert. Aus diesen Gründen werden diese Ansätze in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

Optimaler Regelungsentwurf mit Hamilton-Funktion

Aufbauend auf Bender veröffentlicht Tomizuka [128] eine vorausschauende Fahrwerksregelung basierend auf diskreter, optimaler Regelung. Das Straßenhöhenprofil wird mit derselben stochastischen Modellierung generiert und es wird ebenfalls ein Viertelfahrzeugmodell verwendet. Tomizuka formuliert ein Gütemaß zu diskreten Schritten über dem Vorausschauhorizont, nimmt ein bekanntes Höhenprofil für jeden dieser Schritte an und löst es mit dynamischer Programmierung. Er betrachtet ebenso wie Bender die Fälle zwischen keiner Vorausschau-Information und unendlicher Vorausschau-Information. Ab einem Vorausschauhorizont von ca. 30 Zeitschritten in einer prinzipiellen dimensionslosen Betrachtung ist bei Tomizuka keine Verbesserung des Gütemaßes mehr zu beobachten. Tomizuka erwähnt als erster die Verwendung eines diskreten Schieberegisters, um die gemessenen Höhenwerte der Regelung zur Verfügung zu stellen.

Thompson [126] stellt einen zeitkontinuierlichen Regelungsansatz für ein vorausschauendes Viertelfahrzeugmodell vor, wobei ebenfalls keine Padé-Approximation zur Linearisierung der Totzeit verwendet wird. Der Ansatz basiert auf dem optimalen Regelungsentwurf mithilfe der Hamilton-Funktion. Hac verwendet in [51, 53] dieselbe Systematik und benutzt definierte Straßenprofile und kein integriertes oder gefiltertes weißes Rauschen. Die Herleitung dieser optimalen vorausschauenden Regelung wird im Folgenden erläutert. Sowohl das Viertel-, als auch das Halb- und das Gesamtfahrzeugmodell können durch ein lineares Zustandsraummodell folgender

²engl. gain scheduling

Art beschrieben werden:

$$\dot{\underline{x}} = \mathbf{A}\underline{x} + \mathbf{B}_u\underline{u} + \mathbf{B}_w\underline{w} \quad \underline{x}(t_0) = \underline{x}_0 \quad (1.7)$$

Hierbei bezeichnet \underline{u} die Aktorstellgröße und \underline{w} die bekannte Straßenunebenheit unter den Rädern. Ein Gütemaß

$$J = \frac{1}{2}\underline{x}^T(T)\mathbf{P}_T\underline{x}(T) + \frac{1}{2}\int_{t=0}^T \underline{x}^T\mathbf{Q}\underline{x} + \underline{u}^T\mathbf{R}\underline{u} dt \quad (1.8)$$

soll unter der Nebenbedingung (1.7) minimiert werden. Hierbei bezeichnet T die Endzeit und die Vorausschauweite des Straßenprofils zu jedem Zeitschritt. Es wird die Hamilton-Funktion $\mathcal{H}(t, \underline{x}, \underline{\lambda}, \underline{u}) = \underline{\lambda}^T(\mathbf{A}\underline{x} + \mathbf{B}_u\underline{u} + \mathbf{B}_w\underline{w}) + \frac{1}{2}(\underline{x}^T\mathbf{Q}\underline{x} + \underline{u}^T\mathbf{R}\underline{u})$ aufgestellt. Um konsistent zur Herleitung in [10, 51] zu bleiben, wird die Hamilton-Funktion als Summe aufgestellt, eine Formulierung als Differenz führt zum selben Ergebnis. Die optimale Lösung muss folgende Gleichungen erfüllen:

$$-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \underline{x}} = \dot{\underline{\lambda}} = -\mathbf{A}^T\underline{\lambda} - \mathbf{Q}\underline{x} \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \underline{u}} = \underline{0} = \mathbf{B}_u^T\underline{\lambda} + \mathbf{R}\underline{u} \quad (1.10)$$

Aus der Transversalitätsbedingung [10, 51] folgt:

$$\underline{\lambda}(T) = \mathbf{P}_T\underline{x}(T) \quad (1.11)$$

Gleichung (1.10) nach $\underline{u} = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}_u^T\underline{\lambda}$ auflösen und in (1.7) einsetzen ergibt die folgende Bestimmungsgleichung:

$$\dot{\underline{x}} = \mathbf{A}\underline{x} - \mathbf{B}_u\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}_u^T\underline{\lambda} + \mathbf{B}_w\underline{w} \quad \underline{x}(t_0) = \underline{x}_0 \quad (1.12)$$

Es wird folgender Ansatz für $\underline{\lambda}$ gewählt [51]:

$$\underline{\lambda}(t) = \mathbf{P}(t)\underline{x}(t) + \underline{r}(t) \quad (1.13)$$

Nun wird (1.13) in (1.12) und (1.9) eingesetzt und $\underline{\lambda}$ eliminiert. Diese beiden Gleichungen werden ineinander eingesetzt um $\dot{\underline{x}}$ zu eliminieren. Die allgemein gültige Lösung resultiert durch Gleichsetzen beider Seiten der resultierenden Gleichung mit $\underline{0}$ und die Endbedingungen ergeben sich aus den Gleichungen (1.11) und (1.13):

$$-\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}_u\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}_u^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} \quad \mathbf{P}(T) = \mathbf{P}_T \quad (1.14)$$

$$\dot{\underline{r}} = \left(\mathbf{P}\mathbf{B}_u\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}_u^T - \mathbf{A}^T\right)\underline{r} - \mathbf{P}\mathbf{B}_w\underline{w} \quad \underline{r}(T) = \underline{0} \quad (1.15)$$

Gleichung (1.14) ist die Matrix Riccati Gleichung. Es wird der Fall $T \rightarrow \infty$ im Gütemaß (1.8) betrachtet und somit ergibt sich die algebraische Riccati-Gleichung mit $\bar{\mathbf{P}} = \mathbf{P}(t)$. Des Weiteren werden sämtliche Höhenwerte $w(\tau)$ für $\tau > T$, die nicht bekannt sind, gleich Null gesetzt. Das lineare Differentialgleichungssystem (1.15) ist instabil, da die Systemmatrix \mathbf{A} für ein Fahrwerk mit Dämpfer stabil ist und durch das Negieren Eigenwerte in der rechten komplexen Halbebene

entstehen. Da jedoch die Endbedingung gegeben ist, kann die Differentialgleichung zeitlich rückwärts gelöst werden. Die Lösung für $\underline{r}(t)$ ergibt sich über den allgemeinen Lösungsansatz für ein Differentialgleichungssystem mit $\mathbf{A}_c = \mathbf{A} - \mathbf{B}_u \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_u^T \bar{\mathbf{P}}$:

$$\underline{r}(t) = - \int_T^t e^{-\mathbf{A}_c^T(t-\tau)} \bar{\mathbf{P}} \mathbf{B}_w \underline{w}(\tau) d\tau \quad (1.16)$$

Vertauschen der Integrationsgrenzen und Einführen von $\sigma = \tau - t$ ergibt [51]:

$$\underline{r}(t) = \int_0^T e^{\mathbf{A}_c^T \sigma} \bar{\mathbf{P}} \mathbf{B}_w \underline{w}(t + \sigma) d\sigma \quad (1.17)$$

In dieser Gleichung wird deutlich, dass der Einfluss entfernter Höhenwerte auf den Vorausschau-term $\underline{r}(t)$ stetig abnimmt. Gleichung (1.10) wird nach \underline{u} aufgelöst und der gesuchte optimale Regler ergibt sich mit (1.13) zu:

$$\underline{u}(t) = -\mathbf{R}^{-1} \left(\mathbf{B}_u^T \bar{\mathbf{P}} \underline{x}(t) + \mathbf{B}_u^T \underline{r}(t) \right) \quad (1.18)$$

Dieser lineare optimale Regler besteht somit aus einer Zustandsrückführung, welche einem LQR entspricht, und einer Vorsteuerung berechnet aus den vorausschauend bekannten Straßenhöhenwerten. Im Anhang A werden die sich ergebenden Gleichungen erläutert, falls nicht der Zustand, sondern der Ausgang des Systems im Gütemaß gewichtet wird [42]. Balzer [10] führt eine ähnliche Erweiterung des Gütemaßes durch, wobei er nicht allgemein einen Ausgang, sondern die Ableitung der Zustände im Gütemaß gewichtet.

Hac [52, 54] wendet diese optimale vorausschauende Regelung auf ein Halbfahrzeugmodell und semi-aktiver Federung an. Es existieren eine Reihe weiterer Veröffentlichungen basierend auf diesem linearen optimalen Regler [62, 67, 85, 86, 127, 144]. In [61] wird zusätzlich noch ein Beobachter der Straßenunebenheit unter dem Vorderrad betrachtet, um mit radstandsbasierter Vorausschau die Hinterräder besser anzusteuern. Marzbanrad [87] entwirft zusätzlich ein Kalman-Filter zur optimalen Zustandsbeobachtung. Senthil [113] löst denselben Ansatz auf andere Weise und verwendet, wie die meisten Autoren, eine stochastische Beschreibung der Straße als gefiltertes weißes Rauschen. Pilbeam [104] wendet die Methodik auf langsam aktive Fahrwerkssysteme an, wobei er diese mit einem Tiefpassfilter modelliert. Er führt eine Variation der Vorausschauweite durch und ermittelt ein Minimum des Gütefunktional für einen 10 Hz-Aktor bei einer Vorausschau von 0,15 s und für einen 3 Hz-Aktor bei 0,3 s.

Langlois [81] verwendet ebenfalls die optimale Vorausschauregelung basierend auf einem Viertelfahrzeugmodell, wendet diese auf jedes Viertel des Fahrzeuges an und simuliert den Regler mit einem Gesamtfahrzeugmodell mit zehn Freiheitsgraden als Strecke. Des Weiteren schlägt er einen einfachen Regelungsansatz ohne Vorausschau basierend auf dem Viertelfahrzeugmodell vor. Hierbei wird die Stellgröße basierend auf der Radeinfederung durch die Forderung, keine Kraft in den Aufbau einzuleiten, berechnet. Er berichtet von besseren Ergebnissen als die optimale vorausschauende Regelung von Thompson für kleinere Bodenunebenheiten. Er bemerkt jedoch eine ungünstige Wirkung, falls beispielsweise eine Steigung im Höhenprofil auftritt, da der Aktor in die Sättigung gerät und nicht die gesamte Steigung ausgleichen kann. Mithilfe der Vorausschauinformation parametrisiert er den Regler kontinuierlich, um dies zu verbessern.

Van der Aa [133] betrachtet semi-aktive Systeme und berücksichtigt Beschränkungen für die Radlast, die Radeinfederung und eine konstante Beschränkung der Dämpferkraft über dem Vorausschauhorizont. Zunächst wendet er die lineare optimale Regelung mit weichen Beschrän-

kungen³ für die Radlast und die Radeinfederung an, indem diese im Gütemaß minimiert werden. Falls die berechnete Dämpferkraft außerhalb des Kennfeldes liegt, wird die Kraft auf den Maximal- bzw. Minimalwert des Kennfeldes für die aktuelle Dämpferrelativgeschwindigkeit begrenzt. Des Weiteren führt er eine rechenintensive Optimierung mit festen Beschränkungen⁴ durch. Er berichtet, dass bei einer Fahrt über kritische Unebenheiten und exakter Berücksichtigung der Beschränkungen, diese besser eingehalten werden.

Kim [74] schlägt einen Straßenerkennungsalgorithmus vor, wobei zwei Lasersensoren am Vorder- und am Hinterrad senkrecht nach unten messen. Er generiert eine Distanzinformati- on im Frequenzbereich durch eine Fouriertransformation der Differenz der beiden Höhenwerte. Anschließend wird das Zeitsignal durch eine inverse Fouriertransformation berechnet. Diese Technik wird in einem Fahrzeug implementiert und die gemessenen Daten werden in einer Simulation verwendet, um einen möglichen Komfortgewinn zu zeigen. Es kommt die lineare optimale Regelung basierend auf einem Gesamtfahrzeugmodell zur Anwendung.

Fazit Der optimale vorausschauende Regelungsentwurf wird als Stand der Technik ver- standen und im Laufe dieser Arbeit mit den entwickelten Reglern verglichen.

Modellprädiktive Ansätze

Kitching [76] bewertet die Vorteile von radstandsbasierter Vorausschau eines semi-aktiven Fahr- werks an einem *Hardware-in-the-Loop* Prüfstand für ein Halbfahrzeugmodell. Er kann eine Verbesserung des Fahrkomforts am Prüfstand darstellen, indem er online ein Prädiktionsmo- dell simuliert, um die Dämpferdynamik zu kompensieren. Muijderman [98] entwirft Regler für semi-aktive Fahrwerke und radstandsbasierter Vorausschau basierend auf Prädiktion eines Fahrzeugmodells und Bestimmung einer optimalen Stellgröße mit einer Online-Optimierung. Er berichtet von bisher enttäuschenden Ergebnissen der Fahrzeugimplementierung aufgrund von beschränkter Rechenkapazität. Bei Kok [80] wird eine Online-Optimierung basierend auf einem nichtlinearen Fahrzeugmodell für eine vorausschauende Fahrwerksregelung verwendet. Mit dem Ausprobieren aller Möglichkeiten⁵ werden für ein gegebenes Straßensignal Ansteuergrößen für die Aktorik simuliert und mithilfe eines Gütefunktionalis die beste Ansteuerung gewählt. Kok berichtet jedoch von Problemen, diese Vorgehensweise auf einem dSPACE Rechner in Echtzeit zu implementieren und schließt mit dem Ausblick, die Regelung mithilfe analoger Schaltkreise in Echtzeit zu realisieren.

Mehra [91] wendet das Konzept der modellprädiktiven Regelung [43,90] für eine vorausschau- ende Fahrwerksregelung an. Er beschreibt die Formulierung des Optimierungsproblems und die Einbeziehung von Beschränkungen auf definierte Ausgangsgrößen. In der Simulation ermittelt er einen Komfortgewinn über eine stochastische Straße im Vergleich zu einem passiven Fahr- werk. Cho [23] wendet ebenfalls die modellprädiktive Regelung auf ein Viertelfahrzeugmodell an und entwirft drei Varianten. Die ersten beiden Varianten sind unbeschränkte modellprä- diktive Regler mit unterschiedlicher Gewichtung der Radeinfederung im Gütemaß. Der dritte Regler beinhaltet explizit Beschränkungen auf die Radeinfederung. Zwischen den drei Reglern wird abhängig von der prädizierten Radeinfederung umgeschaltet. Für die Überfahrt eines Ein- zelhindernisses ermittelt er in der Simulation einen Komfortgewinn durch geringere Aufbau- beschleunigung sowie eine Verbesserung der Fahrdynamik durch geringere Reifeneinfederung

³engl. soft constraints

⁴engl. hard constraints

⁵engl. brute force

gegenüber einem passiven Fahrwerk und auch gegenüber einer nicht vorausschauenden *Skyhook*-Regelung. Cho [22] erweitert dieses Konzept noch auf ein Halbfahrzeugmodell. Ahmed [3] verwendet die Fouriertransformierte der vorausschauenden Straßeninformation, berechnet offline mit einer modellprädiktiven Regelung optimale Ansteuergrößen, speichert diese in einem Kennfeld ab und steuert somit online im Fahrzeug die Aktorik an. Er zeigt Verbesserungen des Fahrkomforts und der Fahrdynamik durch Simulationsergebnisse und Messungen am Viertelfahrzeugprüfstand. De Bruyne [26] betrachtet einen hydraulischen Aktor mit Beschränkungen der Aktorkraft in Abhängigkeit der Aktorgeschwindigkeit. Diese approximiert er stückweise linear und verwendet eine hybride modellprädiktive Problemformulierung basierend auf einem Viertelfahrzeugmodell. Er zeigt in der Simulation eine Verbesserung bei Überfahrt eines Einzelhindernisses im Vergleich zu einem modellprädiktiven Regler ohne Berücksichtigung der Aktorbeschränkungen und Begrenzen der Aktorkraft⁶.

Fazit Die modellprädiktive Regelung wird als vielversprechend bewertet, da Beschränkungen explizit berücksichtigt werden können. Sie erscheint für die vorliegende Problemstellung gut geeignet, da Informationen über die Zukunft vorhanden sind und die Aktoren Beschränkungen aufweisen. Somit kann durch Prädiktion eines Modells kombiniert mit einer Online-Optimierung das Potential einer vorausschauenden Fahrwerksregelung ermittelt werden. Der Vorteil einer Online-Optimierung im Gegensatz zur einer Offline-Optimierung der Regelungsparameter, wie beispielsweise beim H_∞ -Ansatz, besteht darin, dass das Ergebnis nicht nur hinsichtlich der zur Offline-Optimierung genutzten Strecken optimal ist.

Weitere Ansätze

Morita [97] führt Simulationen für vorausschauende semi-aktive Fahrwerke durch, wobei die entwickelte Ansteuerung die Dämpfer vor einer Bodenunebenheit weich und nach einer bestimmten Zeit wieder hart stellt. Moran [96] entwirft eine vorausschauende Fahrwerksregelung mithilfe neuronaler Netze, Edge [142] verwendet Fuzzy-Logik.

Spirk und Henning [117, 118] betrachten eine vorausschauende Fahrwerksregelung mit dem Ziel, die dynamischen Radlastschwankungen zu verringern und die Traktion zu verbessern. Sie betrachten hierfür einen Lasersensor, welcher vor den Vorderrädern senkrecht nach unten den Abstand zwischen Karosserie und Straße misst. Sie verwenden am Viertelfahrzeugprüfstand einen Lasersensor basierend auf Triangulation mit einem Messbereich von 25 cm und einer Messgenauigkeit von 0,3 mm bei einer Abtastrate von 1,5 kHz. Es wird die zweite Ableitung des Straßenhöhenprofils aus der Differenz der gemessenen Aufbaubeschleunigung und der zweimal abgeleiteten und gefilterten Laser-Entfernungsmessungen bestimmt. Dies dient als Eingang für eine Störgrößenkompensation zur Reduktion der Radlastschwankungen. Die Effektivität dieser Vorsteuerung wird am Viertelfahrzeugprüfstand gezeigt.

Fazit In der vorliegenden Arbeit wird der Schwerpunkt auf die Erhöhung des Fahrkomforts bei zumindest gleichbleibender Fahrsicherheit und Fahrdynamik gelegt. Des Weiteren werden Sensoren mit einem größeren Vorausschaubereich betrachtet, da dies die Erkennung niederfrequenter Straßenanregungen ermöglicht. Bei einer punktuellen Messung des Höhenprofils anstatt einer flächigen Messung zu jedem Zeitschritt entfällt zudem die Möglichkeit, basierend auf den Sensorinformationen eine genaue Bestimmung der Sensorbewegung zwischen zwei Zeitschritten durchzuführen.

⁶engl. force clipping

Im Fahrzeug implementierte Ansätze

Donahue [31] implementiert in seiner Masterarbeit eine vorausschauende Fahrwerksregelung in einem militärischen Geländefahrzeug (HMMWV) mit einem hydraulischen aktiven Fahrwerk und benutzt dafür Laser- und Radarsensoren. Er vergleicht einen *Skyhook*-Regler, einen LQR, ein passives Fahrzeug und eine vorausschauende Ansteuerung mit modellprädiktiver Regelung. Er verwendet für die vorausschauende modellprädiktive Regelung ein vorher bekanntes Straßenhöhenprofil, jedoch zeigen die Ergebnisse keine signifikante Verbesserung des Fahrverhaltens.

Schindler [110] entwickelt in seiner Dissertation sowohl eine Aufbereitung der Sensorrohdaten, als auch einen Regler um das Fahrwerk mit der Vorausschauinformation anzusteuern. Er benutzt hierfür ein Versuchsfahrzeug mit dem hydraulischen ABC-Fahrwerk von Daimler. Er verwendet sowohl ein Halb- als auch ein Gesamtfahrzeugmodell, die Vorausschauinformation wird zur Störgrößenkompensation verwendet und mit einem Fahrwerksregler ohne Vorausschau kombiniert. Schindler zeigt zunächst in der Simulation eine Komfortverbesserung der vorausschauenden Fahrwerksansteuerung gegenüber einer Ansteuerung des ABC-Fahrwerks ohne Vorausschau. Des Weiteren zeigt er in Fahrzeugmessungen eine Reduktion der Hubbeschleunigung bei Überfahrt einer einen Meter langen und fünf Zentimeter hohen Fahrbahnschwelle. Einen Ansatz der Störgrößenkompensation verwendet auch Streiter [120,121], wobei hier die erste und zweite Ableitung des Straßenhöhenprofils als Eingang einer Übertragungsfunktion zur vorausschauenden Ansteuerung des ABC-Fahrwerks verwendet wird. Mercedes führt in der S-Klasse im Jahr 2013 das *Magic Body Control* (MBC) Fahrwerk ein. Es wird die hydraulische Federfußpunktverstellung, kombiniert mit Verstelldämpfern, mit zusätzlichen Informationen aus der Stereokamera angesteuert [25,136]. Dabei wird ebenfalls angesprochen, die Fahrbahnsteigung und -krümmung für die vorausschauende Ansteuerung zu verwenden.

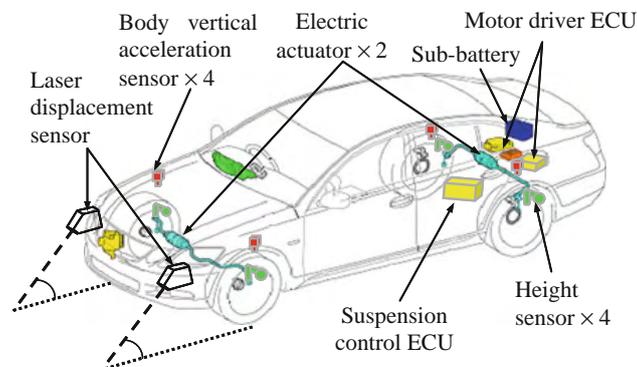


Abbildung 1.10: Fahrzeugaufbau bei Sugai et al. (Bild aus [122])

Sugai von Toyota [122] benutzt zwei Lasersensoren, welche vertikal scannend im Bereich der beiden Frontscheinwerfer eingebaut den Abschnitt der Straße vor den Rädern erfassen. Das Fahrzeug ist mit einer elektrischen Wankstabilisierung ausgestattet (Abbildung 1.10). Die Frequenz der Sensoren beträgt 0,1 ms, die Genauigkeit 0,2 mm. Um die Wankbeschleunigung zu reduzieren benutzt er einen *Skyhook*-Ansatz kombiniert mit einer Vorsteuerung aus dem Straßenhöhenprofil. Dieses Vorsteuermoment berechnet sich aus der Differenz des Straßenhöhenprofils rechts und links geteilt durch die Spurbreite und gewichtet mit einem Proportionalitätsfaktor. Er führt eine Kompensation der Aktordynamik durch und erprobt das System am Vierstempelprüfstand und im Fahrzeug. Er berichtet von einer Reduktion der Wankbeschleuni-

gung in einem Frequenzbereich von 0,5 bis 3 Hz sowie einer Reduktion der benötigten Leistung durch die vorausschauende Regelung.

Fazit Das Konzept einer Störgrößenkompensation wird als einfach und vielversprechend gewertet und ebenfalls weiter untersucht werden.

1.2.4 Sensoren und Algorithmen zur Ermittlung des Straßenhöhenprofils

Ein wesentlicher Punkt einer vorausschauenden Fahrwerksregelung ist die Auswahl eines geeigneten Sensors sowie die Ermittlung des Straßenhöhenprofils durch Aufbereitung der Sensorrohdaten.

Mögliche Sensoren

Aus Gründen des Bauraums und der Kosten ist es vorteilhaft für die Industrialisierung, bereits existierende und zukünftige Umfeldsensoren, welche für Fahrerassistenzsysteme eingesetzt werden, auch für die vorausschauende Fahrwerksregelung zu verwenden. Eine Möglichkeit sind videobasierte Sensoren, wobei zwischen einer Stereokamera und einer Monokamera zu unterscheiden ist.

Eine Stereokamera mit der Basisweite b ist in Abbildung 1.11a schematisch gezeichnet. Ein Bildpunkt im dreidimensionalen Raum wird auf die zweidimensionale Bildebene projiziert, die sich im Abstand der Brennweite f vom Kamerazentrum entfernt befindet. Die Verschiebung des korrespondierenden Bildpunktes in beiden Kamerabildern wird als Disparität d bezeichnet. Sind die Kameradaten Brennweite und Basisweite bekannt, kann die Entfernung des Bildpunktes Z berechnet werden [2, 138]:

$$Z = \frac{f \cdot b}{d} \quad (1.19)$$

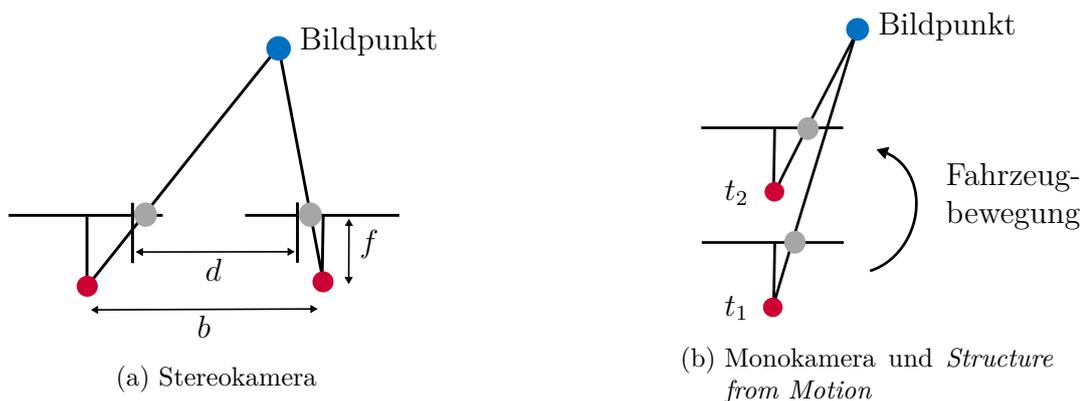


Abbildung 1.11: Schematische Darstellung der Entfernungsbestimmung mit einem Kamerasystem

Im Gegensatz hierzu kann mit einer Monokamera die Entfernungsmessung eines Bildpunktes einer unbewegten Umgebung mit dem *Structure from Motion* (SfM) Verfahren durchgeführt werden (siehe Abbildung 1.11b). Hierbei wird über Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten t_1 und t_2 einer bewegten Kamera die Verschiebung korrespondierender Bildpunkte auf der Bildebene gemessen und hieraus eine Entfernung bestimmt. Dafür ist eine genaue Kenntnis

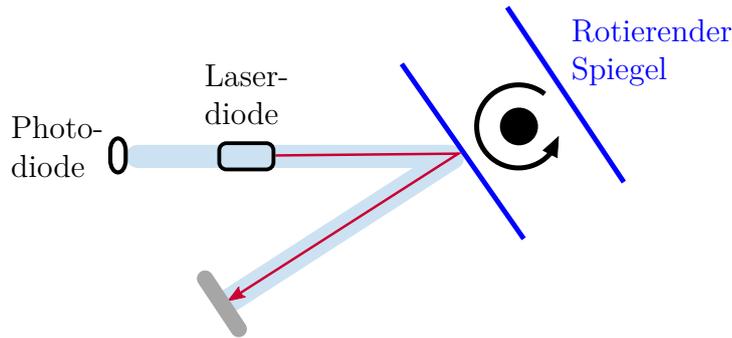


Abbildung 1.12: Schematische Darstellung der Entfernungsbestimmung eines Lasersensors

der Kamerabewegung notwendig. Diese kann über Initialwerte basierend auf der Fahrzeuggeschwindigkeit und weitergehender Optimierung zur Übereinstimmung aufeinanderfolgender Bilder erhalten werden. Bei stehendem Fahrzeug kann eine Entfernungsbestimmung mit einer Monokamera nicht durchgeführt werden.

Über eine stereoskopisch berechnete Disparität können somit die Entfernungswerte über die baulich festgelegte Basisweite aus den beiden Bildern zu einem Zeitpunkt berechnet werden. Bei dem *Structure from Motion* Verfahren können Entfernungswerte durch Kombination zweier Bilder unterschiedlicher Zeitpunkte erhalten werden, wobei die Basisweite variabel ist und somit deutlich größer gewählt werden kann. Mit einer Stereokamera könnten, genügend Rechenkapazität vorausgesetzt, mit beiden Kameras stereoskopisch und zusätzlich auf jeder Kamera separat mit SfM Entfernungsinformationen gewonnen werden.

Ein weiterer möglicher Sensor ist der Laserscanner, auch Lidar⁷ genannt, basierend auf Pulslaufzeitmessung. Abbildung 1.12 zeigt die prinzipielle Funktionsweise. Hierbei wird Licht im Infrarotbereich mit einer Laserdiode über einen rotierenden Spiegel ausgesendet und die Pulslaufzeit bis zur Detektion durch die Photodiode gemessen. Somit lassen sich in einer Ebene, definiert durch den rotierenden Spiegel, Entfernungsmessungen ermitteln. Durch den Einsatz mehrerer Photodioden lassen sich mehrere parallele Ebenen durch den rotierenden Spiegel mit den Laserpulsen abtasten.

Die Sensoren liefern folglich Entfernungsinformationen der gemessenen Straße in einem sensorfesten und somit karosseriefesten Koordinatensystem. Dies bedeutet, dass bei einer Bewegung des Fahrzeugaufbaus die Entfernungsmessungen zur Straße variieren. Der prinzipielle Unterschied der Sensoren besteht in folgenden Punkten:

1. Die Anzahl der Messpunkte zu jedem Zeitschritt
2. Die Genauigkeit der Entfernungsmessung
3. Der Sensorsichtbereich, u.a. die Reichweite des Sensors
4. Die Taktrate des Sensors
5. Die Latenz bis die Entfernungsinformation zur Verfügung steht
6. Das Verhalten des Sensors bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen wie Tag, Nacht und Schatten, Trockenheit und Nässe, Nebel und Schnee

⁷Von *light plus radar* bzw. Abkürzung für *light detection and ranging*

Diese Eigenschaften eines Sensors müssen berücksichtigt werden, um die Eignung für eine vorausschauende Fahrwerksregelung zu beurteilen.

Konzepte zur Erstellung des Straßenhöhenprofils

Ein zentraler Punkt einer vorausschauenden Fahrwerksregelung ist die Erzeugung des Straßenhöhenprofils aus den Sensorrohdaten und somit des der Regelung zur Verfügung stehenden Eingangssignals. Dies wird in den bisher genannten Veröffentlichungen nur unzureichend thematisiert. Ein vollständiges Konzept hierfür wird von Schindler [110] vorgeschlagen und in einem Versuchsfahrzeug umgesetzt. Hierbei werden zwei Industrie-Laserscanner der Firma Sick verwendet, welche neben den Fahrzeugscheinwerfern vertikal scannend eingebaut sind. Somit treffen die Laserstrahlen durch den rotierenden Spiegel in einer Geraden jeweils längs vor den Rädern auf den Boden. Es ergeben sich viele Messpunkte vor den Rädern, jedoch mit dem Nachteil, dass der Laserscanner schwierig für weitere Fahrerassistenzfunktionen genutzt werden kann und kein zusätzlicher seitlicher Bereich für Kurvenfahrt abgedeckt wird. Aus diesen Entfernungsmessungen berechnet Schindler zunächst Höhenwerte bezüglich einer Bezugslinie durch die Radaufstandspunkte (Abbildung 1.13).

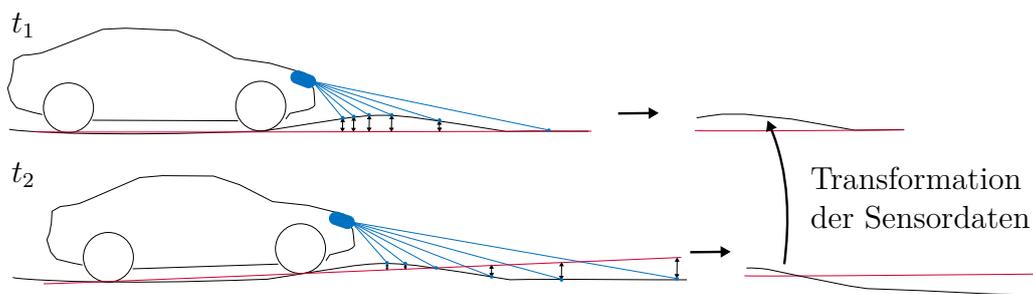


Abbildung 1.13: Akkumulation der Höhenwerte durch Transformation der neuen Sensordaten in die bereits erstellte Höhenkarte; Bezugslinie in Rot und Höhenprofil in Schwarz

Es werden in aufeinanderfolgenden Zeitschritten redundante Bereiche der Straße gemessen, da der verwendete Lasersensor einen Sichtbereich von ca. zwei bis zehn Metern erfasst und Entfernungsmessungen dieses Bereichs mit 75 Hz liefert. Bei einer Geschwindigkeit von beispielsweise 30 km/h legt das Fahrzeug somit zwischen zwei Scans 11 cm zurück. Somit wird der größte Teil des Fahrbahnabschnitts redundant gescannt. Die verwendeten Sensoren sind leistungsstarke Industriesensoren, das generelle Konzept des redundanten Messens der Fahrbahn ist jedoch auch bei den erwähnten automobil-gebräuchlichen Sensoren gegeben.

Um die Genauigkeit der Sensormessung zu erhöhen, werden die Messungen zu unterschiedlichen Zeitschritten derselben Stelle akkumuliert. Hier muss zunächst der unterschiedliche Blickwinkel des Sensors aufgrund der Fahrzeugkarosseriebewegung kompensiert werden. Es wird mittels linearer Regression Huben und Nicken des Fahrzeuges derart korrigiert, dass die neuen Messwerte, umgerechnet in Höhenwerte zur Radaufstandsfläche, möglichst gut mit der bereits erstellten Höhenkarte zur Übereinstimmung kommen. Danach wird eine Akkumulation des redundant gemessenen Bereichs in einem diskretisierten Raster vor den Rädern durchgeführt. Die Aufweitung des Laserstrahls wird durch eine örtliche Wahrscheinlichkeitsverteilung beachtet. Das diskrete Raster mit Höhenwerten wird geschwindigkeitsabhängig unter dem Fahrzeug durchgeschoben.

Des Weiteren wird das Höhenprofil in jedem Zeitschritt gedreht, so dass die Höhenwerte unter den Rädern Null sind. Diese Korrektur setzt ein, sobald das Fahrzeug zum ersten Mal über das erkannte Höhenprofil gefahren ist. Diese Methode zur Erstellung des Straßenhöhenprofils hat die Eigenschaft, dass die Höhenwerte unter den Rädern immer Null sind und sich ein örtlich konsistentes Höhenprofil ergibt, welches von Zeitschritt zu Zeitschritt unterschiedlich im Koordinatensystem liegt.

Fazit Die Verringerung des Messrauschens durch Mittelung über mehrere Zeitschritte und eine genauere Bestimmung der Sensorbewegung durch Ermittlung der Korrespondenz redundant gemessener Straßenabschnitte wird weiter betrachtet; ebenso die Verwendung einer diskreten Höhenkarte, welche fahzeuggeschwindigkeitsabhängig in Längsrichtung verschoben wird. Hierdurch stehen die für die Regelung benötigten Höhenwerte durch Auslesen der betreffenden Zellen zur Verfügung und es muss keine Erweiterung des Zustandsraums oder eine Übertragungsfunktion zur Überbrückung der Totzeit eingeführt werden. Es werden somit in der vorliegenden Arbeit auf dieser Basis Konzepte entwickelt, um ein möglichst günstiges Höhenprofil für die entworfenen Regler zu erhalten.

2.1.1 Herleitung der Bewegungsgleichungen

Bewegungsgleichungen für den Fahrzeugaufbau

Es wird die Annahme kleiner Winkel für Nicken und Wanken getroffen, des Weiteren, dass die Wank- und Nickachse durch den Schwerpunkt gehen. Es wird Impuls- und Drallsatz für den Fahrzeugaufbau in einem inertialen Koordinatensystem aufgestellt, wobei das Huben des Fahrzeugaufbaus immer in inertialer z-Richtung verläuft:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} m_A & 0 & 0 \\ 0 & J_\eta & 0 \\ 0 & 0 & J_\omega \end{pmatrix}}_{\Theta_A} \cdot \begin{pmatrix} \ddot{z}_A \\ \ddot{\eta} \\ \ddot{\omega} \end{pmatrix} = - \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -l_v & -l_v & l_h & l_h \\ t_v & -t_v & t_h & -t_h \end{pmatrix}}_{\mathbf{T}_G} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} F_{R,vl} \\ F_{R,vr} \\ F_{R,hl} \\ F_{R,hr} \end{pmatrix}}_{\underline{F}_R} + \underbrace{\begin{pmatrix} F_z \\ M_\eta \\ M_\omega \end{pmatrix}}_{\underline{f}} \quad (2.1)$$

Die Deviationsmomente $J_{\eta\omega}$ betragen bei einem typischen Fahrzeug weniger als 1% der Hauptträgheitsmomente J_η, J_ω und werden deshalb vernachlässigt. Die Konstanten m_A, J_η und J_ω bezeichnen die Aufbaumasse sowie die Trägheitsmomente um den Schwerpunkt in Nick- bzw. Wankrichtung. Der Radstand zum Schwerpunkt wird durch l_v und l_h beschrieben, die Spurweite durch t_v und t_h .

Es sollen alle Aktorikmöglichkeiten aus Abbildung 1.1 betrachtet werden. Dies führt auf das allgemeine Aktorikmodell aus Abbildung 2.2. Es kann ein System mit linearisiertem, passiven Dämpfer und Dämpfungskonstante d dargestellt werden, ebenso eine Kraft F_d anstelle des Dämpfers um einen Verstelldämpfer oder den Krafteingang eines vollaktiven Systems darzustellen. Die Federfußpunktverstellung ist durch den Verstellweg s_{ii} definiert. Je nach Art der Federfußpunktverstellung entfällt entweder die Feder parallel zur Aktorik oder die Feder c_2 .

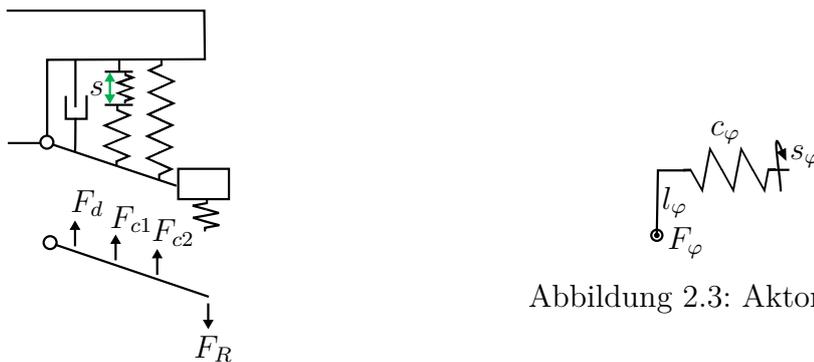


Abbildung 2.2: Allgemeines Aktorikmodell

Abbildung 2.3: Aktor mit Drehfeder

Die Variante mit der Feder c_2 tritt bei einem Aktor mit Drehfeder nach Abbildung 1.5b auf. Es kann eine Umrechnung der Drehfederrate in eine Längsfederrate und des Verdrehwinkels in eine vertikale Verschiebung durchgeführt werden, um den Drehaktor nach Abbildung 2.3 auf das allgemeine Aktorikmodell aus Abbildung 2.2 zu überführen. Die über den Hebel ausgeübte vertikale Kraft F_φ in Abbildung 2.3 berechnet sich aus dem Verdrehwinkel s_φ , der Drehfederrate c_φ und dem Hebelarm l_φ und soll der Multiplikation einer Federkonstanten c_1 mit einem vertikalen Aktorweg s entsprechen:

$$F_\varphi = \frac{c_\varphi \cdot s_\varphi}{l_\varphi} = c_1 \cdot s \quad (2.2)$$

Der Zusammenhang zwischen Verdrehwinkel und vertikaler Verschiebung kann für kleine Winkel mit der Bogenmaßdefinition $s = s_\varphi \cdot l_\varphi$ angegeben werden. Diese beiden Gleichungen zusammengefasst ergibt folgende Umrechnung der Drehfederrate c_φ in die Längsfederrate c_1 :

$$c_1 = \frac{c_\varphi}{l_\varphi} \quad (2.3)$$

Im Folgenden werden Übersetzungen vom Rad zum Dämpfer und vom Rad zur Feder verwendet (Abbildung 2.2). Diese Übersetzungen können durch Radeinfederungstests ermittelt werden, bilden die genaue Geometrie des Fahrwerks nach und sind wie folgt definiert:

$$F_{R,ii} = i_{d,ii} \cdot F_{d,ii} + i_{c1,ii} \cdot F_{c1,ii} + i_{c2,ii} \cdot F_{c2,ii} \quad (2.4)$$

Die über den gesamten Arbeitsbereich linearisierten Feder- und Dämpferkräfte berechnen sich wie folgt:

$$\underline{F}_{c1} = \mathbf{K}_{c1} \cdot (\underline{z}_{\text{rel},c1} - \underline{s}) \quad (2.5)$$

$$\underline{F}_{c2} = \mathbf{K}_{c2} \cdot \underline{z}_{\text{rel},c2} \quad (2.6)$$

$$\underline{F}_d = \mathbf{K}_d \cdot \dot{\underline{z}}_{\text{rel},d} \quad (2.7)$$

Eine positive Relativgeschwindigkeit wird als Zugstufe des Dämpfers definiert, wobei die Dämpferkraft in diesem Fall als positiv definiert wird (siehe Abbildung 1.6b). Die Matrizen \mathbf{K}_{c1} , \mathbf{K}_{c2} und \mathbf{K}_d beinhalten die linearisierten Feder- und Dämpferkonstanten $c_{1,VA}$, $c_{1,HA}$, $c_{2,VA}$, $c_{2,HA}$, d_{VA} und d_{HA} in den Diagonalelementen. Die Matrizen \mathbf{H}_{c1} , \mathbf{H}_{c2} und \mathbf{H}_d beinhalten die Übersetzungen $i_{c1,VA}$, $i_{c1,HA}$, $i_{c2,VA}$, $i_{c2,HA}$, $i_{d,VA}$ und $i_{d,HA}$ in den Diagonalelementen. Es gilt $\mathbf{T}_{c1} = \mathbf{T}_G \cdot \mathbf{H}_{c1}$ und analog für \mathbf{T}_{c2} und \mathbf{T}_d . Für den Relativweg $z_{\text{rel},c1,ii}$ und analog für $z_{\text{rel},c2,ii}$ sowie für die Relativgeschwindigkeit $\dot{z}_{\text{rel},d,ii}$ zwischen Fahrzeugaufbau und Querlenker an der jeweiligen Übersetzung gilt für kleine Winkel:

$$\underline{z}_{\text{rel},c1} = \mathbf{T}_{c1}^T \begin{pmatrix} z_A \\ \eta \\ \omega \end{pmatrix} - \mathbf{H}_{c1} \cdot \underline{z}_R \quad (2.8)$$

$$\dot{\underline{z}}_{\text{rel},d} = \mathbf{T}_d^T \begin{pmatrix} \dot{z}_A \\ \dot{\eta} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} - \mathbf{H}_d \cdot \dot{\underline{z}}_R \quad (2.9)$$

Einsetzen der Definition der Feder- und Dämpferkräfte (2.5) bis (2.7) mithilfe der Definition der Relativwege (2.8), der Relativgeschwindigkeiten (2.9) und den Übersetzungen (2.4) in Gleichung (2.1) führt zu den Bewegungsgleichungen des Fahrzeugaufbaus:

$$\Theta_A \begin{pmatrix} \ddot{z}_A \\ \ddot{\eta} \\ \ddot{\omega} \end{pmatrix} + \mathbf{T}_d \mathbf{K}_d \mathbf{T}_d^T \begin{pmatrix} \dot{z}_A \\ \dot{\eta} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} + (\mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{T}_{c1}^T + \mathbf{T}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{T}_{c2}^T) \begin{pmatrix} z_A \\ \eta \\ \omega \end{pmatrix} = \mathbf{T}_d \mathbf{K}_d \mathbf{H}_d \dot{z}_R + (\mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{H}_{c1} + \mathbf{T}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{H}_{c2}) \underline{z}_R + \mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \underline{z}_S - \mathbf{T}_d \underline{F}_d + \underline{f} \quad (2.10)$$

Bewegungsgleichungen für die Räder

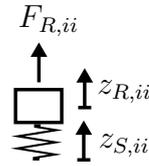


Abbildung 2.4: Freigeschnittenes Rad mit Reifen

Die Bewegungsgleichungen für die vier Radmassen ergeben sich nach Abbildung 2.4 zu

$$\begin{aligned} \Theta_R \ddot{z}_R &= -\mathbf{K}_{cR} (z_R - z_S) + \underline{F}_R \\ &= -\mathbf{K}_{cR} (z_R - z_S) + (\mathbf{H}_{c1} \underline{F}_{c1} + \mathbf{H}_{c2} \underline{F}_{c2} + \mathbf{H}_d \underline{F}_d), \end{aligned} \quad (2.11)$$

mit den Radmassen m_R in den Diagonalelementen von Θ_R und den Reifensteifigkeiten c_R in den Diagonalelementen der Matrix \mathbf{K}_{cR} . Einsetzen der Feder- und Dämpferkräfte führt auf folgende Radbewegungsgleichungen:

$$\begin{aligned} \Theta_R \ddot{z}_R + \mathbf{H}_d \mathbf{K}_d \mathbf{H}_d \dot{z}_R + (\mathbf{H}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{H}_{c1} + \mathbf{H}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{H}_{c2} + \mathbf{K}_{cr}) \underline{z}_R = \\ \mathbf{H}_d \mathbf{K}_d \mathbf{T}_d^T \begin{pmatrix} \dot{z}_A \\ \dot{\eta} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} + (\mathbf{H}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{T}_{c1}^T + \mathbf{H}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{T}_{c2}^T) \begin{pmatrix} z_A \\ \eta \\ \omega \end{pmatrix} - \mathbf{H}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \underline{z}_S + \mathbf{K}_{cR} \underline{z}_S + \mathbf{H}_d \underline{F}_d \end{aligned} \quad (2.12)$$

Zustandsraumdarstellung

Die Aufbau- (2.10) und Radbewegungsgleichungen (2.12) ergeben die Zustandsraumdarstellung des Gesamtfahrzeugmodells:

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_A \\ \dot{\eta} \\ \dot{\omega} \\ \dot{z}_R \\ \ddot{z}_A \\ \ddot{\eta} \\ \ddot{\omega} \\ \ddot{z}_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 3} & \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 3} & \mathbf{I}_4 \\ \mathbf{A}_{31} & \mathbf{A}_{32} & -\Theta_A^{-1} \mathbf{T}_d \mathbf{K}_d \mathbf{T}_d^T & \Theta_A^{-1} \mathbf{T}_d \mathbf{K}_d \mathbf{H}_d \\ \mathbf{A}_{41} & \mathbf{A}_{42} & \Theta_R^{-1} \mathbf{H}_d \mathbf{K}_d \mathbf{T}_d^T & -\Theta_R^{-1} \mathbf{H}_d \mathbf{K}_d \mathbf{H}_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_A \\ \eta \\ \omega \\ z_R \\ \dot{z}_A \\ \dot{\eta} \\ \dot{\omega} \\ \dot{z}_R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 3} & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \Theta_A^{-1} \mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} & -\Theta_A^{-1} \mathbf{T}_d & \Theta_A^{-1} & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ -\Theta_R^{-1} \mathbf{H}_{c1} \mathbf{K}_{c1} & \Theta_R^{-1} \mathbf{H}_d & \mathbf{0}_{4 \times 3} & \Theta_R^{-1} \mathbf{K}_{cR} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{s} \\ \underline{F}_d \\ \underline{f} \\ \underline{z}_S \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_{31} &= -\Theta_A^{-1} (\mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{T}_{c1}^T + \mathbf{T}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{T}_{c2}^T) \\
 \mathbf{A}_{32} &= \Theta_A^{-1} (\mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{H}_{c1} + \mathbf{T}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{H}_{c2}) \\
 \mathbf{A}_{41} &= \Theta_R^{-1} (\mathbf{H}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{T}_{c1}^T + \mathbf{H}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{T}_{c2}^T) \\
 \mathbf{A}_{42} &= -\Theta_R^{-1} (\mathbf{H}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{H}_{c1} + \mathbf{H}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{H}_{c2} + \mathbf{K}_{cR})
 \end{aligned}$$

Diese lineare Zustandsraumdarstellung mit 14 Zuständen ist asymptotisch stabil für den Fall, dass die Dämpferkonstanten in der Matrix \mathbf{K}_d ungleich Null sind, ansonsten grenzstabil mit Eigenwerten auf der imaginären Achse. Das System ist nicht vollständig steuerbar, da die Aktorik nicht sowohl die Aufbau- als auch die Radmassen beliebig beeinflussen kann. Dies lässt sich über das Kriterium von Kalman berechnen, da der Rang der Steuerbarkeitsmatrix \mathbf{S} , mit $\mathbf{S} = (\mathbf{B} \ \mathbf{A}\mathbf{B} \ \mathbf{A}^2\mathbf{B} \ \dots \ \mathbf{A}^{13}\mathbf{B})$, kleiner der Systemordnung ist. Dem System liegt das allgemeine Aktorikmodell aus Abbildung 2.2 zu Grunde. Um die einzelnen Konfigurationen aus Abbildung 1.1 zu erhalten, sind folgende Modifikationen vorzunehmen:

1. **Verstellbarer Dämpfer** Eingang \underline{s} und die Matrizen \mathbf{K}_d und \mathbf{K}_{c1} zu Null setzen. Die Dämpferkraft ist über den Eingang \underline{F}_d definiert.
2. **Federfußpunktverstellung und passiver Dämpfer** Eingang \underline{F}_d zu Null setzen. Der linearisierte, passive Dämpfer wird über die Matrix \mathbf{K}_d berücksichtigt. Je nach Variante der Federfußpunktverstellung gegebenenfalls \mathbf{K}_{c2} zu Null setzen.
3. **Federfußpunktverstellung und verstellbarer Dämpfer** Die Matrix \mathbf{K}_d zu Null setzen, da kein linearer passiver Dämpfer vorhanden ist.
4. **Vollaktives System** Die Matrix \mathbf{K}_d , den Eingang \underline{s} und die Matrix \mathbf{K}_{c1} zu Null setzen. Die Übersetzung i_d an den Aktor des vollaktiven Systems anpassen. Somit ist ein vollaktives System mit dem Krafteingang \underline{F}_d modelliert.

2.1.2 Modellreduktion

Zur modellbasierten Regelung eines langsam aktiven Fahrwerks ist das vorgestellte Modell (2.13) mit sieben Freiheitsgraden nur bedingt geeignet. Die Bandbreite einer langsam aktiven Federfußpunktverstellung bis ca. 5 Hz liegt deutlich unterhalb der Radeigenfrequenz von ca. 12 Hz. Die Raddynamik kann somit nicht beeinflusst werden. Eine Regelung basierend auf einem Modell mit Raddynamik erzeugt hochfrequente Stellsignale im Bereich der Radeigenfrequenz, diese können von der Aktorik nicht realisiert werden. Aus diesem Grund eignet sich ein Modell ohne Raddynamik deutlich besser, da nur Stellsignale zur Beeinflussung des Fahrzeugaufbaus mit einer Eigenfrequenz von ca. 1,5 Hz erzeugt werden. Ein weiterer Vorteil eines solchen reduzierten Modells besteht darin, dass die vertikalen Radpositionen und die vertikalen Radgeschwindigkeiten keine Zustände sind und somit für einen Regelungsentwurf nicht mit einem Beobachter geschätzt werden müssen. In diesem Abschnitt werden die Gleichungen nur für die Federfußpunktverstellung ausgeführt.

Es gibt zwei Möglichkeiten, ein Modell ohne Raddynamik zu erhalten. Ein Ansatz besteht in der Aufstellung der Gleichungen ohne Räder, wie in Abbildung 2.5 dargestellt. Werden die Bewegungsgleichungen für dieses Modell ohne Räder mit den im vorigen Abschnitt vorgestellten Notationen aufgestellt, folgt folgende lineare Zustandsraumdarstellung mit den drei Freiheitsgraden Huben, Nicken und Wanken des Fahrzeugaufbaus:

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_A \\ \dot{\eta} \\ \dot{\omega} \\ \ddot{z}_A \\ \ddot{\eta} \\ \ddot{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 \\ -\Theta_A^{-1} (\mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{T}_{c1}^T + \mathbf{T}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{T}_{c2}^T) & -\Theta_A^{-1} \mathbf{T}_d \mathbf{K}_d \mathbf{T}_d^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_A \\ \eta \\ \omega \\ z_A \\ \dot{\eta} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ \Theta_A^{-1} \mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} & \Theta_A^{-1} & \Theta_A^{-1} (\mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{H}_{c1} + \mathbf{T}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{H}_{c2}) & \Theta_A^{-1} \mathbf{T}_d \mathbf{K}_d \mathbf{H}_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{s} \\ \underline{f} \\ \underline{z}_S \\ \underline{\dot{z}}_S \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Bei diesem System tritt auch die erste Ableitung der Straße als Eingang auf, da diese zur Berechnung der Dämpferkraft notwendig ist.

Die zweite Möglichkeit besteht in der Reduktion des vorgestellten Modells mit sieben Freiheitsgraden durch Eliminierung der Raddynamik und Einführung einer stationären Radeinfederung [119]. Mit der Radeinfederung $\underline{z}_{R,\text{rel}}$ gilt $\underline{z}_R = \underline{z}_{R,\text{rel}} + \underline{z}_S$. Die Radposition \underline{z}_R wird hiermit in den Gleichungen (2.10) und (2.12) ersetzt. In der resultierenden Radbewegungsgleichung werden die dynamischen Anteile eliminiert und eine stationäre Radeinfederung berechnet. Diese stationäre Radeinfederung wird in die resultierende Aufbaubewegungsgleichung eingesetzt, wodurch eine reduzierte Zustandsraumdarstellung mit den Freiheitsgraden Huben, Nicken und Wanken entsteht:

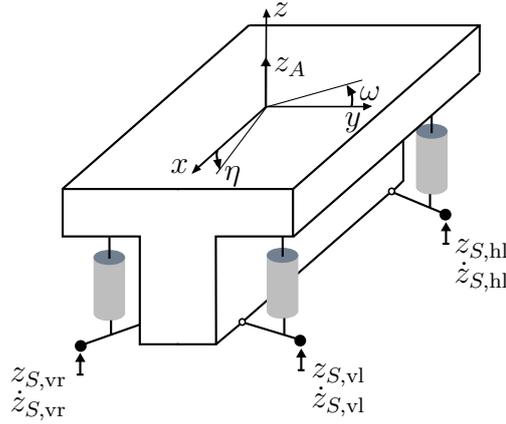


Abbildung 2.5: Gesamtfahrzeugmodell ohne Radmassen

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_A \\ \dot{\eta} \\ \dot{\omega} \\ \ddot{z}_A \\ \ddot{\eta} \\ \ddot{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & & & & & \\ -\Theta_A^{-1} (\mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{T}_{c1}^T + \mathbf{T}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{T}_{c2}^T - \mathbf{T}^* \mathbf{A}^*) & & & & & \\ & \mathbf{I}_3 & & & & \\ & -\Theta_A^{-1} \mathbf{T}_d \mathbf{K}_d \mathbf{T}_d^T & & & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_A \\ \eta \\ \omega \\ \dot{z}_A \\ \dot{\eta} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{s}{f} \\ \frac{f}{z_S} \\ \dot{z}_S \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ \Theta_A^{-1} (\mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} - \mathbf{T}^* \mathbf{B}^*) & \Theta_A^{-1} & \Theta_A^{-1} \mathbf{T}^* \mathbf{H}^{*-1} \mathbf{K}_{cR} & \Theta_A^{-1} \mathbf{T}_d \mathbf{K}_d \mathbf{H}_d \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}^* = \mathbf{H}^{*-1} (\mathbf{H}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{T}_{c1}^T + \mathbf{H}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{T}_{c2}^T)$$

$$\mathbf{B}^* = \mathbf{H}^{*-1} \mathbf{H}_{c1} \mathbf{K}_{c1}$$

$$\mathbf{T}^* = \mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{H}_{c1} + \mathbf{T}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{H}_{c2}$$

$$\mathbf{H}^* = \mathbf{H}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{H}_{c1} + \mathbf{H}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{H}_{c2} + \mathbf{K}_{cR}$$

Diese Modellreduktion entspricht bis auf einige zusätzliche Terme dem Modell (2.14). Der Einfluss dieser zusätzlichen Terme ist gering. Beide Modelle besitzen sechs Zustände, sind vollständig steuerbar und besitzen sowohl die Straßenhöhe als auch deren erste zeitliche Ableitung als Eingang.

2.1.3 Modellinvertierung

Es wird eine Invertierung des reduzierten Gesamtfahrzeugmodells (2.14) vorgeschlagen und im Folgenden durchgeführt. Der vektorielle relative Grad $\underline{r} = (r_1 \dots r_m)^T$ eines linearen MIMO Systems

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}} &= \mathbf{A}\underline{x} + \sum_{i=1}^m b_i u_i & \underline{x}(0) &= \underline{x}_0 \in \mathbb{R}^n \\ y_i &= \underline{c}_i^T \underline{x} & i &\in \{1, \dots, m\} \quad \underline{u}, \underline{y} \in \mathbb{R}^m \end{aligned}$$

ist wie folgt definiert [146, 147]:

- (i) $\underline{c}_i^T \mathbf{A}^k \underline{b}_j = 0 \quad i, j \in \{1, \dots, m\} \quad 0 \leq k \leq r_{i-2}$
- (ii) $\underline{c}_i^T \mathbf{A}^{r_i-1} \underline{b}_j = \beta_{ij} \neq 0 \quad i \in \{1, \dots, m\} \quad \text{für mind. ein } j \in \{1, \dots, m\}$
- (iii) $\text{Rang} \{\mathbf{B}\} = m \quad \mathbf{B} = \{\beta_{ij}\}$

Werden für das reduzierte Modell die drei Ausgänge

$$\underline{z} = \begin{pmatrix} z_A & \eta & \omega \end{pmatrix}^T \tag{2.16}$$

gewählt, entspricht die Summe des vektoriellen relativen Grades der Systemordnung: $\sum_{i=1}^3 r_i = 6$. Die Ausgänge \underline{z} sind flache Ausgänge des Systems, wobei ein Freiheitsgrad zusätzlich festgelegt werden kann. Es liegt somit keine interne Dynamik vor.

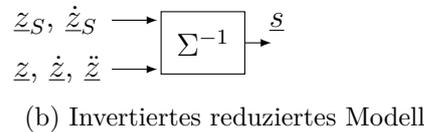
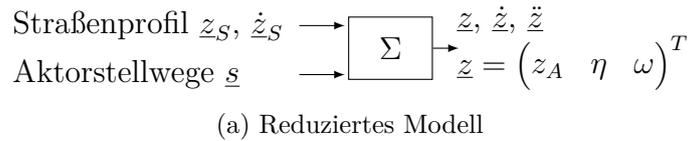


Abbildung 2.6: Modellinvertierung

Um das Modell zu invertieren (Abbildung 2.6), wird die zweite Ableitung der flachen Ausgänge nach der Stellgröße \underline{s} aufgelöst, dies entspricht einem Auflösen nach \underline{s} in den letzten drei Zeilen des Gleichungssystems (2.14). Die Struktur dieser drei Gleichungen lässt sich schreiben als:

$$\mathbf{M}_2 \ddot{\underline{z}} + \mathbf{M}_1 \dot{\underline{z}} + \mathbf{M}_0 \underline{z} = \mathbf{M}_4 \underline{s} + \mathbf{M}_3 \begin{pmatrix} \dot{z}_S \\ \dot{z}_S \end{pmatrix} \tag{2.17}$$

Zur Auflösung dieser Gleichung nach der Stellgröße \underline{s} kann eine zusätzliche Gleichung eingeführt werden. Zur Einstellung einer definierten Nick-, Wank- und Hubposition sind somit unterschiedliche Actorstellungen möglich. Das kann anschaulich verdeutlicht werden, indem man sich ein Ausfahren diagonal gegenüberliegender Aktoren und Einfahren der anderen beiden Aktoren vorstellt. Dies führt zur selben ebenen Lage des Fahrzeugaufbaus, jedoch erhöht sich die Verspannung im Fahrzeugaufbau.

Eine Möglichkeit diesen Freiheitsgrad festzulegen, besteht beispielsweise in der definierten Verteilung des Wankmomentes auf die Vorder- bzw. Hinterachse. Da im Folgenden jedoch vor

allem der Vertikalkomfort maßgebliches Regelziel ist, wird vorgeschlagen, die Verspannung im Fahrzeugaufbau zu eliminieren. Der Begriff der Verspannung¹ im Fahrzeugaufbau wird von mehreren Autoren verwendet [55, 119, 135], jedoch jeweils mit einer anderen Definition. In dieser Arbeit wird definiert, dass sich die Verspannung k aus der Differenz der Summe gegenüberliegender Aktorkräfte ergibt. Somit ist die Verspannung gleich Null, wenn das Fahrzeug auf ebener Straße eben steht und alle vier Aktoren dieselbe Last tragen. Aus den Gleichungen (2.5) und (2.8) folgt mit der Annahme einer stationären Radeinfederung und somit $z_S = z_R$:

$$k = (-1 \quad 1 \quad 1 \quad -1) \mathbf{K}_{c1} \left(\mathbf{T}_{c1}^T \begin{pmatrix} z_A \\ \eta \\ \omega \end{pmatrix} - \mathbf{H}_{c1} z_S - \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{pmatrix} \right) = 0 \quad (2.18)$$

Mithilfe dieser Gleichung wird (2.17) um eine vierte Zeile erweitert und nach der Stellgröße \underline{s} aufgelöst:

$$\begin{aligned} \underline{s} &= \mathbf{K}_0 \underline{z} + \mathbf{K}_1 \dot{\underline{z}} + \mathbf{K}_2 \ddot{\underline{z}} + \mathbf{K}_3 \begin{pmatrix} z_S \\ \dot{z}_S \end{pmatrix} & (2.19) \\ \mathbf{K}_0 &= \overline{\mathbf{M}}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{M}_0 \\ (-1 \quad 1 \quad 1 \quad -1) \mathbf{K}_{c1} \mathbf{T}_{c1}^T \end{pmatrix} & \mathbf{K}_1 = \overline{\mathbf{M}}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} \end{pmatrix} \\ \mathbf{K}_3 &= -\overline{\mathbf{M}}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{M}_3 \\ (-1 \quad 1 \quad 1 \quad -1) \mathbf{K}_{c1} \mathbf{H}_{c1} \quad \mathbf{0}_{1 \times 4} \end{pmatrix} & \mathbf{K}_2 = \overline{\mathbf{M}}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{M}_2 \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} \end{pmatrix} \\ \text{mit } \overline{\mathbf{M}} &= \begin{pmatrix} \mathbf{M}_4 \\ (-1 \quad 1 \quad 1 \quad -1) \mathbf{K}_{c1} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Es kann somit eine gewünschte Bewegung des Fahrzeugaufbaus in den Freiheitsgraden Huben, Nicken und Wanken vorgegeben werden, die dafür notwendigen Stellgrößen für das überfahrene Straßenhöhenprofil berechnen sich mit dem inversen Modell. Diese Stellgrößen können außerhalb der physikalischen Begrenzungen des limitierten Verstellweges und der limitierten Verstellgeschwindigkeit liegen.

2.1.4 Kompensation der nichtlinearen Dämpferkennlinie

Für die linearen Modellgleichungen der Gesamtfahrzeugmodelle wird die nichtlineare Dämpferkennlinie des passiven Dämpfers im gesamten Bereich linearisiert. Um den Effekt der nichtlinearen Dämpferkennlinie im linearen Modell zu berücksichtigen, wird in jedem Zeitschritt die Differenzkraft zur linearen Kennlinie bei Kenntnis der Dämpferrelativgeschwindigkeit über den Krafteingang der Modelle $F_{d,ii}$ hinzugefügt. Dies ist in Abbildung 2.7 veranschaulicht und kann genutzt werden, um einen Beobachter basierend auf einem genaueren Modell und somit einem genaueren Prädiktionsschritt zu entwerfen.

Des Weiteren kann ein Fahrwerksregler für eine Federfußpunktverstellung basierend auf einem linearen Modell entworfen werden, beispielsweise die Optimierung einer modellprädiktiven Regelung, und die resultierende Stellgröße um die Modellabweichung kompensiert werden. Dies ist

¹engl. warp

möglich, da sich der Aktor einer Federfußpunktverstellung parallel zum nichtlinearen Dämpfer befindet. Somit kann mit linearer Optimierung die nichtlineare Dämpferkennlinie berücksichtigt werden. Die kompensierte Stellgröße $s_{c,ii}$ berechnet sich zu

$$s_{c,ii} = s_{ii} - \frac{\Delta F}{c_1} \frac{i_d}{i_{c1}}, \quad (2.20)$$

wobei die unterschiedlichen Hebelarme i_{c1} und i_d von Dämpfer und Aktor berücksichtigt werden. Die Differenzkraft ΔF berechnet sich aus der Differenz zwischen linearisierter und nichtlinearer Dämpferkennlinie für die aktuelle Dämpferrelativgeschwindigkeit.

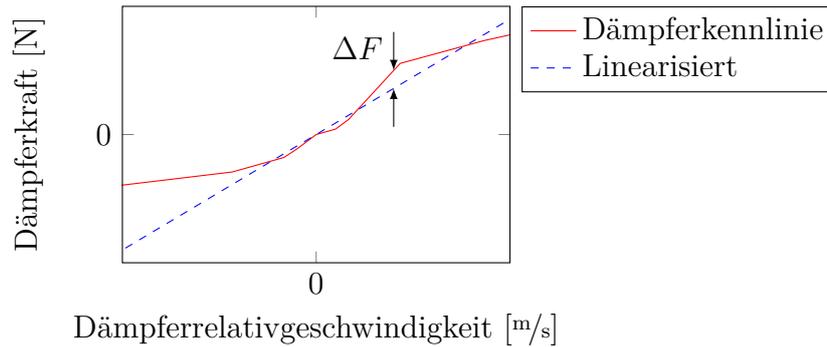


Abbildung 2.7: Kompensation der nichtlinearen Dämpferkennlinie in jedem Zeitschritt

2.1.5 Berücksichtigung der Aktordynamik

In den vorgestellten Gesamtfahrzeugmodellen ist die Dynamik der Federfußpunktverstellung noch nicht berücksichtigt. Die Regelstruktur der Federfußpunktverstellung besteht aus einem vorgegebenden Soll-Verstellweg $\underline{s}_{\text{soll}}$, eine unterlagerte Motorregelung regelt diesen ein. Die Dynamik der unterlagerten Motorregelung kann so eingestellt werden, dass ein PT-1 Verhalten zwischen Sollvorgabe und Aktorstellweg besteht: $s_{\text{ist},ii} = \frac{1}{1+T_A s} s_{\text{soll},ii}$. Dieses PT-1 Verhalten kann in die Zustandsraumdarstellung integriert werden und führt zu einem zusätzlichen Zustand pro Aktor:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{\underline{x}}(t) \\ \dot{\underline{s}}_{\text{ist}}(t) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_u \\ \mathbf{0} & -\frac{1}{T_A} \mathbf{I}_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{x}(t) \\ \underline{s}_{\text{ist}}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \frac{1}{T_A} \mathbf{I}_4 \end{pmatrix} \underline{s}_{\text{soll}}(t) + \begin{pmatrix} \mathbf{B}_w \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \underline{w}(t) \\ \underline{y}(t) &= (\mathbf{C} \quad \mathbf{D}_u) \begin{pmatrix} \underline{x}(t) \\ \underline{s}_{\text{ist}}(t) \end{pmatrix} + \mathbf{D}_w \underline{w}(t) \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.2 Experimentelle Modellvalidierung

Das vorgestellte Gesamtfahrzeugmodell mit sieben Freiheitsgraden (2.13), das vorgestellte reduzierte Gesamtfahrzeugmodell (2.14) und das für die Simulationen benutzte und von der AUDI AG bereitgestellte Simulationsmodell werden in diesem Abschnitt mit Fahrzeugmessungen verglichen. Das Simulationsmodell mit zehn Freiheitsgraden besitzt neben den vier Radmassen und der Aufbaumasse noch eine Masse des Verbrennungsmotors mit den drei Freiheitsgraden

Huben, Nicken und Wanken. Der Motor ist mit nichtlinearen, frequenzselektiv dämpfenden Motorlagern gelagert. Die Fahrwerksfedern und -dämpfer sind mittels gemessener, nichtlinearer Kennlinien modelliert, ebenso das Dämpferlager und die Nebenfederraten. Der Unterschied der beiden vorgestellten reduzierten Modelle (2.14) und (2.15) ist nicht signifikant.

Es gibt in der Literatur vereinzelt Vergleiche von vertikaldynamischen Fahrzeugmodellen mit Fahrzeugmessungen [130], dies jedoch immer auf einem Vierstempelprüfstand. Hierbei wird ein stehendes Fahrzeug durch vier, meist hydraulische, Stempel unter den Rädern mit einem definierten vertikalen Verfahrweg angeregt. Dieser Verfahrweg kann einer zuvor vermessenen Straße entsprechen. Im Folgenden wird die Modellvalidierung mit Messungen eines fahrenden Fahrzeuges über eine höhenprofilvermessene Straße durchgeführt. Die Referenzierung erfolgt über ein hochgenaues GPS-basiertes System im Fahrzeug. Somit wird in der Simulation das Verhalten der Fahrzeugmodelle über dasselbe Höhenprofil mit derselben Geschwindigkeit berechnet und ein Vergleich von Fahrzeugmessungen mit simulierten Werten durchgeführt. Diese Methode ist realitätsnäher, da sich das Fahrzeug mit der wirklichen Geschwindigkeit bewegt.

2.2.1 Referenzierung auf höhenprofilvermessenen Strecken

Im Laufe dieser Arbeit werden hochgenau höhenprofilvermessen Strecken verwendet. Es wird an dieser Stelle die Datenstruktur und die Zuordnung der Position erläutert.

Die höhenvermessenen Straßen sind im Format OpenCRG (www.OpenCRG.org) gespeichert und im World Geodetic System 1984 (WGS 84) referenziert. Es wird zunächst eine Referenzachse in einem Gauß-Krüger-Koordinatensystem beschrieben (siehe Abbildung 2.8). Ein solches kartesisches Koordinatensystem besitzt eine x -Koordinate nach Norden, eine y -Koordinate nach Osten und gilt für ein hinreichend kleines Gebiet auf der Erde. Diese Koordinatenachsen werden in der Literatur auch mit Hochwert und Rechtswert bezeichnet. Die gekrümmte Referenzachse verläuft in etwa mittig der vermessenen Straße und ist in dem verebneten Gauß-Krüger-Koordinatensystem beschrieben. Hierdurch wird eine zur Referenzachse tangentielle u -Koordinate und orthogonale v -Koordinate definiert. In diesen $(u v)$ -Koordinaten werden in einem 1 cm x 1 cm-Raster auf einer Straßenbreite von ca. 3 m absolute Höhenwerte bezogen auf den WGS 84 Ellipsoid, welcher näherungsweise die Erdoberfläche darstellt, referenziert. Zur Speicherung dieser Daten ist also eine Höhenmatrix mit Höhenwerten z für ein Gitter an u - und v -Koordinaten notwendig. Des Weiteren zwei Vektoren, welche den Verlauf der Referenzachse in $(x y)$ -Koordinaten beschreiben.

Das im Fahrzeug eingebaute GPS-basierte System nutzt ein Korrektursignal, entweder über das Mobilfunknetz oder über eine installierte Sendestation. Der Hersteller des Systems benutzt zudem Inertialsensoren zur Messung von Beschleunigungen und Drehraten des Fahrzeugs und somit werden, neben weiteren Größen, Längengrad, Breitengrad und Azimut mit 100 Hz ausgegeben. Der Azimut gibt den Winkel der Fahrzeugbewegung bezüglich der Achse nach Norden an. Die Positionsgenauigkeit beträgt bei gutem Empfang laut Herstellerangabe 2 cm.

Die im Fahrzeug gemessene Position des GPS-basierten Systems als Längengrad und Breitengrad kann in das $(x y)$ -Koordinatensystem transformiert werden. Es wird die Zwangsbedingung eingeführt, dass das Fahrzeug mit allen vier Rädern auf der vermessenen Höhenkarte steht.

Um die Höhenwerte unter den vier Rädern für eine gegebene Fahrzeugposition aus der Karte auszulesen, müssen, unter Berücksichtigung der Einbauposition des GPS-basierten Systems, zur Position in $(x y)$ -Koordinaten korrespondierende $(u v)$ -Koordinaten gefunden werden. Diese Korrespondenz $(x y) \rightarrow (u v)$ muss iterativ ermittelt werden. Hierzu wird ausgehend vom

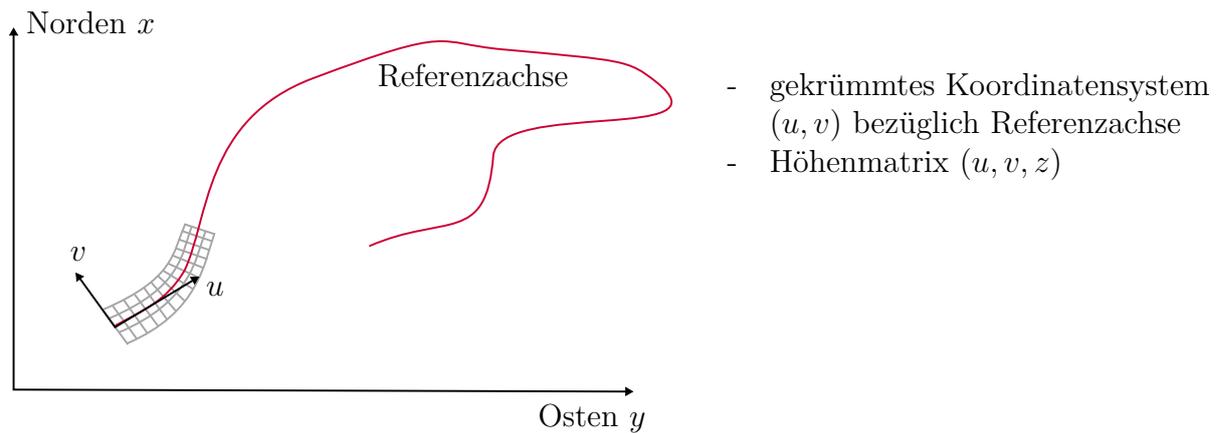


Abbildung 2.8: Höhenprofilvermessung im OpenCRG Format

Startwert die Referenzachse durchlaufen. Ein Minimum des orthogonalen Abstands zwischen Referenzachse und gegebener Position in (x, y) -Koordinaten liefert die gesuchte u -Koordinate. Hieraus wird die v -Koordinate bestimmt. Wird dies für jeden Zeitschritt einer Fahrt ermittelt, kann jeweils beim zuletzt gefundenen u -Wert der Referenzachse gestartet werden. Somit müssen nur einige wenige Iterationen bis zur nächsten Übereinstimmung ausgeführt werden.

Die hochgenau vermessenen Höhenprofile werden in dieser Arbeit für folgende Anwendungen verwendet:

1. Mithilfe der GPS-Daten wird das überfahrene Höhenprofil ermittelt und eine Modellvalidierung erfolgt, indem Fahrzeugmessungen mit Simulationen über dasselbe Höhenprofil mit derselben Geschwindigkeit durchgeführt werden.
2. Mit einem Fahrzeugmodell wird die Fahrzeugbewegung über diese realistische Strecke simuliert. Es wird angenommen, das Fahrzeug fährt entlang der Referenzachse. Mithilfe des Höhenprofils für die gesamte Straßenbreite werden exakte Entfernungsmessungen eines karosseriefesten Sensors mit definierten Sichtlinien berechnet. Diese Entfernungsmessungen werden mit einem Sensorrauschen versehen. Somit werden die entwickelten Algorithmen zur Erstellung des Straßenhöhenprofils, sowie zur Fahrwerksansteuerung, über realistische Straßen getestet und bewertet.
3. Die Höhenkarte wird auf dem Entwicklungssteuergerät des Fahrzeuges gespeichert. Somit werden die Höhendaten vor dem Fahrzeug mithilfe der GPS-Lokalisierung online ausgelesen. Dies wird genutzt, um die entworfenen Regelungsverfahren für den Fall genauer Sensoreingangsdaten im Fahrzeug zu testen und das Potential aufzuzeigen.
4. Diese Höheninformationen der Straße werden des Weiteren genutzt, um die Messwerte von Umfeldsensoren und die Ergebnisse eines Beobachters des Straßenhöhenprofils zu bewerten.

2.2.2 Vergleich von Fahrzeugmessungen mit Simulationsergebnissen

In Abbildung 2.9 sind die Messdaten des zur Verfügung stehenden Audi A5 Testfahrzeugs mit aktiver Federfußpunktverstellung und gesperrter Aktorik sowie die Geschwindigkeit und das

Höhenprofil der Straße gezeigt.

Die Messdaten Hubbeschleunigung und Nickrate korrespondieren mit hoher Güte mit den simulierten Werten des Simulationsmodells, des hergeleiteten linearen Modells mit sieben Freiheitsgraden (2.13) und des hergeleiteten linearen Modells mit drei Freiheitsgraden (2.14). Die Messdaten wurden offline mit einem 20 Hz-Tiefpass phasenfrei gefiltert.

Die im Fahrzeug gemessene Quer- und Längsbeschleunigung wird durch Multiplikation mit Masse und Hebelarm dazu benutzt, die äußeren Momente $\underline{f} = (0 \ M_\eta \ M_\omega)^T$ als Eingang für das sieben und drei Freiheitsgrade Modell zu berechnen und somit Wanken und Nicken bei Kurvenfahrt und Längsbeschleunigung zu berücksichtigen. Trotzdem ergibt sich oftmals eine Verschiebung im Zentimeterbereich zwischen der simulierten und gemessenen Radeinfederung $l_{z,ii}$, sichtbar im fünften Diagramm, die Änderung des Wertes ist jedoch richtig wiedergegeben.

Eine Optimierung der Modellparameter, ausgehend von den nominellen Werten, um eine bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation zu erzielen, führt zu keinen signifikanten Verbesserungen [139]. Ein wichtiger Einflussfaktor ist die gewählte Linearisierung der Dämpferkennlinie, diese kann wie in Abschnitt 2.1.4 diskutiert jedoch kompensiert werden.

In Abbildung 2.10 wird für einen Abschnitt der Strecke mit höherfrequenter Anregung ein Vergleich der an den Rädern des Testfahrzeuges befestigten Beschleunigungssensoren mit den Simulationswerten durchgeführt. Hier wird deutlich, dass das hergeleitete sieben Freiheitsgrade Modell die höherfrequenten Radschwingungen bei entsprechender Anregung nicht ganz so gut abbildet wie das Simulationsmodell mit detaillierterer nichtlinearer Modellierung der Fahrwerkselemente und des Reifens. Für die Regelung eines langsam aktiven Fahrwerks ist eine hinreichend genaue Modellierung der Aufbaubewegung bis ca. 5 Hz notwendig, dies ist für das reduzierte Modell erfüllt.

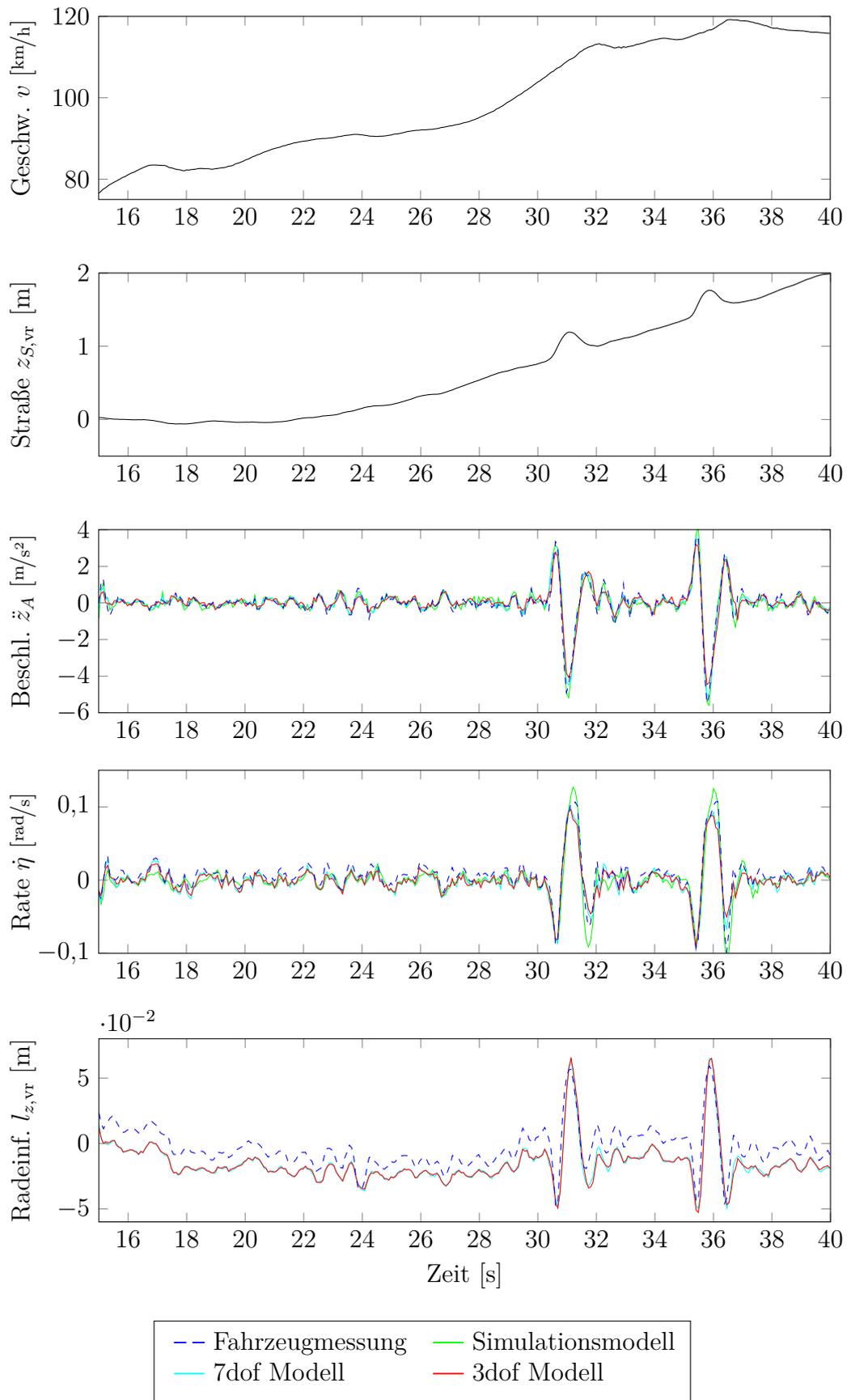


Abbildung 2.9: Vergleich von Fahrzeugmessungen mit Simulationsergebnissen; Fahrt über Straße mit zwei hohen Bodenwellen

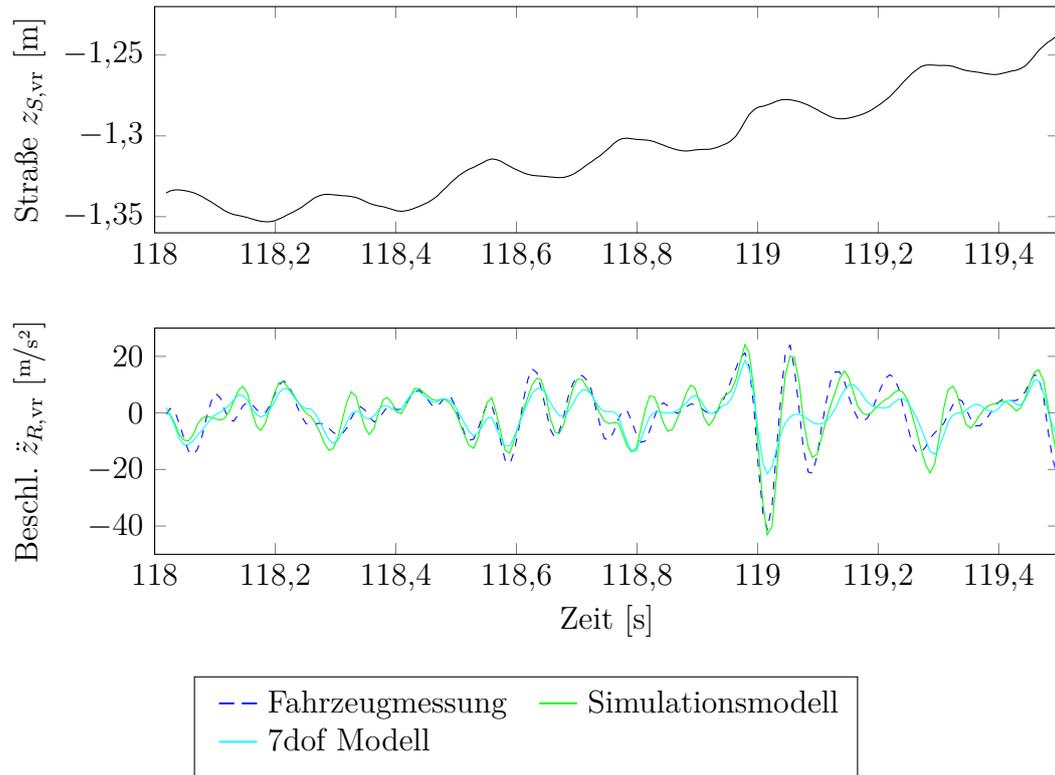


Abbildung 2.10: Vergleich Fahrzeugmessung mit Simulationsergebnissen; Fahrt über Straße mit Bodenwellen und 116 km/h

3 Regelungsentwurf

Es werden zunächst Regelungsverfahren für eine Fahrwerksansteuerung basierend auf einem vor dem Fahrzeug gemessenen Höhenprofil entwickelt und anschließend mögliche Gesamtkonzepte aus Regelung mit Vorausschau und Regelung ohne Vorausschau vorgeschlagen.

3.1 Modellprädiktiver Optimierungsalgorithmus für die Stellsignale

Da bei der vorausschauenden Fahrwerksregelung zu jedem Zeitschritt das Straßenhöhenprofil über einem bestimmten Vorausschauhorizont gegeben ist, erscheint die Methodik der modellprädiktiven Regelung vielversprechend. Hierbei wird das Verhalten des Fahrzeugmodells über den Vorausschauhorizont prädiziert und mit einer Online-Optimierung werden optimale Stellgrößen für jeden Zeitschritt über diesen Vorausschauhorizont berechnet um ein Gütemaß zu minimieren (Abbildung 3.1). Hierbei bezeichnet $\underline{x}[k]$ den Anfangszustand, $\underline{u}[k]$ die initiale Stellgröße, $\hat{\underline{y}}$ die prädizierten Systemausgänge, $\hat{\underline{u}}$ die Stellgrößen über dem Vorausschauhorizont und $\hat{\underline{w}}$ die Straßeninformation über dem Vorausschauhorizont für alle vier Räder. Es werden nur die berechneten Stellgrößen für den nächsten Zeitschritt verwendet, und das Optimierungsproblem in jedem Zeitschritt erneut gelöst. Es können explizit Beschränkungen der Stellgröße und der Zustände berücksichtigt werden. Bei einer Federfußpunktverstellung sind der Aktorstellweg und die Aktorstellgeschwindigkeit mechanisch begrenzt.

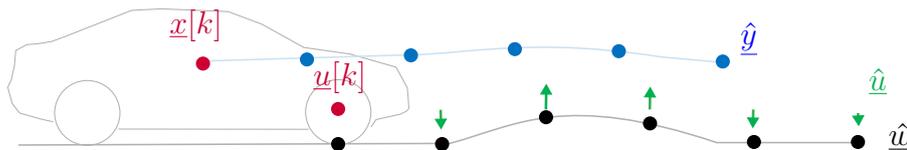


Abbildung 3.1: Funktionsweise der modellprädiktiven Regelung mit fünf Prädiktionsschritten; dargestellt für einen Aktor

Im Folgenden werden lineare Systemmodelle verwendet. Hierfür gibt es zwei prinzipielle Möglichkeiten das modellprädiktive Optimierungsproblem zu formulieren [9]. So können im Gütemaß Ausgänge und Zustände zu jedem Zeitschritt gewichtet minimiert werden und in den Nebenbedingungen des Optimierungsproblems wird das Einhalten der Systemdynamik sichergestellt. Dies führt zu einem linear-quadratischen Optimierungsproblem, auch quadratisches Programm (QP) genannt, mit den Zuständen und Stellgrößen als Optimierungsvariablen. In der Hessematrix sind nur die Hauptdiagonalelemente besetzt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Zustände im Gütemaß mithilfe der Systemgleichungen zu eliminieren. Dies führt auf ein linear-quadratisches Optimierungsproblem mit den Stellgrößen als Optimierungsvariablen und einer kondensierten, vollbesetzten Hessematrix [14].

Im Folgenden wird die zweite Variante ausgeführt und der für diese Problemformulierung geeignete und frei verfügbare Solver qpOASES [34–36] verwendet, der an der KU Leuven entwickelt wurde. Weitere mögliche frei verfügbare Solver für diese Klasse an Optimierungsproblemen sind beispielsweise CVXGEN [88,89], entwickelt an der Stanford University, oder FORCES [30], entwickelt an der ETH Zürich. Des Weiteren MSQNLQP vom Institut für Systemdynamik [116]. Die konvexen Optimierungsprobleme einer linearen modellprädiktiven Regelung können somit schnell und echtzeitfähig gelöst werden. Ein weiterer Vorteil konvexer Optimierungsprobleme besteht darin, dass ein lokales Minimum immer auch der global optimalen Lösung entspricht.

3.1.1 Formulierung des Optimierungsproblems

Das reduzierte Gesamtfahrzeugmodell (2.14) bzw. das Gesamtfahrzeugmodell (2.13) wird mit zero order hold¹ der Eingangsgröße diskretisiert:

$$\begin{aligned} \underline{x}[k+1] &= \mathbf{\Phi}\underline{x}[k] + \mathbf{\Gamma}_u \underline{u}[k] + \mathbf{\Gamma}_w \underline{w}[k] & \underline{x}[k] &= \underline{x}_k & \underline{u}[k] &= \underline{u}_k \\ \underline{y}[k] &= \mathbf{C}\underline{x}[k] + \mathbf{D}_u \underline{u}[k] + \mathbf{D}_w \underline{w}[k] \end{aligned} \quad (3.1)$$

Hierbei entspricht die Stellgröße \underline{u} je nach Aktorik der Federfußpunktverstellung \underline{s} , der Dämpferkraft \underline{F}_d oder einer Kombination aus beidem $(\underline{s} \ \underline{F}_d)^T$. Der Term $\underline{w} = (\underline{f} \ \underline{z}_S \ \underline{\dot{z}}_S)^T$ steht für die bekannten Störgrößen über dem Vorausschauhorizont. Der Ausgang \underline{y} beinhaltet die Zustände \underline{x} und die Aufbaubeschleunigungen \ddot{z}_A , $\ddot{\eta}$ und $\ddot{\omega}$.

Die Optimierung wird so ausgelegt, dass die drei Aufbaubeschleunigungen minimiert werden [49]. Die Zustände werden nur im Endzeitschritt gewichtet, um Stabilität und Rückkehr zur Ruhelage zu gewährleisten. Somit wird nur die Verbesserung des Fahrkomforts im Gütemaß beachtet. Eine gleichbleibend gute Fahrdynamik ist ebenfalls erwünscht. Da im reduzierten Modell keine Zustände mehr für die Raddynamik existieren, kann dies mit diesem Modell nicht explizit berücksichtigt werden. Die Simulationsergebnisse werden jedoch zeigen, dass für langsam aktive Systeme die dynamischen Radlastschwankungen bei beruhigtem Fahrzeugaufbau ebenfalls sinken und somit eine explizite Berücksichtigung im Gütemaß nicht notwendig ist. Der Ausgang $\hat{\underline{y}}$ über dem Vorausschauhorizont wird als Funktion des Anfangszustandes $\underline{x}[k]$, der aktuellen Aktorposition $\underline{u}[k]$ und der Straßeninformation über dem Vorausschauhorizont $\hat{\underline{w}}$ prädiziert:

$$\begin{aligned} \hat{\underline{y}} &= \hat{\mathbf{\Phi}}\underline{x}[k] + \hat{\mathbf{\Gamma}}_{u,k} \underline{u}[k] + \hat{\mathbf{\Gamma}}_u \hat{\underline{u}} + \hat{\mathbf{\Gamma}}_w \hat{\underline{w}} \\ \hat{\underline{y}} &= \begin{pmatrix} \underline{y}[k+1] \\ \vdots \\ \underline{y}[k+p] \end{pmatrix} \quad \hat{\underline{u}} = \begin{pmatrix} \underline{u}[k+1] \\ \vdots \\ \underline{u}[k+p] \end{pmatrix} \quad \hat{\underline{w}} = \begin{pmatrix} \underline{w}[k] \\ \vdots \\ \underline{w}[k+p] \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Hierbei bezeichnet p die Anzahl an diskreten Schritten des Vorausschauhorizonts. Die Matrizen $\hat{\mathbf{\Phi}}$, $\hat{\mathbf{\Gamma}}_{u,k}$, $\hat{\mathbf{\Gamma}}_u$ und $\hat{\mathbf{\Gamma}}_w$ können aus den Zustandsraummatrizen berechnet werden (Anhang B). Es soll in einem quadratischen Gütemaß die Differenz zwischen $\hat{\underline{y}}$ und vorzugebenden Referenzwerten $\hat{\underline{y}}_{\text{ref}}$ minimiert werden, diese Referenzwerte werden im einfachsten Fall alle Null sein:

¹Beispielsweise mit der Matlab Funktion `c2d`

$$\min_{\hat{\underline{u}}} \left(\hat{\underline{y}} - \hat{\underline{y}}_{\text{ref}} \right)^T \mathbf{Q} \left(\hat{\underline{y}} - \hat{\underline{y}}_{\text{ref}} \right)^T + \hat{\underline{u}}^T \mathbf{R} \hat{\underline{u}} \quad (3.3)$$

Das Gütemaß minimiert die Aufbaubeschleunigungen zu jedem Zeitschritt über dem Vorausschauhorizont, der Endzustand wird gesondert gewichtet:

$$\mathbf{Q} = \text{diag} \left(\underline{0}^T \quad Q_{\dot{z}_A} \quad Q_{\ddot{\eta}} \quad Q_{\dot{\omega}} \quad \dots \quad Q_{\underline{x}}^{\text{end}} \quad Q_{\dot{z}_A} \quad Q_{\ddot{\eta}} \quad Q_{\dot{\omega}} \right) \quad (3.4)$$

Es wird (3.2) in (3.3) eingesetzt. Sämtliche Summanden, welche nicht von den Optimierungsvariablen $\hat{\underline{u}}$ abhängen, werden eliminiert. Der folgende Ausdruck ist eine Erweiterung der Formulierung in [22, 23, 91], da die initiale Aktorposition $\underline{u}[k]$ und Referenzwerte $\hat{\underline{y}}_{\text{ref}}$ miteinbezogen sind:

$$\begin{aligned} \min_{\hat{\underline{u}}} \quad & \frac{1}{2} \hat{\underline{u}}^T \left(\hat{\Gamma}_u^T \mathbf{Q} \hat{\Gamma}_u + \mathbf{R} \right) \hat{\underline{u}} \\ & + \left(\underline{x}[k]^T \hat{\Phi}^T \mathbf{Q} \hat{\Gamma}_u + \underline{u}[k]^T \hat{\Gamma}_{u,k}^T \mathbf{Q} \hat{\Gamma}_u + \hat{\underline{u}}^T \hat{\Gamma}_w^T \mathbf{Q} \hat{\Gamma}_u - \hat{\underline{y}}_{\text{ref}}^T \mathbf{Q} \hat{\Gamma}_u \right) \hat{\underline{u}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Dies ist äquivalent zu einem linear-quadratischen Optimierungsproblem:

$$\begin{aligned} \min_{\hat{\underline{u}}} \quad & \frac{1}{2} \hat{\underline{u}}^T \mathbf{H} \hat{\underline{u}} + \underline{g}^T \hat{\underline{u}} \\ \text{s.t.} \quad & \hat{\underline{u}} \in \mathcal{U} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Die Hesse-Matrix \mathbf{H} ist im vorliegenden Fall konstant. Der Gradientenvektor \underline{g} ist von der aktuellen Aktorposition und der Straßenvorausschau abhängig und wird somit in jedem Zeitschritt aktualisiert. Die Beschränkungen der Aktorik sollen explizit berücksichtigt werden, um das maximale Potential zu erreichen. Die Formulierung wird im nächsten Abschnitt erläutert.

Zur Ausführung der Optimierung müssen in jedem Zeitschritt die Anfangszustände des Fahrzeugmodells bestimmt werden. Hierzu wird der Anfangszustand Hubgeschwindigkeit aus dem Messwert Hubbeschleunigung durch Hochpassfilterung, Integration und Tiefpassfilterung ermittelt. Des Weiteren werden die Zustände Huben, Nicken und Wanken aus den Radeinfederungen sowie dem Höhenprofil berechnet. Hierbei ist zu beachten, dass die Fahrzeugzustände im selben Koordinatensystem wie das Höhenprofil dargestellt sind. Um Huben, Nicken und Wanken zu berechnen, muss die Information aus den Radeinfederungen zum Höhenprofil addiert werden. Die Nick- und die Wankrate sind ebenfalls als Messwerte in Serienfahrzeugen verfügbar. Der Entwurf eines Kalman-Filters zur Beobachtung der Fahrzeugeigenbewegung wurde in [103] untersucht.

3.1.2 Berücksichtigung der Aktorbeschränkungen

Aktorbeschränkungen für eine Federfußpunktverstellung

Bei der Federfußpunktverstellung sind die Aktorstellgeschwindigkeit und der Aktorstellweg mechanisch begrenzt. Das Optimierungsproblem (3.6) wird mit den entsprechenden Beschränkungen formuliert:

$$\min_{\hat{\underline{u}}} \frac{1}{2} \hat{\underline{u}}^T \mathbf{H} \hat{\underline{u}} + \underline{g}^T \hat{\underline{u}} \quad (3.7)$$

$$s.t. \quad \begin{aligned} \underline{l}_M &\leq \mathbf{M} \hat{\underline{u}} \leq \underline{u}_M \\ \underline{u}_{\min} &\leq \hat{\underline{u}} \leq \underline{u}_{\max} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Die Vektoren \underline{u}_{\min} und \underline{u}_{\max} bezeichnen den minimalen und den maximalen Verstellweg der Aktoren für jeden Zeitschritt über dem Vorausschauhorizont. Die Beschränkungen für die Verstellgeschwindigkeit berechnen sich mit

$$\begin{aligned} \underline{l}_M &= \begin{pmatrix} -\Delta \underline{u}_{\max} + \underline{u}[k] \\ -\Delta \underline{u}_{\max} \\ -\Delta \underline{u}_{\max} \\ \vdots \end{pmatrix} & \underline{u}_M &= \begin{pmatrix} \Delta \underline{u}_{\max} + \underline{u}[k] \\ \Delta \underline{u}_{\max} \\ \Delta \underline{u}_{\max} \\ \vdots \end{pmatrix} \\ \mathbf{M} &= \begin{pmatrix} 1 & & & \\ -1 & 1 & & \\ & -1 & 1 & \\ & & & \ddots \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Der Vektor $\Delta \underline{u}_{\max}$ bezeichnet den maximalen Aktorstellweg der vier Aktoren in einem Zeitschritt.

Es ist auch möglich, Zustandsbeschränkungen auf die Radeinfederung einzubeziehen, um eine zu große Einfederung und ein Einsetzen der Federweganschläge (Druckpuffer) zu verhindern. Hier ist zum einen problematisch, dass der Druckpuffer früh mit einer progressiven Kennung einsetzt und somit eine klare Grenze schwer festzulegen ist. Zum anderen wird das Optimierungsproblem unlösbar, wenn über eine Unebenheit gefahren wird, bei welcher in jedem Fall diese festgelegte maximale Radeinfederung überschritten wird. Aus diesen Gründen wird im Folgenden auf eine Beschränkung der Radeinfederung verzichtet.

Aktorbeschränkungen für einen Verstelldämpfer

Mit der modellprädiktiven Optimierung werden Sollkräfte für die vier Verstelldämpfer berechnet. Diese Sollkräfte werden über ein inverses Dämpferkennfeld in entsprechende Ansteuerströme der Ventile umgerechnet und somit die Dämpfer angesteuert. Die Dynamik des Dämpfers wird im Modell für den Regler vernachlässigt, ist im Simulationsmodell jedoch abgebildet. Ein Verstelldämpfer kann eine Kraft zwischen der Weich- und der Hartkennlinie stellen (Abbildung 1.6b). Dies ist eine zustandsabhängige, nichtlineare Beschränkung. Folgend werden drei Möglichkeiten vorgeschlagen, diese Aktorbeschränkung in der modellprädiktiven Optimierung (3.6) zu berücksichtigen [48]:

1. Es werden die nichtlinearen, zustandsabhängigen Beschränkungen der Dämpferkraft berücksichtigt. Die Hart- als auch die Weichkennlinie sind durch einen Polygonzug beschrieben, dieser verbindet stückweise linear die einzelnen Messpunkte. In jedem Zeitschritt wird eine Prädiktion des Fahrzeugmodells ausgeführt, wobei die Dämpferkraft \underline{F}_d in einem Zeitschritt durch die zustandsabhängige untere Grenze $l_d(\dot{z}_{\text{rel},d})$ und die zustandsabhängige obere Grenze $\underline{u}_d(\dot{z}_{\text{rel},d})$ beschränkt ist. Diese Grenzen für die vier Aktoren sind eine Funktion der Dämpferrelativgeschwindigkeiten an den vier Rädern $\dot{z}_{\text{rel},d}$:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \underline{l}_d(\dot{z}_{\text{rel},d}[k+1]) \\ \vdots \\ \underline{l}_d(\dot{z}_{\text{rel},d}[k+p]) \end{pmatrix}}_{\hat{\underline{l}}_d} \leq \underbrace{\begin{pmatrix} \underline{F}_d[k+1] \\ \vdots \\ \underline{F}_d[k+p] \end{pmatrix}}_{\hat{\underline{F}}_d} \leq \underbrace{\begin{pmatrix} \underline{u}_d(\dot{z}_{\text{rel},d}[k+1]) \\ \vdots \\ \underline{u}_d(\dot{z}_{\text{rel},d}[k+p]) \end{pmatrix}}_{\hat{\underline{u}}_d} \quad (3.10)$$

Die untere Grenze besteht aus der Hartkennlinie für negative Dämpferrelativgeschwindigkeiten und aus der Weichkennlinie für positive Dämpferrelativgeschwindigkeiten. Die obere Grenze verhält sich entgegengesetzt, siehe hierfür auch Abbildung 1.6b. Zur Berechnung der oberen und unteren Grenze über dem Vorausschauhorizont wird die Dämpferrelativgeschwindigkeit $\dot{z}_{\text{rel},d}$ äquivalent zu Gleichung (3.2) prädiziert:

$$\hat{\dot{z}}_{\text{rel},d} = \hat{\Phi}^* \underline{x}[k] + \hat{\Gamma}_{u,k}^* \underline{u}[k] + \hat{\Gamma}_u^* \hat{\underline{u}} + \hat{\Gamma}_w^* \hat{\underline{w}} \quad (3.11)$$

Hiermit lässt sich für jede Zeile aus Gleichung (3.10) die obere und untere Grenze der Dämpferkraft durch den Polygonzug als Funktion von der Optimierungsvariablen $\hat{\underline{u}} = \hat{\underline{F}}_d$ ausdrücken. Somit ergibt sich aus Gleichung (3.10) die nichtlineare Nebenbedingung:

$$\hat{\underline{l}}_d(\hat{\underline{u}}) \leq \hat{\underline{u}} \leq \hat{\underline{u}}_d(\hat{\underline{u}}). \quad (3.12)$$

Diese lässt sich in die Form

$$\underbrace{\begin{pmatrix} -\hat{\underline{u}} + \hat{\underline{l}}_d(\hat{\underline{u}}) \\ \hat{\underline{u}} - \hat{\underline{u}}_d(\hat{\underline{u}}) \end{pmatrix}}_{\underline{c}(\hat{\underline{u}})} \leq \underline{0} \quad (3.13)$$

umformulieren. Somit resultiert ein linear-quadratisches Optimierungsproblem mit nicht-linearen Nebenbedingungen. Diese nichtlineare modellprädiktive Regelung soll als Referenzlösung verwendet werden. Es wird nicht auf eine möglichst effiziente und schnelle Berechnung Wert gelegt und somit die Matlab Funktion `fmincon` zur Lösung des Optimierungsproblems in jedem Zeitschritt ausgeführt. Die Berechnungszeit ist deutlich länger als für eine lineare modellprädiktive Regelung und somit eignet sich dieses Verfahren nur zur Potentialabschätzung in der Simulation.

2. Es wird eine zweite Möglichkeit vorgeschlagen, um eine linear-quadratische Optimierung mit geringerem Rechenaufwand zu erhalten. Hierbei wird das Fahrzeugmodell mit einer linearisierten passiven Dämpfung über den Vorausschauhorizont prädiziert und somit eine Approximation der Dämpferrelativgeschwindigkeiten über dem Vorausschauhorizont berechnet. Diese Prädiktion erfolgt analog zur Gleichung (3.2) und wird direkt aus den Anfangswerten und der Straßenvorausschau berechnet, da kein Aktor beachtet ist. Somit wird mithilfe des Dämpferkennfeldes eine Approximation der Beschränkungen für die Kraft des Verstelldämpfers für jeden Zeitschritt über dem Vorausschauhorizont direkt berechnet. Es ergibt sich das linear-quadratische Optimierungsproblem (3.6) mit den linearen Beschränkungen $\hat{\underline{u}}_{\min} \leq \hat{\underline{u}} \leq \hat{\underline{u}}_{\max}$. Falls die berechnete Dämpferkraft durch die Approximation leicht außerhalb des zulässigen Dämpferkennfeldes liegt, wird sie auf den Randbereich begrenzt.

- Der dritte Ansatz besteht darin, die Optimierung (3.6) ohne Beschränkungen zu berechnen und diese ideale Dämpferkraft, falls sie außerhalb liegt, auf den Randbereich des Dämpferkennfeldes zu begrenzen (Abbildung 3.2). Ohne Beschränkungen lässt sich das Optimierungsproblem (3.6) durch partielles Ableiten nach den Optimierungsvariablen lösen. Nullsetzen des erhaltenen Ausdrucks führt auf das zu lösende Gleichungssystem $\mathbf{H}\hat{\mathbf{u}} = -\mathbf{g}$. Da die Hesse-Matrix im vorliegenden Fall konstant ist, kann die invertierte Matrix \mathbf{H}^{-1} offline berechnet werden. Die Lösung erfolgt somit über eine Matrizenmultiplikation: $\hat{\mathbf{u}} = -\mathbf{H}^{-1}\mathbf{g}$. Das Vorgehen, die Dämpferkraft ohne Beschränkungen zu begrenzen, ist analog dem *clipped optimal* Ansatz der optimalen semi-aktiven Regelung ohne Vorausschau. In dieser Arbeit wird der Ansatz mit Vorausschau und der Vergleich mit einer nichtlinearen Optimierung unter Beachtung der exakten Beschränkungen untersucht.

Der Vergleich der drei vorgeschlagenen Regelungsverfahren erfolgt im Abschnitt 5.2.1 bei der Präsentation der Simulationsergebnisse.

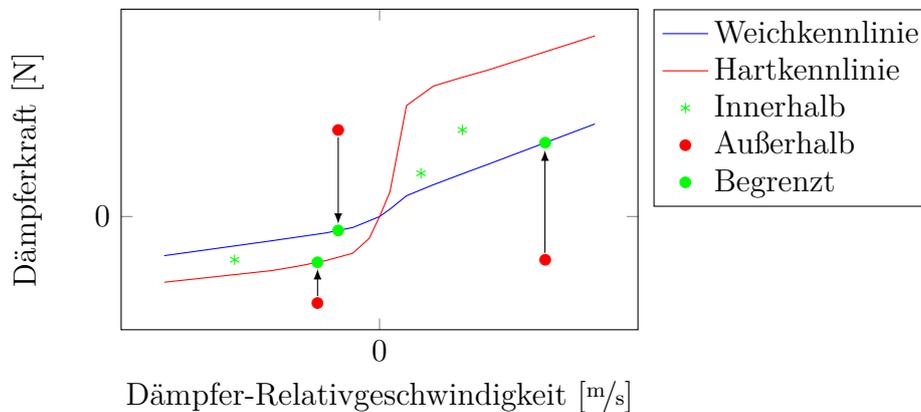


Abbildung 3.2: Begrenzen der Dämpferkraft, falls diese außerhalb des realisierbaren Kennfeldes liegt

Aktorbeschränkungen für ein System mit Verstelldämpfer und Federfußpunktverstellung

Liegt ein Fahrwerkssystem mit Federfußpunktverstellung und Verstelldämpfer vor, besteht die Möglichkeit, eine optimale Kraft für jedes Rad zu berechnen und in einem zweiten Schritt diese optimale Kraft auf die beiden Aktoren aufzuteilen. Es ist jedoch schwierig, die unterschiedlichen Beschränkungen der beiden Aktoren, siehe hierfür auch Abbildung 1.6, zu berücksichtigen. Wird eine optimale Kraft ohne Beschränkungen berechnet und diese im zweiten Schritt aufgeteilt, wird kein proaktives Verhalten erreicht. In diesem Fall wird eine nicht realisierbare optimale Kraft berechnet, um das Hindernis auch ohne Proaktivität zu kompensieren. Um das Potential zu ermitteln, müssen die Beschränkungen somit in der Optimierung berücksichtigt werden. Es wird vorgeschlagen, beide Aktoren als separate Optimierungsvariablen zu behandeln. Es werden zwei modellprädiktive Regelungsansätze entwickelt:

- Es werden jeweils Dämpferkraft und Aktorstellweg für jedes Rad mit dem quadratischen Programm (3.6) und $\underline{\mathbf{u}} = (\underline{\mathbf{s}} \ \underline{\mathbf{F}}_d)^T$ berechnet. Die Beschränkungen des Verstelldämpfers werden äquivalent zum zweiten Ansatz für das semi-aktive Fahrwerk bestimmt. So wird

das Fahrzeug mit linearisiertem passiven Dämpfer und Aktorverstellung gleich Null über den Vorausschauhorizont prädiziert und hieraus die Beschränkungen für den Verstelldämpfer ermittelt. Die Beschränkungen für die Federfußpunktverstellung werden nach Gleichung (3.8) berechnet. Somit ergibt sich ein linear-quadratisches Optimierungsproblem mit linearen Beschränkungen.

2. Die Weichkennlinie des Verstelldämpfers resultiert, außer für geringe Frequenzen bis ca. 2,5 Hz, in gutem Fahrkomfort (Abbildung 1.7). Da die Federfußpunktverstellung in diesem Bereich den Fahrkomfort erhöht, wird im zweiten Ansatz vorgeschlagen, den Dämpfer in der Weichkennlinie zu belassen und nur die Federfußpunktverstellung modellprädiktiv zu optimieren. Es wird das reduzierte Reglermodell (2.14) mit einer Linearisierung der Dämpfer-Weichkennlinie verwendet und die Beschränkungen der Federfußpunktverstellung (3.8) berücksichtigt. Dies führt wiederum zu einem linear-quadratischen Optimierungsproblem. Während einer Kurvenfahrt und bei starker Radschwingung muss die Dämpferkraft erhöht werden, um eine gute Fahrdynamik zu gewährleisten. Dies kann beispielsweise mit einem *Groundhook*-Konzept geschehen.

Der Vergleich der beiden vorgeschlagenen Regelungsverfahren erfolgt im Abschnitt 5.2.1 bei der Präsentation der Simulationsergebnisse.

Die Ungenauigkeit des gemessenen, vorausliegenden Straßenhöhenprofils wird in dieser Arbeit durch speziell entwickelte Filterverfahren kompensiert. Es ist auch möglich, die Unsicherheiten mittels min-max MPC [11, 83] in der modellprädiktiven Formulierung zu berücksichtigen. Für bekannte Unsicherheiten des Straßenhöhenprofils über dem Vorausschauhorizont ergeben sich unterschiedliche Szenarien der Prädiktion des Fahrzeugmodells. Mit min-max MPC wird das Gütemaß für den ungünstigsten Fall optimiert, um eine robuste Regelung zu gewährleisten. Dies führt jedoch auf deutlich rechenaufwendigere Optimierungsprobleme und wird im Folgenden nicht näher betrachtet.

3.1.3 Erweiterung auf nicht-äquidistante Schritte

Um die Anzahl der Optimierungsvariablen zu reduzieren wird die Prädiktion auf einem nicht-äquidistanten Raster mit kürzeren Zeitschritten im Nahbereich ausgeführt. Hiermit wird mit einer hohen Taktrate ein neues Stellsignal erzeugt, bei gleichzeitig großer Vorausschauweite. Die längeren Zeitschritte mit konstanten Stellgrößen weiter entfernt sind ausreichend, da das Optimierungsproblem in jedem Zeitschritt neu gelöst wird.

Die Prädiktion des Fahrzeugmodells für äquidistante Zeitschritte wurde in Gleichung (3.2) formuliert. Nun wird eine konstante Stellgröße \underline{u} und ein konstantes Höhenprofil \underline{w} zwischen definierten Zeitpunkten k_1 bis k_p angenommen, die Vielfache der Taktzeit sind. Das Gütemaß wird ebenfalls nur zu den Zeitpunkten k_1 bis k_p ausgewertet. Dies wird an einem Beispiel erläutert. Für $p = 4$ Prädiktionsschritte ergibt sich die Prädiktion des Ausgangs analog zur Gleichung (3.2):

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} \underline{y}[k+1] \\ \underline{y}[k+2] \\ \underline{y}[k+3] \\ \underline{y}[k+4] \end{pmatrix} &= \hat{\Phi} \underline{x}[k] + \hat{\Gamma}_{u,k} \underline{u}[k] + \begin{pmatrix} D_u & & & \\ C\Phi_u & D_u & & \\ C\Phi^2_u & C\Phi_u & D_u & \\ C\Phi^3_u & C\Phi^2_u & C\Phi_u & D_u \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{u}[k+1] \\ \underline{u}[k+2] \\ \underline{u}[k+3] \\ \underline{u}[k+4] \end{pmatrix} + \\
 &\begin{pmatrix} C\Gamma_w & D_w & & & \\ C\Phi\Gamma_w & C\Gamma_w & D_w & & \\ C\Phi^2\Gamma_w & C\Phi\Gamma_w & C\Gamma_w & D_w & \\ C\Phi^3\Gamma_w & C\Phi^2\Gamma_w & C\Phi\Gamma_w & C\Gamma_w & D_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{w}[k] \\ \underline{w}[k+1] \\ \underline{w}[k+2] \\ \underline{w}[k+3] \\ \underline{w}[k+4] \end{pmatrix} \quad (3.14)
 \end{aligned}$$

Nun werden die nicht-äquidistanten Schritte $k_1 = 1$, $k_2 = 2$ und $k_3 = 4$ gewählt und somit $\underline{u}[k+2] = \underline{u}[k+3]$ und $\underline{w}[k+2] = \underline{w}[k+3]$:

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} \underline{y}[k+1] \\ \underline{y}[k+2] \\ \underline{y}[k+4] \end{pmatrix} &= \hat{\Phi}^* \underline{x}[k] + \hat{\Gamma}_{u,k}^* \underline{u}[k] + \begin{pmatrix} D_u & & & \\ C\Phi_u & D_u & & \\ C\Phi^2_u & C\Phi\Gamma_u + C\Gamma_u & D_u & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{u}[k+1] \\ \underline{u}[k+2] \\ \underline{u}[k+4] \end{pmatrix} + \\
 &\begin{pmatrix} C\Gamma_w & D_w & & & \\ C\Phi\Gamma_w & C\Gamma_w & D_w & & \\ C\Phi^3\Gamma_w & C\Phi^2\Gamma_w & C\Phi\Gamma_w + C\Gamma_w & D_w & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{w}[k] \\ \underline{w}[k+1] \\ \underline{w}[k+2] \\ \underline{w}[k+4] \end{pmatrix} \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

Bei den Beschränkungen der Aktorgeschwindigkeit (3.8) müssen diese nicht-äquidistanten Schritte ebenfalls berücksichtigt werden, da in einem längeren Intervall der Aktor mehr Verstellweg realisieren kann.

3.2 Modellprädiktiver Optimierungsalgorithmus für Referenztrajektorien des Aufbaus

Im vorigen Abschnitt 3.1 wurde eine modellprädiktive Regelung zur Optimierung der Stellgrößen entwickelt. In diesem Abschnitt wird eine neue Methode vorgeschlagen, bei welcher drei Trajektorien für Huben, Nicken und Wanken über dem Vorausschauhorizont optimiert werden. Ziel ist ebenfalls, die Hub-, Nick-, und Wankbeschleunigung zu minimieren. Dies wird im Folgenden für die Aktorik der Federfußpunktverstellung ausgeführt. Es wird das hergeleitete inverse Fahrzeugmodell (2.19) sowie dieselben Aktorbeschränkungen (3.8) und dasselbe nicht-äquidistante Raster der Prädiktion wie im ersten modellprädiktiven Ansatz verwendet.

In einem Zeitschritt werden für jeden Zeitpunkt des Vorausschauhorizonts, anstelle der vier Aktorstellwege, drei Werte für Huben, Nicken und Wanken optimiert. Somit reduzieren sich die Optimierungsvariablen um ein Viertel. Ein weiterer Vorteil der modellprädiktiven Optimierung der Aufbau-Trajektorien gegenüber der modellprädiktiven Optimierung der Aktorstellgrößen besteht darin, dass die Systemdynamik in den Beschränkungen des Optimierungsproblems beachtet wird. Somit bleibt bei der Variation der Fahrzeugparameter, beispielsweise bei veränderter Zuladung oder veränderter Dämpferkennlinie eines Verstelldämpfers, die Hesse-Matrix der Optimierung konstant. Dies kann vorteilhaft für die Rechenzeit ausgenutzt werden.

Milam [93] und Petit [102] entwickeln eine Online-Trajektorienengineering basierend auf einer B-Spline Repräsentation des Systemausgangs. Die im Folgenden hergeleitete Trajektorienengineering unterscheidet sich, da Vorausschauinformationen berücksichtigt werden. Des Weiteren werden die Anfangswerte der Trajektorien aus den initialen Systemzuständen direkt berechnet, bei Milam und Petit sind dies Optimierungsvariablen mit Beschränkungen. Der vorgeschlagene Ansatz führt zu einem linear-quadratischen Optimierungsproblem [47].

3.2.1 Nicht-äquidistante B-Splines

Wie bei Milam [93] wird der flache Ausgang $\underline{z} = (z_A \quad \eta \quad \omega)^T$ in B-Splines parametrisiert. Der Aufbau von B-Splines wird bei de Boor [15] grundlegend erläutert. Da die erste und zweite Ableitung der Trajektorien Eingang des inversen Modells (2.19) sind, müssen die Trajektorien zweifach stetig differenzierbar sein. Somit werden kubische B-Splines ausgewählt. Exemplarisch für den ersten Ausgang parametrisiert in kubischen B-Splines ergibt sich: $z_1(t) = \sum_{i=0}^{m-5} P_i b_i(t)$ $t \in [t_3, t_{m-4}]$ (Abbildung 3.3). Der Knotenvektor mit m Knotenpunkten $t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_{m-1}$ definiert die Basisfunktionen $b_i(t)$ eines B-Splines, die Kontrollpunkte P_i gewichten die Basisfunktionen und sind die zu optimierenden Freiheitsgrade. Die B-Spline Kurve ergibt sich aus der Addition der mit den Kontrollpunkten gewichteten Basisfunktionen. Die Definition der Basisfunktionen für B-Splines des Grades n ergibt sich aus der Rekursionsformel von Cox und de Boor:

$$b_{j,0}(t) := \begin{cases} 1, & \text{für } t_j \leq t < t_{j+1} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$b_{j,n}(t) := \frac{t - t_j}{t_{j+n} - t_j} b_{j,n-1}(t) + \frac{t_{j+n+1} - t}{t_{j+n+1} - t_{j+1}} b_{j+1,n-1}(t) \quad (3.16)$$

$$j \in \{0, \dots, m - n - 2\}$$

Der Knotenvektor wird einmal gewählt und die stückweise definierten kubischen B-Splines lassen sich auch in Matrixnotation schreiben:

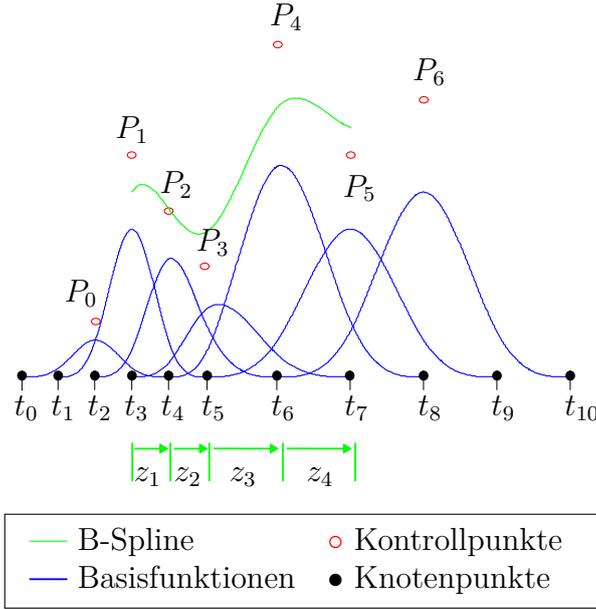
$$z_{1,i}(t) = \begin{pmatrix} \mathcal{A}_i(t) & \mathcal{B}_i(t) & \mathcal{C}_i(t) & \mathcal{D}_i(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

$$t \in [t_{i+2}, t_{i+3}] \quad i \in \{1, \dots, m - 7\}$$

Die Ausgänge z_2 und z_3 sind äquivalent definiert. Die Herleitung der Terme \mathcal{A}_i , \mathcal{B}_i , \mathcal{C}_i , \mathcal{D}_i aus der Rekursionsformel (3.16) wird im Anhang C ausgeführt. Die Ableitung der Basisfunktionen erfolgt durch Ableiten der Terme $\mathcal{A}_i(t)$, $\mathcal{B}_i(t)$, $\mathcal{C}_i(t)$ und $\mathcal{D}_i(t)$ und somit ist es möglich die Trajektorien sowie deren erste und zweite Ableitung als Funktion einer Anzahl von Optimierungsvariablen darzustellen.

3.2.2 Aufstellen des Gütemaßes

Die Optimierung soll die zweite Ableitung der Trajektorien für Huben, Nicken und Wanken über dem Vorausschauhorizont minimieren. Hierfür soll die Gütefunktion an den Knotenpunk-


 Abbildung 3.3: Nicht-äquidistanter B-Spline mit $m = 11$

ten $\underline{T} = (t_4 \dots t_{m-4})$ der B-Splines ausgewertet werden, wobei der Knotenpunkt t_3 der Anfangszeit entspricht und zu Null gesetzt wird. Der Knotenvektor wird identisch für die drei Trajektorien gewählt und $\underline{P}_1 = (P_{1,z_A} \ P_{1,\eta} \ P_{1,\omega})^T$ bezeichnet den zweiten Kontrollpunkt für die Hub-, Nick- und Wanktrajektorie. Die zweite Ableitung der drei Trajektorien an den Punkten \underline{T} wird berechnet:

$$\hat{\underline{z}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \ddot{\mathcal{A}}_2 & \ddot{\mathcal{B}}_2 & \ddot{\mathcal{C}}_2 & \ddot{\mathcal{D}}_2 \\ & \ddot{\mathcal{A}}_3 & \ddot{\mathcal{B}}_3 & \dots \\ & & & \ddots \end{pmatrix}}_{(\underline{f}_2^* \mid \underline{\mathcal{S}}_2)} \begin{pmatrix} \underline{P}_1 \\ \underline{P}_2 \\ \vdots \\ \underline{P}_{m-5} \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

$$\hat{\underline{z}} = (\ddot{z}(t_4) \ \dots \ \ddot{z}(t_{m-4}))^T$$

Die Matrix $\ddot{\mathcal{A}}_i$ beinhaltet $\ddot{\mathcal{A}}_i(\underline{T}(i-1))$ in den drei diagonalen Einträgen, ebenso $\ddot{\mathcal{B}}_i$, $\ddot{\mathcal{C}}_i$ und $\ddot{\mathcal{D}}_i$. Der Vektor $\hat{\underline{p}} = (\underline{P}_3 \ \dots \ \underline{P}_{m-5})^T$ besteht aus den Optimierungsvariablen. Die ersten drei Kontrollpunkte der Trajektorien \underline{P}_0 , \underline{P}_1 und \underline{P}_2 werden aus den Anfangszuständen des Fahrzeuges bestimmt, diese müssen online gemessen oder beobachtet werden:

$$\begin{pmatrix} \underline{P}_0 \\ \underline{P}_1 \\ \underline{P}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{A}_1 & \mathcal{B}_1 & \mathcal{C}_1 \\ \dot{\mathcal{A}}_1 & \dot{\mathcal{B}}_1 & \dot{\mathcal{C}}_1 \\ \ddot{\mathcal{A}}_1 & \ddot{\mathcal{B}}_1 & \ddot{\mathcal{C}}_1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \underline{z}_0 \\ \dot{\underline{z}}_0 \\ \ddot{\underline{z}}_0 \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

Die Matrix \mathcal{D}_1 ist Null, da der Knotenpunkt t_3 zu Null gewählt wird. Die Matrix \mathcal{A}_1 beinhaltet $\mathcal{A}_1(0)$ in den drei Diagonaleinträgen, die anderen Matrizen sind äquivalent definiert. Ein quadratisches Gütemaß zur Minimierung der zweiten Ableitung an den Punkten \underline{T} wird formuliert:

$$\begin{aligned}
 \min_{\hat{\underline{p}}} \quad & \hat{\underline{z}}^T \mathbf{Q}_p \hat{\underline{z}} = \\
 \min_{\hat{\underline{p}}} \quad & (\underline{f}_2 + \mathcal{S}_2 \hat{\underline{p}})^T \mathbf{Q}_p (\underline{f}_2 + \mathcal{S}_2 \hat{\underline{p}}) = \\
 \min_{\hat{\underline{p}}} \quad & \hat{\underline{p}}^T \mathcal{S}_2^T \mathbf{Q}_p \mathcal{S}_2 \hat{\underline{p}} + 2 \hat{\underline{p}}^T \mathcal{S}_2^T \mathbf{Q}_p \underline{f}_2
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

$$\underline{f}_2 = \underline{f}_2^* \cdot \begin{pmatrix} \underline{P}_1 \\ \underline{P}_2 \end{pmatrix} \tag{3.21}$$

Eine Gewichtung der Stellgröße ist möglich, wird in (3.20) aber nicht durchgeführt, um ein quadratisches Programm mit konstanter Hesse-Matrix zu erhalten. Die Stellgröße wird mit dem inversen Modell aus den Optimierungsvariablen $\hat{\underline{p}}$ und dem Straßenhöhenprofil berechnet. Wie beim ersten modellprädiktiven Ansatz werden die Kontrollpunkte zum Endzeitpunkt stärker gewichtet, um Stabilität und Rückkehr zur Ruhelage sicherzustellen.

3.2.3 Quadratisches Programm mit Beschränkungen

Die Stellgrößen der Federfußpunktverstellung $\hat{\underline{u}} = \hat{\underline{s}}$ an den Kontrollpunkten \underline{T} der B-Spline Basisfunktionen können als Funktion der Optimierungsvariablen $\hat{\underline{p}}$ ausgedrückt werden, indem das inverse Modell (2.19) verwendet wird:

$$\begin{aligned}
 \hat{\underline{u}} = & \underbrace{(\mathcal{K}_0 \mathcal{S}_0 + \mathcal{K}_1 \mathcal{S}_1 + \mathcal{K}_2 \mathcal{S}_2)}_{\underline{C}_p} \hat{\underline{p}} \\
 & + \underbrace{\mathcal{K}_0 \underline{f}_0 + \mathcal{K}_1 \underline{f}_1 + \mathcal{K}_2 \underline{f}_2 + \mathcal{K}_3 \hat{\underline{u}}}_{\underline{C}_c}
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Die konstante Matrix \mathcal{S}_0 und der konstante Vektor \underline{f}_0 für die Trajektorie sowie $\mathcal{S}_1, \underline{f}_1$ für die erste Ableitung der Trajektorie sind äquivalent zu $\mathcal{S}_2, \underline{f}_2$ aus (3.18) und (3.21) definiert. \mathcal{K}_0 bezeichnet eine Matrix mit \mathbf{K}_0 aus dem inversen Modell (2.19) in den Diagonalelementen. Dasselbe gilt für $\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2$ und \mathcal{K}_3 . Nun werden die Eingangsbeschränkungen für den Aktor \underline{u} (3.8) zu Beschränkungen auf den Ausgängen \underline{z} transformiert und mit der Definition der B-Splines (3.17) zu Beschränkungen auf den Optimierungsvariablen $\hat{\underline{p}}$ abgebildet. Hierfür wird Gleichung (3.22) für die Zeitpunkte $\underline{T} = (t_4 \dots t_{m-4})$ in die Beschränkungen eingesetzt. Dies ergibt für die Beschränkung des Aktorstellweges:

$$\begin{aligned}
 \hat{\underline{u}}_{\min} & \leq \hat{\underline{u}} \leq \hat{\underline{u}}_{\max} \\
 \rightarrow \quad \hat{\underline{u}}_{\min} - \underline{C}_c & \leq \mathbf{C}_p \hat{\underline{p}} \leq \hat{\underline{u}}_{\max} - \underline{C}_c
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

Des Weiteren werden wiederum Beschränkungen auf der Aktorstellgeschwindigkeit zu den Zeitpunkten \underline{T} berücksichtigt:

$$\hat{u}_{lr} \leq \begin{pmatrix} -\Delta_1 & \Delta_1 & & \\ & -\Delta_2 & \Delta_2 & \\ & & & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{u}(0) \\ \hat{u} \end{pmatrix} \leq \hat{u}_{ur} \quad (3.24)$$

$$\Delta_1 = \frac{1}{\underline{T}(1)} \mathbf{I}_4$$

$$\Delta_i = \frac{1}{\underline{T}(i) - \underline{T}(i-1)} \mathbf{I}_4$$

Die Vektoren \hat{u}_{lr} und \hat{u}_{ur} bezeichnen die untere und die obere Grenze der Verstellgeschwindigkeit der vier Aktoren. Es wird wiederum \hat{u} mit Gleichung (3.22) ersetzt:

$$\hat{u}_{lr} + \underline{C}_{cr} \leq \mathbf{C}_{pr} \hat{p} \leq \hat{u}_{ur} + \underline{C}_{cr} \quad (3.25)$$

$$\underline{C}_{cr} = \begin{pmatrix} \Delta_1 \underline{u}(0) \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Delta_1 & & & \\ -\Delta_2 & \Delta_2 & & \\ & & & \ddots \end{pmatrix} \underline{C}_c$$

$$\mathbf{C}_{pr} = \begin{pmatrix} \Delta_1 & & & \\ -\Delta_2 & \Delta_2 & & \\ & & & \ddots \end{pmatrix} \mathbf{C}_p$$

Eine Kombination der beiden Beschränkungen (3.23) und (3.25) ergibt:

$$\begin{pmatrix} \hat{u}_{\min} - \underline{C}_c \\ \hat{u}_{lr} + \underline{C}_{cr} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} \mathbf{C}_p \\ \mathbf{C}_{pr} \end{pmatrix} \hat{p} \leq \begin{pmatrix} \hat{u}_{\max} - \underline{C}_c \\ \hat{u}_{ur} + \underline{C}_{cr} \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

Dies führt auf ein quadratisches Programm (3.20) mit Beschränkungen folgender Form:

$$\min_{\hat{p}} \quad \frac{1}{2} \hat{p}^T \mathbf{H}_p \hat{p} + \underline{g}_p^T \hat{p} \quad (3.27)$$

$$\text{s.t.} \quad \underline{l}_p \leq \mathbf{M}_p \hat{p} \leq \underline{u}_p$$

Die Hessematrix \mathbf{H}_p ist wie beim ersten modellprädiktiven Ansatz konstant. Ohne Beschränkungen minimiert die Optimierung die zweite Ableitung der Trajektorien für einen gegebenen Anfangszustand, wobei die Systemdynamik und das Straßenhöhenprofil sind in den Beschränkungen berücksichtigt sind. Diese stellen sicher, dass die berechneten Stellgrößen den begrenzten Stellweg und die begrenzte Stellgeschwindigkeit nicht überschreiten. Nach der Optimierung der Trajektorien wird das Stellsignal mit dem inversen Modell berechnet.

Mit der B-Spline Formulierung wäre es möglich, Beschränkungen auch zwischen den Knotenpunkten der Basisfunktionen auszuwerten. Dasselbe gilt für die Berechnung der Stellgrößen. Hierbei treten jedoch Probleme auf. Falls die Optimierungsvariablen zeitlich gröber diskretisiert werden als die Beschränkungen, kann ein unlösbares Optimierungsproblem entstehen, da die wenigen Stellgrößen immer die Beschränkungen verletzen. Um einen robust funktionierenden Algorithmus zu erhalten, werden somit die Beschränkungen an den Knotenpunkten

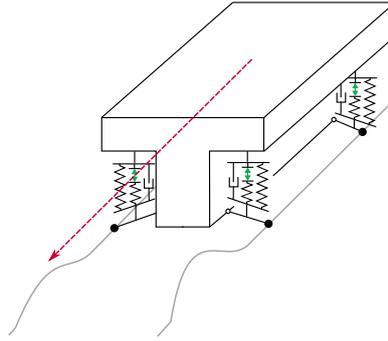


Abbildung 3.4: Störgrößenkompensation mit einem inversen Modell

der B-Splines, an denen auch die Kontrollpunkte optimiert werden, ausgewertet. Des Weiteren wird die Stellgröße nur an den Knotenpunkten der B-Splines über das inverse Modell berechnet, da die Einhaltung der Beschränkungen an zwei Knotenpunkten nicht beinhaltet, dass die Beschränkungen zwischen den Knotenpunkten ebenfalls eingehalten werden. Somit liegt der auszuwertende Knotenpunkt auf dem nächsten Zeitschritt des Berechnungstakts und die weiteren Knotenpunkte werden auf einem nicht-äquidistanten Raster verteilt.

Es wurde in diesem Abschnitt ein weiteres modellprädiktives Verfahren zur optimalen vorausschauenden Ansteuerung einer Federfußpunktverstellung entwickelt. Der Vergleich mit dem modellprädiktiven Ansatz aus Abschnitt 3.1 erfolgt in Abschnitt 5.2.2 bei der Präsentation der Simulationsergebnisse.

3.3 Störgrößenkompensation mit einem inversen Modell

In diesem Abschnitt wird ein weiterer Ansatz zur vorausschauenden Ansteuerung des Fahrwerks entwickelt. Hierbei werden die Sollgrößen für Huben, Nicken und Wanken des inversen Modells (2.19) zu Null gesetzt, womit eine Vorsteuerung aus den Straßenhöhenwerten berechnet wird. Dies ist in Abbildung 3.4 veranschaulicht und entspricht einer Störgrößenkompensation, wobei für das System $\dot{\underline{x}} = \mathbf{A}\underline{x} + \mathbf{B}_u\underline{u} + \mathbf{B}_w\underline{w}$ die Stellgröße \underline{u} den Störeingang \underline{w} vollständig kompensiert und \underline{u} direkt aus \underline{w} berechnet wird. Die Überbestimmtheit bei drei Aufbaufreiheitsgraden und vier Aktoren wird über die eingeführte Gleichung zur Eliminierung der Verspannung aufgelöst. Die berechneten Stellgrößen bewirken, dass für ein gegebenes Höhenprofil die Aufbaubewegungen des reduzierten Fahrzeugmodells eliminiert werden. Hierbei können jedoch Stellgrößen entstehen, welche außerhalb des beschränkten Aktorstellweges und der beschränkten Aktorstellgeschwindigkeit liegen. Es wird deshalb in dieser Arbeit vorgeschlagen, das Straßenprofil vorher geeignet aufzubereiten, so dass nur Anteile im Straßenhöhenprofil verbleiben, welche ausgeglichen werden sollen und können. Hierauf wird im nächsten Kapitel eingegangen. Des Weiteren ist es vorteilhaft eine nichtlineare, für hohe Stellwege mit dem Stellweg zunehmende Sättigung einzubauen, um in jedem Fall eine Stellgröße im zulässigen Bereich zu erhalten.

Dieser Ansatz der Störgrößenkompensation mit dem inversen Modell ist ähnlich dem Kompensationsansatz in [110], wobei in der vorliegenden Arbeit explizit die Gleichung zur Eliminierung der Verspannung berücksichtigt wird. Es wird im Folgenden das inverse Modell zur Störgrößenkompensation für diesen spezialisierten Fall, „Aufbaubewegung gleich Null“, in Abhängigkeit der Fahrzeugparameter hergeleitet. Soll die Störgröße \underline{w} durch die Federfußpunkt-

verstellwege \underline{s} kompensiert werden, folgt aus Gleichung (2.14):

$$\mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \underline{s} + (\mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{H}_{c1} + \mathbf{T}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{H}_{c2}) \underline{z}_S + \mathbf{T}_d \mathbf{K}_d \mathbf{H}_d \dot{\underline{z}}_S = 0 \quad (3.28)$$

Aus der Gleichung zur Elimination der Verspannung (2.18) ergibt sich beim Vernachlässigen der Aufbaubewegung $\underline{z} = 0$:

$$\begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \mathbf{K}_{c1} (-\mathbf{H}_{c1} \underline{z}_S - \underline{s}) = 0 \quad (3.29)$$

Mit diesen beiden Gleichungen folgt [82]:

$$\underline{s} = - \begin{pmatrix} \mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \\ (-1 & 1 & 1 & -1) \mathbf{K}_{c1} \end{pmatrix}^{-1} \left(\begin{pmatrix} (\mathbf{T}_{c1} \mathbf{K}_{c1} \mathbf{H}_{c1} + \mathbf{T}_{c2} \mathbf{K}_{c2} \mathbf{H}_{c2}) \\ (-1 & 1 & 1 & -1) \mathbf{K}_{c1} \mathbf{H}_{c1} \end{pmatrix} \underline{z}_S + \begin{pmatrix} \mathbf{T}_d \mathbf{K}_d \mathbf{H}_d \\ \mathbf{0}_{1 \times 4} \end{pmatrix} \dot{\underline{z}}_S \right) \quad (3.30)$$

Somit berechnen sich die vier Stellgrößen aus den Straßenhöhenwerten und deren erster Ableitung unter den vier Rädern.

Um die Aktordynamik der Federfußpunktverstellung zu beachten, wird untersucht, das PT-1 Verhalten in der Systemdynamik zu modellieren. Aus Gleichung (3.30), strukturell geschrieben als $\underline{s}_{\text{ist}} \stackrel{!}{=} \mathbf{K}_0 \underline{z}_S + \mathbf{K}_1 \dot{\underline{z}}_S$, wird somit mit $s_{ii,\text{ist}} = \frac{1}{1+T_A s} s_{ii,\text{soll}}$:

$$\underline{s}_{\text{soll}} = \mathbf{K}_0 \underline{z}_S + (\mathbf{K}_1 + \mathbf{T}_A \mathbf{K}_0) \dot{\underline{z}}_S + \mathbf{T}_A \mathbf{K}_1 \ddot{\underline{z}}_S \quad (3.31)$$

Die Matrix \mathbf{T}_A beinhaltet die Zeitkonstanten T_A in den vier Diagonalelementen. Somit wird als Eingang das Höhenprofil unter dem Rad, sowie dessen erste und zweite zeitliche Ableitung benötigt. Da mit höherer Ableitung die Signalgüte abnimmt, wird dieser Ansatz nicht verwendet.

Um die Aktordynamik zu kompensieren, werden stattdessen die Höhenwerte \underline{z}_S und $\dot{\underline{z}}_S$ nicht direkt unter den Rädern, sondern im Abstand $\Delta l = v \cdot T_A$ vor den Rädern, als Eingang der Vorsteuerung verwendet. Somit wird das PT-1 Verhalten der Aktorik mit der Zeitkonstanten T_A kompensiert.

Bei einer solchen Störgrößenkompensation wird nach einer Vorverarbeitung des Höhenprofils immer der Höhenwert unter den Rädern, bzw. ein entsprechend örtlich vorgezogener Wert, verwendet. Dies ist im Gegensatz zur modellprädiktiven Regelung zu sehen, da hierfür Höhenwerte über einem Vorausschauhorizont als Eingang der Regelung verwendet werden.

3.4 Gesamtkonzept der Regelung

Die grundsätzliche Struktur der Fahrwerksregelung wurde in Abbildung 1.3 dargestellt. Ein Regelungsansatz für den Vertikalkomfort ohne Vorausschau, hauptsächlich basierend auf den im Fahrzeug gemessenen Größen der Radeinfederung, wird im Folgenden kurz vorgestellt. Hierbei gibt die Aktorik der gemessenen Radeinfederung nach und weicht den Straßenunebenheiten aus. Hierdurch wird durch die Aktorbewegung eine weichere, als die mechanisch eingebaute, Feder emuliert. Um diese weichere Feder k_2 nach Abbildung 3.5 durch die Aktorik zu realisieren, muss eine zur Federsteifigkeit k_2 äquivalente Kraft durch Aktorik und Feder k_1 erzeugt werden:

$$F = (x_2 - x_1 + s) k_1 \stackrel{!}{=} (x_2 - x_1) k_2 \quad (3.32)$$

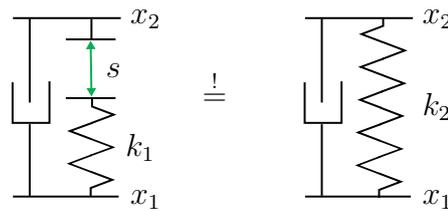


Abbildung 3.5: Realisierung einer weicheren Feder durch die Aktorik

Mit dem Regelgesetz $s = P(x_2 - x_1)$ gelingt dies mit der Verstärkung $P = \frac{k_2 - k_1}{k_1}$. Dieser Regelungsansatz *Weiche Feder*, sowie ein modularer Aufbau der Fahrwerksregelung mit unabhängigen Vorsteuerungen aus dem Nick-, Wank- und Niveaumodul gehen auf Dipl.-Ing. Uli Schaaf von der AUDI AG [109] zurück.

Es existieren ähnliche Ansätze in der Literatur, so benutzt Sunwoo [124] ein Referenzmodell mit vorgegebenen Fahrzeugparametern für eine adaptive Regelung eines aktiven Fahrwerks und entwirft einen Regler, welcher die Abweichung zu diesem Referenzmodell minimiert.

Ein weiterer Ansatz zur Erhöhung des Vertikalkomforts ohne Vorausschau ist der *Skyhook*-Ansatz. Dieser wurde im Stand der Technik vorgestellt. Für eine aktive Fahrwerksregelung wird vorgeschlagen, die aus dem *Skyhook*-Ansatz berechneten Sollkräfte aus Gleichung (1.2) als relative Kräfte zu interpretieren und mit der Formel $s = F_{\text{soll}}/c_1$ die Aktorstellwege zu berechnen. Die Konstante c_1 bezeichnet die Federkonstante der in Serie zum Aktor verbauten Feder. Die Anwendung und Optimierung des *Skyhook*-Konzepts für eine aktive Federfußpunktverstellung geht auf Dr.-Ing. Andreas Unger von der AUDI AG [131] zurück.

Es werden folgend zwei mögliche Gesamtkonzepte für eine vorausschauende Fahrwerksregelung vorgeschlagen. Als erste Variante wird ein modularer Aufbau nach Abbildung 3.6 mit Niveaumodul, Nick- und Wankvorsteuerung sowie den beiden Vertikalmodulen ohne Vorausschau, *Skyhook* und *Weiche Feder*, und der Vorsteuerung berechnet aus der Vorausschau mit dem hergeleiteten inversen Modell betrachtet. Das schneller getaktete *Skyhook*-Modul als Regelung und die Vorsteuerung mittels inversen Modells können parallel ohne Einschränkung aktiv sein und bilden eine Zwei-Freiheitsgrade Struktur. Beim Ausgleichen einer Bodenunebenheit durch die Vorausschau entstehen geringere Beschleunigungen im Fahrzeugaufbau und somit berechnet das *Skyhook*-Modul geringere Stellgrößen, um die restlichen auftretenden Aufbaubeschleunigungen zu minimieren. Das Modul *Weiche Feder* wird deaktiviert, falls eine Stellgröße durch die Vorausschau vorliegt. Falls zusätzlich zur Federfußpunktverstellung ein Verstelldämpfer vorhanden ist, wird dieser unabhängig angesteuert und generell in der Weichkennlinie belassen. Eine gute Fahrdynamik kann mit einem *Groundhook*-Regelungsansatz sichergestellt werden.

Das vorgeschlagene Gesamtkonzept für die modellprädiktive Regelung zeigt Abbildung 3.7. Bei einer modellprädiktiven Regelung wird das Höhenprofil zu diskreten Zeitpunkten über dem Vorausschauhorizont verwendet. Des Weiteren besteht die Eingangsgröße der modellprädiktiven Regelung, neben der Straßeninformation, aus dem aktuellen Fahrzeugzustand. Dieser muss aus den Messgrößen der Radeinfederungen und der Aufbaubeschleunigungen und -drehraten berechnet oder beobachtet werden. Das Nick-, Wank- und Niveauverhalten kann über die Sollvorgabe über den Vorausschauhorizont eingestellt werden.

4 Erstellung und Aufbereitung des Straßenhöhenprofils

In den bisherigen Kapiteln wurden Regelungsverfahren vorgestellt, um mithilfe des Straßenhöhenprofils vor den Rädern das Fahrwerk anzusteuern. In diesem Kapitel wird zunächst ein gewünschtes Straßenhöhenprofil als Eingangssignal für die Regelung definiert. Daraufhin werden Algorithmen entwickelt, um aus den Sensorrohdaten das gewünschte Höhenprofil zu erzeugen.

4.1 Definition des gewünschten Straßenhöhenprofils

Es wird in dieser Arbeit definiert, dass mit der vorausschauenden Fahrwerksregelung die Frequenzanteile der Straße von 0,5 Hz bis 5 Hz ausgeglichen werden sollen. Frequenzen über 5 Hz können von einer Federfußpunktverstellung nicht realisiert werden, Frequenzen unter 0,5 Hz sind für den Fahrer nur geringfügig spürbar. Diese Eckfrequenzen wurden in dieser Arbeit durch Simulationen ermittelt und werden im Weiteren verwendet, sie müssen jedoch im Fahrzeug bei der Applikation abgestimmt werden.

Um das für die Regelung gewünschte Eingangssignal zu erhalten, wird das absolute Höhenprofil mit einer Vorwärts-Rückwärtsfilterung bearbeitet (Abbildung 4.1). Ein absolutes Höhenprofil beschreibt das Profil über Normal-Null. Die konstante Verschiebung über Normal-Null ist hierbei irrelevant und wird in dieser Arbeit nicht beachtet. Das resultierende gewünschte Höhenprofil wird zum Vergleich als Funktion des Ortes gezeichnet, für die vorausschauende Fahrwerksansteuerung wird das gewünschte Höhenprofil als Funktion der Zeit verwendet.

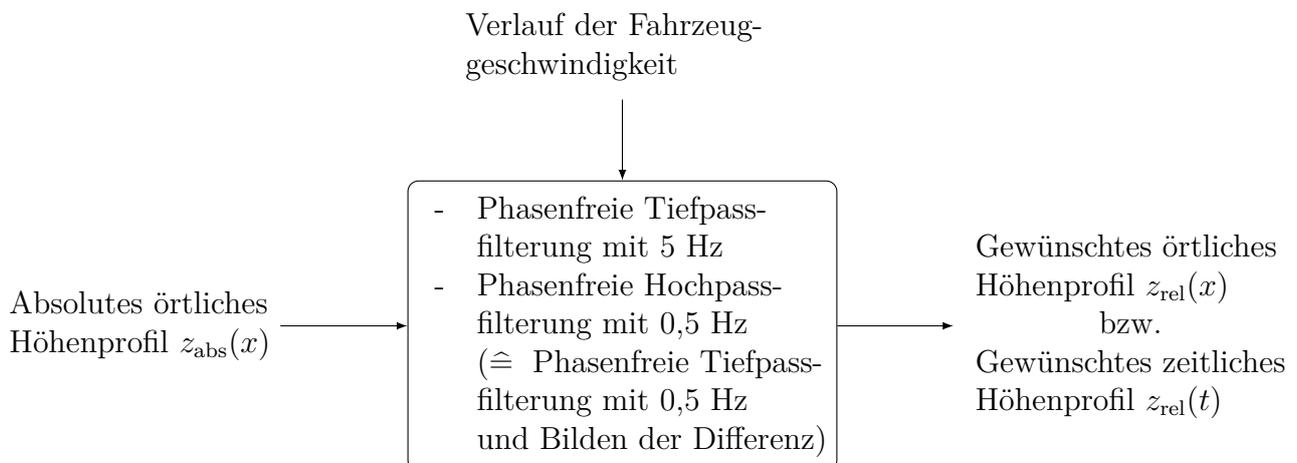


Abbildung 4.1: Definition des gewünschten Höhenprofils als Eingangssignal für die vorausschauende Fahrwerksregelung

In Abbildung 4.2 sind beispielhaft absolute Höhenprofile und die daraus resultierenden gewünschten Höhenprofile dargestellt. Hierbei wird zur Anschauung ein Bezugsverlauf eingezeichnet, der durch eine Tiefpassfilterung mit 0,5 Hz berechnet wird. Die Ermittlung des gewünschten Höhenprofils entspricht dem Bilden der Differenz aus absolutem Höhenprofil und Bezugsverlauf. Das gewünschte Höhenprofil berechnet sich abhängig von der Fahrgeschwindigkeit.

Bei einer Fahrt mit 120 km/h sind die sinusförmigen Bodenwellen im linken Diagramm in Abbildung 4.2a im gewünschten Frequenzbereich und somit im Höhenprofil im rechten Diagramm abgebildet. Bei einer langsameren Geschwindigkeit ergeben sich im gewünschten Höhenprofil, durch die Filterung, Bodenwellen mit kleinerer Amplitude.

Die Filterung der 45 m langen und 30 cm hohen Bodenwelle im linken Diagramm in Abbildung 4.2b ergibt ein gewünschtes Höhenprofil im rechten Diagramm, welches vor der hohen Bodenwelle negativ ist und somit als Eingang einer Fahrwerksregelung ein proaktives Anheben des Fahrzeuges bewirkt.

Die 2 m lange und 4 cm hohe Schwelle im linken Diagramm in Abbildung 4.2c wird durch die Filterung, sichtbar im rechten Diagramm, abgerundet.

Das gewünschte Höhenprofil einer Rampe im rechten Diagramm in Abbildung 4.2d beschreibt aufgrund der Filterung ein Höhenprofil, welches mit einer Federfußpunktverstellung und beschränktem Stellweg ausgeglichen werden kann.

Zur Erzeugung des gewünschten Höhenprofils wurde in Abbildung 4.2 das über die gesamte Strecke bekannte absolute Höhenprofil gefiltert. Im Folgenden werden Methoden entwickelt, um aus den Sensorrohdaten mit einem beschränkten Sensorsichtbereich und gemessen in einem karosseriefesten Koordinatensystem dieses gewünschte Höhenprofil zu erzeugen.

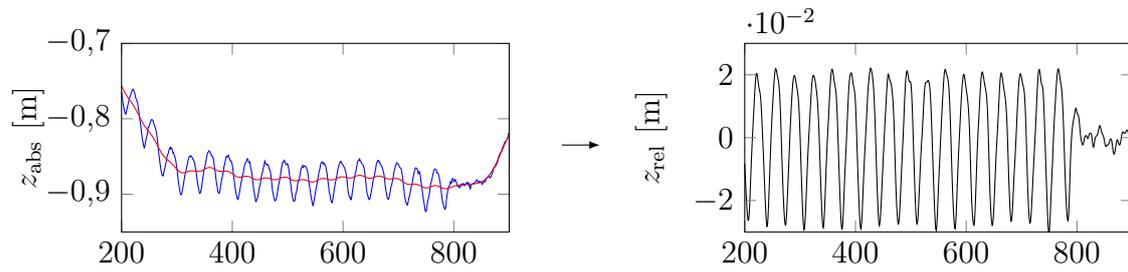
4.2 Konzepte zur Erstellung des Straßenhöhenprofils

Bei der Erstellung des Straßenhöhenprofils ist zu beachten, dass sich der karosseriefest montierte Sensor durch Huben, Nicken und Wanken des Fahrzeugaufbaus sowie durch die Fahrtgeschwindigkeit mitbewegt und somit die Straße in jedem Zeitschritt aus einer anderen Perspektive misst. Die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aus unterschiedlichen Blickwinkeln redundant gemessenen Straßenabschnitte werden akkumuliert, um das Sensorrauschen zu verringern. Es werden in diesem Abschnitt neue Möglichkeiten zur Erstellung des Straßenhöhenprofils vorgeschlagen und deren Auswirkungen im Zusammenhang mit den vorgeschlagenen Regelungskonzepten diskutiert.

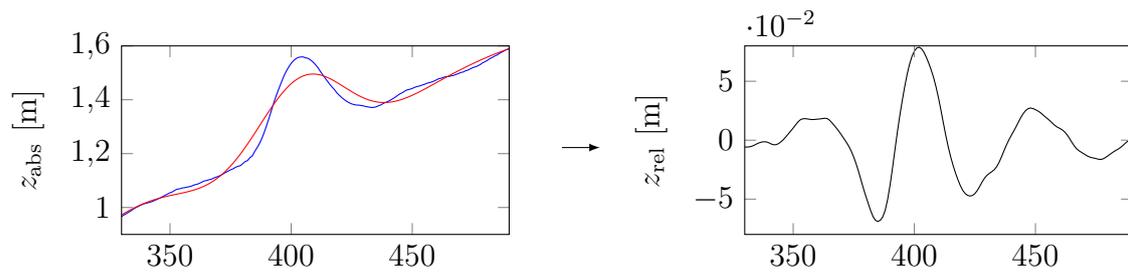
4.2.1 Höhenprofil durch Transformation der älteren Sensordaten in die jeweils aktuellen Sensormesswerte

Es wird vorgeschlagen, die erstellte Höhenkarte jeweils so zu transformieren, dass sie mit den aktuellen Sensormesswerten übereinstimmt. Hierzu werden die folgenden Schritte durchgeführt (Abbildung 4.3):

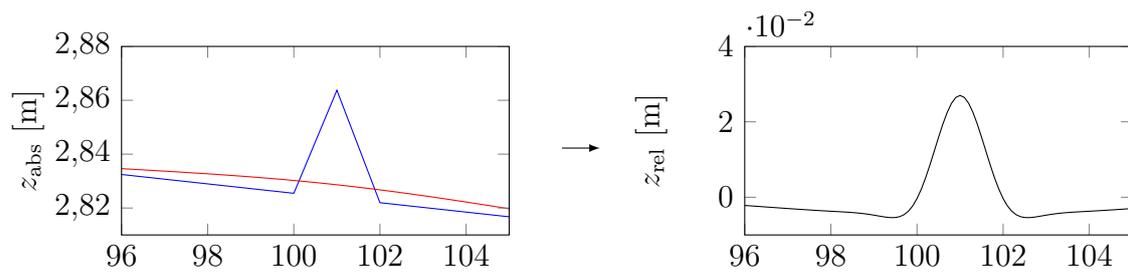
1. Die vom Sensor gemessenen Entfernungswerte zum Zeitpunkt t_1 werden in Höhenwerte zu einer sensorfest definierten Bezugsebene umgerechnet.
2. Im nächsten Zeitschritt t_2 werden wiederum die gemessenen Entfernungswerte in Höhenwerte zu der sensorfest definierten Bezugsebene umgerechnet. Aufgrund der Karosseriebewegung ist die Orientierung der sensorfesten Bezugsebene zur Straße verändert.



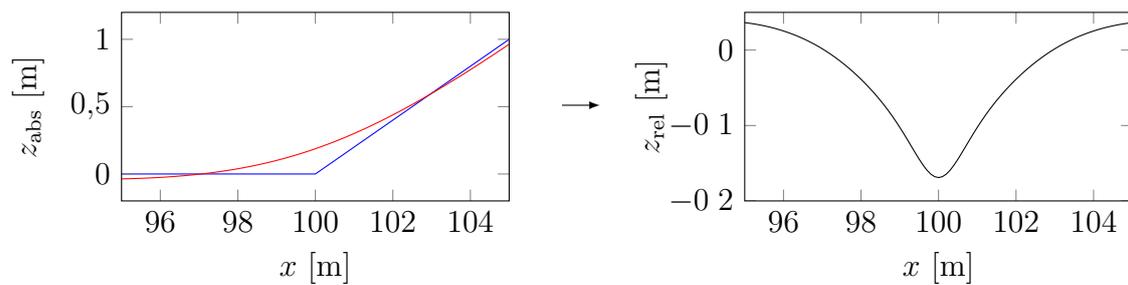
(a) Bodenwellen mit einer Periodendauer von 35 m und einer Amplitude von 2 cm bei 120 km/h



(b) 45 m lange und 30 cm hohe Bodenwelle bei 100 km/h



(c) 2 m lange und 4 cm hohe Schwelle bei 30 km/h



(d) Rampe bei 30 km/h

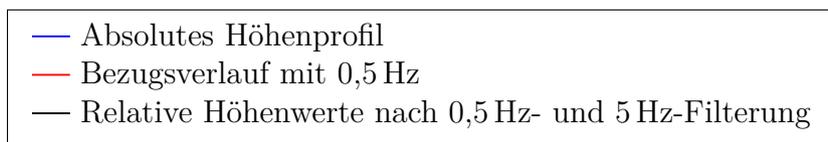


Abbildung 4.2: Erzeugung des gewünschten Höhenprofils aus dem absoluten Höhenprofil durch eine Hochpassfilterung mit 0,5 Hz und eine Tiefpassfilterung mit 5 Hz

3. Es wird eine Transformation durchgeführt, um die Höhenwerte des Zeitschritts t_1 mit den Höhenwerten des Zeitschrittes t_2 zur Überdeckung zu bringen.
4. Die Höhenwerte des aus zwei unterschiedlichen Zeitschritten redundant gemessenen Straßenabschnitts werden akkumuliert, um die Genauigkeit des Höhenprofils zu erhöhen.

Hierbei wird die sensorfest mitgeführte Bezugsebene derart definiert, dass in der Ruhelage auf einer ebenen Straße diese Bezugsebene der Straßenoberfläche entspricht. Im Folgenden wird diese Definition verwendet; weitere sensorfest definierte Bezugsebenen sind ebenfalls möglich.

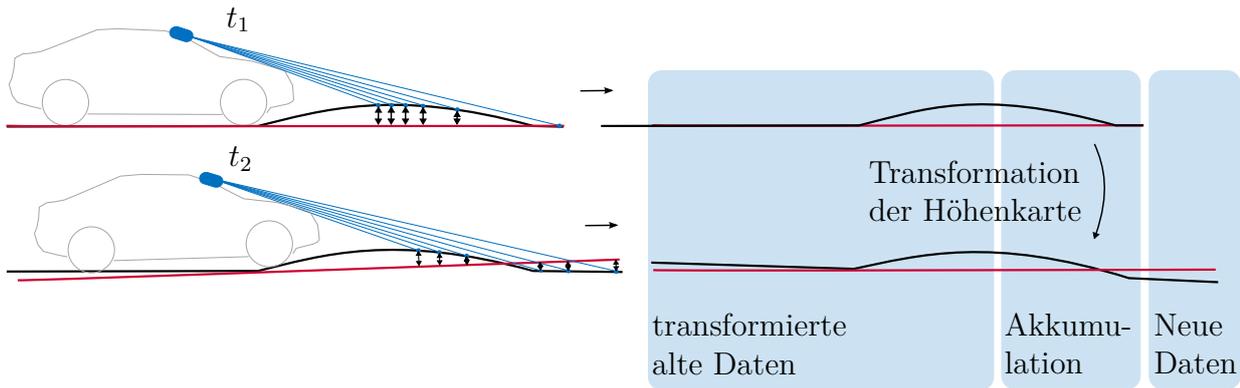


Abbildung 4.3: Sensorfeste Akkumulation: Berechnung der Höhenwerte bezüglich einer sensorfest definierten Bezugsebene, Transformation der Höhenkarte und Akkumulation; Bezugsebene in Rot und Höhenprofil in Schwarz

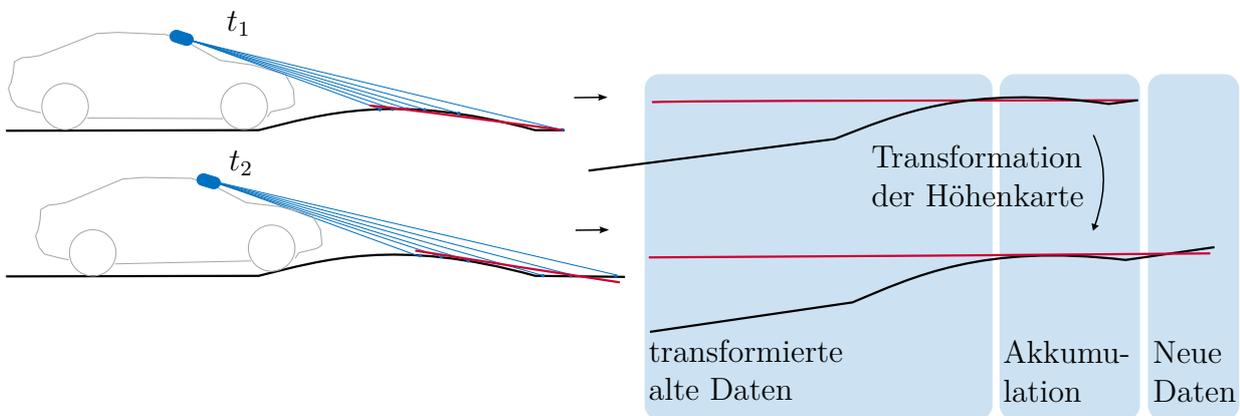


Abbildung 4.4: Profilbezogene Akkumulation: Berechnung der Höhenwerte bezüglich einer Ausgleichsebene in den Rohdaten, Transformation der Höhenkarte und Akkumulation; Bezugsebene in Rot und Höhenprofil in Schwarz

Es wird eine weitere Möglichkeit zur Akkumulation der Höhenwerte vorgeschlagen und in Abbildung 4.4 veranschaulicht. Hierbei wird ebenfalls die bereits erstellte Höhenkarte derart transformiert, dass sie mit den aktuell gemessenen Höhenwerten übereinstimmt. Es werden die Höhenwerte jedoch nicht in einem karosseriefesten Koordinatensystem akkumuliert, sondern in einem höhenprofilbezogenen Koordinatensystem. Dieses wird durch eine Ausgleichsebene durch die aktuell gemessenen Höhenwerte festgelegt.

Beim Beschleunigen des Fahrzeuges auf ebener Strecke wird bei der Variante mit sensorfester Bezugsebene, aufgrund der Nickbewegung der Fahrzeugkarosserie, das Höhenprofil vor den Rädern als Gerade mit negativer Steigung abgebildet. Bei der profilbezogenen Variante ist das Höhenprofil einer ebenen Straße für die Spur vor den Rädern, unabhängig von der Bewegung des Fahrzeugaufbaus, immer als Nulllinie im Koordinatensystem abgebildet.

Bei beiden Varianten wird somit eine Akkumulation des Höhenprofils durchgeführt, wobei dieses Höhenprofil von Zeitschritt zu Zeitschritt im Koordinatensystem verdreht und verschoben wird. Dieses Verdrehen und Verschieben ist deutlich ausgeprägter bei der Variante mit sensorfester Akkumulation. Des Weiteren sind bei beiden Ansätzen sämtliche Informationen der Straße im Höhenprofil abgebildet.

Mit der im weiteren Verlauf entwickelten Methodik können beide Varianten angewendet werden.

4.2.2 Höhenprofil im inertialen Koordinatensystem

Es wird als weitere Möglichkeit vorgeschlagen, die Akkumulation der Sensormesswerte in einem inertialen Koordinatensystem durchzuführen (Abbildung 4.5). Hier wird wie folgt vorgegangen:

1. Zum Startzeitpunkt t_0 wird die Radaufstandsfläche als inertielle Bezugsebene definiert.
2. In den folgenden Zeitschritten t_i werden die Entfernungsmessungen des Sensors in Höhenwerte zu dieser inertialen Bezugsebene umgerechnet. Hierzu werden die neuen Messdaten derart transformiert, dass sie mit der bereits erstellten Höhenkarte übereinstimmen.
3. Es erfolgt eine Akkumulation der neuen Messdaten mit der bereits erstellten Höhenkarte.
4. Es wird eine konstante vertikale Verschiebung des Höhenprofils durchgeführt, falls das Höhenprofil zu große Werte für den jeweiligen Datentyp erreicht.

Durch die inertielle Darstellung ergibt sich ein örtlich und zeitlich konsistentes Höhenprofil. Im Gegensatz zu den beiden bisher vorgestellten Varianten treten somit keine Verdrehungen des Höhenprofils im Koordinatensystem von Zeitschritt zu Zeitschritt auf. Des Weiteren sind ebenfalls sämtliche Informationen der Straße im verfügbaren Sensorsichtbereich im Höhenprofil abgebildet. Es ergibt sich jedoch eine mit der Zeit zunehmende Verschiebung von der ursprünglich festgelegten Bezugsebene. Um den Wertebereich der Datentypen bei längeren Fahrten nicht zu überschreiten, wird bei bestimmten Grenzen die Bezugsebene neu angepasst und dieser Sprung im Höhenprofil dem Regler übergeben. Dieses inertielle Höhenprofil wird als Eingangssignal der modellprädiktiven Regelung verwendet werden.

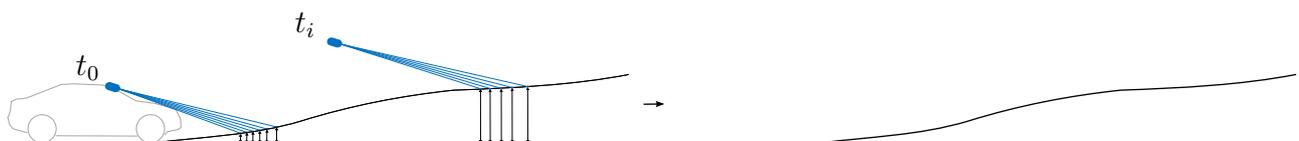


Abbildung 4.5: Akkumulation der Höhenwerte im inertialen Koordinatensystem

4.3 Simulation zur Erstellung des Straßenhöhenprofils

Zur Validierung der entwickelten Algorithmen wird eine Simulationsumgebung von der Aufbereitung des Sensorsignals bis hin zur Fahrwerksregelung und Simulation der Fahrzeugbewegung aufgebaut (Abbildung 4.6). Mit dem nichtlinearen Simulationsmodell aus Abschnitt 2.2 wird Huben, Nicken und Wanken des Fahrzeugaufbaus und somit die Bewegung des karosseriefest montierten Sensors bei Überfahrt eines Höhenprofils simuliert. Für einen zu definierenden Sensor werden exakte Entfernungsmesswerte zu jedem Zeitschritt ermittelt, indem entlang der Sensorstrahlen der Abstand zwischen Sensor und Straße berechnet wird. Um die Sensorungenauigkeit abzubilden wird ein Rauschen addiert und somit steht ein Eingangssignal für die entwickelten Algorithmen zur Verfügung.

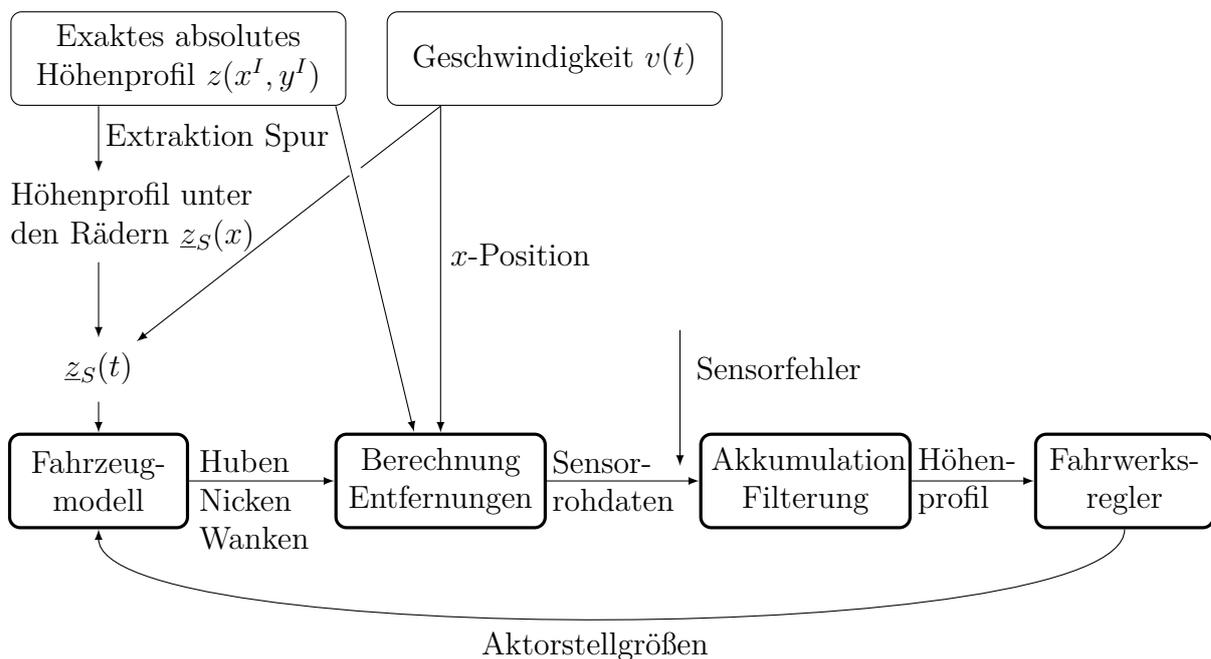


Abbildung 4.6: Gesamtheitliche Simulation von der Erstellung des Straßenhöhenprofils bis zur Fahrwerksansteuerung

Simulative Berechnung der Sensormessdaten

Es werden für die Simulation die höhenprofilvermessenen Strecken im OpenCRG Format verwendet. Der Aufbau der Daten wurde in Abschnitt 2.2.1 erläutert. In der Simulation wird angenommen, dass das Fahrzeug entlang der Referenzachse der Höhendaten fährt. Das Fahrzeugmodell berechnet hierbei Huben, Nicken und Wanken des Fahrzeugschwerpunktes im inertialen Koordinatensystem, in welchem auch die Straße gegeben ist. Es wird eine Gerade für jeden Sensorstrahl im inertialen Koordinatensystem berechnet und iterativ der Schnittpunkt mit der Straße gesucht. In Abbildung 4.7 sind die Koordinatensysteme dargestellt und in Tabelle 4.1 erläutert.

Es wird ein prinzipielles Sensormodell verwendet, wobei die Sensorstrahlen durch die Winkel η_1 bis η_m um die y^S -Achse und die Winkel φ_1 bis φ_m um die z^S -Achse definiert sind. Die

Entfernungsmessung entlang des Sensorstrahls bildet sowohl die Pulslaufzeitmessung eines Laserscanners als auch die Disparitätsbestimmung einer Kamera ab. Die Einbaulage des Sensors kann variiert werden. Des Weiteren können Taktzeit, Anzahl und Orientierung der Sensorstrahlen sowie die Genauigkeit der Messung eines Sensorstrahls definiert werden.

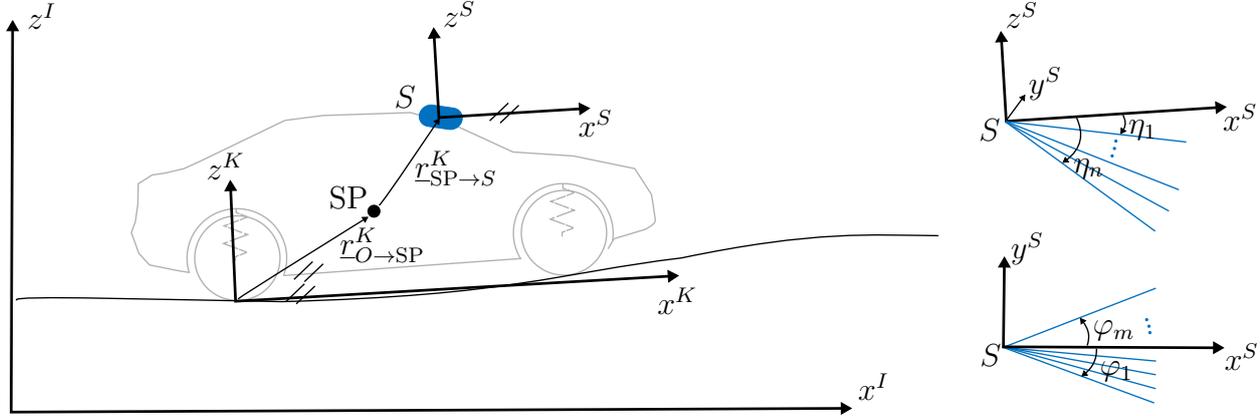


Abbildung 4.7: Definition von Vektoren und Koordinatensystemen

Tabelle 4.1: Erläuterung Koordinatensysteme

I	Inertiales Koordinatensystem, in welchem die Höhenwerte gegeben sind
K	Karosseriefestes Koordinatensystem mit Ursprung im Aufstandspunkt Mitte Hinterachse, (x, y) im Stationärzustand auf der ebenen Straße
S	Karosseriefestes Koordinatensystem mit Ursprung im Sensor
$\underline{r}_{O \rightarrow SP}^K$	Vektor von Mitte Hinterachse Boden zum Schwerpunkt im System K
$\underline{r}_{SP \rightarrow S}^K$	Vektor vom Schwerpunkt zum Sensor im Koordinatensystem K

Die Eigenbewegung des Fahrzeuges wird durch eine Drehung zuerst um die Nickachse und dann um die Wankachse definiert. Das Huben z_A des Simulationsmodells ist bezogen auf die Nulllinie der Höhenwerte. Das Huben ist zu Beginn der Simulation Null und die dynamischen Gleichungen des Vertikalmodells ermitteln über Integration der entstehenden Vertikalbeschleunigungen die Hubposition. Für den Wert im Schwerpunkt muss somit noch die Schwerpunkthöhe addiert werden. Der Nickwinkel η und der Wankwinkel ω bezeichnen die vom Simulationsmodell berechneten Winkel der Fahrzeugkarosserie bezüglich des inertialen Koordinatensystems I , wobei ein Nicken und Wanken um den Schwerpunkt angenommen wird. Der Wert x_{HA} bezeichnet den x -Wert der Hinterachse zum betrachteten Simulationszeitpunkt, welcher sich aus der Integration der in der Simulation definierten Fahrzeuggeschwindigkeit ergibt. Somit wird die Position des Sensors im inertialen Koordinatensystem I berechnet:

$$\underline{r}_{O \rightarrow S}^I = \begin{pmatrix} x_{HA} \\ 0 \\ z_A \end{pmatrix} + \underline{r}_{O \rightarrow SP}^K + \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \eta & 0 & \sin \eta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \eta & 0 & \cos \eta \end{pmatrix}}_{\mathbf{R}_{\omega \eta}^{-1}} \underline{r}_{SP \rightarrow S}^K \quad (4.1)$$

Die Geradengleichung eines Sensorstrahls im inertialen Koordinatensystem ergibt sich aus dem Aufpunkt im Sensor aus Gleichung (4.1) und einem Richtungsvektor \underline{n}_{ij} für jeden Strahl

mit den Winkeln η_i ($i \in \{1, \dots, n\}$) und φ_j ($j \in \{1, \dots, m\}$). Die Richtungen der Sensorstrahlen werden berechnet, indem der x -Einheitsvektor des Sensorkoordinatensystems S zunächst um den Gierwinkel φ_j und danach um den Nickwinkel η_i gedreht wird:

$$\underline{n}_{ij}^I = \mathbf{R}_{\omega\eta}^{-1} \underbrace{\begin{pmatrix} \cos \eta_i & 0 & \sin \eta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \eta_i & 0 & \cos \eta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_j & -\sin \varphi_j & 0 \\ \sin \varphi_j & \cos \varphi_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\underline{n}_{ij}^K} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Mit der Gleichung des Sensorstrahls im inertialen System $r_{ij}^I = r_{O \rightarrow S}^I + \lambda \cdot \underline{n}_{ij}^I$ ($\lambda \in \mathbb{R}$) wird iterativ der Schnittpunkt mit der Straßenoberfläche, gegeben durch die OpenCRG Höhenmatrix (u, v, z) , gesucht. Es gilt $\|\underline{n}_{ij}^I\|_2 = \|\underline{n}_{ij}^K\|_2 = 1$. Die u -Koordinate der Höhenmatrix entspricht der x -Koordinate des inertialen Systems I und die v -Koordinate dem y -Wert.

Zur Schnittpunktsuche wird eine Intervallschachtelung verwendet. Als Startpunkte werden die Sensorposition und der in etwa der Straßenoberfläche symmetrisch gegenüberliegende Punkt des Sensorstrahls gewählt. Nun wird die Distanz zwischen beiden Startwerten sukzessive halbiert und der Höhenwert mit dem z -Wert der Höhenmatrix verglichen. Das Vorzeichen der Differenz liefert hierbei eine Aussage, in welcher Hälfte des geteilten Strahls sich der Schnittpunkt befindet. Dies wird fortgeführt bis eine Abbruchgenauigkeit von 0,1 mm erreicht ist. Die ausgelesenen Werte der Höhenmatrix werden innerhalb der Zellen linear interpoliert. Somit wird eine Distanz d_{ij} zwischen Sensorposition und Schnittpunkt mit der Straße berechnet, womit $(x \ y \ z)^K$ -Koordinaten der gemessenen Straße im karosseriefesten Koordinatensystem K gegeben sind. Dies sind exakte Messdaten \underline{r}_{ij}^K eines in der Simulation definierten Sensors:

$$\underline{r}_{ij}^K = \underline{r}_{O \rightarrow SP}^K + \underline{r}_{SP \rightarrow S}^K + d_{ij} \cdot \underline{n}_{ij}^K \quad (4.3)$$

Mit dieser Methodik können beliebige Sensoren an beliebigen Stellen des Fahrzeuges angebracht und das resultierende Höhenprofil simuliert werden. In dieser Arbeit wird beispielhaft ein optischer Sensor hinter der Windschutzscheibe auf Höhe des Rückspiegels betrachtet. Es werden Sensoreigenschaften festgelegt, die in der Größenordnung eines realistischen, optischen Sensors liegen, falls die Software auf die Auswertung einer großen Anzahl an Disparitäten zur Messung des Bodens ausgelegt ist. Es wird angenommen, dass in horizontaler Richtung von -25° bis 25° 100 Entfernungswerte äquidistant im Winkel berechnet werden. Es werden nur die Werte vor den Rädern für Geradeausfahrt und eine Reifenbreite von 25 cm beachtet. In vertikaler Richtung wird angenommen, dass 110 Entfernungswerte zwischen $\eta_1 = 4^\circ$ und $\eta_n = 14^\circ$ äquidistant im Winkel pro Zeitschritt berechnet werden. Dies bedeutet bei der genannten Einbaulage, dass in Ruhelage der erste Sensormesspunkt in 6,7 m vor der Hinterachse und der entfernteste Sensormesspunkt in 20,4 m vor der Hinterachse die Straße misst.

Für die betrachtete Geradeausfahrt werden somit pro Zeitschritt 790 Entfernungsinformationen für den Bereich vor den Rädern gemessen. In Abbildung 4.8 ist die Überfahrt der Bodenwellen mit 2 cm Amplitude und 35 m Periodenlänge gezeigt. Im ersten Diagramm wird die berechnete Sensorposition zu zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten abgebildet und die Messdaten der Straße vor den beiden Rädern für beide Zeitschritte. Die Straßenoberfläche ist als farbig eingefärbtes Gitter eingezeichnet. Das zweite Diagramm zeigt in der Vergrößerung die Messpunkte auf der Straße.

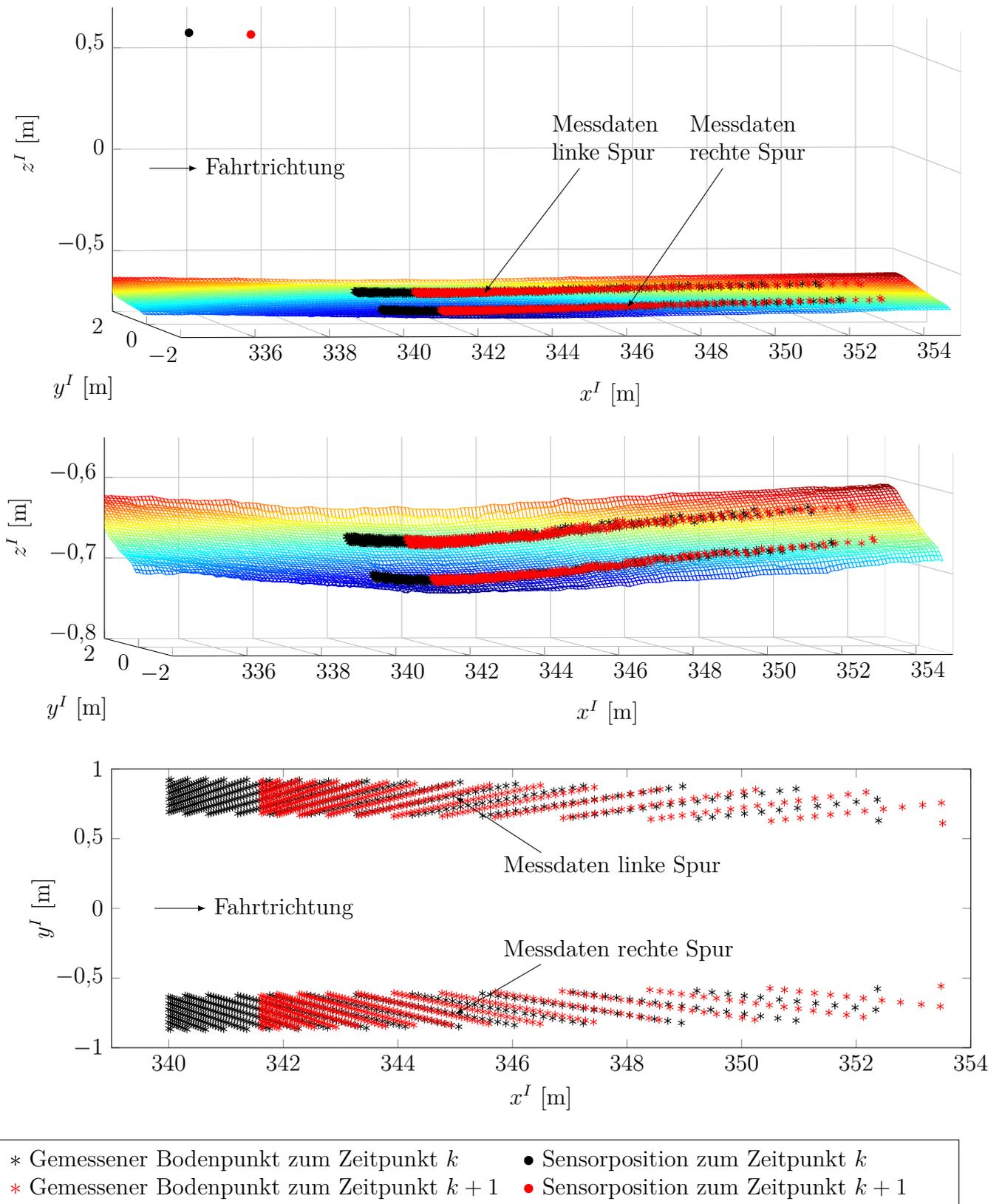


Abbildung 4.8: Berechnung exakter Sensormessdaten in der Simulation; Fahrt über Bodenwellen mit 35 m Periodenlänge und 120 km/h

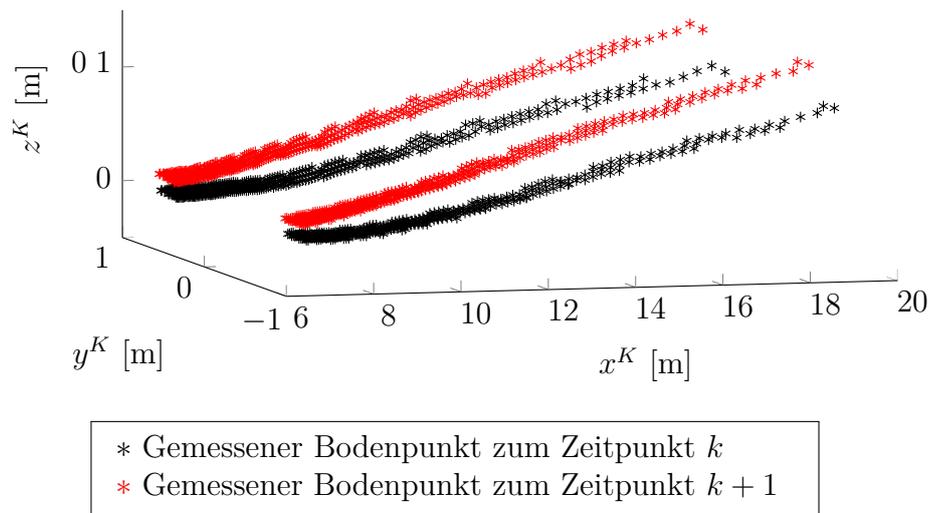


Abbildung 4.9: Simulierte exakte Sensormessdaten im karosseriefesten Koordinatensystem

Im dritten Diagramm ist eine Draufsicht auf die Sensormesspunkte der Straße abgebildet. Da die Sensorstrahlen gewählt werden, welche in Ruhelage den Bereich vor den Rädern abdecken, und die Straße ansteigt, verschieben sich die Messpunkte für weitere Entfernungen leicht Richtung Fahrzeugmittelachse.

Optische Systeme in modernen Fahrzeugen besitzen eine Auflösung in der Größenordnung 1000 x 1000 Pixel, aus diesem Grund ist die große Anzahl an Messpunkten zu einem Zeitschritt realistisch. In der Simulation wird angenommen, der Sensor liefert alle 50 ms diese Anzahl an Entfernungsmessungen.

In Abbildung 4.9 sind die exakten Sensormessdaten für die beiden Zeitschritte im karosseriefesten Koordinatensystem gezeigt. Es wird deutlich, dass die beispielhaften Bodenwellen nicht gesamtheitlich im Sensorsichtbereich abgebildet sind, es ist jedoch die Krümmung in den Sensordaten sichtbar. Aufgrund von Huben, Nicken und Wanken des Fahrzeugaufbaus liegen die Punkte der beiden Zeitschritte nicht exakt übereinander. Diese Entfernungsmessungen zur Straße werden mit einem Rauschen versehen und im weiteren Verlauf der Arbeit zur Simulation der Erstellung des Straßenhöhenprofils verwendet.

4.4 Algorithmen zur Akkumulation der Höhenprofilaten

Mit der im vorigen Abschnitt entwickelten Simulationsumgebung sind Sensormesswerte der Straße im karosseriefesten Koordinatensystem K gegeben. Es wird analog zu [110,128] ein diskretes Schieberegister zur Akkumulation der Höhenwerte verwendet, mit dem Unterschied, dass in dieser Arbeit die Höhenkarte von einer definierten Vergangenheit bis zu der Vorausschauweite des Sensors angelegt wird. Dies ist in Abbildung 4.10 für die Höhenwerte $h_1 \dots h_k$ veranschaulicht. Die gewählte Diskretisierung wird zu äquidistanten 15 cm gewählt, es wird jeweils eine Karte für die rechte und die linke Spur angelegt. Die Höhenkarte wird in jedem Zeitschritt um den zurückgelegten Weg in Fahrzeuginnenrichtung verschoben. Treffen mehrere Höhenwerte aus der Sensormessung, örtlich oder zeitlich, in dieselbe Zelle, werden diese akkumuliert. Diese Mittelung verringert das Sensorrauschen.

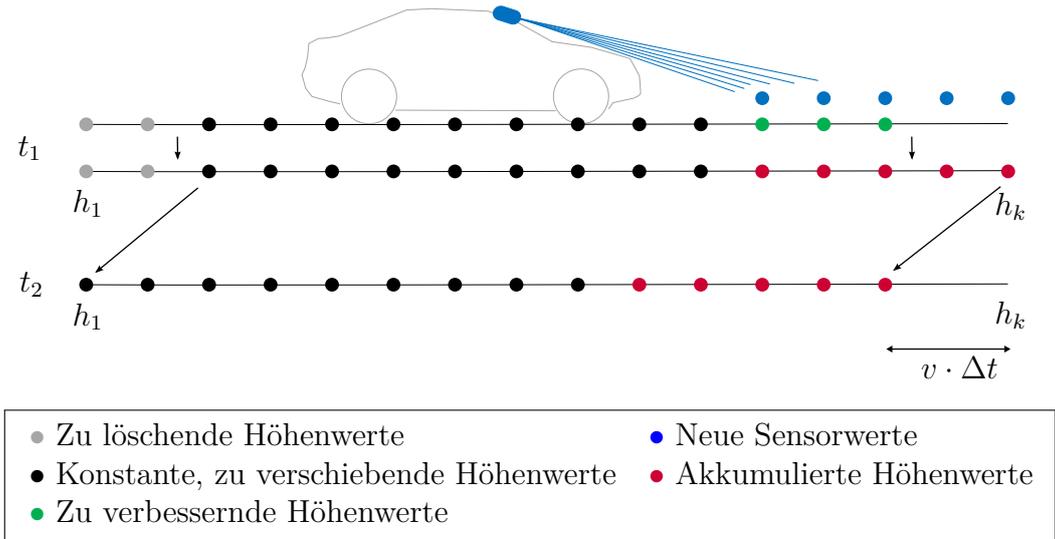


Abbildung 4.10: Akkumulation der Höhenwerte in einem diskreten Schieberegister

Maximum-Likelihood-Methode

Es wird zunächst davon ausgegangen, die Standardabweichung der einzelnen Messwerte sei eine Sensoreigenschaft und bekannt. Diese kann über der Entfernung zunehmen. Um den Erwartungswert μ für die Höhe eines diskretisierten Straßenabschnittes aus den Messungen x_i mit der jeweiligen, als bekannt angenommenen, Standardabweichung σ_i zu berechnen, wird die Verwendung der Maximum-Likelihood-Methode [8,37] vorgeschlagen. Hierbei wird in der Regel von derselben Standardabweichung σ aller Messwerte ausgegangen, im Folgenden werden die Gleichungen für Messwerte mit bekanntem, unterschiedlichem σ_i hergeleitet.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte einer Normalverteilung mit Erwartungswert μ und Standardabweichung σ_i lautet

$$f_i(x_i | \mu, \sigma_i^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma_i^2}\right). \quad (4.4)$$

Das Maximum der Likelihood-Funktion $L(\mu, \sigma)$ zeigt das wahrscheinlichste Paar aus Erwartungswert und Standardabweichung von n Messwerten an. Hierzu wird die Funktion partiell nach μ und nach σ abgeleitet und jeweils die Nullstelle ermittelt. Im vorliegenden Fall wird angenommen, es sei für jede Messung ein σ_i bekannt.

Die Likelihood-Funktion $L(\mu)$ berechnet sich aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeitsdichten aller n Messungen (4.4):

$$L(\mu) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (4.5)$$

Um den Erwartungswert mit der maximalen Wahrscheinlichkeit zu suchen, wird das Maximum der Funktion (4.5) ermittelt. Hierzu wird diese nach μ abgeleitet und dieser Ausdruck zu Null gesetzt. Wie ebenfalls bekannt, vereinfacht sich dies, wenn der Logarithmus der Likelihood-Funktion $\ln(L(\mu))$ abgeleitet wird. Dies beeinflusst das Ergebnis nicht, da der Logarithmus streng monoton steigend ist und somit das Maximum des Logarithmus einer Funktion an derselben Stelle auftritt wie das Maximum der Funktion selbst. Es folgt somit:

$$\frac{\partial}{\partial \mu} \ln(L(\mu)) = \frac{\partial}{\partial \mu} \left(\ln \left(\prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \right) - \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma_i^2} \right) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i - \mu}{\sigma_i^2} \stackrel{!}{=} 0 \quad (4.6)$$

Dies nach μ aufgelöst ergibt den Erwartungswert, falls für jede Messung eine bekannte, unterschiedliche Standardabweichung bekannt ist:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (4.7)$$

Wird die identische Standardabweichung σ für alle Messungen angenommen, folgt aus Gleichung (4.7) für die Berechnung des Erwartungswertes das arithmetische Mittel $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$. In der vorliegenden Anwendung wird eine Zelle in jedem Zeitschritt mit neuen Messwerten aktualisiert (Abbildung 4.10). Es muss somit jeweils der aktuelle Höhenwert der Zelle μ_1 und die Anzahl der darin enthaltenen Messungen n_1 gespeichert sein. Der Mittelwert aktualisiert sich durch n_2 neue Messungen zu μ_2 und wird durch $\mu_2 = 1/(n_1 + n_2) \cdot (n_1\mu_1 + \sum_{j=1}^{n_2} x_j)$ rekursiv berechnet.

Es wird folgend untersucht, welches Ergebnis ein Kalman-Filter [137] zur Akkumulation der Höhenwerte liefern würde. Die Systemgleichung und Messgleichung für den Höhenwert der Zelle x lautet:

$$x[k] = x[k - 1] + \tilde{w}[k - 1] \quad z[k] = x[k] + \tilde{v}[k] \quad (4.8)$$

Sowohl das Prozessrauschen $\tilde{w} \sim \mathcal{N}(0, Q)$ als auch das Messrauschen $\tilde{v} \sim \mathcal{N}(0, R)$ werden als normalverteilt mit Erwartungswert Null und Varianz Q bzw. R angenommen. Ist die Zuordnung der Zellen von einem Zeitschritt zum nächsten bekannt, beträgt das Prozessrauschen Q Null und R entspricht der Varianz des Messwertes.

Es werden in einem Versuch Messwerte mit Erwartungswert 2 sowie additivem, normalverteilten Rauschen mit Standardabweichung 2 generiert und das Kalman-Filter mit dem rekursiven arithmetischen Mittel verglichen. Die Varianz R sowie die Anfangskovarianz des Kalman-Filters sind durch die quadrierte Standardabweichung der Messungen gegeben und der Anfangszustand des Kalman-Filters wird auf den ersten Wert der Messung gesetzt. Obwohl die Systemmatrizen A und C sowie Q und R konstant sind, kann nicht die stationäre Lösung und somit eine konstante Kalman-Verstärkung verwendet werden. Die mit den Messwerten abnehmende Kalman-Verstärkung K ist im zweiten Diagramm in Abbildung 4.11 abgebildet.

Das arithmetische Mittel und das Kalman-Filter liefern für das vorliegende einfache System das identische Ergebnis (Abbildung 4.11), was sich auch anhand der Formeln zeigen lässt. In der folgenden Arbeit wird zur Akkumulation das gewichtete arithmetische Mittel nach Gleichung (4.7) verwendet.

Definition eines Gütemaßes

Die Kovarianzmatrix P des Kalman-Filters könnte zur Güteinformation des akkumulierten Höhenwertes verwendet werden. Dies hat jedoch den Nachteil, dass in die Berechnung nur die definierten Varianzen Q und R und die Anzahl der Aktualisierungsschritte eingehen, jedoch nicht die wirkliche Streuung der Messwerte. Diese kann, beispielsweise aufgrund von unterschiedlichen Witterungsbedingungen, variieren. Aus Gleichung (4.7) wird ersichtlich, dass sich das Ergebnis nicht ändert, wenn sämtliche Varianzen bzw. Standardabweichungen der Messungen mit einem

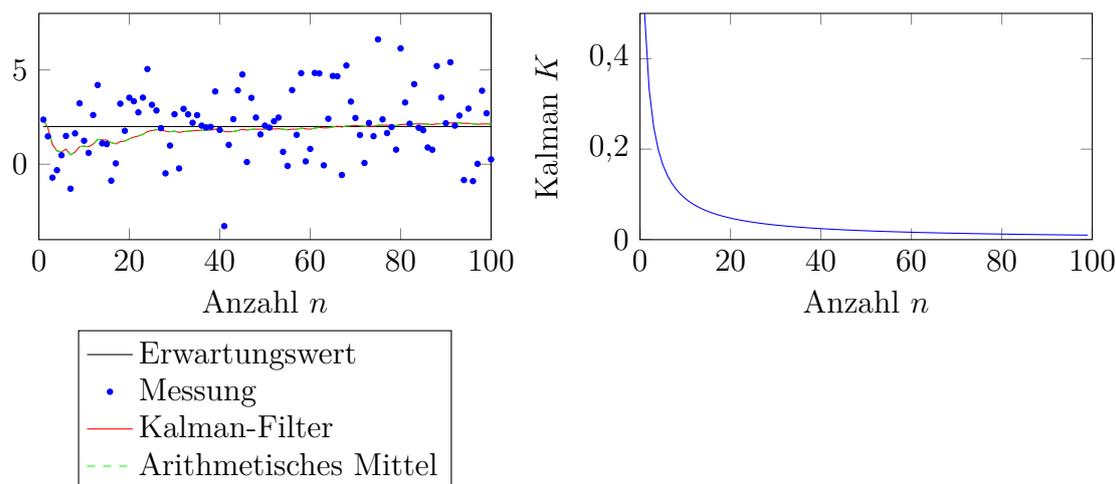


Abbildung 4.11: Vergleich Kalman-Filter und arithmetisches Mittel zur Akkumulation eines Messsignals mit konstantem Erwartungswert und konstanter Standardabweichung

Faktor multipliziert werden. Es wird also angenommen, dass auch bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen die Standardabweichung der Messungen über der Sensorsichtweite, bis auf die Multiplikation mit einem Faktor, konstant bleibt. Somit wird die Akkumulation bei jeder Witterungsbedingung mit dem definierten Modell der Standardabweichung über der Sensorsichtweite durchgeführt.

Für das Gütemaß wird vorgeschlagen, die Varianz des akkumulierten Höhenwertes $\text{Var}(\mu)$ mit der bekannten Verteilung der Standardabweichung über der Entfernung zu verwenden. Die Varianzgesetze lauten:

$$\text{Var}(aX + b) = a^2 \text{Var}(X) \quad (4.9)$$

$$\text{Var}\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) = \sum_{i=1}^n \text{Var}(X_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Cov}(X_i, X_j) \quad (4.10)$$

Es werden diese Varianzgesetze auf den Erwartungswert μ aus Gleichung (4.7) angewendet. Es wird angenommen, die Messwerte x_i sind unkorreliert, also $\text{Cov}(x_{i-1}, x_i) = 0$. Dies ergibt:

$$\text{Var}(\mu) = \text{Var}\left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}\right) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}\right)^{-2} \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i^{-4} \cdot \text{Var}(x_i) \quad (4.11)$$

Die Varianz der Stichprobe berechnet sich, da μ ebenfalls geschätzt wird, zu:

$$\text{Var}(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (4.12)$$

Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass sich das örtliche Modell der Varianz σ_i nicht ändert, jedoch ein Faktor aufgrund der Witterungsbedingung hinzukommen kann. Dies hat keinen Einfluss auf Gleichung (4.11), da sich ein konstanter Faktor vor den σ_i kürzt. Die Varianz des Erwartungswertes nach Gleichung (4.11) berechnet sich also aus den Schwankungen der wirklichen Messwerte unter Beachtung, dass weiter entfernte Messwerte eine größere Schwankung

aufweisen. Des Weiteren geht die Anzahl der Messungen in die Varianz $\text{Var}(\mu)$ mit ein. Somit wird die Güteinformation sicherer, wenn mehr Messwerte denselben Wert gemessen haben. Es muss jedoch beachtet werden, dass eine Mindestanzahl an Messungen notwendig sind, um die Varianz und somit das Gütemaß zu bestimmen. Falls nur zwei Messwerte in einer Zelle vorliegen, kann isoliert aus dieser Zelle keine Güteaussage getroffen werden. Es kann aber mit der Annahme einer trägen Änderung der Varianz über der Zeit, beziehungsweise mit der Einführung größerer diskreter Raster zur Bestimmung der Varianz, auch für diese Fälle eine Aussage getroffen werden. Innerhalb der hier angenommenen Randbedingungen geht es darum, den Faktor zu ermitteln, mit welchem die sensorspezifisch festgelegte örtliche Verteilung der Varianz multipliziert werden muss, um den wirklichen Messwerten zu entsprechen.

Zur Bewertung eines Sensors ist es hilfreich aus der, vom Sensorhersteller angegebenen, Standardabweichung der Messpunkte sowie deren Anzahl die Standardabweichung des akkumulierten Höhenwertes berechnen. Aus Gleichung (4.11) folgt:

$$\text{Var}(\mu) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^{-2} \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i^{-4} \cdot \sigma_i^2 = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^{-2} \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i^{-2} \quad (4.13)$$

Diese Berechnung wird im weiteren Verlauf der Arbeit an einem Beispielsensor durchgeführt. Für eine identische Standardabweichung σ aller Messungen ergibt sich: $\text{Var}(\mu) = \sigma^2/n$.

4.5 Transformation der Sensordaten

Für die vorgeschlagenen Varianten der sensorfesten Akkumulation und der inertialfesten Akkumulation ist es jeweils notwendig, die Sensordaten von einem Zeitschritt zum nächsten zu transformieren. Diese Transformation kann berechnet werden, falls die Eigenbewegung des Fahrzeuges, Huben z_A , Nicken η , Wanken ω und Längsbewegung x , bekannt ist (Abbildung 4.12). Die Transformation der Sensordaten $\underline{r}_{O_1 \rightarrow P}^{K_1}$ vom Koordinatensystem K_1 ins Koordinatensystem K_2 ergibt den Vektor $\underline{r}_{O_2 \rightarrow P}^{K_2}$ und berechnet sich nach Abbildung 4.12, indem die Vektoren vom inertialen Ursprung zum Punkt P im Koordinatensystem K_1 und K_2 ausgedrückt werden. Wird dies nach der Beschreibung im System K_2 aufgelöst, ergibt sich:

$$\underline{r}_{O_2 \rightarrow P}^{K_2} = \mathbf{R}_{\Delta\omega\Delta\eta} \left(\underline{r}_{O_1 \rightarrow P}^{K_1} - \mathbf{R}_{\omega_1\eta_1} \begin{pmatrix} \Delta x \\ 0 \\ \Delta z_A \end{pmatrix}^I - \underline{r}_{O \rightarrow SP}^K \right) + \underline{r}_{O \rightarrow SP}^K \quad (4.14)$$

Bei der Aufstellung der Gleichung ist zu beachten, dass Huben, Nicken und Wanken im inertialen System I bezüglich des Fahrzeugschwerpunkts definiert sind. Die Fahrzeuglängsbewegung Δx wird ebenfalls im inertialen System angenommen. Die Drehmatrix \mathbf{R} ist äquivalent zur Gleichung (4.1) definiert, wobei sich die Inverse einer Drehmatrix durch Vertauschen der Minuszeichen vor den Sinustermen berechnet. Die Notation ist analog zu Tabelle 4.1 und es wird als Reihenfolge der Drehungen zunächst Nicken und dann Wanken verwendet.

Falls die Eigenbewegung des Fahrzeuges von einem Zeitschritt zum nächsten exakt bestimmt werden kann, kann somit die Transformation der Sensordaten exakt durchgeführt werden. Die im Fahrzeug gemessenen Beschleunigungen gelten bezüglich des inertialen Systems und können somit zur Bestimmung der inertialen Fahrzeugbewegung zwischen zwei Zeitschritten genutzt werden. Dies ist jedoch nicht immer hochgenau möglich, z.B. bei Überfahrt eines Hindernisses.

Im Folgenden werden Ansätze zur Berechnung der Transformation der Sensordaten basierend auf den Umfeldsensordaten, welche die Straße redundant messen, hergeleitet. Es wird zudem eine Kombination mit den Beschleunigungsmessungen untersucht.

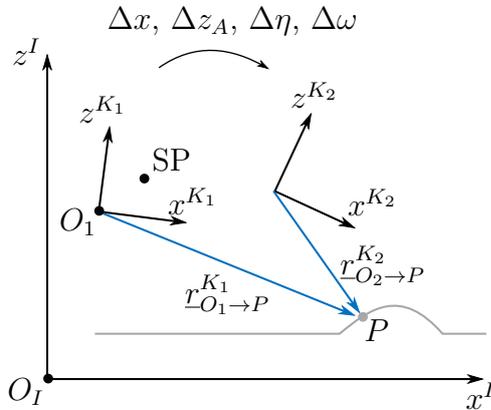
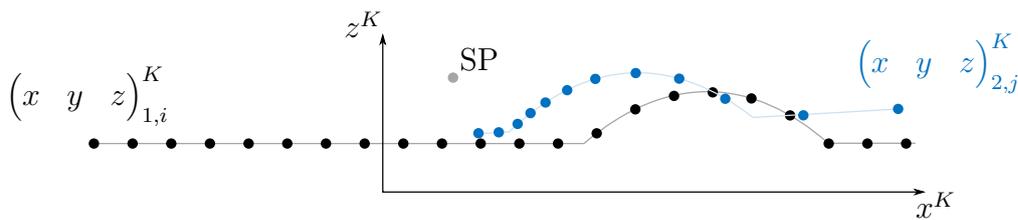


Abbildung 4.12: Berechnung der Transformation der Sensordaten aus der Fahrzeugeigenbewegung

4.5.1 Transformation durch *Matching* der Sensordaten

Die neuen Sensordaten sind durch die Sensorbewegung in den sechs räumlichen Freiheitsgraden gegenüber der erstellten Karte des vorherigen Zeitschrittes verschoben und verdreht (Abbildung 4.13). Es wurde in Abschnitt 4.2.1 vorgeschlagen, ein Höhenprofil durch Transformation der Höhenkarte in die neuen Sensorwerte zu erstellen und im Folgenden wird die Variante mit sensorfester Bezugsebene betrachtet. Hierzu muss in Abbildung 4.13 die schwarze Kurve so transformiert werden, dass sie mit der blauen Kurve übereinstimmt. Sie kann dafür prinzipiell um einen beliebigen Drehpunkt gedreht werden und dies hat dann jeweils unterschiedliche Werte für die vertikale Verschiebung zur Folge.



- Erstellte Karte zum Zeitschritt k mit äquidistanten Stützstellen
- Sensormessungen zum Zeitschritt $k + 1$ umgerechnet in Höhenwerte bezüglich einer sensorfesten Bezugsebene

Abbildung 4.13: Ermittlung der Transformation basierend auf den Sensordaten

Im Folgenden wird der Drehpunkt des Höhenprofils um den Schwerpunkt des Fahrzeuges gewählt, um bei Bedarf eine Kombination mit weiteren Messwerten durchzuführen. Die Freiheitsgrade zum Transformieren der Höhenkarte bestehen in Δz_A , Δx , $\Delta \eta$ und $\Delta \omega$. Mit diesen Freiheitsgraden soll die Höhenkarte „1“ in Abbildung 4.13 derart transformiert werden, dass

die quadrierte Differenz zu den Messwerten „2“ einander zugeordneter Punkte minimal wird. Es folgt hierfür aus der dritten Zeile von Gleichung (4.14):

$$\min_{\Delta x, \Delta z_A, \Delta \eta, \Delta \omega} \sum \left(\cos \Delta \omega \sin \Delta \eta (x_{1,i} - x_{SP} - \Delta x^K) - \sin \Delta \omega (y_{1,i} - y_{SP}) + \cos \Delta \omega \cos \Delta \eta (z_{1,i} - z_{SP} - \Delta z_A^K) + z_{SP} - z_{2,j} \right)^2 \quad (4.15)$$

Bei einer derartigen Optimierung (4.15) besteht vor allem das Problem, dass sich durch Variieren der Optimierungsvariablen Δx die Zuordnung¹ der Punkte verändert bzw. eine nichtlineare Funktion zur Beschreibung des Profils nötig ist. Ein guter Anfangswert, vor allem in Δx , ermöglicht von vornherein eine feste Zuordnung korrespondierender Punkte und lässt sich deutlich einfacher lösen. Es wird im Folgenden angenommen, dass die Verschiebung Δx aufgrund der gemessenen Fahrgeschwindigkeit bekannt ist.

Zur exakteren Bestimmung kann das Profil zusätzlich iterativ in x-Richtung verschoben, jeweils eine neue Zuordnung der Punkte aufgestellt, und bei einer signifikanten Verbesserung die Position angepasst werden. Eine integrierte Optimierung in x-Richtung ohne neue Zuordnung der Punkte, jedoch bezüglich einer linearisierten Approximation des Höhenprofils zum jeweiligen Stützpunkt, führt ebenfalls zu einem linear-quadratischen Optimierungsproblem [33]. Da die Übereinstimmung bei ebener Straße für unterschiedliche x sehr ähnlich ist, kann es jedoch vorkommen, dass durch die Optimierung die erste Schätzung verschlechtert wird.

Mit der Annahme kleiner Winkel, einer bekannten Verschiebung Δx^K und der somit bekannten Zuordnung der Zellen zu den K neuen Messwerten, vereinfacht sich Gleichung (4.15). Dies entspricht im Prinzip dem Vorgehen in [110] mit dem Unterschied, dass zusätzlich die Transformation in Wankrichtung berechnet wird und der Drehpunkt im Schwerpunkt liegt:

$$\min_{\Delta z_A, \Delta \eta, \Delta \omega} \sum_{k=1}^K \left(\underbrace{\Delta \eta (x_{1,k} - x_{SP} - \Delta x^K) - \Delta \omega (y_{1,k} - y_{SP}) - \Delta z_A^K + z_{1,k} - z_{2,k}}_{z_{1,k, \text{transformiert}}} \right)^2 \quad (4.16)$$

Dies kann auch in folgender Form geschrieben werden:

$$\begin{aligned} \min_{\underline{x}} \quad & \underline{x}^T \mathbf{E}^T \mathbf{E} \underline{x} + 2 \mathbf{E}^T \underline{e} \underline{x} + \underline{e}^T \underline{e} & (4.17) \\ \underline{x} = & \left(\Delta z_A \quad \Delta \eta \quad \Delta \omega \right)^T \\ \mathbf{E} = & \begin{pmatrix} -1 & (x_{1,1} - x_{SP} - \Delta x^K) & -(y_{1,1} - y_{SP}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -1 & (x_{1,K} - x_{SP} - \Delta x^K) & -(y_{1,K} - y_{SP}) \end{pmatrix} \\ \underline{e} = & \begin{pmatrix} z_{1,1} - z_{2,1} \\ \vdots \\ z_{1,K} - z_{2,K} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

¹engl. data association

Dies ist ein linear-quadratisches Optimierungsproblem ohne Beschränkungen und das Vorgehen wird auch als lineare Regression bezeichnet. Durch partielles Ableiten nach den Optimierungsvariablen und Nullsetzen des Ausdrucks entsteht ein zu lösendes lineares Gleichungssystem:

$$\mathbf{E}^T \mathbf{E} \underline{x} = -\mathbf{E}^T \underline{e} \quad (4.18)$$

Mit den berechneten Wank- und Nickwinkeln und der Hubverschiebung wird nach (4.16) jeweils $z_{1,k}$ transformiert ermittelt und somit eine Transformation des alten Höhenprofils durchgeführt. Eine Transformation „2“ \rightarrow „1“ berechnet sich analog mit den negierten Werten. Dieses zur Übereinstimmung bringen der Sensordaten, basierend auf einer ersten Schätzung², wird im Folgenden *Matching* der Sensordaten genannt. Neben der Fahrgeschwindigkeit ist es hilfreich, eine erste Schätzung der Bewegung basierend auf den Inertialsensormessungen durchzuführen, um eine genaue Zuordnung der Datenpunkte zu gewährleisten. Des Weiteren kann es vorteilhaft sein, je nach Rauschen des Sensors, die Messwerte vor dem *Matching* örtlich zu filtern.

Um beim *Matching* die Unsicherheit der einzelnen Höhenwerte zu berücksichtigen, werden in Gleichung (4.16) die einzelnen Summanden mit der Varianz der zugeordneten Punkte gewichtet. So wird jeder der k -Summanden mit $1/(\text{Var}(z_{1,k}) + \text{Var}(z_{2,k}))$ gewichtet.

4.5.2 Prädiktor-Korrektor Verfahren zur Ermittlung der Transformation der Sensordaten

Im vorigen Abschnitt wurde eine Methode vorgestellt, durch *Matching* die Sensordaten zu transformieren. Nun stellt sich die Frage, ob die Ermittlung der Transformation durch Verwendung weiteren Wissens verbessert werden kann. Zusätzliche Informationen sind beispielsweise die gemessenen Radeinfederungen sowie Beschleunigungen und Drehraten des Fahrzeugaufbaus und die hergeleiteten Fahrzeugmodelle.

Eine Möglichkeit besteht darin, mit dem reduzierten Fahrzeugmodell aus Kapitel 2 die Fahrzeugeigenbewegung zu präzisieren und mithilfe eines Kalman-Filters mit den gemessenen Beschleunigungen und Drehraten im Fahrzeugaufbau, den gemessenen Radeinfederungen und mit der Relativbewegung zwischen zwei Zeitschritten aus dem *Matching* der Sensordaten zu korrigieren. Um diese Prädiktion genau durchführen zu können, müsste neben dem Aktorstellweg das Höhenprofil als Eingang des Systems verwendet werden. Dies ist jedoch kritisch zu sehen, da ein Fehler im Höhenprofil die Erstellung des Höhenprofils negativ beeinflusst und somit eine instabile Rückkopplung entsteht. Es ist auch möglich, die Prädiktion mit dem Fahrzeugmodell ohne Eingang durchzuführen und mit den gemessenen Beschleunigungen und der Information aus den *Matching* zu korrigieren. Hierbei wird jedoch mit der Annahme konstanter Aufbaugeschwindigkeiten präzisiert und bei einer auftretenden Beschleunigung, zum Beispiel bei der Überfahrt einer Unebenheit, führt das nachträgliche Korrigieren der trägen Masse zu einem Phasenverzug. Eine Filterung der gemessenen Beschleunigungen und Drehraten dürfte zu einem ähnlichen Effekt führen.

Ein neuer Ansatz besteht darin, die gemessenen Radeinfederungen und die Aktorstellwege in Kräfte auf den Aufbau umzurechnen und dies als Eingang des Systems für die Prädiktion zu verwenden. Diese Prädiktion wird mit den gemessenen Drehraten und Beschleunigungen und mit der Relativbewegung aus dem *Matching* korrigiert. Hierbei muss jedoch der Einfluss

²engl. initial guess

von Querbewegungen und Längsbewegungen auf die Radeinfederungen eliminiert werden.

Es wird eine zweite neue Möglichkeit vorgeschlagen und im Folgenden erläutert, welche robuster auszuführen ist. Die Methode orientiert sich am Vorgehen der Inertialnavigation [13,21,106]. Hier werden die gemessenen Beschleunigungen der Inertialsensorik als Eingang eines Kalman-Filters integriert und mit den Positionsdaten eines Satellitennavigationssystems korrigiert. Im vorliegenden Fall wird die gemessene Hubbeschleunigung $\ddot{z}_{A,\text{mess}}$ als Eingang des Systemmodells verwendet und mit der relativen Hubbewegung zwischen zwei Zeitschritten berechnet aus dem *Matching* der Umfeldsensordaten korrigiert. Die System- und Messgleichung für den Entwurf eines Kalman-Filters lauten somit:

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_A \\ \ddot{z}_A \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{pmatrix} z_A \\ \dot{z}_A \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}}_{\mathbf{b}} \ddot{z}_{A,\text{mess}} + \tilde{w} \quad \tilde{w} \sim \mathcal{N}(0, Q) \quad (4.19)$$

$$z = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\mathbf{c}} \begin{pmatrix} z_A \\ \dot{z}_A \end{pmatrix} + \tilde{v} \quad \tilde{v} \sim \mathcal{N}(0, R) \quad (4.20)$$

Hierbei kann Q als Varianz des Einganges, also der Beschleunigungsmessung, interpretiert werden und R bezeichnet die Varianz der Hubgeschwindigkeitsbestimmung aus dem *Matching*. Es muss darauf geachtet werden, die Kovarianzmatrizen, welche zunächst im kontinuierlichen gegeben sind, mit der Taktzeit T_s zeitlich zu diskretisieren:

$$R = R_{\text{kont}} \quad \mathbf{Q} = T_s \cdot \mathbf{Q}_{\text{kont}} \quad (4.21)$$

Da die Systemmatrizen \mathbf{A} , \mathbf{c} sowie \mathbf{Q} und R konstant sind, konvergiert die Kalman Verstärkung \mathbf{K} unabhängig von den Messwerten zu $\mathbf{K}_{\text{stat}} = (\mathbf{K}_1 \ \mathbf{K}_2)^T$. Für diese Werte sind nur das Verhältnis und nicht die Absolutwerte von \mathbf{Q} und R relevant. Mit dem Faktor \mathbf{K}_2 wird in den Gleichungen des Kalman-Filters die im Modell integrierte Hubbeschleunigung aus der Messung mit dem Korrekturwert aus den Umfeldsensordaten durch ein gewichtetes Mittel aktualisiert.

Wird zur Probe die Hubbeschleunigung ohne Korrektur mit dem Euler-Vorwärts-Verfahren integriert und danach mit demselben Faktor mit der Relativbewegung aus dem *Matching* gemittelt, ergibt sich in der Mehrzahl der Fälle ein ungünstigeres Ergebnis. Dies liegt daran, dass innerhalb des Kalman-Filters auch die Integration des verrauschten Messwertes korrigiert wird.

Des Weiteren werden im Fahrzeug mit der Inertialsensorik die Nick- und die Wankgeschwindigkeit gemessen. Die relative Nick- und Wankbewegung zwischen zwei Zeitschritten wird ebenfalls aus dem *Matching* der Sensordaten gewonnen. Es liegen also zwei Messgrößen für denselben zu bestimmenden Wert vor. Hierbei ist die beste Möglichkeit für jeden Zeitschritt ein gewichtetes arithmetisches Mittel beider Messgrößen nach Gleichung (4.7) zu bilden, wenn das Rauschen beider Signale normalverteilt und die Standardabweichung bekannt ist.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Transformation über das *Matching* der Sensordaten, ausgehend von einem guten Startwert, zu berechnen und mit dem Signal aus den Inertialsensoren zu plausibilisieren. Falls eine größere Abweichung auftritt, wird das Vertrauensmaß der Vorausschauinformation reduziert.

Eine Bewertung der entwickelten Methoden wird im weiteren Verlauf der Arbeit durchgeführt.

Simultaneous localization and mapping

Simultaneous localization and mapping (SLAM) bezeichnet in der Robotik eine Aufgabenstellung, bei welcher ein Roboter oder ein Fahrzeug gleichzeitig seine Position bestimmt und eine Karte der ihn umgebenden N Referenzpunkte³ aufbaut. Im Folgenden wird das Vorgehen kurz skizziert. Es wird im gängigen Fall [27, 59] ein Kalman-Filter mit den Zuständen der Fahrzeugposition und -orientierung \underline{x} sowie die Position aller Referenzpunkte $\underline{p}_1 \dots \underline{p}_N$ benutzt. Die Prädiktion der Fahrzeugposition und -orientierung erfolgt mit dynamischen Gleichungen: $\underline{x}[k+1] = \Phi \underline{x}[k] + \Gamma \underline{u}[k]$. Die Prädiktion der Referenzpunkte erfolgt über deren konstante Position. Somit ergibt sich folgende Struktur für die Prädiktion der Zustände:

$$\begin{pmatrix} \underline{x}[k+1] \\ \underline{p}_1[k+1] \\ \vdots \\ \underline{p}_N[k+1] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi & & & \\ & \mathbf{I} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{x}[k] \\ \underline{p}_1[k] \\ \vdots \\ \underline{p}_N[k] \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Gamma \\ \underline{0} \\ \vdots \\ \underline{0} \end{pmatrix} \underline{u}[k] \quad (4.22)$$

Mit dem Messmodell wird eine Erwartung der Sensormessung ermittelt. Die Erwartung der Sensormessung besteht standardmäßig in einem Entfernungswert und einem Winkel des Messstrahls. Die Struktur der Messgleichung ergibt sich folgendermaßen:

$$\underline{z} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_x & \mathbf{C}_{p1} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ \mathbf{C}_x & & & \mathbf{C}_{pN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{x}[k] \\ \underline{p}_1[k] \\ \vdots \\ \underline{p}_N[k] \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

Die weitere Berechnung besteht im standardmäßigen Vorgehen eines Kalman-Filters [137].

Dieses Verfahren kann auf das vorliegende Problem angewendet werden. Hierbei müssen in jedem Zeitschritt alte Zustände für die überfahrenen Höhenwerte entfernt und neue Zustände für die zukünftigen Höhenwerte initialisiert werden. Es treten dieselben Probleme der Zuordnung der Datenpunkte auf. Diese Zuordnung muss in einem separaten, vorgelagerten Schritt durch eine möglichst gute erste Schätzung der Fahrzeugbewegung durchgeführt werden.

Da sich die Systemmatrix aus Gleichung (4.22) in jedem Zeitschritt ändert, muss die Kalman-Verstärkung in jedem Zeitschritt neu berechnet werden. Werden nur die zu aktualisierenden Höhenwerte nach Abbildung 4.10 als Zustände des Kalman-Filters verwendet, ergeben sich beispielsweise bei einer Distanz von 4 bis 20 m und einer 15 cm Diskretisierung 214 Höhenwerte. Die Berechnungsschritte des Kalman-Filters sind somit sehr rechenaufwändig, vor allem die Berechnung der inversen Matrix in der Dimension der Messgleichung. Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass eine Ungenauigkeit in der Bestimmung der Fahrzeugeigenbewegung Auswirkungen auf die Akkumulation hat. Gleichzeitig setzt das Verfahren voraus, dass die Sensordaten richtig den Höhenwerten zugeordnet werden. Da eine mit 15 cm feine Diskretisierung der Höhenkarte vorliegt, ist eine korrekte Zuordnung der Daten gleichbedeutend mit einer sehr genauen Kenntnis der Längsbewegung.

Aus diesen Gründen wird im Folgenden das zweistufige Verfahren verwendet, bei dem zuerst die Transformation ermittelt und danach die Akkumulation durchgeführt wird.

³engl. landmarks

4.6 Methoden zur Filterung des Straßensignals

In den letzten Abschnitten wurden Konzepte vorgeschlagen und erläutert, wie aus den Sensorrohdaten ein Straßenhöhenprofil erzeugt wird. Dieses Höhenprofil besitzt durch eine nicht exakte Bestimmung der Transformation der Sensordaten sowie aufgrund von Sensorrauschen eine Ungenauigkeit. Es wird im Folgenden eine kontinuierliche Filterung des Signals und des Weiteren eine Erkennung definierter Unebenheiten in der Straße vorgeschlagen. Hierbei wird nur bei definierten Unebenheiten das Straßensignal verwendet, ansonsten wird von einer innerhalb der Sensorungenauigkeit glatten Straße ausgegangen. In Abschnitt 4.1 wurde definiert, dass die Anteile des Höhenprofils zwischen 0,5 Hz und 5 Hz für die Fahrwerksregelung relevant sind. Diese Grenzfrequenzen können in der Applikation angepasst werden.

4.6.1 Kontinuierliche Filterung

Die Höhenwerte können sowohl örtlich in jedem Zeitschritt als auch zeitlich über mehrere Zeitschritte gefiltert werden, da in jedem Zeitschritt die Straße in einem bestimmten örtlichen Bereich bekannt ist (Abbildung 4.10). Da die zukünftige Straßeninformation bekannt ist, kann das Höhenprofil phasenfrei gefiltert werden. Dies ist ein großer Vorteil der Vorausschau, da ohne Vorausschau durch den Phasenverzug der gefilterten Eingangssignale die Aktoren mit Zeitverzug angesteuert werden.

Es sind nach der in dieser Arbeit festgelegten Definition des gewünschten Höhenprofils (Abschnitt 4.1) zwei Aufgaben zu lösen:

1. Die 5 Hz-Tiefpassfilterung, da ein langsam aktives Fahrwerk nicht schneller agieren kann.
2. Die 0,5 Hz-Hochpassfilterung, um niederfrequente Anteile des Höhenprofils zu eliminieren.

Die zweite Aufgabe kann auch der Regelung überlassen werden, indem das Höhenprofil im inertialfesten Koordinatensystem als Eingang der modellprädiktiven Regelung verwendet wird.

Örtliche Vorwärts-Rückwärtsfilterung

Für eine phasenfreie Vorwärts-Rückwärtsfilterung ist es notwendig, das Signal in der Vergangenheit und in der Zukunft zu kennen. Es wird das Signal über den gegebenen Zeitraum gefiltert und das Ergebnis zeitlich rückwärts nochmals gefiltert [50]. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Anzahl der verwendeten Verzögerungen der Rückführung des Filters der Anzahl der verwendeten Verzögerungen des Eingangs entspricht. Sollte dies nicht der Fall sein, können die entsprechenden Koeffizienten zu Null gesetzt werden. Der Koeffizient a_0 ist zur Normalisierung gleich Eins gesetzt. Die Differenzgleichung eines linearen, zeitdiskreten Filters mit Ordnung k lautet gemäß [100]:

$$\begin{aligned} y[n] = & b_0 \cdot x[n] + b_1 \cdot x[n-1] + \dots + b_k \cdot x[n-k] \\ & - a_1 \cdot y[n-1] - \dots - a_k \cdot y[n-k] \end{aligned} \quad (4.24)$$

Eine Realisierung des Filters in Direktform II, welche die minimale Anzahl von Verzögerungsgliedern und somit den minimalen Speicherplatz benötigt, ist gegeben durch:

$$\begin{aligned}
 y[n] &= b_0 \cdot x[n] + z_1[n-1] \\
 z_1[n] &= b_1 \cdot x[n] + z_2[n-1] - a_1 \cdot y[n] \\
 &\vdots \\
 z_{k-1}[n] &= b_{k-1} \cdot x[n] + z_k[n-1] - a_{k-1} \cdot y[n] \\
 z_k[n] &= b_k \cdot x[n] - a_k \cdot y[n]
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Für die Vorwärts-Rückwärtsfilterung bleibt die Frage, wie die Anfangszustände des Filters bei der Vorwärts- und Rückwärtsfilterung zu wählen sind. Um den Einschwingvorgang des Filters zu eliminieren, wird jeweils der Stationärzustand des Filters für den ersten Eingangswert als Anfangszustand gewählt. Hierzu wird die Forderung konstanter Zustände über der Zeit,

$$\begin{aligned}
 z_1[n] &= z_1[n-1] \\
 &\vdots \\
 z_k[n] &= z_k[n-1],
 \end{aligned}$$

in die Gleichungen (4.25) der Direktform II eingesetzt:

$$\begin{pmatrix} 1 + a_1 & -1 & & & \\ a_2 & 1 & -1 & & \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \\ a_{k-1} & & & 1 & -1 \\ a_k & & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{z_1[n]}{x[n]} \\ \frac{z_2[n]}{x[n]} \\ \vdots \\ \frac{z_{k-1}[n]}{x[n]} \\ \frac{z_k[n]}{x[n]} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 - a_1 b_0 \\ b_2 - a_2 b_0 \\ \vdots \\ b_{k-1} - a_{k-1} b_0 \\ b_k - a_k b_0 \end{pmatrix} \tag{4.26}$$

Dieses Gleichungssystem wird für das gewählte Filter einmal offline gelöst. Unter Einsetzen des ersten Eingangs $x[0]$ des aktuellen Datensatzes kann der Anfangszustand $z_1[0] \dots z_k[0]$ des Filters in der Direktform II (4.25) berechnet werden. Dies wird sowohl für die Vorwärts- als auch für die Rückwärtsfilterung durchgeführt. Dieses prinzipielle Vorgehen wird auch in der Matlab Funktion `filtfilt` verwendet. Die Anforderungen der Fahrwerksregelung bestehen in einer Filterung, definiert durch Eckfrequenzen in der Einheit Hz. Um das Straßenhöhenprofil örtlich in dem verfügbaren Bereich zu filtern, wird somit mithilfe der aktuellen Fahrgeschwindigkeit die Ortsdiskretisierung in eine Zeitdiskretisierung umgerechnet.

Örtlicher gleitender gewichteter Mittelwert

Um das Höhenprofil örtlich phasenfrei zu filtern, kann ebenso ein gewichteter gleitender Mittelwert⁴ verwendet werden. Hierbei wird das Signal in einem Fenster mit einer Gewichtungsfunktion, welche summiert Eins ergeben muss, um keine Verstärkung zu erzeugen, multipliziert und daraufhin addiert. Dies entspricht einer Faltung des Signals mit der Gewichtungsfunktion. Als Gewichtungsfunktion kann beispielsweise eine Normalverteilung oder eine Gleichverteilung

⁴engl. Moving Average Filter

verwendet werden. Eine für die Fahrwerksregelung notwendige Filterung des Signals mit definierten Eckfrequenzen lässt sich als Multiplikation des Spektrums $X(\Omega)$ des Eingangssignals mit dem Frequenzgang $H(\Omega)$ des Filters formulieren. Die inverse Fouriertransformation in den Zeitbereich ergibt eine Faltung der Impulsantwort $h[n]$ mit dem Eingangssignal $x[n]$ [100]:

$$Y(\Omega) = H(\Omega) \cdot X(\Omega) \quad \xrightarrow{\mathcal{F}} \quad y[n] = h[n] * x[n] \quad (4.27)$$

Die Definition der Faltung lautet: $y[n] = h[n] * x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k] \cdot x[n - k]$. Wird ein ideales Tiefpassfilter mit der zeitkontinuierlichen Eckfrequenz ω in rad/s und der zeitdiskreten Eckfrequenz $W = \omega \cdot T_s$ mit der Taktzeit T_s gewählt, ergibt sich die in Abbildung 4.14 dargestellte Funktion

$$H(\Omega) = \begin{cases} 1, & |\Omega| \leq W \\ 0, & W < |\Omega| \leq \pi \end{cases} \quad (4.28)$$

Mit der Transformation in den Zeitbereich [100]

$$h[n] = \mathcal{F}^{-1}(H(\Omega)) = \frac{\sin[Wn]}{\pi n} = \frac{W}{\pi} \text{sinc}\left[\frac{Wn}{\pi}\right] \quad \text{mit} \quad \text{sinc}[n] = \frac{\sin[\pi n]}{\pi n} \quad (4.29)$$

ergibt sich, durch die Faltung $y[n] = h[n] * x[n]$, die Filterung des Signals mit einem idealen Tiefpass. Dieses Filter ist akausal. Da jedoch Informationen über zukünftige Werte vorhanden sind, kann dies ausgeführt werden, indem die Gewichtungsfunktion nach Abbildung 4.14 in einem definierten Bereich und nicht von $-\infty$ bis ∞ verwendet wird. Dies ist ein FIR Filter ohne Rückführung. Ein Hochpassfilter wird durch $1 - H(\Omega)$ realisiert, beziehungsweise im Zeitbereich durch die Differenz aus Signal und gefiltertem Signal: $y[n] = x[n] - h[n] * x[n]$. Für die Bearbeitung des Straßenhöhenprofils hat die vorgestellte Vorwärts-Rückwärtsfilterung durch die Berechnung der geeigneten Anfangsbedingungen des Filters bessere Ergebnisse erzielt, weshalb diese im Weiteren verwendet wird.

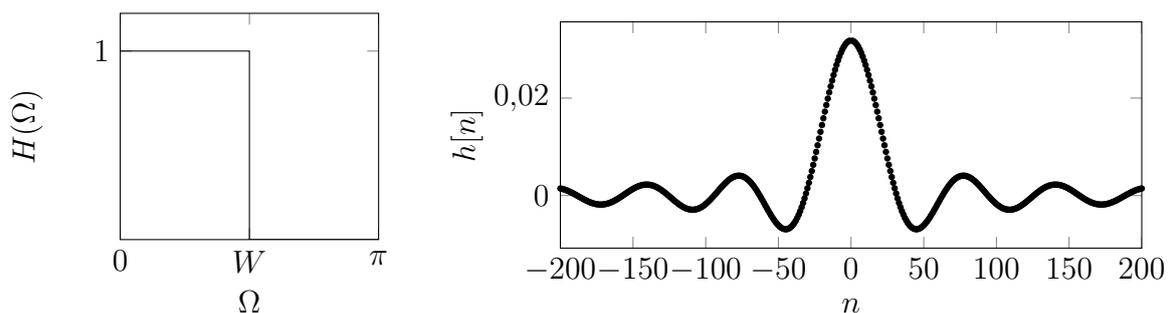


Abbildung 4.14: Ideales Tiefpassfilter im Frequenz- und im Zeitbereich

Örtliche Vorwärts-Rückwärtsfilterung mit zeitlich übereinstimmendem Anfangswert

Mit der vorgestellten Vorwärts-Rückwärtsfilterung mit jeweils eingeschwungenen Anfangszuständen ist eine örtliche phasenfreie Filterung möglich, wobei das Straßensignal auch in der Vergangenheit vorliegen muss. Eine weitere Überlegung besteht darin, die zeitliche Filterung

von einem Zeitschritt zum nächsten mit einzubeziehen, indem die Anfangszustände des Filters so gewählt werden, dass die ersten Ausgangswerte der Vorwärts-Rückwärtsfilterung konsistent in der Zeit mit den vorherigen Werten an dieser Stelle sind. Bei dieser Variante muss nicht das vergangene Höhenprofil vorliegen, sondern nur die Höhenwerte einiger voriger Zeitschritte, um nahtlos anzuschließen. Das Filter kann in Zustandsraumdarstellung formuliert werden:

$$\underline{x}[k+1] = \mathbf{\Phi}\underline{x}[k] + \mathbf{\Gamma}\underline{u}[k] \quad \underline{y}[k] = \mathbf{C}\underline{x}[k] + \mathbf{D}\underline{u}[k] \quad (4.30)$$

Der Ausgang der Filterung $\underline{y} = (y_0 \dots y_{N-1})^T$ für N Eingangsgrößen $\underline{u} = (u_0 \dots u_{N-1})^T$ lässt sich analog dem Vorgehen bei der modellprädiktiven Regelung präzisieren für einen Anfangswert \underline{x}_0 :

$$\underline{y} = \mathbf{U}\underline{u} + \mathbf{O}\underline{x}_0 \quad (4.31)$$

Die Matrizen \mathbf{U} und \mathbf{O} können aus den Zustandsraummatrizen in (4.30) berechnet werden (siehe Anhang B). Gustafsson [50] hat die Formel abgeleitet, mit der sich das Ergebnis einer Vorwärts-Rückwärtsfilterung $\underline{y}_{\text{fb}}$ berechnen lässt. Es wird angenommen, dass für beide Filterschritte dasselbe Filter verwendet wird. Der Operator R kennzeichnet die Umkehrung der Zeilen des Vektors bzw. der Matrix, \underline{x}_0 bezeichnet den Anfangszustand der Vorwärtsfilterung und \underline{x}_{N-1} den Anfangszustand der Rückwärtsfilterung:

$$\begin{aligned} \underline{y}_{\text{fb}} &= \left(\mathbf{U}\underline{y}_f^R + \mathbf{O}\underline{x}_{N-1} \right)^R = \mathbf{U}^R (\mathbf{U}\underline{u} + \mathbf{O}\underline{x}_0)^R + \mathbf{O}^R \underline{x}_{N-1} \\ &= \mathbf{U}^T \mathbf{U}\underline{u} + \mathbf{U}^T \mathbf{O}\underline{x}_0 + \mathbf{O}^R \underline{x}_{N-1} \end{aligned} \quad (4.32)$$

Ausgehend von der Arbeit von Gustafsson wird vorgeschlagen, den Anfangszustand der Rückwärtsfilterung \underline{x}_{N-1} durch die Stationärbedingung festzulegen, um das Einschwingen des Filters zu eliminieren. Diese wurde in Gleichung (4.26) für die Direktform II des Filters hergeleitet. Ist das Filter in Zustandsraumdarstellung gegeben, berechnet sich der Stationärzustand für den jeweiligen Eingang mit der Bedingung $\underline{x}[k+1] = \underline{x}[k]$ in Gleichung (4.30) und somit durch Lösen des linearen Gleichungssystems $(\mathbf{\Phi} - \mathbf{I})\underline{x}_{N-1}/u_{N-1} = -\mathbf{\Gamma}$. Der Anfangszustand der Vorwärtsfilterung \underline{x}_0 wird derart festgelegt, dass die Ausgänge $y_{\text{fb},0} \dots y_{\text{fb},k}$ mit den Ausgangswerten der Filterung des vorigen Zeitschrittes übereinstimmen. Hierbei ist k die gewählte Filterordnung, welche die Anzahl der Anfangszustände festlegt. Aus Gleichung (4.32) folgt:

$$\underline{y}_{\text{fb}} \Big|_{1:k} = \left(\mathbf{U}^T \mathbf{U}\underline{u} + \mathbf{O}^R \underline{x}_{N-1} \right) \Big|_{1:k} + \left(\mathbf{U}^T \mathbf{O} \right) \Big|_{1:k} \underline{x}_0 \stackrel{!}{=} \underline{y}_{\text{soll}} \quad (4.33)$$

Die Notation $\bullet \Big|_{1:k}$ kennzeichnet die Zeilen 1 bis k des Vektors bzw. der Matrix. Das lineare Gleichungssystem (4.33) muss in jedem Zeitschritt gelöst werden, um die Anfangszustände der Vorwärtsfilterung zu berechnen. Es ist somit das Höhenprofil über den Vorausschauhorizont sowohl örtlich als auch zeitlich konsistent gefiltert. Dies wird im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet, um die Eingangsinformation für die modellprädiktive Regelung zu erzeugen.

Örtlich vorgezogenes zeitliches Filtern

Es wird im Folgenden noch eine weitere Variante erläutert, bei welcher basierend auf der rein örtlichen Vorwärts-Rückwärtsfilterung unter Berücksichtigung der Vergangenheit zusätzlich ei-

ne zeitliche Filterung durchführt wird. Hier wird das Höhenprofil nur an definierten Stellen, beispielsweise unter den Rädern, zeitlich gefiltert.

Ein Tiefpassfilter besitzt immer einen Phasenverzug, um welchen das gefilterte Signal dem Originalsignal hinterherhinkt. Um dies zu kompensieren und ein zeitlich gefiltertes Höhenprofil ohne Phasenverzug unter den Rädern zu erhalten, wird nicht in jedem Zeitschritt der Höhenwert unter den Rädern als Eingang des Filters verwendet, sondern ein sich örtlich vor dem Rad befindlicher Höhenwert. Diese Distanz wird so gewählt, dass unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit der Phasenverzug des Filters genau kompensiert wird. Bei den verwendeten *Finite Impulse Response* (FIR) Filtern ist die Gruppenlaufzeit konstant, d.h. das gefilterte Signal eilt frequenzunabhängig dem Originalsignal um eine feste Zeitdauer hinterher. Diese berechnet sich aus dem Produkt der halben Filterordnung und der Taktzeit: $\Delta T_{\text{FIR}} = \frac{n_{\text{FIR}}}{2} T_s$. Um die Aktordynamik zusätzlich zu kompensieren, ist eine weitere zeitliche Verschiebung des Filters um die Zeitkonstante des Aktors notwendig. Diese Methode liefert ein über der Zeit phasenfrei gefiltertes Höhenprofil unter den Rädern. Ein solches Signal eignet sich für die Störgrößenkompensation mittels inversen Modells aus Abschnitt 3.3. Das Vorgehen, einen örtlich vor dem Rad befindlichen Höhenwert als Eingang eines Filters zu verwenden, wird auch in [145] verwendet.

4.6.2 Erkennung definierter Unebenheiten

Es wird vorgeschlagen definierte Unebenheiten aus dem Höhenprofil zu extrahieren, wobei nur bei einer Unebenheit ein Straßensignal für die vorausschauende Regelung verwendet wird. Die Motivation hierfür ist in Abbildung 4.15 gezeigt. Hier wird ein Einzelhindernis nach der Formel [94]

$$h(x) = \begin{cases} \hat{h} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{L} x\right) & \text{für } 0 \leq x \leq L \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.34)$$

verwendet und ein Rauschen von ± 1 cm alle 15 cm auf das Höhenprofil addiert. Das Ergebnis einer Vorwärts-Rückwärtsfilterung mit der Grenzfrequenz 5 Hz, wobei eine Fahrgeschwindigkeit von 30 km/h zur Umwandlung der Orts- in die Zeitdiskretisierung angenommen wird, ist in der Abbildung veranschaulicht. Es wird deutlich, dass durch die Filterung die Unebenheit in ihrer Form erhalten bleibt, auf ebener Fläche das Rauschen jedoch nicht eliminiert wird. Dieses Rauschen würde eine Aktorbewegung veranlassen. Dies hat eventuell eine spürbare Komfortverschlechterung zur Folge, in jedem Fall jedoch eine nutzlose ständige Aktorbewegung. Es ist möglich, die Filterung mit kleinerer Eckfrequenz auszulegen. Hierdurch würde das Rauschen eliminiert werden, jedoch auch zu großen Teilen die Unebenheit. Somit wäre der Effekt der vorausschauenden Fahrwerksregelung deutlich beeinträchtigt. Aus diesem Grund ist es wünschenswert, große Amplituden zu erkennen und kleine Amplituden zu eliminieren. Es werden drei prinzipielle Möglichkeiten vorgeschlagen, wie dies durchgeführt werden kann.

Erkennung definierter Unebenheiten mittels definierter Geometrien

Die erste Möglichkeit besteht darin, das Höhenprofil mit definierten Geometrien zu vergleichen. Es wird vorgeschlagen, nach positiven und negativen Unebenheiten, sowie nach positiven und negativen Kanten zu suchen. Hierzu kann die Formel (4.34) verwendet werden, wobei Höhe und

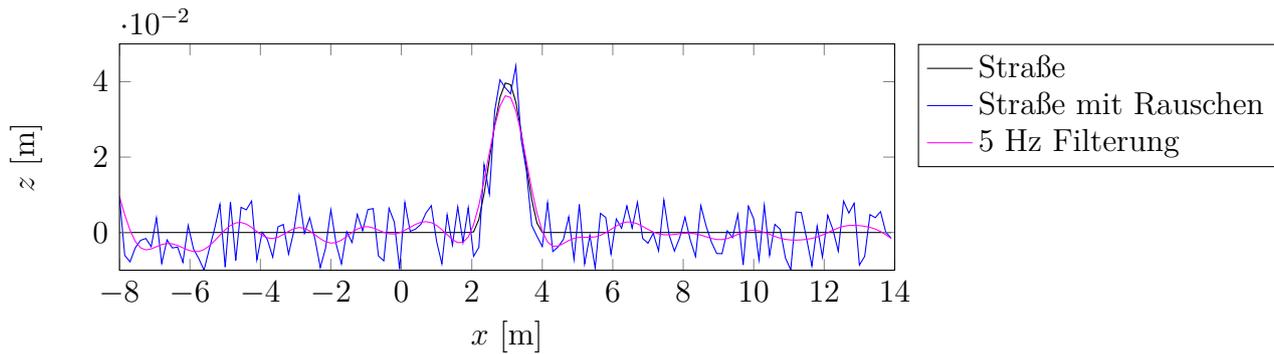


Abbildung 4.15: Unebenheit mit Rauschen und Ergebnis einer Filterung mit einem 5 Hz Tiefpass für 30 km/h

Länge variierbar sind. Diese Parameter sind so zu wählen, dass robust nur wirkliche Unebenheiten erkannt werden. Die Geometrien werden über das Höhenprofil geschoben und für jede Position ein Übereinstimmungswert aus Differenz von Schablone und Höhenprofil berechnet. Bei Überschreiten einer Schwelle des Übereinstimmungswertes wird der Bereich innerhalb der Schablone als Unebenheit markiert. Die Schablone kann für jede zu untersuchende Position jeweils so verdreht und vertikal verschoben werden, dass Anfang und Ende auf dem Höhenprofil liegen, um mit schräg im Koordinatensystem liegenden Höhenprofilen umzugehen. Im Folgenden wird jedoch bevorzugt, das Höhenprofil zunächst mit einem Hochpass zu filtern und danach mit der Geometrie zu vergleichen. Hierfür können auch Korrelationsfunktionen verwendet werden.

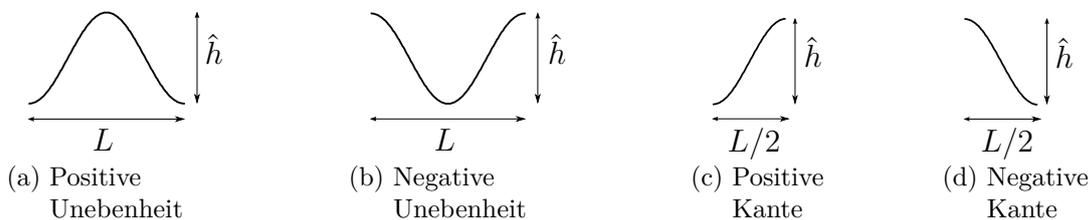


Abbildung 4.16: Zu suchende Geometrien im Straßenhöhenprofil

Diese Methode ist sehr robust. Es können jedoch nur Unebenheiten extrahiert werden, welche nicht länger als der Sensorsichtbereich sind. Beispielsweise können die 35 m langen Bodenwellen aus Abbildung 4.2a nicht erkannt werden.

Erkennung definierter Unebenheiten anhand des Gradienten

Eine weitere Methode zur Erkennung von definierten Unebenheiten im Straßenhöhenprofil besteht in der Auswertung von Gradienten. Hierbei kann jedoch nicht der Gradient des Höhenprofils direkt ausgewertet werden, da dieser durch das Rauschen auf ebener Straße genauso groß sein wird wie bei einer Unebenheit. Dies ist sichtbar in Abbildung 4.15. Aus diesem Grund wird das Höhenprofil zunächst mit einem Tiefpass gefiltert und der Gradient dieser Kurve ausgewertet. Dies ist in der Bildverarbeitung als *Edge Detection* bekannt, wobei als phasenfreie Filterung ein gewichteter gleitender Mittelwert verwendet wird. Ein bekannter Algorithmus stammt von Canny [20], hierbei wird die erste Ableitung der Gaußschen Normalverteilung als

Gewichtungsfunktion verwendet. Die Gaußsche Normalverteilung $G(x)$ mit den Parametern Standardabweichung σ und Erwartungswert μ

$$G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(x - \mu)}{2\sigma^2} \quad (4.35)$$

ist in Abbildung 4.17 für unterschiedliche Standardabweichungen gezeichnet. Eine Faltung des Höhenprofils $h[x]$ mit der Gaußschen Normalverteilung $G[x]$ entspricht der Bildung des gewichteten gleitenden Mittelwertes. Hierbei kann die Breite der Gaußschen Normalverteilung mit der Standardabweichung angepasst werden, um kleine Terme in der Faltung zu vernachlässigen. Die Standardabweichung ist hierbei ein Maß für die Glättung des Höhenprofils. Wird nach Maxima der ersten Ableitung des gefilterten Höhenprofils gesucht, werden oft Werte in der Flanke der Unebenheit ermittelt. So wird aufbauend auf Canny nach Maxima und Minima der 1. und 2. Ableitung des gefilterten Höhenprofils $g[x]$ gesucht [57]. Hierbei gilt:

$$g[x] = G[x] * h[x] \quad (4.36)$$

$$\frac{d}{dx}g[x] = \frac{d}{dx} (G[x] * h[x]) = \frac{dG[x]}{dx} * h[x] \quad (4.37)$$

$$\frac{d^2}{dx^2}g[x] = \frac{d^2}{dx^2} (G[x] * h[x]) = \frac{d^2G[x]}{dx^2} * h[x] \quad (4.38)$$

Es ist also äquivalent, die Gewichtungsfunktion ein- bzw. zweimal abzuleiten und hiermit das Höhenprofil zu falten. Somit kann die erste bzw. zweite Ableitung der Normalverteilung mit dem Straßenhöhenprofil gefaltet und die resultierende Kurve auf Extrema untersucht werden. Die Abbildungen 4.18a und 4.18b zeigen die Faltung des verrauschten Höhenprofils mit der Gaußschen Normalverteilung, die Abbildungen 4.18c und 4.18d die Analyse der 1. und 2. Ableitung auf Extrema.

Folgendes Vorgehen wird entworfen, um eine definierte Unebenheit zu detektieren:

1. Analyse der Extrema der ersten Ableitung einer groben Glättung des Höhenprofils auf Überschreiten einer Schwelle.
2. Suchen nach Extrema der zweiten Ableitung einer feineren Glättung des Höhenprofils in einem definierten Bereich um die Extrema der ersten Ableitung.

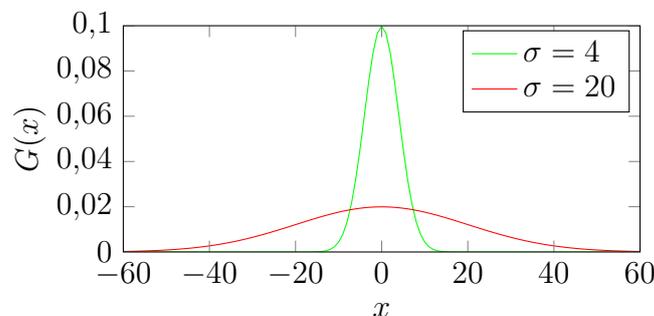


Abbildung 4.17: Gaußsche Normalverteilung für zwei Standardabweichungen

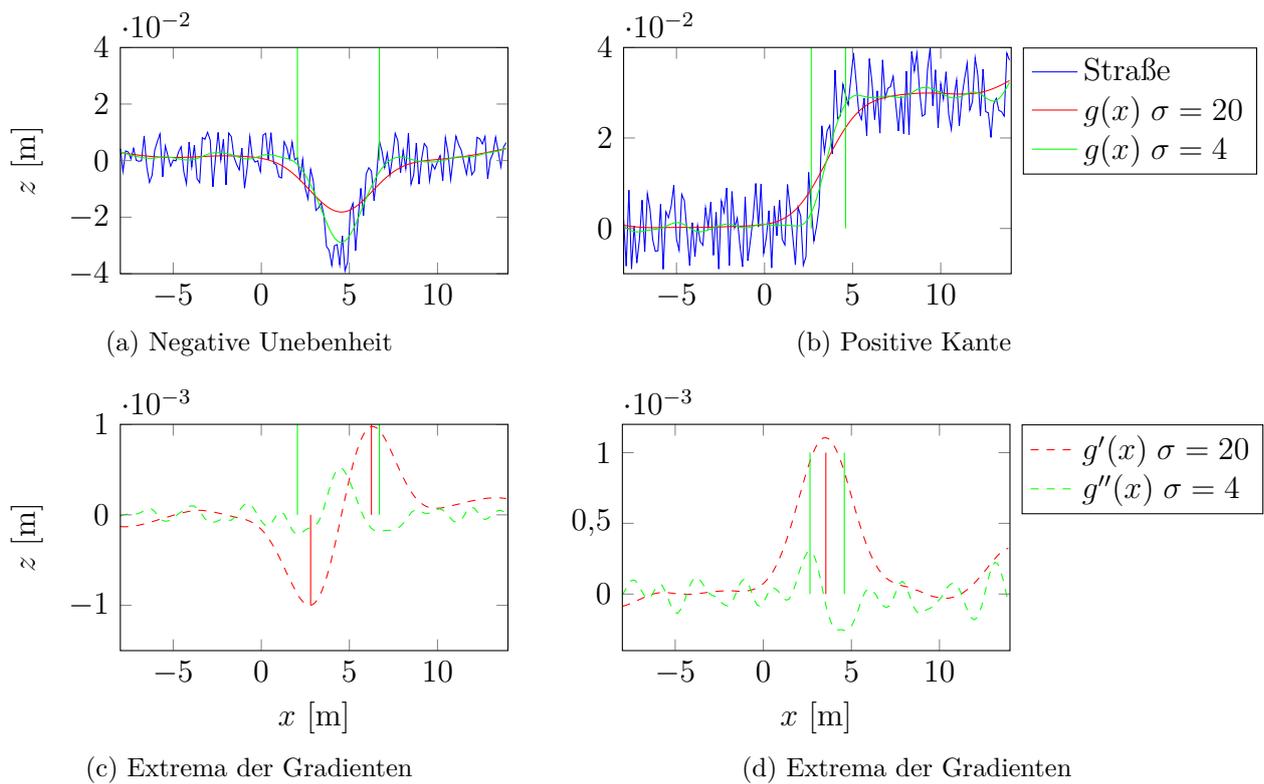


Abbildung 4.18: Uebenheitserkennung basierend auf der 1. und 2. Ableitung des gefilterten Höhenprofils

- Überprüfen der Extrema auf Plausibilität hinsichtlich der vier möglichen Uebenheiten nach Tabelle 4.2. Anfang und Ende der Uebenheiten sind durch die Extrema der zweiten Ableitung definiert.
- Verfolgen der Uebenheit über der Zeit. Aus einer positiven Kante kann eine positive Uebenheit werden, aus einer negativen Kante eine negative Uebenheit.

Die Kombination aus erster und zweiter Ableitung ermöglicht sowohl Robustheit als auch exakte Bestimmung der Anfangs- und Endpunkte. Um diese Filterung durchführen zu können, ist es notwendig die Straße auch hinter den Rädern zu speichern, wie es in Abbildung 4.10 dargestellt wurde. Mit dieser Methode können auch Bodenwellen länger als der Sensorsichtbereich anhand der Krümmung erkannt werden.

Tabelle 4.2: Erkennung Uebenheit anhand Gradienten

Analyse $g'[x]$	Analyse $g''[x]$	Uebenheit
{max min}	{max min max}	positive Uebenheit
{min max}	{min max min}	negative Uebenheit
{max}	{max min}	positive Kante
{min}	{min max}	negative Kante

Erkennung definierter Unebenheiten anhand der Amplitude

Es wird eine dritte Möglichkeit vorgeschlagen, in der das Höhenprofil auf Überschreiten einer definierten Amplitude untersucht wird. Hierbei wird das Höhenprofil zunächst mit einem Hochpass phasenfrei gefiltert. Dies ist notwendig, da beispielsweise bei der sensorfesten Akkumulation eine ebene Straße, bei entsprechendem Nicken des Fahrzeuges, durch eine steigende oder fallende Gerade im Koordinatensystem dargestellt wird und somit eine flache Straße beliebige Amplituden überschreiten kann.

Des Weiteren muss darauf geachtet werden, den Anfang und das Ende der Unebenheit richtig zu erfassen. Werden nur die Höhenwerte über einer bestimmten Amplitude ausgewählt, wird der Anfang und das Ende abgeschnitten und die vorausschauende Ansteuerung reagiert zu spät. Somit wird ausgehend von den Höhenwerten, die eine definierte Amplitude überschreiten, nach vorne und nach hinten im Höhenprofil gesucht bis eine Abbruchschranke erreicht wird. Diese Abbruchschranke kann über die Umkehrung der Steigung analog dem Verfahren der gradientenbasierten Unebenheitserkennung oder durch Unterschreiten eines definierten Höhenwertes bestimmt werden.

Für alle drei Varianten wird vorgeschlagen, Merker für die erkannte Unebenheit in einem Vektor, ähnlich dem Höhenprofil, zu speichern und über der Zeit zu verfolgen. Tritt eine Unebenheit ausreichend oft über der Zeit an derselben Stelle auf, wird das Höhenprofil für diesen Bereich der Fahrwerksregelung gefiltert zur Verfügung gestellt.

4.7 Gesamtkonzept Höhenprofilschätzung und Regelung

In Kapitel 3 wurden modellbasierte Regelungsverfahren für ein vorausschauendes Fahrwerkssystem vorgeschlagen. Dies waren modellprädiktive Regelungsansätze, wobei eine Optimierung über einen Vorausschauhorizont durchgeführt wird, um optimale Stellgrößen zu berechnen. Des Weiteren wurde ein Ansatz zur Störgrößenkompensation mit einem inversen Modell entwickelt, dabei wird der Höhenwert unter den Rädern als Eingangssignal benutzt.

In diesem Kapitel wurden neue Möglichkeiten entwickelt, ein Straßenhöhenprofil aus den Sensorrohdaten zu erzeugen. Die erste Möglichkeit besteht darin, die erstellte Höhenprofilkarte in jedem Zeitschritt in die neuen Sensorrohdaten zu transformieren und danach zu akkumulieren. Hierfür wurden zwei Varianten mit jeweils unterschiedlichem Koordinatensystem vorgeschlagen. Die zweite Möglichkeit besteht in der Akkumulation der Sensordaten in einem inertialen Koordinatensystem.

In Abschnitt 4.6 wurden schließlich Methoden zur Filterung des Straßenhöhenprofils vorgeschlagen. Diese bestehen aus einer örtlichen Vorwärts-Rückwärtsfilterung, aus einer zeitlichen Filterung mit örtlich vorgezogenem Eingangssignal und einer Erkennung definierter Unebenheiten. Im Folgenden werden mögliche Kombinationen der entwickelten Konzepte vorgeschlagen und erläutert. Im abschließenden Kapitel der Arbeit erfolgt eine Bewertung.

Durchführen einer Potentialanalyse

Zur Durchführung einer Potentialanalyse wird zunächst die modellprädiktive Optimierung sowie die Störgrößenkompensation mit inversem Modell mit einem exakten Straßensignal bezogen auf einen niederfrequenten Bezugsverlauf nach Abbildung 4.2 in der Simulation untersucht. Die überfahrene Strecke des Simulationsmodells entspricht hierbei dem Höhenprofil, welches der

Regelung mit einer bestimmten Vorausschau stückweise zur Verfügung steht. Hiermit wird der maximal mögliche Komfortgewinn einer vorausschauenden Fahrwerksregelung gezeigt.

Sensorfeste Akkumulation und inverses Modell

Bei der vorgeschlagenen Methode, die erstellte Höhenkarte in die aktuellen Sensormesswerte zu transformieren, entweder in einem sensorfesten oder einem profilbezogenen Koordinatensystem, entsteht ein Höhenprofil, das in jedem Zeitschritt im Koordinatensystem verdreht und verschoben ist. Es wird folgende Bearbeitung vorgeschlagen, um das als gewünscht definierte Höhenprofil zu erhalten:

1. Örtliche Tiefpassfilterung des Höhenprofils mit 5 Hz, um Sensorrauschen zu minimieren
2. Örtliche Hochpassfilterung des Höhenprofils mit 0,5 Hz, um festzulegen, welche Anteile der Straße ausgeglichen werden
3. Zeitliche Filterung mit 5 Hz mit örtlich vorgezogenem Eingangswert

Dieses Vorgehen ist in Abbildung 4.19 veranschaulicht. Der Kernpunkt dieses neu vorgeschlagenen Verfahrens besteht darin, dass die örtliche, phasenfremde Hochpassfilterung das Verdrehen und Verschieben des Höhenprofils in jedem Zeitschritt eliminiert und gleichzeitig die gemessenen Höhenwerte interpretiert, indem festgelegt wird, welche Frequenzen der Straße von der Regelung ausgeglichen werden sollen.

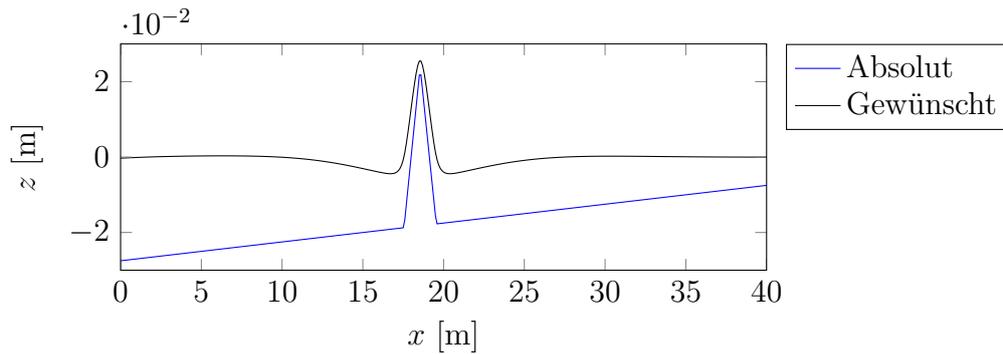
In Abbildung 4.19a ist als Beispiel die 4 cm hohe und 2 m lange Fahrbahnschwelle abgebildet (blaue Linie). Die schwarze Linie zeigt das in dieser Arbeit als gewünscht definierte Höhenprofil, welches durch eine phasenfremde Hoch- und Tiefpassfilterung mit 0,5 Hz und 5 Hz erzeugt wird. Durch die Filterung werden Anfang und Ende der Unebenheit ausgerundet, somit ergibt eine vorausschauende Ansteuerung ein leichtes Anheben des Fahrzeuges vor dem Hindernis. Dieses Anheben soll nicht spürbar sein.

In Abbildung 4.19b sind in Grün drei aufeinanderfolgende Höhenprofile abgebildet, welche im Koordinatensystem verdreht und verschoben sein können, jedoch jeweils die Straße in einem definierten Bereich aus der Vergangenheit bis zu der Vorausschauweite wiedergeben. Die Abkürzung VA bezeichnet die Position der Vorderachse. Dieses Profil wird örtlich mit einem Tiefpass und einem Hochpass gefiltert. Durch die Hochpassfilterung liegt das Profil, bis auf Randeffekte, auf dem gewünschten Profil. Abbildung 4.19c zeigt jeweils die mittleren Abschnitte des örtlich hochpassgefilterten Profils, zusammengesetzt aus den unterschiedlichen Zeitschritten. In Grün wird das Ergebnis der phasenfremden zeitlichen Filterung mit örtlich vorgezogenem Eingangswert dargestellt.

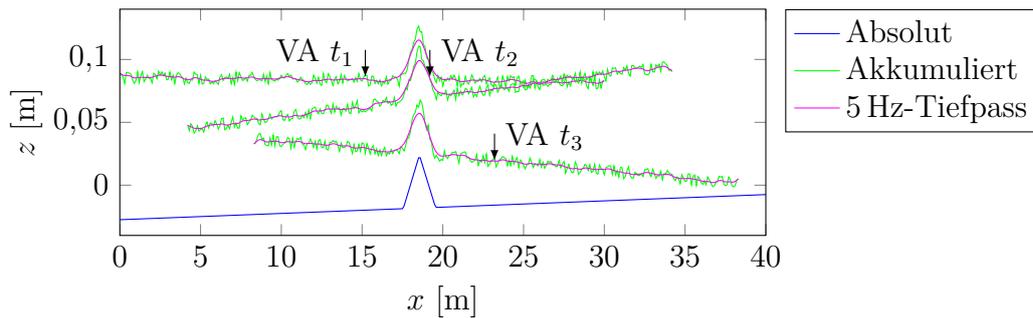
Mit dieser Methodik ist es auch möglich, Unebenheiten länger als das Sensorsichtfeld auf die gewünschte Bezugslinie zu beziehen und somit auszugleichen. Dies wird in den Simulationsergebnissen in Kapitel 5 gezeigt. Das Verfahren wird für die rechte und die linke Spur separat angewendet.

Inertialfeste Akkumulation und modellprädiktive Regelung

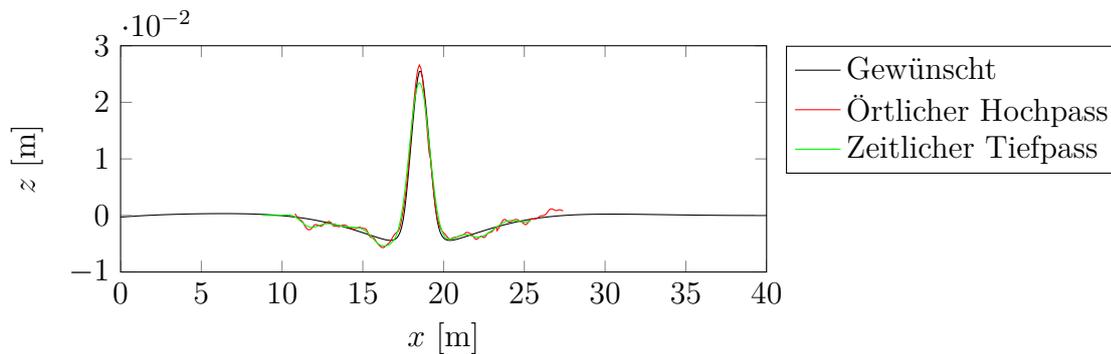
Das Höhenprofil im inertialen Koordinatensystem enthält ebenso alle Frequenzanteile der Straße, mit dem Unterschied, dass das Höhenprofil nicht in jedem Zeitschritt verdreht und vertikal



(a) Absolutes Höhenprofil und gewünschtes Höhenprofil



(b) In jedem Zeitschritt im Koordinatensystem verdrehtes Höhenprofil und örtliche Tiefpassfilterung mit 5 Hz



(c) Örtliche Hochpassfilterung mit 0,5 Hz, Verwenden der Höhenwerte bis zum nächsten Zeitschritt und zeitliche Tiefpassfilterung mit 5 Hz

Abbildung 4.19: Prinzipielle Erläuterung der Sensordatenaufbereitung für die Überfahrt der Schwelle

verschoben wird. Es kann somit auch hier das im vorigen Abschnitt vorgeschlagene Vorgehen angewendet werden. Des Weiteren ist es möglich, das inertielle Höhenprofil direkt als Eingang der modellprädiktiven Regelung, ohne vorhergehende Hochpassfilterung, zu verwenden. Es können somit ebenfalls Bodenwellen, länger als der Sensorsichtbereich, vorausschauend ausgeglichen werden.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Variante mit sensorfester oder profilbezogener Akkumulation kombiniert mit der Störgrößenkompensation mit inversem Modell, sowie die Variante mit inertialfester Akkumulation und modellprädiktiver Regelung untersucht. Im abschließenden Kapitel wird eine Empfehlung für ein favorisiertes Gesamtkonzept gegeben.

5 Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen

In diesem Kapitel werden Simulationsergebnisse der vorgeschlagenen Regelungsvarianten und der vorgeschlagenen Varianten zur Erstellung des Straßenhöhenprofils für unterschiedliche Fahrwerksaktoren vorgestellt. Sie bilden die Basis für die Bewertung der entwickelten Verfahren und der Entscheidung, welche Varianten im Fahrzeug implementiert werden.

5.1 Aufbau der Simulation

Schwerpunkt der Untersuchung ist die Verbesserung des Fahrkomforts durch eine vorausschauende Fahrwerksregelung. Fahrkomfort kann durch eine Reduktion der Beschleunigungen im Fahrzeugaufbau, also der Hub-, Nick-, und Wankbeschleunigung, quantifiziert werden. Es gibt unterschiedliche Kriterien, um zur Bewertung des Komforts die Zeitverläufe der Aufbaubeschleunigungen in eine Bewertungszahl zu übersetzen. Hierbei werden zum Beispiel die Frequenzen im Signal unterschiedlich gewichtet. Diese Übersetzung des Zeitverlaufes der Beschleunigung in eine Zahl hat jedoch den Nachteil, dass viel Information verloren geht. Außerdem beschränkt sich die Komfortverbesserung bei einer Federfußpunktverstellung auf den Bereich bis ca. 5 Hz. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Verläufe der Beschleunigungen im Zeit- bzw. im Frequenzbereich gezeigt. Des Weiteren wird gegebenenfalls ein root mean square (RMS) der Zeitverläufe oder die prozentuale Reduktion des Spitzenwertes der Beschleunigung zusätzlich angegeben. Der RMS n diskreter Punkte $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ berechnet sich zu $x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}$. Im Anhang D ist erläutert, wie eine Fouriertransformation zeitdiskreter Signale durchgeführt wird.

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der möglichst großen Reduktion der Beschleunigungen im Fahrzeugaufbau. Eine endgültige Bewertung des Fahrkomforts kann jedoch immer erst im Fahrzeug von einem geschulten Fahrer durchgeführt werden. Des Weiteren wird die dynamische Radlastschwankung ausgewertet, welche als Maß für die Fahrdynamik und Fahrsicherheit zu sehen ist. Eine geringe Radlastschwankung kennzeichnet einen guten Kontakt zwischen Reifen und Straße.

5.2 Simulation mit gegebenem Höhenprofil

Zunächst werden Simulationsergebnisse präsentiert, wobei ein exaktes Höhenprofil bezüglich eines gewünschten, niederfrequenten Bezugsverlaufs als gegeben angenommen wird. Dieses Höhenprofil wird als Eingang der Regelung und als zu überfahrendes Höhenprofil des Simulationsmodells verwendet.

5.2.1 Reglermodell entspricht Streckenmodell

Um zu zeigen, welche Komfortverbesserung mit den Grenzen realistischer Aktoren möglich ist, wird zunächst das Streckenmodell identisch dem Reglermodell gewählt. Hierfür wird das Modell mit sieben Freiheitsgraden (2.13) verwendet. Dieser Simulationsaufbau ist in Abbildung 5.1 veranschaulicht. Als Taktzeit der Simulation und der modellprädiktiven Optimierung wird 10 ms gewählt.

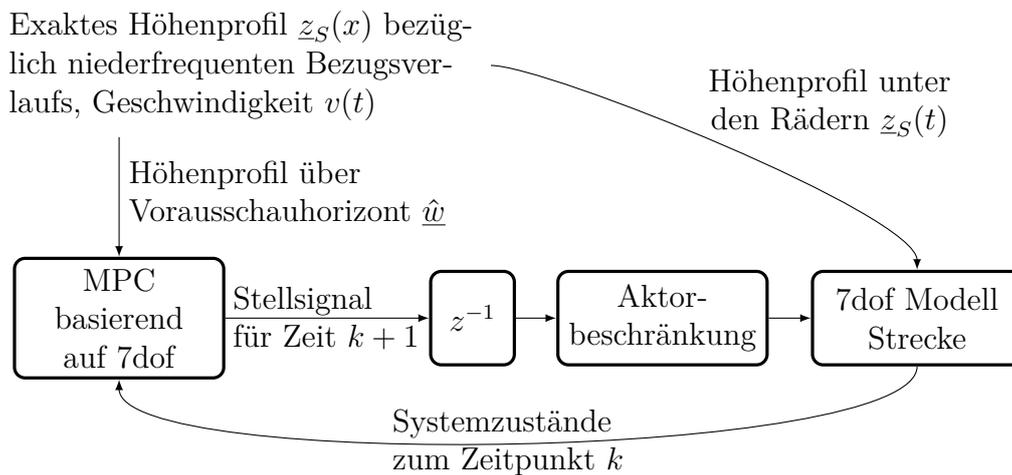


Abbildung 5.1: Aufbau der Simulation mit Reglermodell entspricht Streckenmodell und gegebenem Höhenprofil als Eingang

Fahrzeug mit Federfußpunktverstellung

In Abbildung 5.2 sind die Simulationsergebnisse einer modellprädiktiven Regelung nach Abschnitt 3.1 für eine Federfußpunktverstellung abgebildet. Es wird die Überfahrt einer 2 m langen und 4 cm hohen Schwelle mit 30 km/h und die Überfahrt der 45 m langen und 30 cm hohen Bodenwelle mit 100 km/h simuliert. Die hohe Bodenwelle entspricht dem Profil in Abbildung 4.2b mit einem niederfrequenten Bezugsverlauf von 0,1 Hz, um die gesamte Bodenwelle als positive Unebenheit abzubilden. Es wird zum einen die Simulation ohne Aktorbeschränkungen durchgeführt, zum anderen mit realistischen Beschränkungen auf Aktorstellweg und Aktorstellgeschwindigkeit. Diese werden in der modellprädiktiven Regelung explizit berücksichtigt.

Aus den in Abbildung 5.2 gezeigten Ergebnissen lassen sich folgenden Schlüsse ziehen:

1. In den unteren beiden Diagrammen wird ersichtlich, dass ohne Beschränkungen der Aktorik und für den Fall, dass das Reglermodell dem Simulationsmodell entspricht, die Aufbaubeschleunigungen eliminiert werden können. Die Trägheitsmassen der Räder spielen somit eine untergeordnete Rolle. Hierfür wird ein hochfrequentes Stellsignal zur Beeinflussung der Raddynamik erzeugt.
2. Mit realistischen Beschränkungen der Aktorik verringert sich die Reduktion der Aufbaubeschleunigungen, ist jedoch noch immer signifikant vorhanden.
3. Des Weiteren werden anschaulich die Vorteile einer modellprädiktiven Regelung verdeutlicht, falls Wissen über die Zukunft vorhanden ist. So ist in beiden Fällen eine proaktive

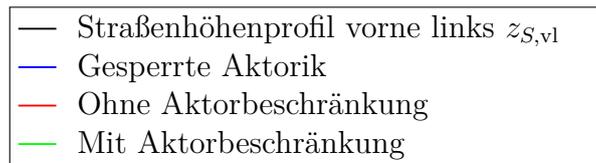
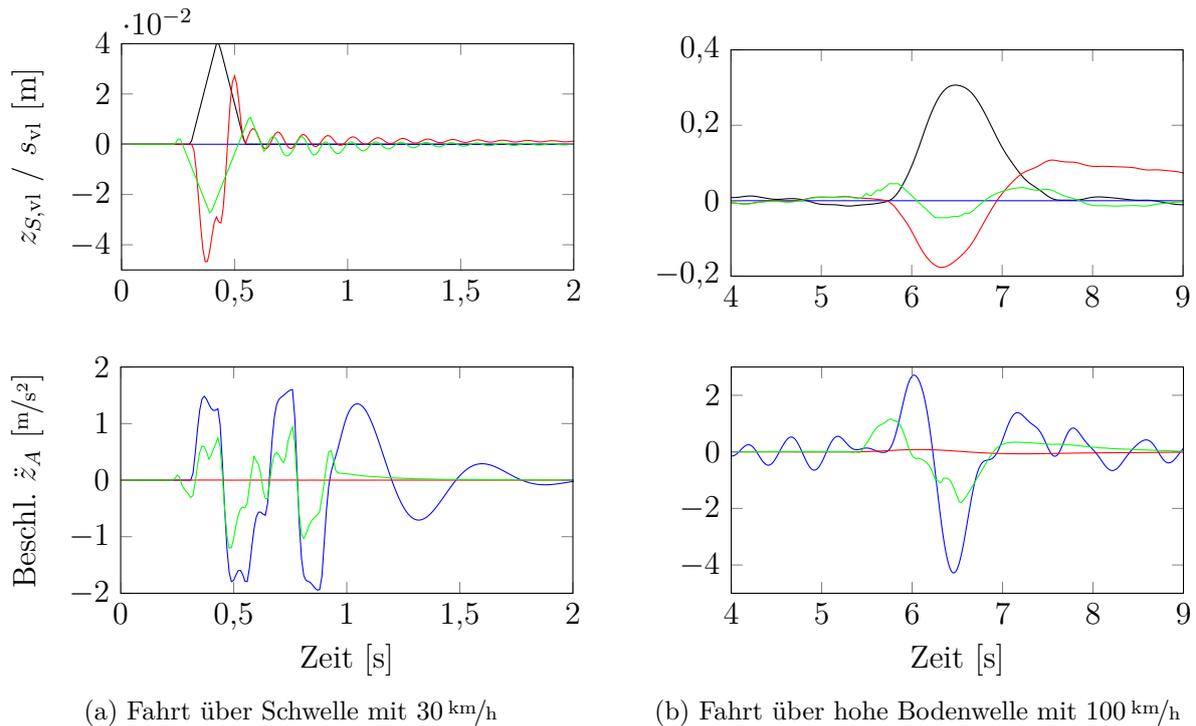


Abbildung 5.2: Simulationsergebnisse MPC Federfußpunktverstellung mit und ohne Aktorbeschränkung und Reglermodell entspricht Streckenmodell

Aktorsteuerung zu erkennen. Bei der Schwelle zeigt sich im Diagramm oben links ein Anziehen der Räder, bevor auf das Hindernis gefahren wird, um mit der begrenzten Verstellgeschwindigkeit den maximalen Effekt zu erzielen. Bei der hohen Bodenwelle wird mit der Optimierung ein proaktives Anheben des Fahrzeuges berechnet, sobald die Bodenwelle in Sicht ist, um den Verstellweg der Aktoren zu erhöhen und somit die Bodenwelle besser zu kompensieren. Dies ist im Diagramm oben rechts sichtbar. Eine derartige proaktive Aktuierung kann mit anderen modellbasierten Regelungskonzepten nicht erreicht werden, da die Aktorbeschränkungen nicht explizit berücksichtigt sind.

Die Vorsteuerung mit dem inversen Modell würde bei dem Eingangssignal der hohen Bodenwelle, falls keine weitere Vorbearbeitung erfolgt, an die Aktorbegrenzungen stoßen und einen ungünstigen Effekt erzielen. Die Vorausschauweite der modellprädiktiven Regelung beträgt bei der Schwelle zehn Schritte und somit 0,1 s. Bei der hohen Bodenwelle sind dies 0,5 s, um das proaktive Anheben zu ermöglichen.

Fahrzeug mit Verstelldämpfer

Nachdem im vorherigen Abschnitt das Verhalten einer vorausschauenden Fahrwerksregelung mit einer Federfußpunktverstellung betrachtet wurde, folgt nun eine Diskussion der Ergebnisse

für ein Fahrzeug mit einem semi-aktiven Fahrwerk. Es wurden in Abschnitt 3.1.2 drei modellprädiktive Ansätze für ein Fahrzeug mit Verstelldämpfer vorgeschlagen. Der erste beinhaltet exakt die nichtlinearen Beschränkungen des Dämpfers und führt in jedem Zeitschritt eine nichtlineare Optimierung aus. Der zweite Ansatz prädiziert in jedem Zeitschritt ein linearisiertes passives Fahrzeugmodell über den Vorausschauhorizont, berechnet dadurch eine Annäherung der Beschränkungen und löst in jedem Zeitschritt ein linear-quadratisches Optimierungsproblem. Der dritte Ansatz berechnet optimale Kräfte ohne Beschränkungen und begrenzt die Kraft, falls nötig, auf die maximal bzw. minimal mögliche Dämpferkraft.

Es wird wie im vorherigen Abschnitt das sieben Freiheitsgrade Modell (2.13) als Reglermodell und als Streckenmodell verwendet, um die drei Regelungsverfahren prinzipiell, ohne die Effekte eines abweichenden Simulationsmodells, zu vergleichen. Die beiden oberen Diagramme in Abbildung 5.3 zeigen die Auswirkungen eines Verstelldämpfers auf die Hub- und Nickbeschleunigung im Frequenzbereich bei der Überfahrt einer schlechten Landstraße mit 60 km/h. Für die Weichkennlinie ergeben sich in dem Bereich kleiner ca. 2,5 Hz ungünstige Komforteigenschaften, für höhere Frequenzen sehr gute. Bei der Hartkennlinie verhält es sich entgegengesetzt. Mit der Regelung des Verstelldämpfers wird für hohe Frequenzen das Niveau der Weichkennlinie erreicht und bei niedrigeren Frequenzen nicht ganz das Niveau der Hartkennlinie.

Es ist sichtbar, dass die drei vorgeschlagenen Regelungsansätze dieselbe Wirkung besitzen. Aus der Literatur ist schon bekannt, dass der *clipped optimal* Ansatz für Fahrwerke ohne Vorausschau optimal ist. Mit Vorausschau hätte man eine Verbesserung erhoffen können, indem proaktiv eine andere Dämpfung gewählt wird, damit sich das Fahrzeug bei der zukünftigen Straßenanregung in einem günstigeren Fahrzeugzustand befindet und somit insgesamt eine bessere Komfortwirkung erzielt werden kann. Dies ist nicht der Fall.

Weitergedacht bedeutet dies, dass im theoretischen Fall, bei exakt bekannten Eingangsgrößen und einem dem Reglermodell entsprechenden Streckenmodell, durch eine vorausschauende Regelung kein Mehrwert zu einer Regelung ohne Vorausschau existiert. Ein *clipped optimal* Ansatz, basierend auf einem linear-quadratisch regulator (LQR), kann auch ohne Vorausschau durchgeführt werden. Dieses Ergebnis unterliegt der Annahme eines zeitverzugsfrei arbeitenden Dämpfers.

In einem realen Fahrzeug müssen die Eingangsgrößen für beispielsweise eine *Skyhook*-Regelung gefiltert werden, wodurch ein Phasenverzug entsteht. Des Weiteren entspricht die Regelstrecke nicht exakt dem Reglermodell. Somit kann in diesem Fall das Vorausschausignal genutzt werden.

Im dritten Diagramm aus Abbildung 5.3 wird die unterschiedliche Wirkungsweise der drei vorgeschlagenen Regelungskonzepte deutlich. Es zeigt, dass durch die nichtlineare Optimierung Dämpferkräfte innerhalb des Dämpferkennfeldes berechnet werden und eine Begrenzung nicht mehr notwendig ist. Bei der Variante mit angenäherten Beschränkungen werden teilweise Kräfte leicht außerhalb des Kennfeldes berechnet und bei der Variante ohne Beschränkungen ergeben sich Kräfte im gesamten Bereich. Diese Sollkräfte werden auf die Kennlinien begrenzt, falls sie außerhalb liegen. Das Endergebnis ist jedoch bei allen drei Varianten identisch.

Die Hubbeschleunigung im vierten Diagramm könnte eliminiert werden, falls die optimale Kraft der modellprädiktiven Regelung ohne Beschränkungen gestellt werden kann, beispielsweise durch ein ideales vollaktives System.

Für das fünfte Diagramm wird eine vereinfachte Leistungsberechnung durch Kraft multipliziert mit Relativgeschwindigkeit für alle vier Aktoren, $p = \sum F_{d,ii} \cdot v_{d,ii}$, durchgeführt. Diese vereinfachte Berechnung beachtet keine Verluste in der Leistungselektronik oder höhere Leis-

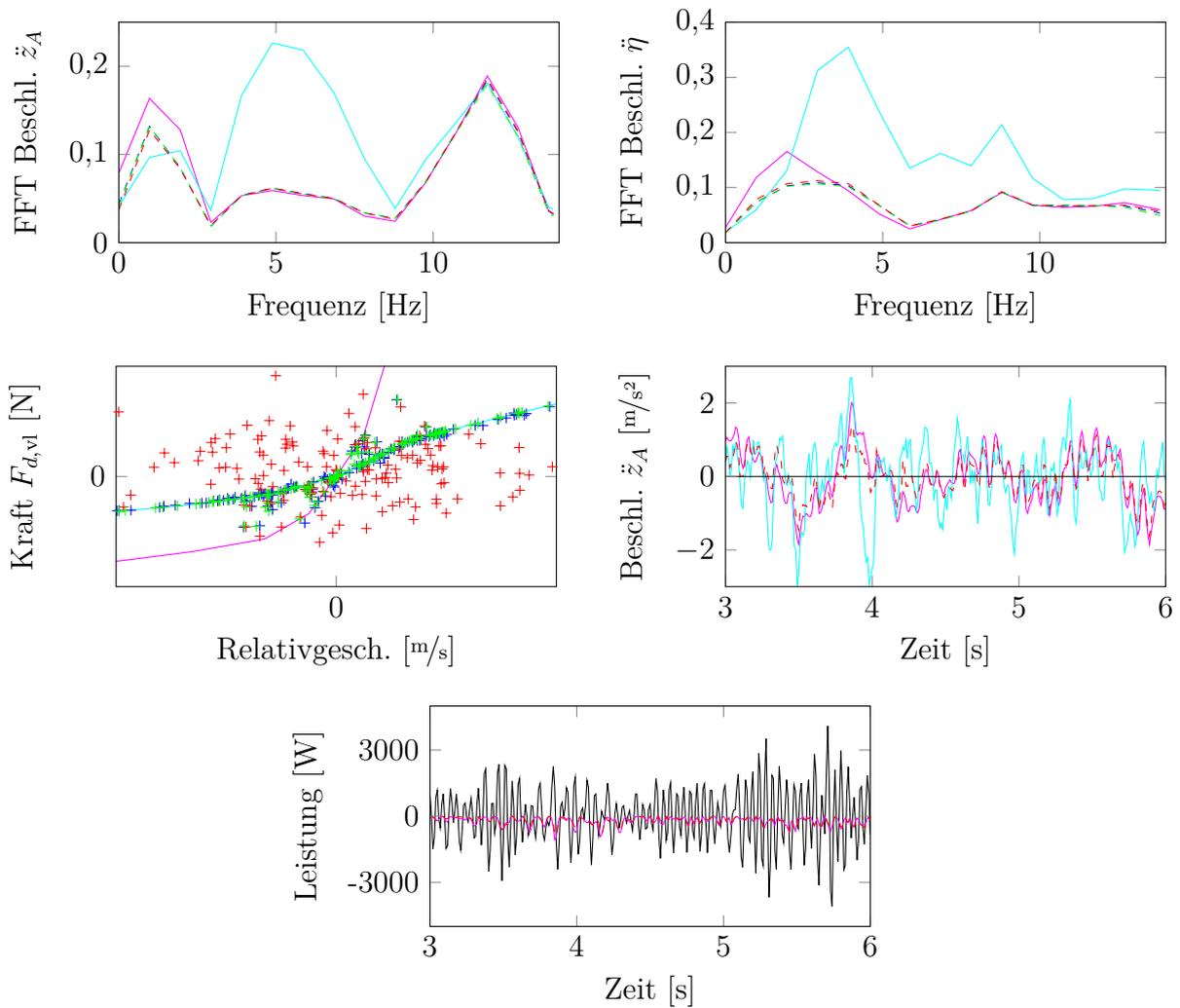


Abbildung 5.3: Simulationsergebnisse MPC Verstelldämpfer und Reglermodell entspricht Streckenmodell; Fahrt über schlechte Landstraße mit 60 km/h

tungsspitzen durch Trägheiten in der Aktorik. Der Mittelwert der Kurven ist in Tabelle 5.1 aufgelistet und beträgt 4 W für die optimale Kraft und jeweils ungefähr -250 W für die Weichkennlinie, die Hartkennlinie und die drei Regelungsansätze für den Verstelldämpfer. Dies zeigt, dass ein ideales vollaktives System im Mittel nahezu keine Energie verbraucht, da die zur Dämpfung eingesetzte Energie rekuperiert werden kann. Diese Überlegung beinhaltet jedoch nicht die Reibungs- und Rekuperationsverluste der Aktorik sowie die Wärmeverluste in der Leistungselektronik.

Des Weiteren ist die Leistung eines Verstelldämpfers negativ, da Energie dissipiert wird.

Tabelle 5.1: Durchschnittlicher prinzipieller Leistungsverbrauch

Optimale Kraft	4 W
Weichkennlinie	-250 W
Hartkennlinie	-249 W
MPC ohne Beschränkungen	-245 W

Fahrzeug mit Verstelldämpfer und Federfußpunktverstellung

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse für ein Fahrwerkssystem mit Verstelldämpfer und Federfußpunktverstellung gezeigt. Analog zu den letzten beiden Abschnitten wird eine vorausschauende Fahrwerksregelung mit exaktem Eingangssignal und einem dem Reglermodell entsprechenden Simulationsmodell (2.13) simuliert. In Abschnitt 3.1.2 wurden zwei Möglichkeiten der modellprädiktiven Regelung für ein Fahrzeug mit Verstelldämpfer und Federfußpunktverstellung vorgeschlagen. Im ersten Ansatz wird ein modellprädiktives Optimierungsproblem in acht Optimierungsvariablen pro Zeitschritt, den vier Federfußpunktverstellwegen und den vier Dämpferkräften, formuliert. Durch Prädiktion eines passiven Fahrzeuges werden die Beschränkungen der Dämpferkräfte ermittelt, dies hat sich im vorigen Abschnitt als gute Möglichkeit zur Einbeziehung der nichtlinearen Dämpferkennlinie herausgestellt. Beim zweiten Regelungsansatz wird der Dämpfer in der Weichkennlinie belassen und ein modellprädiktives Optimierungsproblem für vier Optimierungsvariablen pro Zeitschritt, den vier Federfußpunktverstellwegen, gelöst.

Die beiden linken Diagramme in Abbildung 5.4 zeigen den verbesserten Fahrkomfort durch eine Federfußpunktverstellung verglichen mit demselben Fahrzeug und Aktorstellweg gleich Null kombiniert mit der Weich- bzw. Hartkennlinie des Dämpfers. Es wird sichtbar, dass die zusätzliche Optimierung der Dämpferkraft zu einer geringfügig höheren Reduktion der Aufbaubeschleunigungen führt. Neben dem Aktorstellweg ist zusätzlich der Dämpferstrom abgebildet. Dieser wird aus der berechneten Dämpferkraft über ein inverses Dämpferkennfeld ermittelt und steuert die Ventile des Dämpfers an. Die obere Grenze kennzeichnet hier die Weichkennlinie, abgekürzt mit WK, und die untere Grenze die Hartkennlinie, abgekürzt mit HK. Die mit der Optimierung berechnete Dämpferkraft entspricht die meiste Zeit der Weichkennlinie, wobei die Dämpfer punktuell verhärtet werden.

Fazit: Diese Untersuchungen mit exakten Straßendaten und dem Reglermodell entsprechendem Streckenmodell ermöglichen zwei grundlegende Aussagen zum Regelungsentwurf. Für ein Fahrwerk mit Verstelldämpfer ist es auch mit Vorausschau nicht notwendig, die Beschränkungen des Dämpfers explizit zu berücksichtigen. Es kann der *clipped optimal* Ansatz verwendet werden. Bei einem Fahrwerk mit Verstelldämpfer und Federfußpunktverstellung ergeben sich gute Ergebnisse hinsichtlich Komforterrhöhung, wenn der Dämpfer in der Weichkennlinie belassen wird. Es ist eine geringfügige Verbesserung durch Optimierung der Dämpferkraft möglich. Bei realistischeren Annahmen wie einer ungenauen Straßenmessung und keiner exakten Übereinstimmung von Reglermodell und Streckenmodell gewinnt der robuste Ansatz, den Dämpfer in der Weichkennlinie zu belassen, weiter an Vorteil und wird somit im Weiteren verwendet.

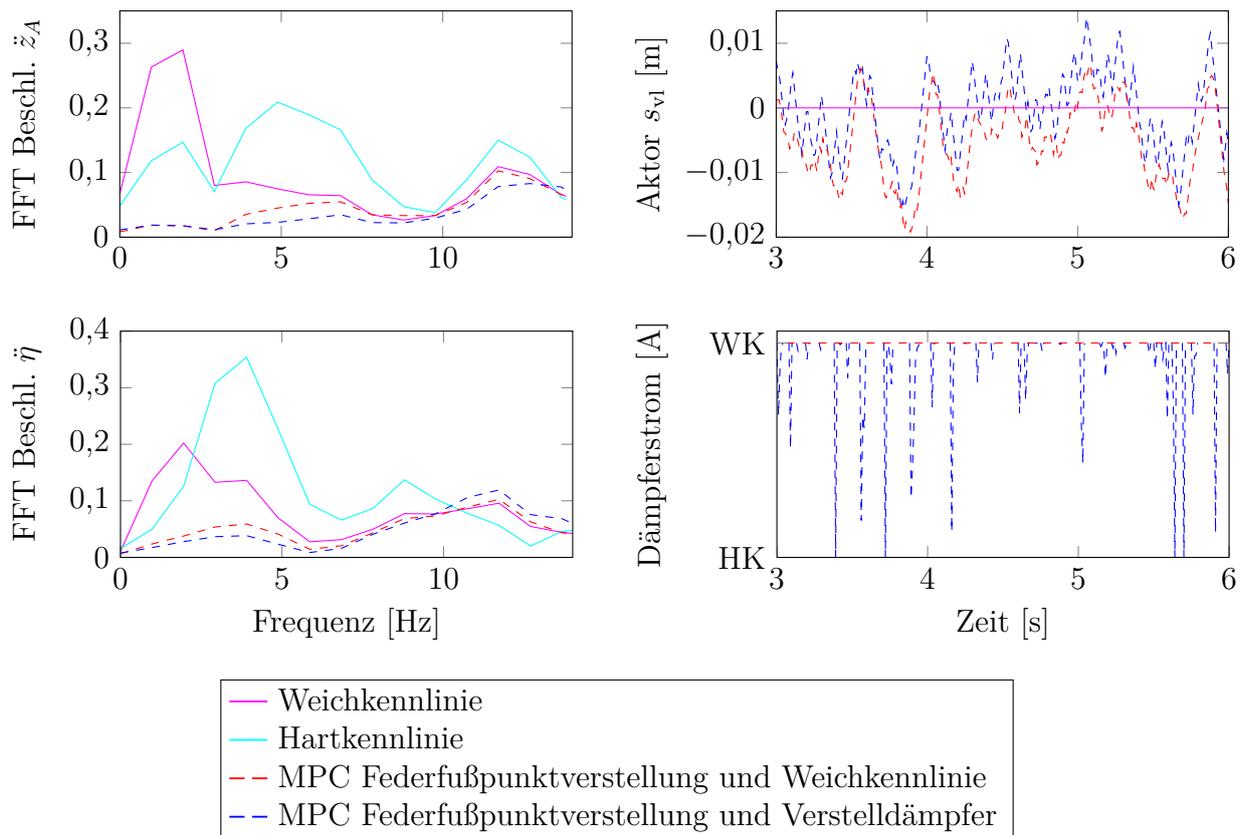


Abbildung 5.4: Simulationsergebnisse MPC Verstelldämpfer und Federfußpunktverstellung und Reglermodell entspricht Streckenmodell; Fahrt über schlechte Landstraße mit 60 km/h

5.2.2 Simulation mit nichtlinearem Simulationsmodell

In diesem Abschnitt werden Simulationsergebnisse vorgestellt, wobei als Eingangssignal der vorausschauenden Fahrwerksansteuerung das vom Simulationsmodell überfahrene Höhenprofil für die gewählte Vorausschau exakt zur Verfügung steht. Das in Abschnitt 2.2 validierte, nicht-lineare Modell mit zehn Freiheitsgraden wird als Simulationsmodell verwendet. Analog zu den vorigen drei Abschnitten wird zunächst ein Fahrwerk mit Federfußpunktverstellung, darauffolgend ein semi-aktives Fahrwerk und zuletzt ein Fahrwerk mit Federfußpunktverstellung und Verstelldämpfer diskutiert.

Fahrzeug mit Federfußpunktverstellung

In Kapitel 3 wurden zwei modellprädiktive Regelungsverfahren und eine Störgrößenkompensation mit einem inversen Modell als Vorsteuerung vorgeschlagen. Diese Verfahren werden mit dem aus der Literatur bekannten, und im Stand der Technik in Abschnitt 1.2.3 erläuterten, Ansatz der optimalen vorausschauenden Regelung verglichen. Der Aufbau der Simulation ist in Abbildung 5.5 schematisch dargestellt. Eine Begrenzung saturiert die Aktorgeschwindigkeit und den Aktorstellweg, falls mit dem inversen Modell oder der optimalen Regelung Stellgrößen außerhalb des möglichen Bereichs berechnet werden, da diese beiden Ansätze die Beschränkungen nicht explizit berücksichtigen können. Als Reglermodell wird jeweils das reduzierte Modell mit

drei Freiheitsgraden (2.14) verwendet. Es werden sowohl für die optimale Regelung als auch für die modellprädiktive Regelung die Gewichtungsmatrizen \mathbf{Q} und \mathbf{R} hinsichtlich guter Ergebnisse für alle Simulationen angepasst und diese konstanten Werte für alle Simulationen verwendet. Des Weiteren sind die Ergebnisse für das Fahrzeug mit Aktorstellweg gleich Null aufgetragen, dies steht stellvertretend für ein Fahrzeug mit passivem Fahrwerk und zeigt die Wirkung der Regelung auf. Die Taktzeit der modellprädiktiven Regelung ist 10 ms, die Vorausschauzeit wird zu 0,5s gesetzt und es werden jeweils neun nicht-äquidistant verteilte Zeitschritte über dem Vorausschauhorizont verwendet.

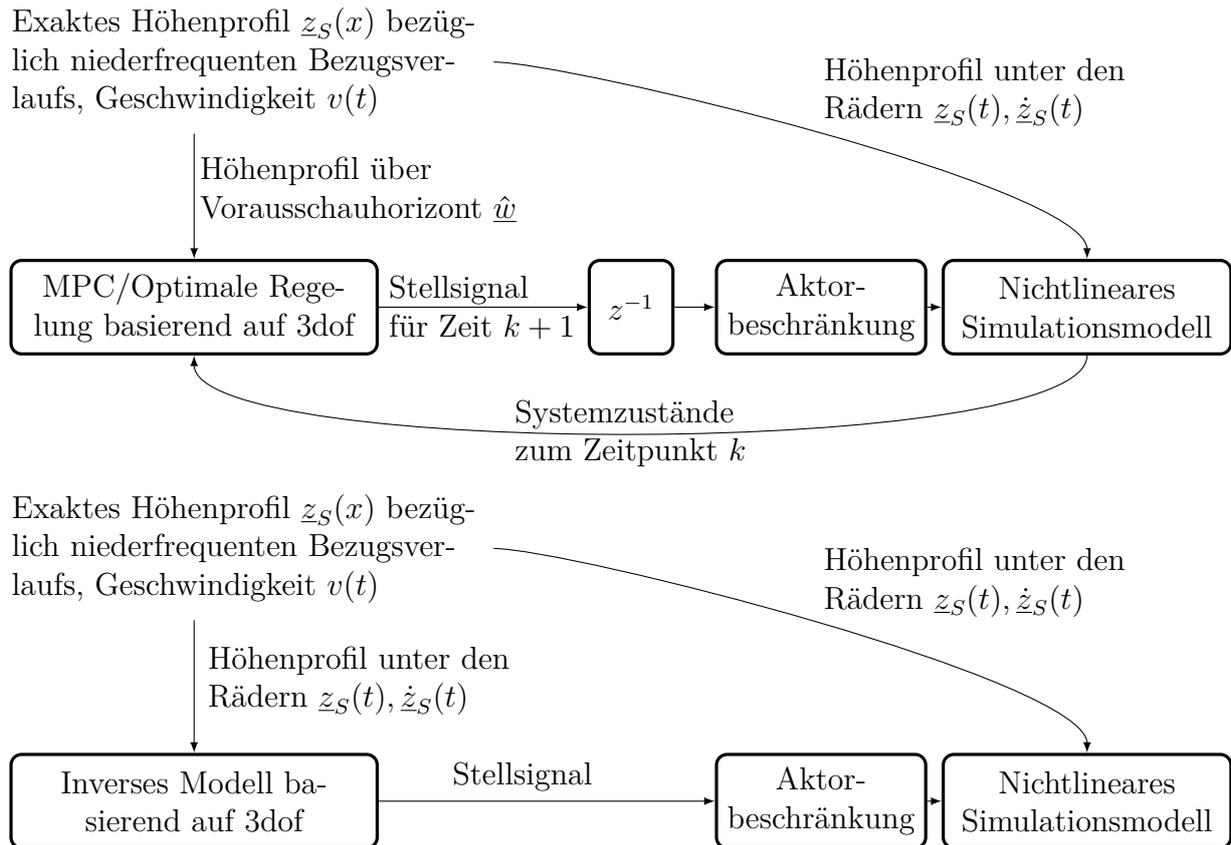


Abbildung 5.5: Aufbau der Simulation mit nichtlinearem Simulationsmodell für die Regelung und die Vorsteuerung

Abbildung 5.6 zeigt die Simulation über eine schlechte Landstraße mit steigender Geschwindigkeit. Das Höhenprofil ist bezüglich eines niederfrequenten Bezugsverlaufs gegeben und im Diagramm oben rechts eingezeichnet. Es sind Regelungsansätze ohne Vorausschau mit Regelungsansätzen mit Vorausschau und exakten Vorausschautdaten verglichen. Die Regelungsansätze ohne Vorausschau sind der *Skyhook*-Regler und der Ansatz *Weiche Feder*. In den beiden linken Diagrammen wird deutlich, dass sowohl der Ansatz *Weiche Feder* als auch die Kombination *Weiche Feder* und *Skyhook* den Komfort bis vier Hertz gegenüber Aktorstellweg gleich Null deutlich verbessern können. Des Weiteren zeigt sich, dass bei exakter Vorausschau bis ungefähr sieben Hertz eine nochmals deutlich reduzierte Aufbaubeschleunigung ermöglicht wird. Wichtig ist hierbei, dass für höhere Frequenzen der Fahrkomfort nicht verschlechtert wird. Das inverse Modell als reine Vorsteuerung ohne Rückführung erzeugt für dieses schon geeignet vorbereitete Straßensignal ähnliche Ergebnisse wie die modellprädiktive Regelung. Des Weiteren wird sicht-

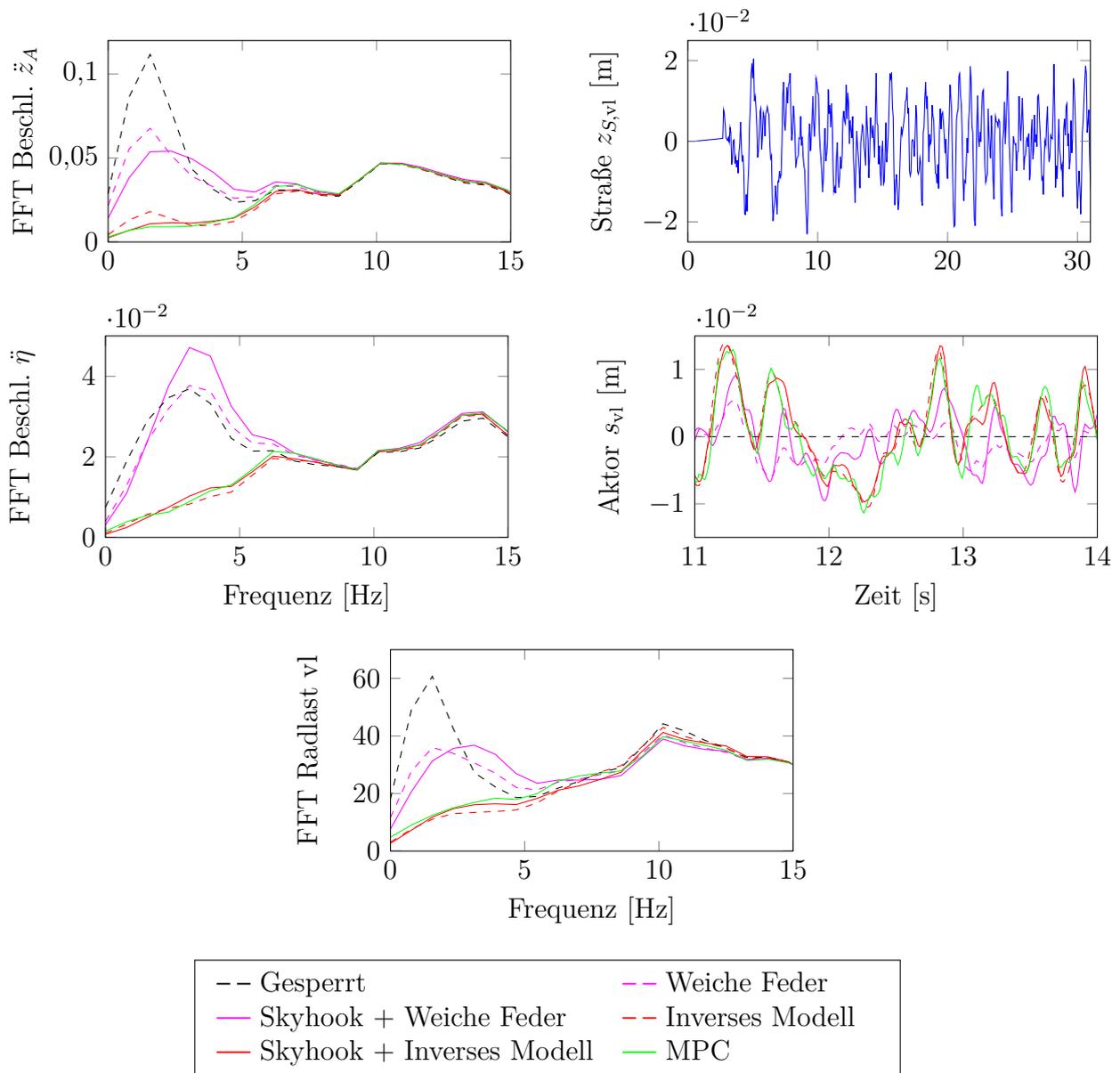


Abbildung 5.6: Simulation Federfußpunktverstellung mit nichtlinearem Simulationsmodell; Fahrt über schlechte Landstraße mit linear steigender Geschwindigkeit von 36 km/h bis 120 km/h

bar, dass die Kombination *Skyhook* und inverses Modell für exakte Straßendaten zwar keine Verbesserung gegenüber der reinen Vorsteuerung mehr erzielt, jedoch auch keine Verschlechterung. Somit wird deutlich, dass diese Kombination aus Vorsteuerung und Rückführung gut geeignet ist.

Im fünften Diagramm wird gezeigt, dass diese Verbesserung im Komfort äquivalent auf die dynamischen Radlastschwankungen zutrifft. Dies wurde nicht im Gütemaß der modellprädiktiven Regelung berücksichtigt. Analog hierzu wird auch in den weiteren Simulationsergebnissen deutlich werden, dass für eine langsam aktive Federfußpunktverstellung eine Erhöhung des Fahrkomforts mit einer Reduktion der dynamischen Radlastschwankungen einhergeht. Für die-

Tabelle 5.2: RMS-Werte der Simulationsergebnisse

	Abb. 5.6 RMS $\ddot{z}_A(t)$	Abb. 5.7 RMS $\ddot{z}_A(t)$	Abb. 5.8 RMS $\ddot{z}_A(t)$	Abb. 5.9 RMS $\ddot{z}_A(t)$
Gesperrt	1,01	1,98	0,47	1,26
Weiche Feder	0,85	1,16	0,44	1,17
Skyhook + Weiche Feder	0,83	0,82	0,49	0,93
Inverses Modell	0,65	0,25	0,28	1,50
Skyhook + Inverses Modell	0,65	0,21	0,32	1,37
MPC	0,66	0,17	0,27	0,73
MPC Trajektorie	0,68	0,16	0,25	0,72
Optimaler vorausschauender Regler	0,75	0,54	0,36	1,35

se und folgende Simulationen sind die RMS-Werte der Zeitverläufe in Tabelle 5.2 dargestellt. Hierbei wird zusätzlich noch der Wert für die optimale vorausschauende Regelung, vorgestellt im Stand der Technik, angegeben. Die Zeitverläufe sind in [47] abgebildet.

Als nächstes Szenario wird in Abbildung 5.7 die Fahrt über Bodenwellen mit 35 m Periodenlänge diskutiert. Diese Bodenwellen liegen auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten innerhalb der Bandbreite der Aktoren. Es wird im dritten Diagramm wieder sichtbar, dass mit Vorausschau und exaktem Höhenprofil der Komfort gegenüber einem Regler ohne Vorausschau deutlich erhöht werden kann, dieser jedoch schon eine deutliche Verbesserung gegenüber dem System ohne Aktorik darstellt. Die verschiedenen, vorgeschlagenen Konzepte mit Vorausschau ermöglichen eine ähnliche Reduktion der Aufbaubeschleunigungen. Die modellprädiktive Trajektorienengineering mit dem Vorteil der geringeren Anzahl an Optimierungsvariablen erzielt ähnliche Ergebnisse wie die modellprädiktive Optimierung der Aktorstellwege.

Bei der Überfahrt der Schwelle in Abbildung 5.8 mit 30 km/h wird im zweiten Diagramm sichtbar, dass durch die Verfahren mit Vorausschauinformation früher und mit maximaler Geschwindigkeit die Aktoren angesteuert werden und somit die Schwelle besser kompensiert wird. Da das Höhenprofil mit 5 Hz phasenfrei gefiltert und somit die Schwelle verbreitert wird, reagiert auch die Vorsteuerung mit inversem Modell proaktiv und das Stellsignal wird in der Geschwindigkeit saturiert. Dies ermöglicht in diesem Beispiel eine ähnliche Komfortverbesserung wie die modellprädiktive Regelung, die nur Stellgrößen mit der genau umsetzbaren Verstellgeschwindigkeit berechnet. Da die Aktorik an die Grenzen der maximalen Verstellgeschwindigkeit gelangt, tritt trotzdem eine Aufbaubeschleunigung im Fahrzeug auf. Die Reduktion beträgt ca. 50 % gegenüber dem Regler ohne Vorausschau und dem System ohne Aktorikansteuerung. Die genauen Werte und zusätzliche Regelungsvarianten sind in Tabelle 5.2 dargestellt. Dies zeigt, dass bei einem solchen hochfrequenten Hindernis der Regler ohne Vorausschau keine nennenswerte Reduktion der maximalen Hubbeschleunigung gegenüber Aktorstellung gleich Null erzielen kann. Es kann jedoch das Schwingen nach dem Hindernis deutlich schneller reduziert werden. Bei einseitiger Überfahrt der Schwelle sind die Ergebnisse ähnlich.

In Abbildung 5.9 ist die Überfahrt der 30 cm hohen und 45 m langen Bodenwelle mit 100 km/h simuliert. Die numerischen Werte und die zusätzlichen, nicht dargestellten Varianten sind in Tabelle 5.2 notiert. Das absolute Höhenprofil wird hierbei auf einen Bezugsverlauf von 0,1 Hz bezogen, um die gesamte Bodenwelle als positive Unebenheit darzustellen. Dies ist im ersten Diagramm gezeigt. Wird dies als Eingangssignal verwendet, wird im zweiten Diagramm deutlich, dass die Vorsteuerung basierend auf dem inversen Modell in die Beschränkungen des

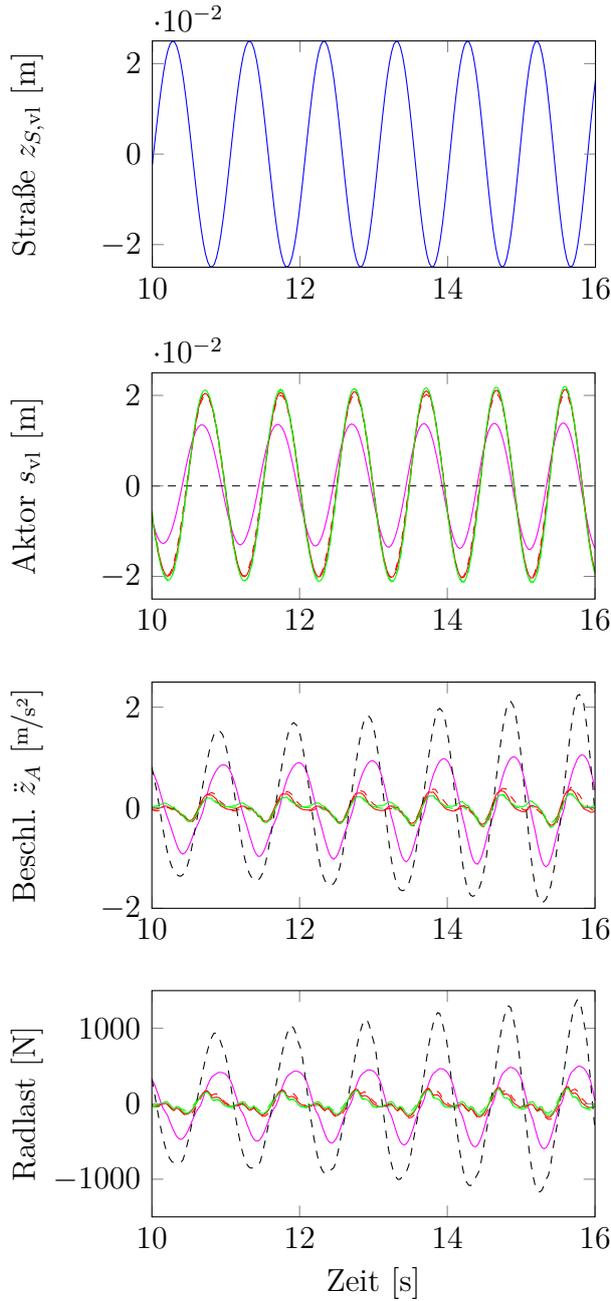


Abbildung 5.7: Simulation Federfußpunktverstellung mit nichtlinearem Simulationsmodell; Fahrt über Bodenwellen mit 35 m Periodenlänge und linear steigend 115 km/h bis 135 km/h

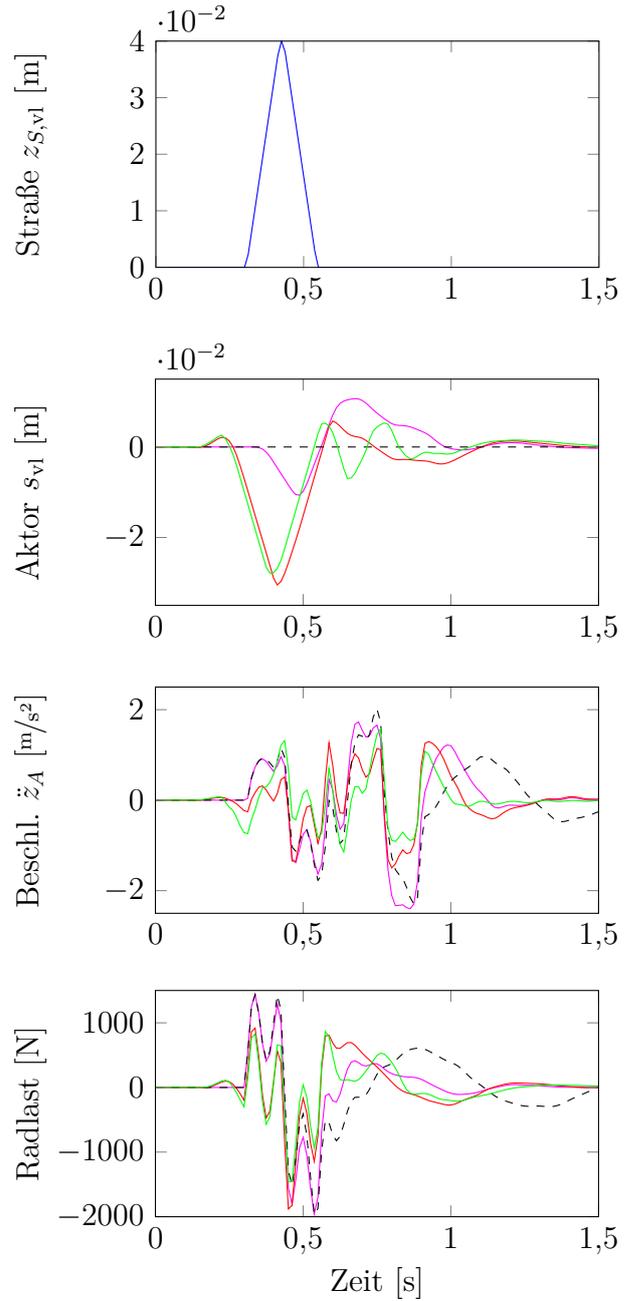
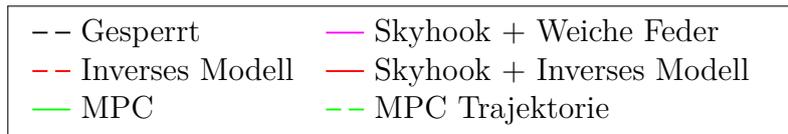


Abbildung 5.8: Simulation Federfußpunktverstellung mit nichtlinearem Simulationsmodell; Überfahrt einer 4 cm hohen und 2 m langen Schwelle mit 30 km/h



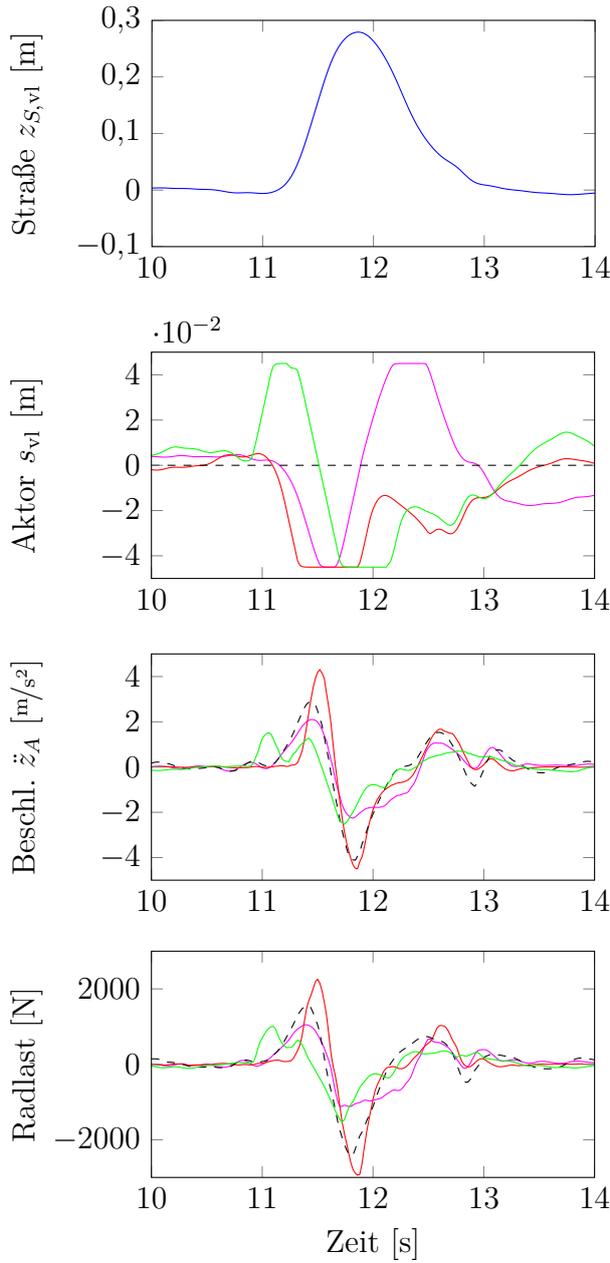


Abbildung 5.9: Simulation Federfußpunktverstellung mit nichtlinearem Simulationsmodell; Überfahrt hohe Bodenwelle mit 100 km/h; Profil Bodenwelle als Reglereingang

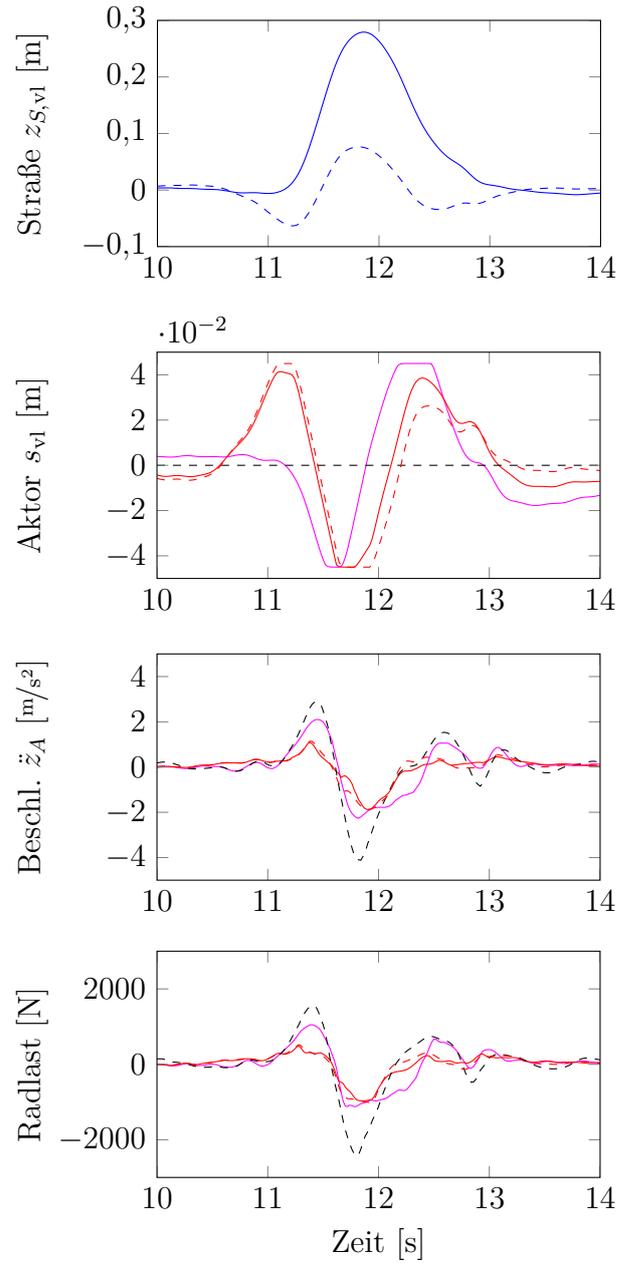
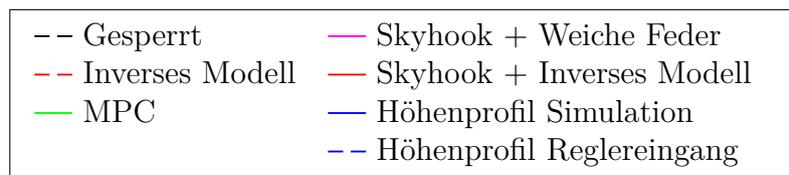


Abbildung 5.10: Simulation Federfußpunktverstellung mit nichtlinearem Simulationsmodell; Überfahrt hohe Bodenwelle mit 100 km/h; 0,5 Hz-gefiltertes Profil als Reglereingang



Aktorstellweges gerät. Ebenso die optimale vorausschauende Regelung. Die modellprädiktive Regelung hingegen berechnet eine optimale Lösung unter expliziter Berücksichtigung dieser Beschränkung. Das Fahrzeug wird, sobald die hohe Bodenwelle in Sicht kommt, angehoben, um danach die Unebenheit mit mehr Stellweg kompensieren zu können. Dies resultiert im dritten Diagramm in einer deutlichen Reduktion der Hubbeschleunigung. Aufgrund der Saturierung des Aktorstellweges wird für dieses Eingangssignal, bei der Verwendung des inversen Modells oder der optimalen Regelung, eine Verschlechterung des Fahrkomforts verglichen mit Aktorstellweg gleich Null erzeugt.

In Abbildung 5.10 wird exakt dieselbe Simulation durchgeführt, es wird nur das Höhenprofil für den vorausschauenden Regler auf einen 0,5 Hz-Bezugsverlauf bezogen. Im ersten und zweiten Diagramm wird deutlich, dass durch das neu geformte Höhenprofil ein proaktives Anheben des Fahrzeuges erzeugt wird. Somit erzielt auch die Vorsteuerung mittels inversen Modells eine ähnliche, deutliche Reduktion der Aufbaubeschleunigungen und, wie immer, auch der Radlastschwankungen. Dies zeigt anschaulich, dass mit der Vorsteuerung ähnliche Komfortverbesserungen wie mit der modellprädiktiven Regelung möglich sind, wenn das Straßenprofil vorher entsprechend vorbereitet wird. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass eine Vorbereitung durch einen phasenfreien Hochpassfilter mit der Grenzfrequenz 0,5 Hz dies ermöglicht.

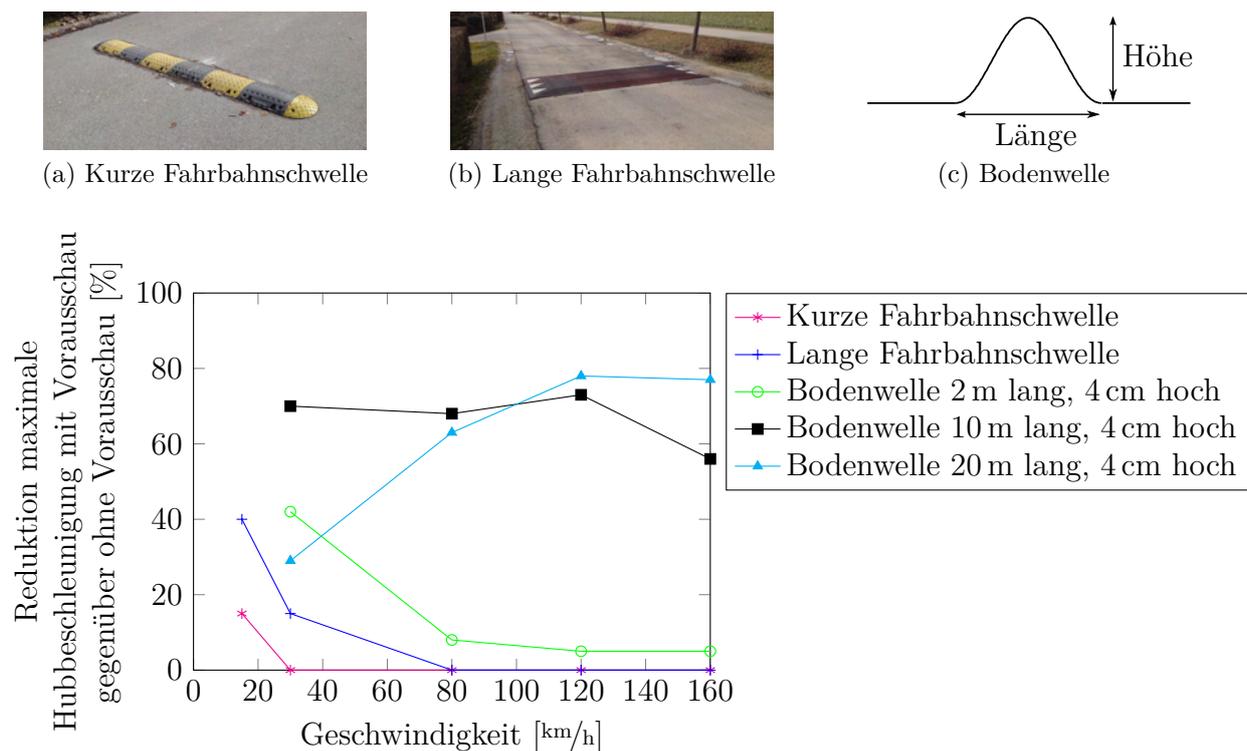


Abbildung 5.11: Simulation der Komforterhöhung für eine Federfußpunktverstellung durch Vorausschau bei exakter Straßeninformation verglichen mit dem Regler *Weiche Feder* ohne Vorausschau

In Abbildung 5.11 ist zum Abschluss eine Übersicht über das Potential einer vorausschauenden Regelung einer Federfußpunktverstellung bei exakter Straßeninformation dargestellt. Es wird die prozentuale Reduktion der maximal auftretenden Beschleunigung beim Einsatz der modellprädiktiven Regelung gegenüber dem Regler *Weiche Feder* ohne Vorausschau aufgetra-

gen. Die kurze Fahrbahnschwelle ist 40 cm lang und 7 cm hoch, die lange Fahrbahnschwelle knapp 2 m lang und 6,5 cm hoch. Die Ergebnisse zeigen, dass bei schnellerer Fahrt, aufgrund der begrenzten Bandbreite der Aktorik, nur für längere Bodenwellen eine Komfortverbesserung zu erzielen ist. Bei einer langsamen Überfahrt von derart langen Bodenwellen ist die Komfortverbesserung wenig ausgeprägt, da bei langsamer Fahrt diese nur gering zu spüren sind.

Fazit: Für die beiden hergeleiteten Ansätze modellprädiktive Trajektoriengenerierung und modellprädiktive Stellgrößenberechnung zeigen sich ähnliche Ergebnisse. Die Vorausschauzeit der modellprädiktiven Ansätze wird auf 0,5 s gelegt, damit das Fahrzeug für die Simulation über die hohe Bodenwelle vorher angehoben werden kann. Es wird eine nicht-äquidistante Verteilung der Zeitschritte gewählt, um die Anzahl der Optimierungsvariablen deutlich zu reduzieren. Für alle anderen Simulationen führt eine Vorausschauzeit von 0,15 s zum selben Ergebnis. Es zeigt sich, dass die reine Vorsteuerung mit einem inversen Modell und einem entsprechend vorbereiteten, exakten Höhensignal zu ähnlichen Komfortverbesserungen führt. Die Vorsteuerung und der *Skyhook*-Regler ergänzen sich. Liegt das exakte Höhenprofil als Eingangssignal der Vorsteuerung vor, wird durch die Kombination mit dem *Skyhook*-Regler keine weitere Verbesserung erzielt.

Mit dem in der Literatur verbreiteten Ansatz der optimalen vorausschauenden Regelung können keine Aktorbeschränkungen explizit berücksichtigt werden. Es wird also ebenso ein geeignet vorbereitetes Höhenprofil benötigt, wobei die erzielten Ergebnisse schlechter als mit der Vorsteuerung sind. Ein weiteres Problem dieses Ansatzes besteht darin, dass aufgrund der Herleitung (Abschnitt 1.2.3) die Optimalität nur für eine Kombination aus Vorsteuerung und Zustandsregler gegeben ist. Dies bedeutet in bestimmten Fällen aber auch, dass die Vorsteuerung ein kontraproduktives Signal erzeugt und von dem Regler basierend auf Rückführung überkompensiert wird. Des Weiteren muss der volle Zustand bekannt sein und es ist schwierig, für unterschiedliche Strecken zu guten Ergebnissen führenden Gewichtungsmatrizen Q und R zu finden. Dies ist bei der modellprädiktiven Regelung nicht der Fall. Hier führt ein Satz von Gewichtungsmatrizen zu guten Ergebnissen auf allen Strecken. Aus diesem Grund wird der Ansatz der optimalen vorausschauenden Regelung nicht weiter untersucht und stattdessen das inverse Modell kombiniert mit einem *Skyhook*-Regler als Zwei-Freiheitsgrade Regelstruktur mit Vorsteuerung und Rückführung vorgeschlagen. Es wurden die exemplarischen Fälle vorgestellt, dass das Fahrzeug vor einem hohen Hindernis angehoben wird, um den verfügbaren Stellweg zu vergrößern, und dass die Räder bei Überfahrt eines hochfrequenten Hindernisses früher als bei einem Regler ohne Vorausschau angezogen werden.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass für langsam aktive Systeme eine Verbesserung der Aufbaubeschleunigung und somit des Fahrkomforts immer auch eine Reduktion der dynamischen Radlastschwankungen und somit eine Verbesserung der Fahrdynamik zur Folge hat. Generell wird sichtbar, dass bei exakter Straßeninformation im gesamten Geschwindigkeitsbereich Bodenunebenheiten im Frequenzbereich unter 5 Hz deutlich besser kompensiert werden können als mit einem Regler ohne Vorausschau, welcher wiederum deutlich besser ist als ein passives Fahrwerk.

Fahrzeug mit Federfußpunktverstellung und Höhenprofil im inertialen Koordinatensystem

Im vorigen Abschnitt war das Höhenprofil immer auf eine niederfrequente Bezugslinie bezogen. Dieser Bezugsverlauf legt fest, welche Frequenzen der Straße ausgeglichen werden sollen,

beispielsweise alle Frequenzen über 0,5 Hz. Um diese Filterung durchzuführen, muss das Höhenprofil in einem Bereich von der Vergangenheit bis in die Zukunft bekannt sein.

Es wird folgend vorgeschlagen und gezeigt, dass mit der modellprädiktiven Regelung auch ein im inertialen Koordinatensystem erstelltes Höhenprofil als Eingangssignal verwendet werden kann. Dies funktioniert, da im Gütemaß nur die Beschleunigungen des Fahrzeugaufbaus minimiert werden und nicht etwa zusätzlich die Hubposition.

Das Fahrzeugmodell wird somit über das inertielle Höhenprofil prädiziert und Stellgrößen unter Berücksichtigung von Beschränkungen derart berechnet, dass die auftretenden Aufbaubeschleunigungen minimiert werden. Bei der modellprädiktiven Regelung werden gewöhnlich im Gütemaß zusätzlich die Endzustände gegen Null gewichtet, um Stabilität und Rückkehr zu Ruhelage sicherzustellen, siehe Gleichungen (3.3) und (3.4). Dies funktioniert jedoch nicht mit dem inertialen Höhenprofil als Eingang, da das Huben des Fahrzeuges im selben inertialen System definiert ist und somit eine deutliche Verschiebung zur Null benötigt. Aus diesem Grund kann entweder nur die Hubgeschwindigkeit im Endzustand gewichtet werden oder auch der Hubweg gegen die Straßenhöhe am Ende des Vorausschauhorizonts gewichtet werden.

Das beste Ergebnis erzielte das Einfügen einer Geraden im Sinne kleinster Fehlerquadrate durch das Höhenprofil von der Vergangenheit bis zur Vorausschauweite und der Höhenwert der Geraden im Endzeitschritt ist der Sollwert für die Gewichtung der Hubposition im Endzeitschritt. Dies gilt als Anhaltspunkt, in welchem Wertebereich die Hubposition in etwa sein sollte. Da das Optimierungsproblem in jedem Zeitschritt mit einem neuen Sollwert für den Endzustand gelöst wird, besteht der Haupteffekt der Optimierung darin, die Aufbaubeschleunigung zu reduzieren und nicht darin, der festgelegten Geraden zu folgen.

Das erste Diagramm in Abbildung 5.12 zeigt das absolute Höhenprofil der Bodenwellen, mit einer Periodenlänge von 35 m und einer Amplitude von 2 cm, das als Eingang der modellprädiktiven Regelung und als Straßeneingang des Simulationsmodells genutzt wird. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt 120 km/h und es wird eine Vorausschau der modellprädiktiven Regelung von 0,25 s gewählt, dies entspricht bei dieser Geschwindigkeit 8,3 m Vorausschau. Im ersten Diagramm ist eingezeichnet, wie gering diese Vorausschau vor der Vorderachse in Relation zu den Bodenwellen ist. Es ist trotzdem möglich, durch die Vorausschau die Aufbaubeschleunigung gegenüber einem Regler ohne Vorausschau deutlich zu verringern. Die Reduktion der Maximalwerte beträgt 65 %.

Fahrzeug mit Verstelldämpfer

In diesem Abschnitt wird mit dem nichtlinearen Simulationsmodell für ein Oberklassefahrzeug mit Verstelldämpfer die Komfortverbesserung bei exakten Vorausschaudaten gegenüber einem *Skyhook*-Regelungsansatz ohne Vorausschau simuliert. Mit den Vorausschaudaten wird die modellprädiktive Regelung ohne Beschränkungen und, falls nötig, darauffolgendem Begrenzen der Kräfte angewendet. Bei den vorhergehenden prinzipiellen Untersuchungen hatte sich dies als optimale Lösung herausgestellt. Es wird das reduzierte Vertikalmodell als Reglermodell verwendet, da dies ebenso gute Ergebnisse erzielte wie das Modell mit Raddynamik. Dies liegt daran, dass mit dem reduzierten Modell der Komfort für höhere Frequenzen auf dem Niveau der Weichkennlinie liegt und dies das Bestmögliche ist. Zudem müssen die Radzustände nicht geschätzt werden.

In den Abbildungen 5.13a und 5.13b wird gezeigt, dass bei Überfahrt der schlechten Landstraße mit steigender Geschwindigkeit durch die vorausschauende Regelung im niedrigen Fre-

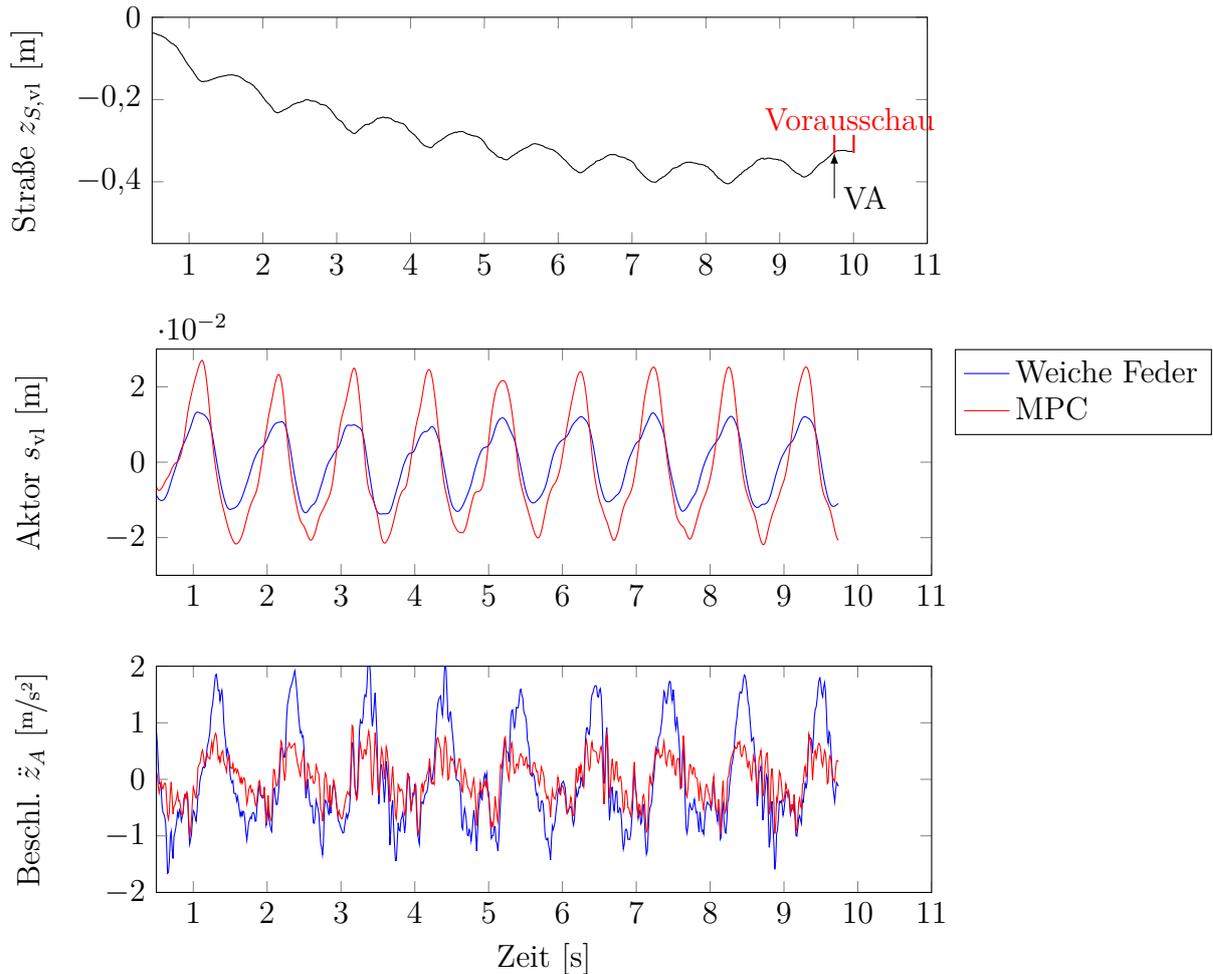
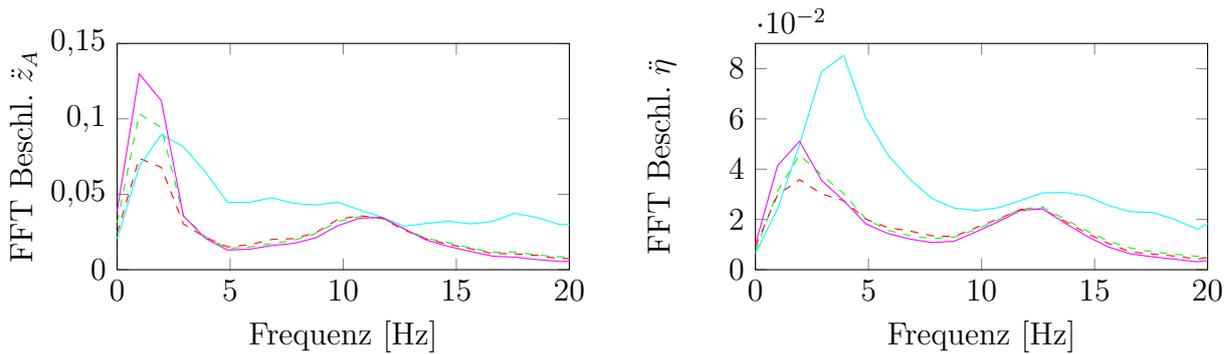


Abbildung 5.12: Simulation Federfußpunktverstellung mit modellprädiktiver Regelung und 0,25s Vorausschau; Überfahrt der Bodenwellen mit 35m Periodenlänge mit 120 km/h; absolutes Höhenprofil als Eingangssignal

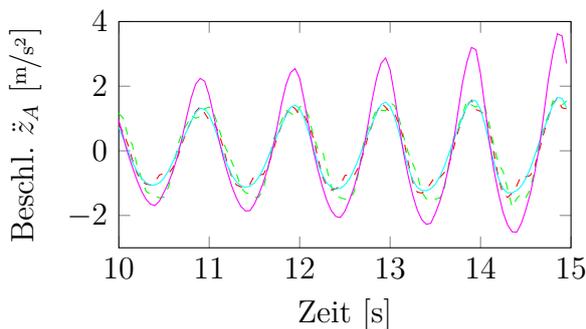
quenzbereich eine Komfortverbesserung gegenüber dem *Skyhook*-Regler möglich ist. Es wurde eine komfortorientierte Parametrierung des *Skyhook*-Reglers verwendet. Abbildung 5.13c zeigt die Überfahrt der langen Bodenwellen und Abbildung 5.13d die Überfahrt der Schwelle. Hier wird der Effekt der Diagramme im Frequenzbereich nochmals deutlich. Bei niedrigen Frequenzen ist die Hartkennlinie die beste Wahl, bei höheren Frequenzen die Weichkennlinie. Bei den langen Bodenwellen hat die vorausschauende Regelung einen geringen Vorteil gegenüber dem *Skyhook*-Regler, eine sportliche Parametrierung des *Skyhook*-Reglers würde auf dasselbe Ergebnis wie der Regler mit Vorausschau hinauslaufen. Dies würde aber bei der Schwelle zu ungünstigeren Ergebnissen führen. Bei einem Einzelhindernis besteht das Optimum darin, in der Weichkennlinie zu verbleiben und ein *Skyhook*-Regler bzw. ein Regler mit Vorausschau kann nur die Nachschwingung nach dem Hindernis stärker reduzieren.

Fazit: Somit ist das Komfortpotential einer vorausschauenden Regelung eines Verstelldämpfers deutlich geringer als bei einer Federfußpunktverstellung. Ein *Skyhook*-Regler in der richtigen Parametrierung führt bei der gegebenen Aktorik zu guten Ergebnissen, diese kann jedoch erst eingestellt werden, nachdem schon über das Hindernis gefahren wurde.

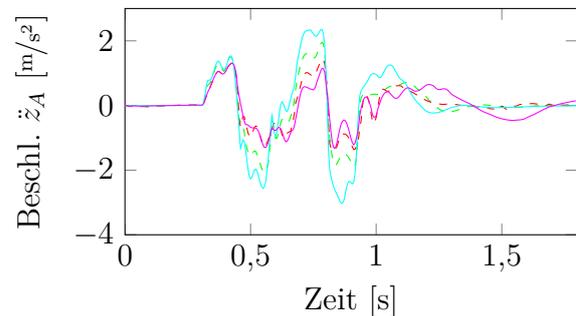


(a) Schlechte Landstraße mit 36 km/h bis 120 km/h

(b) Schlechte Landstraße mit 36 km/h bis 120 km/h



(c) Bodenwellen mit 35 m Periode und 115 km/h - 130 km/h



(d) Schwelle mit 30 km/h



Abbildung 5.13: Simulation der Komfortverbesserung eines Fahrwerks mit Verstelldämpfer und exakten Vorausschadaten

Fahrzeug mit Verstelldämpfer und Federfußpunktverstellung

Ein Ergebnis der prinzipiellen Untersuchungen für ein Fahrwerk mit Verstelldämpfer und Federfußpunktverstellung bestand darin, dass mit dem Dämpfer in der Weichkennlinie und einer reinen Ansteuerung der Federfußpunktverstellung eine gute Komfortverbesserung zu erzielen ist. Dies kann bei der Simulation mit dem nichtlinearen Simulationsmodell bestätigt werden. Es stellt sich die Frage, ob der Dämpfer noch weicher gewählt werden kann als die Weichkennlinie eines Verstelldämpfers eines semi-aktiven Fahrwerks. Dies ist in Abbildung 5.14 untersucht.

Hierbei wird zunächst gezeigt, dass durch die Vorsteuerung mit inversem Modell kombiniert mit der Weichkennlinie eines Verstelldämpfers der Komfort bis 7 Hz deutlich verbessert werden kann. Im höherfrequenten Bereich bleibt der gute Komfort des weichen Dämpfers erhalten. Unter der Annahme, dass die Dämpferkennlinie die Hälfte dieser Weichkennlinie beträgt, wird deutlich, dass der Komfort im höherfrequenten Bereich durch die weichere Dämpfung verbessert wird. Im niederfrequenten Bereich sorgt die Federfußpunktverstellung für einen guten Komfort, wenn auch der Aufbau durch die weichere Dämpfung geringer beruhigt wird. Die dynamische Radlastschwankung steigt jedoch an. Diese Auslegung ist also günstig für die Geradeausfahrt, bei schneller Kurvenfahrt ist es notwendig den Dämpfer zur Sicherstellung der Fahrsicherheit

zu verhärten.

Da die Federfußpunktverstellung, unterstützt durch die Vorausschau, den niederfrequenten Bereich gut beruhigt, kann der Dämpfer sehr weich gewählt werden, wodurch der Komfort im höherfrequenten Bereich ebenfalls erhöht wird.

Bei einer Federfußpunktverstellung mit passivem Dämpfer muss eine deutlich härtere Dämpfung, verglichen mit der hier verwendeten Weichkennlinie eines Verstelldämpfers, verwendet werden, um den Kompromiss zwischen Fahrkomfort und Fahrdynamik mit dem passiven Dämpfer zu ermöglichen.

Fazit: Durch die Verwendung eines weicheren Dämpfers und das Belassen des Dämpfers in der Weichkennung kann durch die Kombination eines Verstelldämpfers mit einer Federfußpunktverstellung der Komfort sowohl im niederfrequenten als auch im höherfrequenten Bereich verbessert werden.

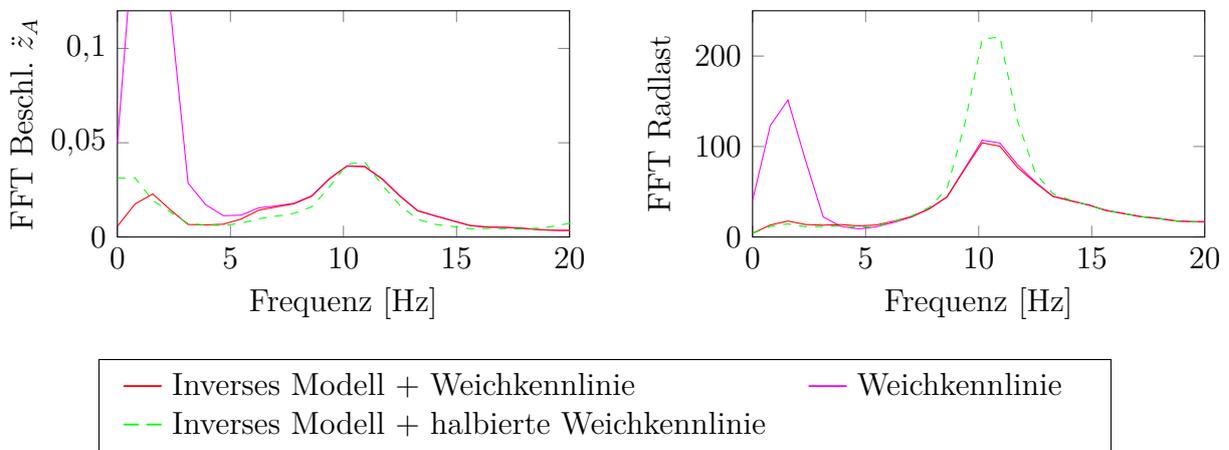


Abbildung 5.14: Simulation der Komfortverbesserung eines Fahrwerks mit Verstelldämpfer und Federfußpunktverstellung mit exakten Vorausschaudaten; Überfahrt schlechte Landstraße mit 36 km/h bis 120 km/h

Sensitivitätsanalyse des gegebenen Höhenprofils

In diesem Kapitel wurden Simulationsergebnisse für die unterschiedlichen Fahrwerke präsentiert, wobei für die vorausschauenden Ansteuerungsverfahren das exakte Höhenprofil als Eingangssignal verwendet wurde. In diesem Abschnitt werden Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse des Eingangssignals erläutert.

Um eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen und Genauigkeitsanforderungen aufzustellen, wird in einem ersten Schritt dieses exakte, auf einen niederfrequenten Bezugsverlauf bezogene, Höhenprofil verfälscht. Hierbei kann ein Faktor multipliziert oder ein Rauschen addiert werden. Des Weiteren kann das Profil in Längsrichtung verschoben werden. Wenn das Höhenprofil immer für die Regelung verwendet werden soll, ist vor allem das Verhalten auf gerader Straße ausschlaggebend. Wünschenswert ist hier eine Genauigkeit im Bereich $\pm 0,25$ cm. Diese Schwankung kann mit einer Filterung eliminiert werden. Bei ungenauem Höhenprofil ist es notwendig, eine entsprechend ausgelegte Unebenheitserkennung nach Abschnitt 4.6.2 zu verwenden.

Es wurde die Überfahrt eines Einzelhindernisses mit unterschiedlicher Geschwindigkeit simuliert. Das Höhenprofil für die Regelung wurde zum einen in Längsrichtung verschoben und zum anderen mit einem Faktor multipliziert. Die resultierende Reduktion der Hubbeschleunigung gegenüber einem Regler ohne Vorausschau wurde ausgewertet. Hierbei war ein Erkenntnis, dass die geforderte Längsgenauigkeit des Höhenprofils am sinnvollsten in einer Zeiteinheit angegeben wird. So wurde eine notwendige Längsgenauigkeit von $\pm 0,02$ s ermittelt. Dies entspricht bei $30 \text{ km/h} \pm 17 \text{ cm}$ und bei $120 \text{ km/h} \pm 67 \text{ cm}$.

Dies ist die erste Möglichkeit Anforderungen an die Sensoren aufzustellen, indem das gewünschte Höhenprofil mit generischen Fehlern verfälscht wird. Eine weitere Methode wird im Folgenden vorgestellt. Hierbei werden die Fehler direkt auf die Entfernungsmessungen des Sensors aufgebracht und das resultierende Ergebnis nach der Erstellung des Straßenhöhenprofils und der Fahrwerksansteuerung in der Simulation bewertet.

5.3 Gesamtsimulation der Erstellung des Höhenprofils und der Fahrwerksansteuerung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Gesamtsimulation nach Abbildung 4.6 vorgestellt. Hierbei werden bei der Überfahrt einer gegebenen Straße mit dem in Abschnitt 2.2 vorgestellten Simulationsmodell nach Abschnitt 4.3 exakte Sensormessdaten des vorgestellten Beispielsensors berechnet.

Es wird ein zufälliger, normalverteilter Wert mit einer Standardabweichung von 5 cm erzeugt. Hierbei wird dieselbe Standardabweichung für alle Entfernungsmessungen angenommen. Der Fehler beträgt bei den folgenden Simulationen bis ca. $\pm 20 \text{ cm}$ und wird auf die Entfernungsmessungen der Sensorstrahlen addiert. Folgende in Abschnitt 4.7 erläuterte Schritte werden für ein Fahrzeug mit Federfußpunktverstellung und passivem Dämpfer simuliert:

1. Sensorfeste Akkumulation (Abschnitt 4.2.1) der im 50 ms Takt neu vorliegenden Messdaten in einer Höhenkarte von -13 m bis 18 m bezüglich der Hinterachse. Die vereinzelt weiter entfernt gemessenen Werte des Beispielsensors werden nicht verwendet.
2. Zur Transformation der Sensordaten wird ein *Matching* (Abschnitt 4.5.1) durchgeführt. Es erfolgt ein Vergleich mit der exakten Transformation, berechnet aus der in der Simulation bekannten Fahrzeugeigenbewegung.
3. Örtliche Vorwärts-Rückwärtsfilterung im 50 ms Takt mit einem 5 Hz-Tiefpass und einem 0,5 Hz-Hochpass (Abschnitt 4.6.1).
4. Zeitliche Tiefpassfilterung mit 5 Hz im 5 ms Takt der beiden entsprechenden Höhenwerte vor den beiden Vorderrädern und Vorsteuerung mit inversem Modell. Die Höhenwerte der Vorderräder werden zeitversetzt als Höhenwerte der Hinterräder verwendet.

Fahrt über ein Einzelhindernis

In Abbildung 5.15 sind die Simulationsergebnisse der Überfahrt der bekannten 2 m langen und 4 cm hohen Schwelle mit 30 km/h gezeigt. Das erste Diagramm zeigt die Schwelle als absolutes Höhenprofil in Schwarz und in Magenta das in dieser Arbeit als gewünscht definierte Höhenprofil. Dies wird durch eine phasenfreie Filterung mit einem 5 Hz-Tiefpass und einem

0,5 Hz-Hochpass des exakten absoluten Höhenprofils erzeugt. In Blau und in Rot sind die Ergebnisse der Erzeugung des Straßenhöhenprofils dargestellt, einmal bei gesperrter Aktorik und einmal für den Fall, dass die vorausschauend angesteuerte Aktorik die Unebenheit ausgleicht. Da die 5 Hz-Filterung zweimal durchgeführt wird, einmal örtlich und einmal zeitlich, reduziert sich die Amplitude geringfügig, verglichen mit dem als gewünscht definierten Signal.

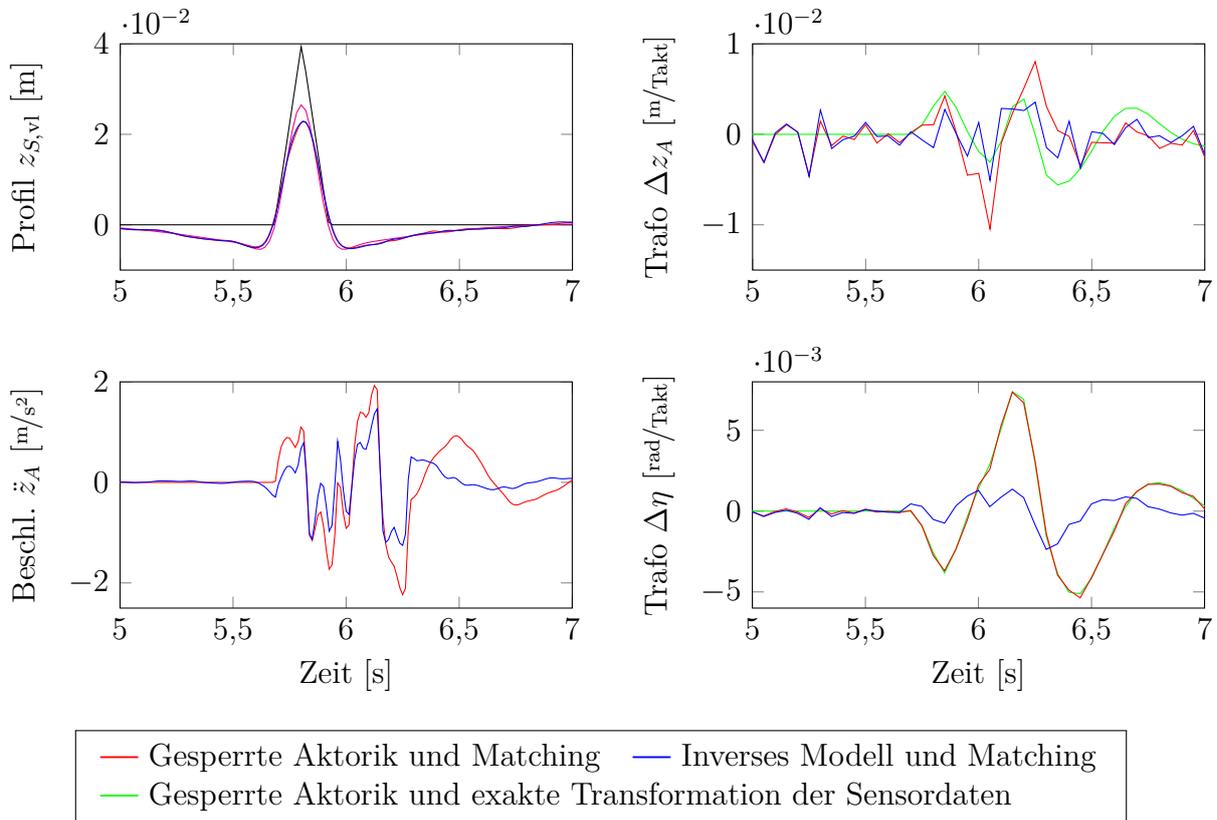


Abbildung 5.15: Simulation der Sensorrohdaten mit 5 cm Standardabweichung, *Matching* der Sensordaten, Filterung des Höhenprofils und vorausschauende Aktoransteuerung; Überfahrt Schwelle mit 30 km/h

Die Simulationsergebnisse zeigen folgende Erkenntnisse:

1. Das durch *Matching* und Filterung erzeugte Höhenprofil im ersten Diagramm in Abbildung 5.15 liegt für die beiden Varianten, inverses Modell und gesperrte Aktorik, genau übereinander und nah am gewünschten Verlauf.
2. Dementsprechend wird im Rahmen der Aktorbegrenzungen die Hubbeschleunigung im Diagramm links unten reduziert. Diese Reduktion ist vergleichbar ausgeprägt wie bei der Simulation mit exaktem gegebenem Höhenprofil in Abbildung 5.8.
3. Des Weiteren wird deutlich, dass durch das vorgeschlagene Konzept der örtlichen Hochpassfilterung die Verdrehung des Straßensignals im Koordinatensystem zu jedem Zeitschritt eliminiert wird und dasselbe Ergebnis entsteht, wie bei der als gewünscht definierten Filterung des absoluten Profils.

4. In den beiden rechten Plots wird ersichtlich, dass durch das *Matching* der Sensordaten die Transformation hochgenau ermittelt wird. Diese Transformation unterscheidet sich im Falle der vorausschauenden Fahrwerksansteuerung mit inversem Modell, da sich in diesem Fall der Fahrzeugaufbau deutlich weniger bewegt.

Fahrt über Bodenwellen länger als der Sensorsichtbereich

In den Abbildungen 5.16 und 5.17 ist die gesamtheitliche Simulation der Erstellung des Höhenprofils und der darauffolgenden Fahrwerksansteuerung bei einer Fahrt mit 120 km/h über die sinusförmigen Bodenwellen mit einer Periodenlänge von 35 m und einer Amplitude von ca. 2 cm gezeigt. Die Bodenwellen sind hierbei deutlich länger als die Vorausschau von 15,3 m vor der Vorderachse und somit kann nicht eine gesamte Bodenwelle überblickt werden. Es ist lediglich bekannt, ob sich die Fahrbahn nach oben oder nach unten krümmt. Es wird gezeigt, dass das vorgeschlagene Gesamtkonzept, unabhängig vom Verlauf der Bodenwelle außerhalb des Sensorsichtbereichs, komfortverbessernde Ergebnisse erzielt.

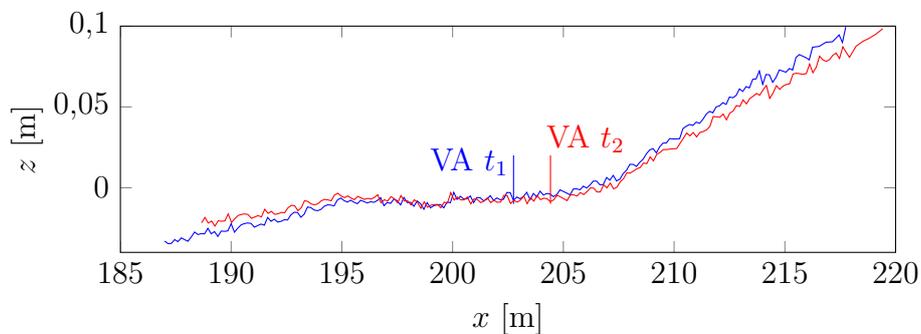


Abbildung 5.16: Sensorfeste Akkumulation; Höhenprofil im sensorfesten Koordinatensystem zu zwei Zeitschritten

In Abbildung 5.16 ist die im sensorfesten Koordinatensystem akkumulierte Höhenkarte zu zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten abgebildet. Hierbei beschreibt VA die Position der Vorderachse zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 . Das Höhenprofil ist im Koordinatensystem von Zeitschritt zu Zeitschritt durch die Eigenbewegung des Fahrzeuges verdreht. Durch eine örtliche Tiefpassfilterung, eine örtliche Hochpassfilterung und eine zeitliche Tiefpassfilterung der an der richtigen Stelle entnommenen Höhenwerte entsteht das Höhenprofil, das im ersten Diagramm in Abbildung 5.17 gezeigt ist.

Im ersten Diagramm in Bild 5.17 ist das gewünschte Profil, erzeugt durch eine 5 Hz-Tiefpass- und 0,5 Hz-Hochpassfilterung des exakten absoluten Profils, in Grün dargestellt. Des Weiteren ist in Rot und in Blau das bei gesperrter Fahrwerksaktorik nach der Sensordatenaufbereitung entstehende Profil gezeichnet. Hierbei wird zum einen die Transformation der Sensordaten von einem Zeitschritt zum nächsten durch *Matching* ermittelt und zum anderen durch die exakte Transformation aus der simulierten Hub-, Nick- und Wankbewegung. Die gestrichelten Kurven zeigen das entstehende Höhenprofil, falls gleichzeitig die vorausschauende Vorsteuerung mit inversem Modell den Fahrzeugaufbau beruhigt.

Die Simulationsergebnisse in Abbildung 5.17 zeigen folgende Ergebnisse:

1. Die Amplitude des Höhenprofils ist bei allen Varianten geringer als gewünscht. Dies liegt hauptsächlich an der gewählten Vorausschau von 15 m. Bei einer größeren Vorausschau

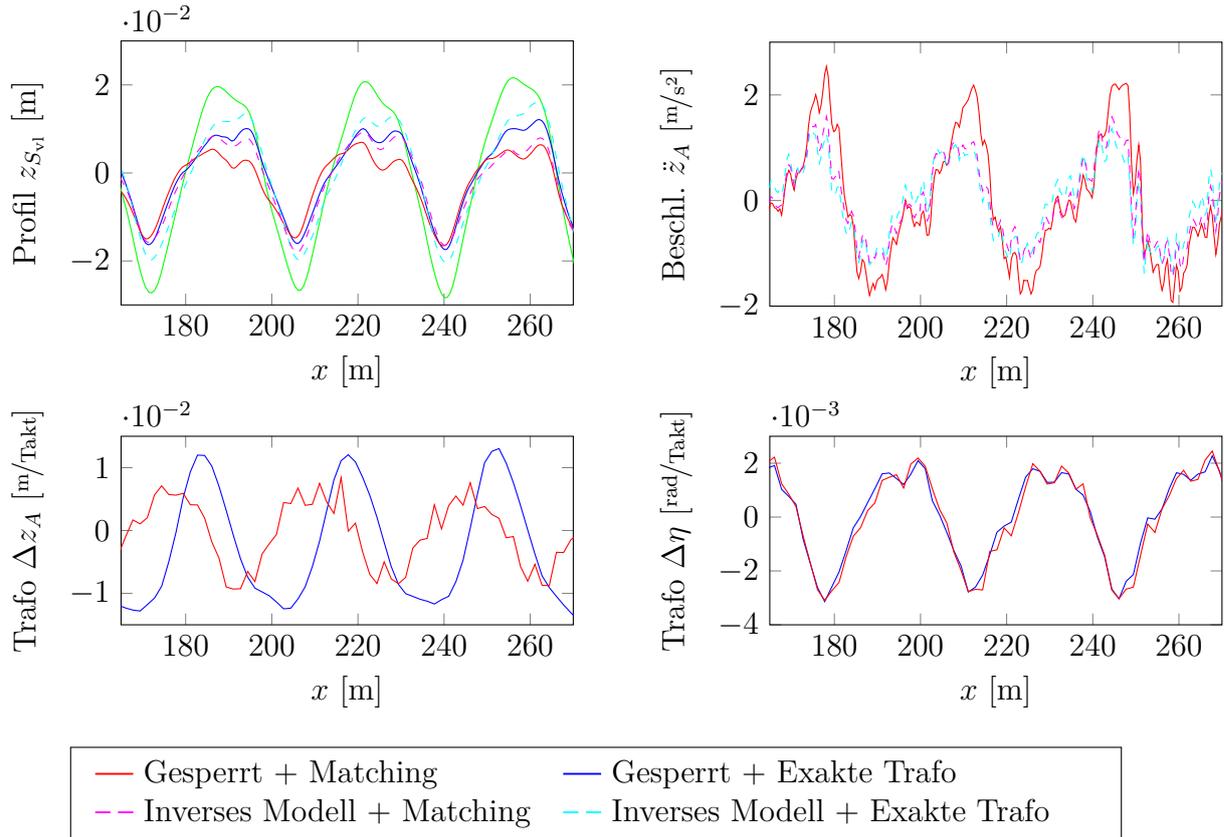


Abbildung 5.17: Simulation der Erstellung des Höhenprofils und der Fahrwerksansteuerung; Fahrt über Bodenwellen mit 35 m Periode und 120 km/h

nähert sich die Amplitude der wirklichen Amplitude. Durch diese geringere Amplitude generiert die Vorsteuerung der Vorausschau weniger Stellsignal. Eine Komfortverbesserung ist signifikant vorhanden (siehe Diagramm oben rechts) und wird durch eine Kombination mit dem *Skyhook*-Regler noch verbessert.

2. Das beste Höhenprofil entsteht bei der Verwendung der exakten Transformation der Sensordaten und dem geregelten Fahrwerk, da hierdurch der Aufbau beruhigt wird. Durch die Beruhigung dreht sich das Höhenprofil weniger im Koordinatensystem. Der örtliche Hochpassfilter, der dieses Drehen eliminiert, wird davon leicht beeinflusst.
3. Auch bei gesperrter Aktorik und *Matching* der Sensordaten wird ein zu guten Ergebnissen führendes Höhenprofil erzeugt, lediglich mit einer geringfügig reduzierten Amplitude. Es ist auch notwendig, dass die Erstellung des Höhenprofils auch bei nicht beruhigtem Fahrzeugaufbau ein robust gutes Straßensignal liefert und nicht voraussetzt, dass ein vorausschauender Regler den Fahrzeugaufbau beruhigt hat.
4. In den beiden unteren Diagrammen ist zu sehen, dass der Fehler durch das *Matching* der Sensordaten gegenüber der exakten Transformation gering ist. Dieser Vergleich wird am besten bei gesperrter Aktorik durchgeführt, da sich hier der Fahrzeugaufbau in beiden Fällen exakt gleich bewegt. Des Weiteren wird im Diagramm oben rechts deutlich, dass die Auswirkungen auf den Komfort des *Matchings* gegenüber der exakten Transformation

für den gewählten Sensor nur geringfügig sichtbar sind. Es besteht also ein geringes Verbesserungspotential, wenn diese Transformation genauer berechnet wird, als nur durch das *Matching* der Sensordaten.

In Abschnitt 4.5.2 wurde ein Prädiktor-Korrektor Verfahren mit Kalman-Filter für die Hubgeschwindigkeit und ein gewichtetes Mittel für die Nick- und Wankrate vorgeschlagen, um die Bestimmung der Transformation zu verbessern. Wird ein geringes Rauschen der Inertialsensoren für Hubbeschleunigung, Nick- und Wankrate in der Simulation angenommen, lässt sich die aus dem *Matching* berechnete Transformation in den unteren beiden Diagrammen in Abbildung 5.17 verbessern.

Es wird insgesamt deutlich, dass durch das *Matching* der Sensordaten ein gutes Ergebnis erreicht wird, und die Inertialsensormessungen auch nur zur Plausibilisierung verwendet werden können. Generell ist diese Bewertung stark abhängig von dem gewählten Sensor. Im vorliegenden Fall wird ein Sensor angenommen, der viele Informationen der Straße in einem Zeitschritt generiert und bei welchem sich der Sichtbereich zweier aufeinanderfolgender Zeitschritte stark überschneidet. Dies eignet sich gut für das *Matching* der Sensordaten. Bei einem Sensor, welcher höchstgenau nur einen Punkt vor dem Fahrzeug messen würde, ließe sich ein solches *Matching* nicht durchführen, was die Berechnung der Transformation zur Kompensation der Fahrzeugeigenbewegung immens erschwert.

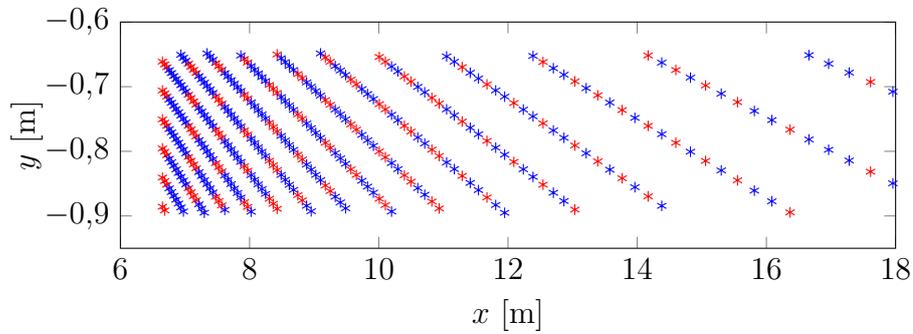
Fazit: Die vorgeschlagene Methodik aus *Matching* und sensorfester Akkumulation der Sensormessdaten, sowie der phasenfremen Hoch- und Tiefpassfilterung des Höhenprofils zur Generierung des Eingangssignals für eine Vorsteuerung mit inversem Modell, führt zu guten Ergebnissen und wird im nächsten Kapitel in der Fahrzeugimplementierung untersucht.

Abschätzung der Genauigkeit des Höhenprofils mit einer Formel

Zur Bewertung, ob ein Sensor für eine vorausschauende Fahrwerksregelung geeignet ist, kann somit die vorgestellte Simulationsumgebung benutzt werden. In diesem Abschnitt wird zudem eine einfachere und schnellere Berechnung erläutert. Es wurde in dieser Arbeit ein Sensor angenommen, welcher alle 50 ms 395 Entfernungsmessungen pro Spur bei Geradeausfahrt von der Straße aufnimmt. Bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h bewegt sich das Fahrzeug in dieser Zeit um 42 cm weiter. Eine 15 cm breite Zelle der Höhenkarte akkumuliert sich hierbei über der Zeit z.B. aus 148 Werten, veranschaulicht in Abbildung 5.18. Es wurde eine konstante Standardabweichung von 5 cm auf die Entfernungsmessung zwischen Sensor und Schnittpunkt mit dem Boden aufgeprägt. Mit der angenommenen Standardabweichung in z-Richtung, der Anzahl und dem Takt der Entfernungsmessung und bei Annahme einer hochgenauen Transformation lässt sich somit einfach für die unterschiedlichen Sensorvarianten die Genauigkeit des Höhenprofils nach der Akkumulation berechnen. Im vorliegenden Fall wurden alle Entfernungsmessungen mit derselben Standardabweichung verfälscht, diese äußert sich in einem Fehler in z-Richtung abhängig vom Strahlwinkel. Dies wird für die Berechnung vernachlässigt. Für identische Standardabweichungen vereinfacht sich Gleichung (4.13) zu: $\text{Var}(\mu) = \sigma^2/n$. Für die gegebenen Werte ergibt dies eine Standardabweichung des Erwartungswertes σ_μ von 4,1 mm. Wie in dem ersten Diagramm in Abbildung 5.15 zu sehen ist, wird diese Ungenauigkeit nach der Akkumulation durch die Filterschritte fast vollständig eliminiert.

Ausschlaggebend für die Bewertung der vorausschauenden Fahrwerksregelung ist der Höhenwert in ca. 4 m vor der Vorderachse, da dieser aufgrund des Sichtbereichs der Kamera, eingeschränkt durch die Motorhaube, nicht mehr verbessert wird. Es kann mit diesem Verfahren die

Genauigkeit nach der Akkumulation für schnellere Geschwindigkeiten berechnet werden. Hier werden dementsprechend weniger Messwerte in einer Zelle akkumuliert. Es muss beachtet werden, dass bei hohen Geschwindigkeiten gegebenenfalls nicht mehr der genaueste Wert 4 m vor dem Rad zur Regelung verwendet werden kann, da das Fahrzeug innerhalb der Gesamtlatenz diesen Abschnitt schon überfahren hat.



- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> * Sensorwerte, die über der Zeit in einer Zelle akkumuliert werden * Sensorwerte, die über der Zeit in den anderen Zellen akkumuliert werden |
|---|

Abbildung 5.18: Entfernungsmessung zur Straße vor einer Spur in einem Zeitschritt

6 Ergebnisse der Fahrzeugimplementierung

In diesem Kapitel werden Messergebnisse der Fahrzeugimplementierung präsentiert. Es steht ein Testfahrzeug mit einer Federfußpunktverstellung und einem passiven Dämpfer zur Verfügung (Abbildung 6.1). In diesem Fahrzeug wurden sowohl ein hochgenaues GPS-basiertes System als auch eine Kamera zur Erkennung des Straßenhöhenprofils eingebaut. Diese ist auf Höhe des inneren Rückspiegels an der Windschutzscheibe angebracht und kann auch für weitere Fahrerassistenzfunktionen genutzt werden. Im Kofferraum befindet sich eine dSPACE Autobox, auf der die in dieser Arbeit vorgestellten Algorithmen implementiert sind.

6.1 Fahrzeugimplementierung mit GPS-basiertem Höhenprofil

Es sollen zunächst Fahrzeugmessungen präsentiert werden, wobei das Höhenprofil hochgenau vermessener Strecken auf der Autobox gespeichert wird. Mit dem im Fahrzeug verbauten GPS-basierten System erfolgt eine Lokalisierung in der digitalen Karte. Somit können in jedem Zeitschritt die Höhenwerte vor den Rädern aus der Karte ausgelesen werden. Dies soll das Potential einer vorausschauenden Fahrwerksregelung in der Fahrzeugimplementierung aufzeigen. Die Methodik zum Speichern und Auslesen der Höhendaten wurde in Abschnitt 2.2.1 genauer erläutert. Für die Fahrzeuganwendung wird eine Höhenkarte mit einer Zellengröße von 10x10 cm verwendet.

Das Höhenprofil liegt in dieser Karte zunächst als absolutes Höhenprofil vor. Dies wird offline in gewünschte relative Höhenwerte, durch die Filterung mit einem 0,5 Hz-Hochpass und einem 5 Hz-Tiefpass, wie in Abbildung 4.2 erläutert, umgerechnet. Die Autobox ist mit 5 ms getaktet und es wird alle 10 ms das Optimierungsproblem der modellprädiktiven Regelung gelöst. Hierbei werden zehn Prädiktionszeitschritte gewählt. Dies führt zu 40 Optimierungsvariablen bei der modellprädiktiven Stellgrößenberechnung und 30 Optimierungsvariablen bei der modellprädiktiven Trajektoriengenerierung.

Um in jedem Zeitschritt Höhenwerte über dem Prädiktionshorizont aus der Karte zu extrahieren, ist es notwendig, die Fahrtrajektorie zu jedem Zeitschritt zu prädizieren. Hierfür wird eine vereinfachte Berechnung basierend auf dem aktuellen Lenkradwinkel und ausgehend von einer Kreisbahn vorgeschlagen (Abbildung 6.2). Da kein Schräglaufwinkel beachtet wird, gilt diese Formel nicht für Fahrten im Grenzbereich. Es wird angenommen, dass sich der Lenkwinkel der Räder δ , berechnet aus dem Lenkradwinkel, auf die Fahrzeugmitte bezieht und der Momentanpol der Fahrzeugbewegung bzw. der Mittelpunkt der Kreisbahn auf Höhe der Hinterachse liegt. Bei positivem Lenkwinkel fährt das Fahrzeug nach links. Aus Abbildung 6.2 ergibt sich somit für den Kreisradius des rechten und linken Vorderrades:



Abbildung 6.1: Versuchsfahrzeug mit Federfußpunktverstellung und Kamera

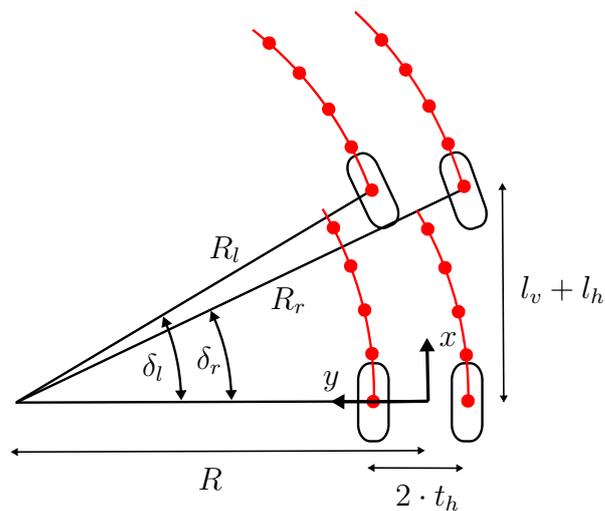


Abbildung 6.2: Prädiktion der Fahrtrajektorie basierend auf Kreisgleichung

$$R_l = \sqrt{(R - t_h)^2 + (l_v + l_h)^2} \quad (6.1)$$

$$R_r = \sqrt{(R + t_h)^2 + (l_v + l_h)^2} \quad (6.2)$$

$$\text{mit } R = \frac{l_v + l_h}{\tan |\delta|}$$

Hieraus ergibt sich über den Lenkwinkel des linken und rechten Vorderrades

$$\tan \delta_l = \frac{l_v + l_h}{R - t_h} \quad \text{bzw.} \quad \tan \delta_r = \frac{l_v + l_h}{R + t_h} \quad (6.3)$$

die Trajektorie der Vorderräder für i diskrete Schritte der Länge Δl entlang der Fahrtrajektorie in einem Mitte Hinterachse fahrzeugfest mitbewegten Koordinatensystem:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{\text{vorne links}} = \begin{pmatrix} R_l \sin\left(\delta_l + \frac{i \cdot \Delta l}{R_l}\right) \\ R - R_l \cos\left(\delta_l + \frac{i \cdot \Delta l}{R_l}\right) \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{\text{vorne rechts}} = \begin{pmatrix} R_r \sin\left(\delta_r + \frac{i \cdot \Delta l}{R_r}\right) \\ R - R_r \cos\left(\delta_r + \frac{i \cdot \Delta l}{R_r}\right) \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

$$\delta < 0 \quad \rightarrow \quad y = -y$$

Der Herleitung liegt die Annahme gleicher Spurweite vorne und hinten $t_v = t_h$ zugrunde.

In diesem Kapitel werden als Maß für den Komfort die Reduktion der Hubbeschleunigung, sowie die Reduktion der Nick- und der Wankrate gezeigt. Es werden die Nick- und die Wankrate verwendet, da diese im Gegensatz zu der Nick- und Wankbeschleunigung im Fahrzeug direkt mit Seriensensorik messbar sind. Um das Rauschen zu entfernen und die Diagramme somit übersichtlicher zu gestalten, werden die gemessenen Aufbaubeschleunigungen und -drehraten phasenfrei mit 15 Hz und die gemessenen Radbeschleunigungen mit 25 Hz Tiefpass gefiltert.

In Abbildung 6.3 fährt das Fahrzeug mit 120 km/h über die Sinuswellen mit einer Amplitude von 2 cm und einer Periodendauer von 35 m. Dasselbe Höhenprofil wurde für die Simulation in Abbildung 5.7 verwendet.

In den Messdaten wird ersichtlich, dass durch eine Aktorbewegung gegenläufig zu den Bodenwellen der Aufbau beruhigt wird. Mit der Regelung ohne Vorausschau, mit den Modulen *Weiche Feder* und *Skyhook*, gelingt dies spürbar. Mit der Regelung mit Vorausschau wird der Effekt nochmals deutlich gesteigert, wobei die Aufbauberuhigung bei der modellprädiktiven Regelung geringfügig ausgeprägter ist, als bei der Vorsteuerung mit dem inversen Modell. Die Demonstration der Fahrt über diese Bodenwellen mit dem modellprädiktiven Regler wurde von allen Testpersonen als beeindruckend empfunden, da die ansonsten deutlich spürbaren Bodenwellen überfahren werden, als handle es sich um eine ebene Straße. Die Maximalwerte der Hubbeschleunigung bei einer Bodenwelle sind für die Variante *Skyhook* plus *Weiche Feder* um 19% gegenüber der gesperrten Aktorik, für das inverse Modell um 65% und für den MPC um 69% reduziert. Das Fahrzeug mit gesperrter Aktorik und somit Aktorstellweg gleich Null kann als Anhaltspunkt für ein passives Fahrzeug betrachtet werden.

Im letzten Diagramm in Abbildung 6.3 sind noch die vertikalen Radbeschleunigungen aufgetragen. Diese sind für sämtliche Ansätze etwa im selben Bereich.

In Abbildung 6.4 werden mit den linken Rädern die Bodenwellen mit 35 m Periode und 2 cm Amplitude und mit den rechten Rädern Sinuswellen mit einer Amplitude von 1 bis 2 cm und einer Periodendauer von 15 bis 25 m überfahren. Hierdurch wird das Wanken des Fahrzeuges angeregt. Die Regelungsansätze, basierend auf Gesamtfahrzeugmodellen, können dies ebenso gut ausgleichen. So wird die maximale Hubbeschleunigung bei der mittleren Bodenwelle bei der Regelung ohne Vorausschau um 28 % gegenüber der gesperrten Aktorik, beim inversen Modell um 66 % und bei der modellprädiktiven Regelung um 77 % verringert. Ebenso tritt eine Reduktion der Nick- und Wankrate auf. Der Effekt der vorausschauenden Regelung ist für den Fahrer ebenso deutlich spürbar wie bei den beidseitig identischen Bodenwellen.

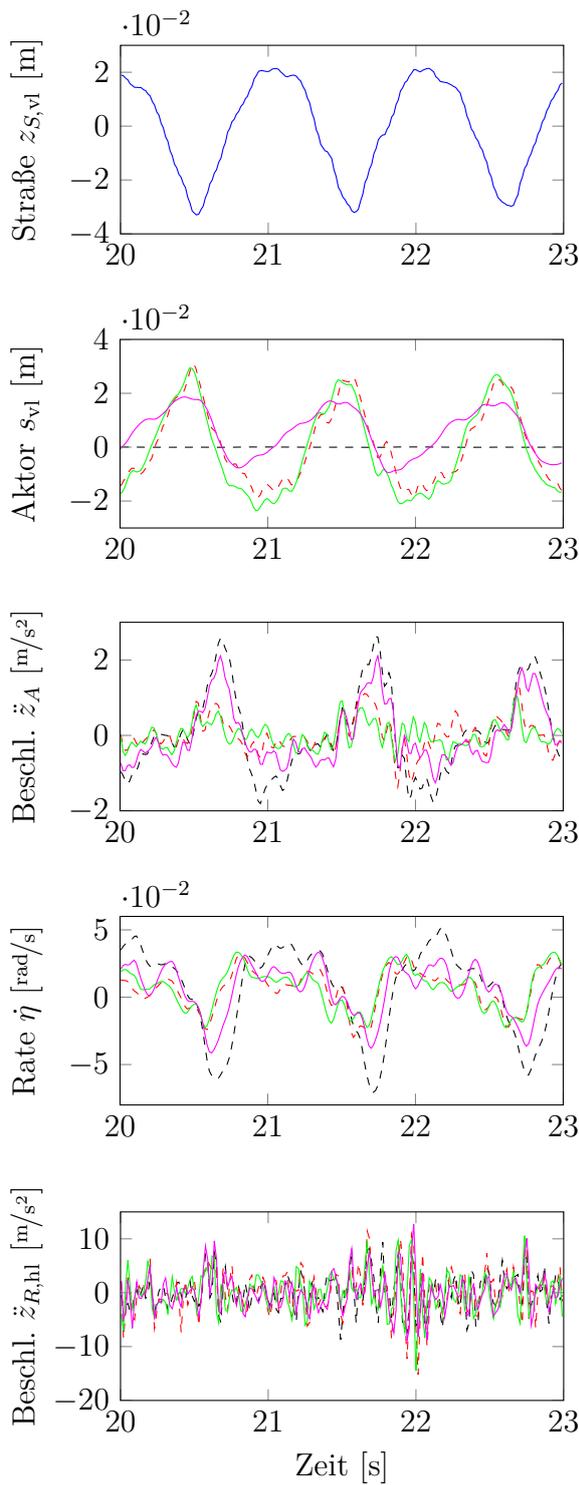


Abbildung 6.3: GPS-basiertes Höhenprofil; Bodenwellen mit 35 m Periode und 120 km/h

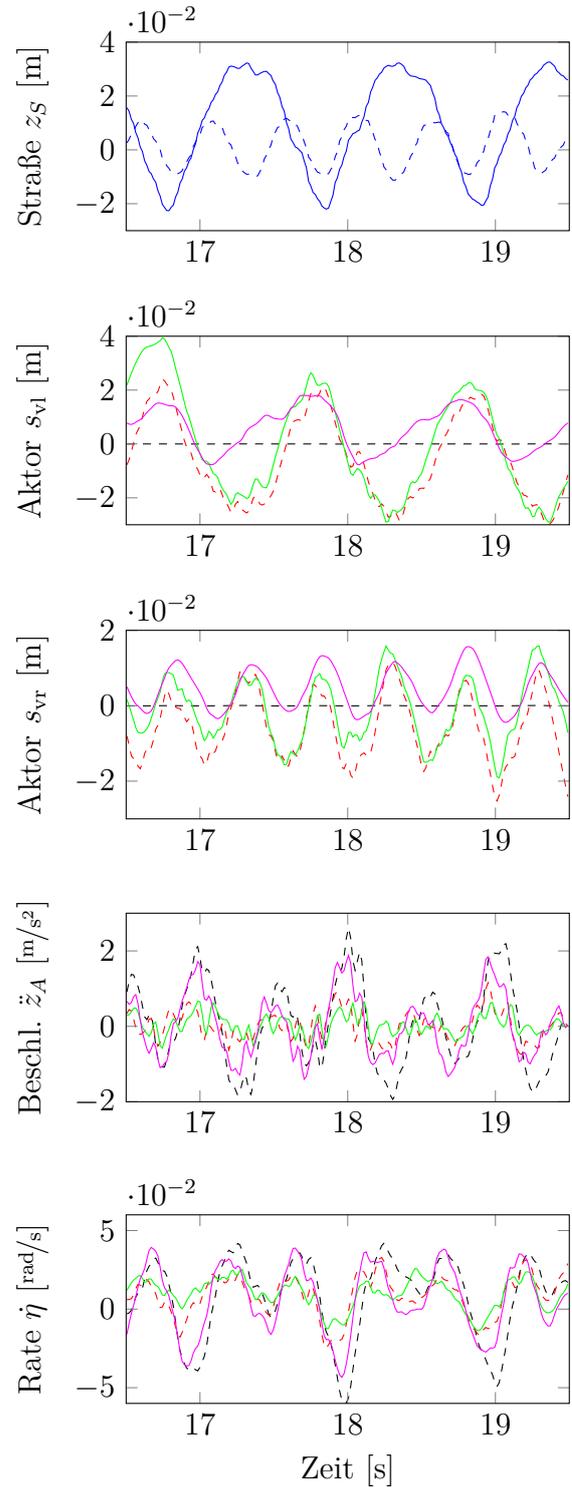
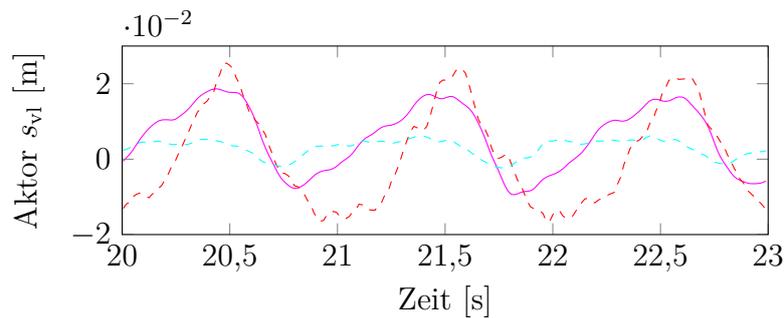


Abbildung 6.4: GPS-basiertes Höhenprofil; unterschiedliche Bodenwellen zwischen rechter und linker Spur mit 120 km/h



Tabelle 6.1: RMS-Werte der gemessenen Beschleunigungen und Drehraten

	Abb. 6.3 RMS \ddot{z}_A	Abb. 6.3 RMS $\dot{\eta}$	Abb. 6.4 RMS \ddot{z}_A	Abb. 6.4 RMS $\dot{\eta}$	Abb. 6.4 RMS $\dot{\omega}$
Gesperrt	1,12	0,033	1,14	0,027	0,086
Weiche Feder	0,92	0,027	0,90	0,026	0,085
Skyhook + Weiche Feder	0,81	0,020	0,83	0,022	0,070
Inverses Modell	0,46	0,016	0,39	0,016	0,027
Skyhook + Inverses Modell	0,48	0,016	0,56	0,019	0,036
MPC	0,33	0,016	0,28	0,014	0,051


 Abbildung 6.5: Bodenwellen mit 35 m Periode und 120 km/h; Vergleich Stellsignal des *Skyhook*-Moduls bei Kombination mit Vorsteuerung aus inversem Modell

Die genauen RMS-Werte der Zeitverläufe der unterschiedlichen Regelungsansätze sind in Tabelle 6.1 dargestellt. Hier wird sichtbar, dass durch die Kombination der Vorsteuerung mittels inversen Modells mit dem *Skyhook*-Regler die Wirksamkeit nicht noch weiter gesteigert wird. Dies liegt an den exakten Straßendaten, wodurch die Vorsteuerung sehr wirksam ist. Durch die Kombination mit der Vorsteuerung erzeugt das *Skyhook*-Modul einen deutlich geringeren Stellweg als ohne Vorsteuerung über dieselbe Strecke. Dies ist in Abbildung 6.5 für die Überfahrt der Sinuswellen mit 35 m Periode und 2 cm Amplitude gezeigt. Somit wird ersichtlich, dass sich die Vorsteuerung mit dem inversen Modell gut mit einem *Skyhook*-Regler im Sinne einer Zwei-Freiheitsgrade Struktur ergänzt.

In Abbildung 6.6 wird gezeigt, dass bei den Bodenwellen mit 35 m Periode und 2 cm Amplitude auch mit 160 km/h eine deutlich spürbare Reduktion der Aufbaubeschleunigung zu realisieren ist. Die Bodenwellen können jedoch nicht mehr komplett ausgeglichen werden, da die Aktorik an die maximale Verstellgeschwindigkeit gerät. Die Reduktion der Hubbeschleunigung beträgt im Bild jedoch noch immer -49 % der vorausschauenden modellprädiktiven Regelung gegenüber der Regelung ohne Vorausschau. Hierdurch wird gezeigt, dass mit der Aktorik, falls die Straße wie gewünscht erkannt wird, auch für hohe Geschwindigkeiten eine deutlich spürbare Verbesserung durch Vorausschau realisiert werden kann. Je schneller die Geschwindigkeit, desto länger müssen die Bodenwellen sein, um innerhalb des Wirkungsbereichs der Aktorik zu liegen.

Im Folgenden werden die Messdaten der Überfahrt der 30 cm hohen und 45 m langen Bodenwelle diskutiert. In Abbildung 6.7 wird zunächst ein niederfrequenter Bezugsverlauf gewählt, so

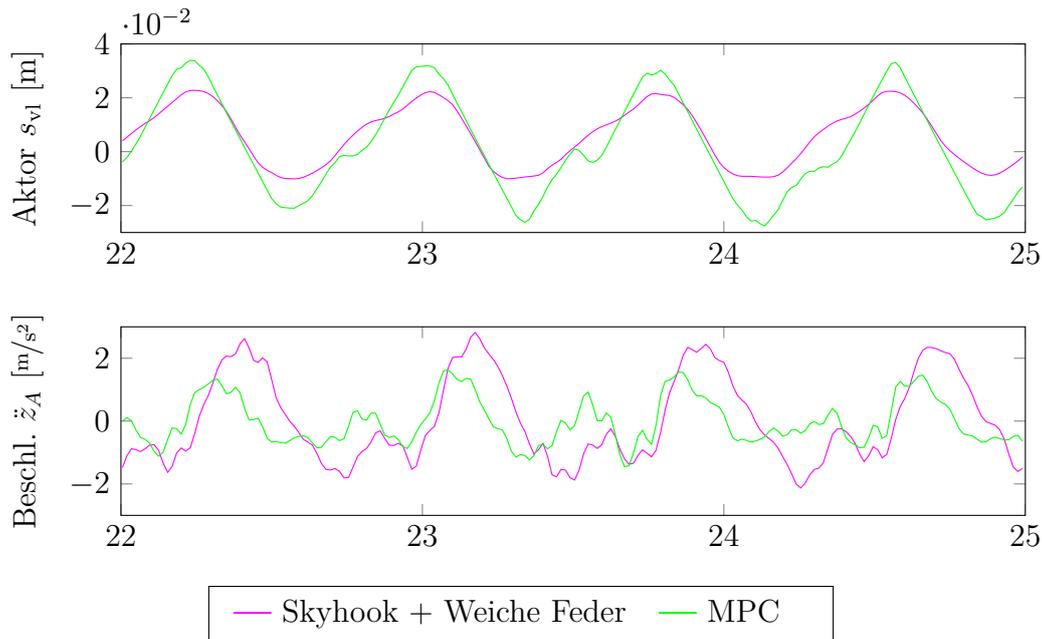


Abbildung 6.6: GPS-basiertes Höhenprofil; Bodenwellen mit 35 m Periode und 160 km/h

Tabelle 6.2: Maximal gemessene Beschleunigungen und Drehraten

	Abb. 6.8 max \ddot{z}_A [m/s ²]	Abb. 6.8 min $\dot{\eta}$ [rad/s]
Gesperrt	3,04 (100 %)	-0,100 (100 %)
Weiche Feder	2,65 (-13 %)	-0,097 (-3 %)
Skyhook + Weiche Feder	2,22 (-27 %)	-0,062 (-38 %)
Inverses Modell	1,55 (-49 %)	-0,049 (-51 %)
Skyhook + Inverses Modell	1,57 (-48 %)	-0,036 (-64 %)

dass die Unebenheit als positive Bodenwelle abgebildet ist. Aufgrund der Beschränkung des Aktorstellweges führt ein solches Eingangssignal bei Verwendung der Vorsteuerung mit inversem Modell zu einer Verschlechterung des Fahrkomforts. Dies wurde in der Simulation in Abbildung 5.9 gezeigt. Mit der modellprädiktiven Regelung kann dieses Eingangssignal verarbeitet werden, da die Aktorbeschränkungen berücksichtigt sind. Durch die Optimierung wird durch positives Ausfahren der Aktoren das Fahrzeug angehoben, sobald die Bodenwelle in Sicht ist. Hierfür wurden die zehn Prädiktionszeitschritte bis zu 0,5 s Vorausschau nicht-äquidistant verteilt und es wird gezeigt, dass auch die entworfene modellprädiktive Trajektoriengenerierung im Fahrzeugeinsatz funktioniert. Es ist eine deutliche Reduktion der Hubbeschleunigung gegenüber der gesperrten Aktorik und gegenüber dem Regler ohne Vorausschau sichtbar.

Es kann jedoch, äquivalent zur Simulation in Abbildung 5.10 und der Erläuterung in Abbildung 4.2b, das Höhenprofil mit einem 0,5 Hz-Filter vorbearbeitet werden (Abbildung 6.8). Mit dem entstehenden Eingangssignal erzielt die Vorsteuerung mit inversem Modell gute Ergebnisse. Die deutliche Komfortverbesserung gegenüber der Fahrt mit gesperrter Aktorik und der Fahrt mit dem Regler ohne Vorausschau ist in den Messdaten und in der Tabelle 6.2 gezeigt.

Es wird, wie auch in vorigen Ergebnissen, deutlich, dass die Messdaten gut mit den Simulationen übereinstimmen.

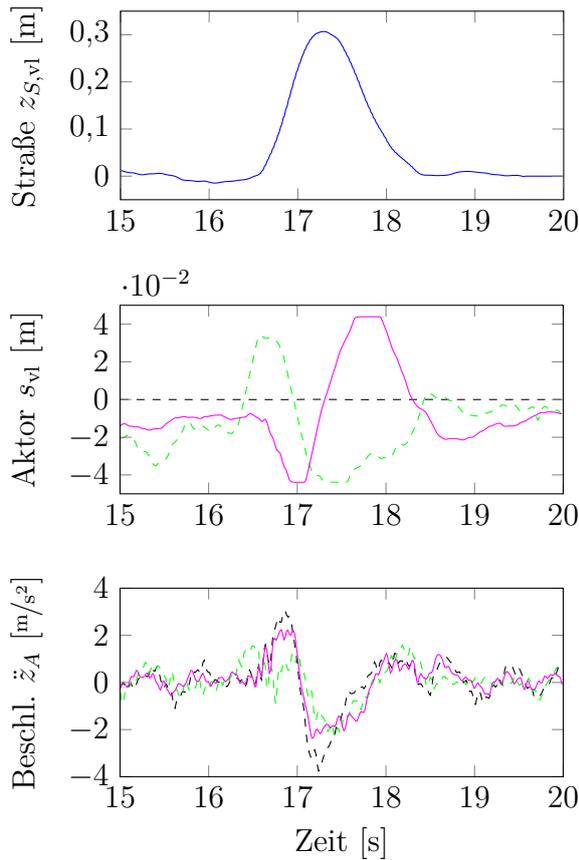


Abbildung 6.7: GPS-basiertes Höhenprofil; hohe Bodenwelle mit 100 km/h; Reglereingang Profil Bodenwelle

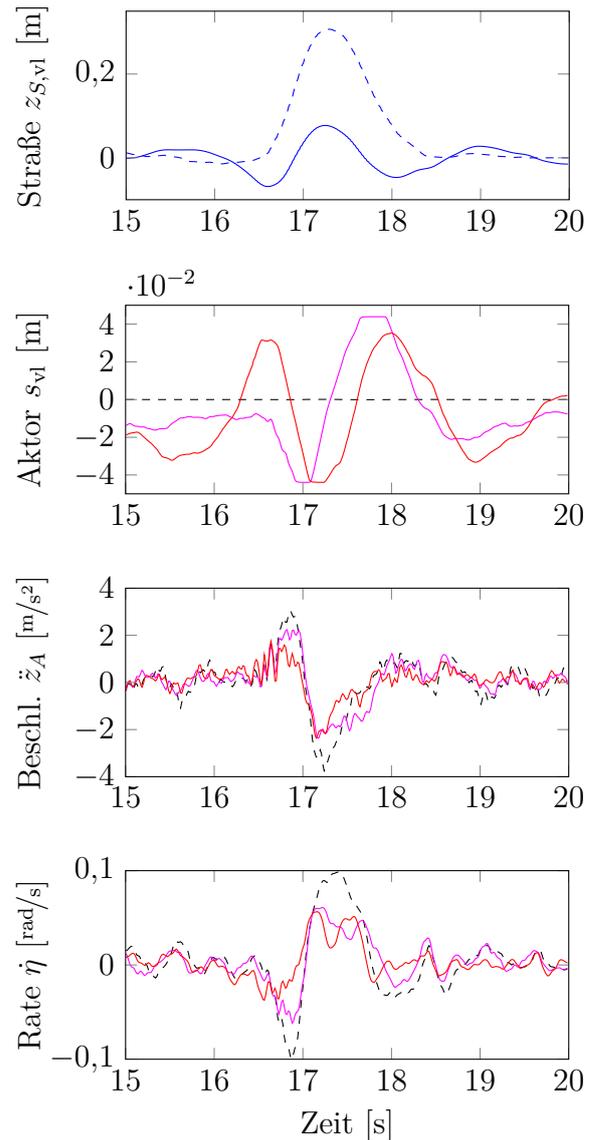
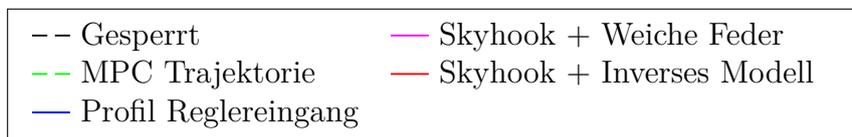


Abbildung 6.8: GPS-basiertes Höhenprofil; hohe Bodenwelle mit 100 km/h; Reglereingang Profil 0,5 Hz-Hochpass gefiltert



6.2 Fahrzeugimplementierung mit Umfeldsensordaten

In diesem Abschnitt werden Messergebnisse mit der Kamera gezeigt. Es werden die Rohdaten der Entfernungsmessung in der Autobox verarbeitet und die in dieser Arbeit vorgeschlagene Kette aus Erstellung des Straßenhöhenprofils und Ansteuerung des Fahrwerks im Fahrzeug durchgeführt. Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 6.9 veranschaulicht.

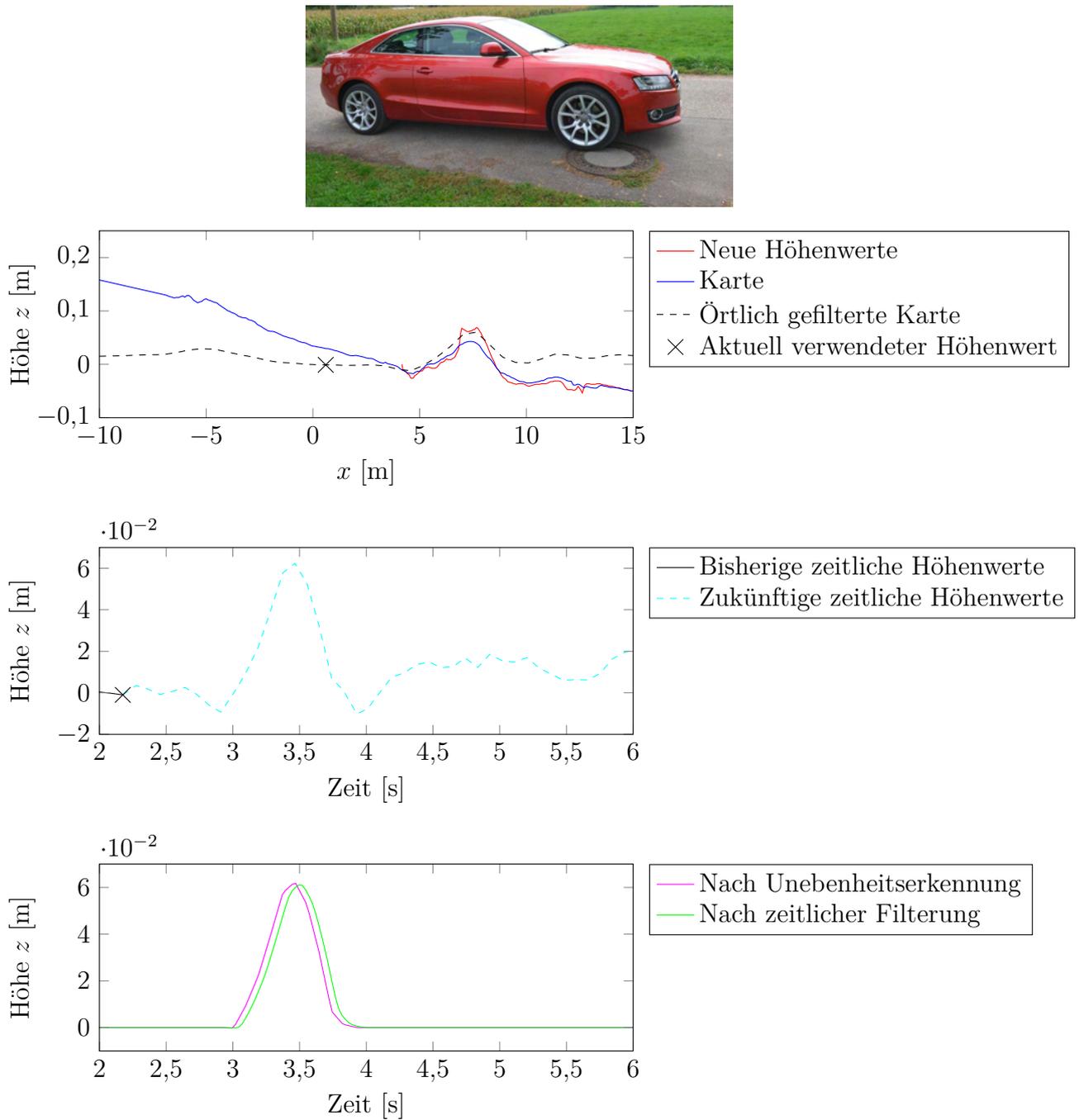


Abbildung 6.9: Überfahrt einer einseitigen Unebenheit mit 20 km/h ; Erläuterung der Sensordatenaufbereitung und der Filterung der rechten Spur

Es wird zunächst nach Abschnitt 4.2.1 eine Transformation der bereits erstellten Höhenkarte in die aktuellen Sensordaten und eine darauffolgende profilbezogene Akkumulation nach Abschnitt 4.4 mit dem gewichteten arithmetischen Mittel vorgenommen. Die Transformation wird mit dem *Matching* der Sensordaten nach Abschnitt 4.5.1 berechnet. Danach erfolgt die vorgeschlagene örtliche Hoch- und Tiefpassfilterung, sowie die zeitliche Tiefpassfilterung der Höhenwerte vor dem Rad (Abschnitt 4.7), und eine Unebenheitserkennung nach Abschnitt 4.6.2. Es

wird die Gesamtregelstruktur aus Abbildung 3.6 angewendet, bestehend aus einer Vorsteuerung mit inversem Modell und einem *Skyhook*-Regler.

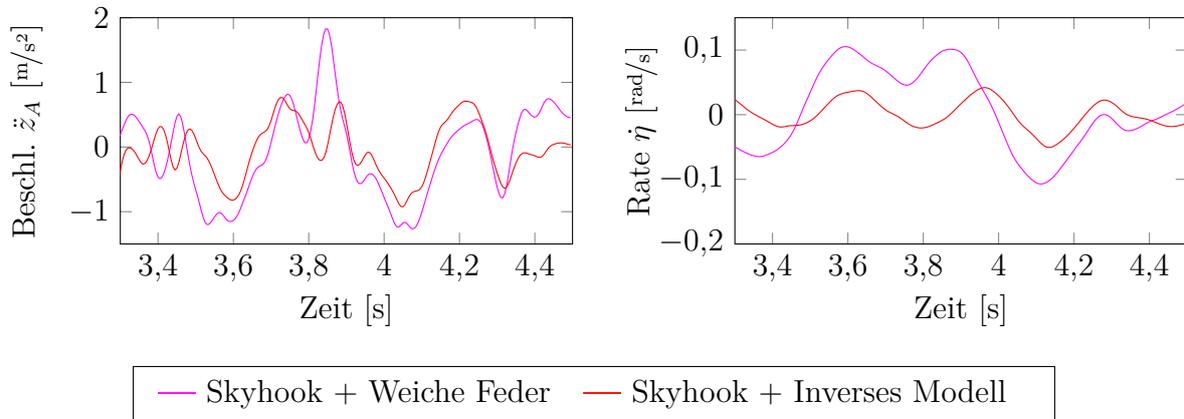


Abbildung 6.10: Reduktion Hubbeschleunigung und Nickrate bei Überfahrt der einseitigen Unebenheit mit 20 km/h und Kamera

In Abbildung 6.10 ist die Reduktion der Aufbaubeschleunigung und der Nickrate bei der Überfahrt der einseitigen Unebenheit aus Abbildung 6.9 gezeigt. Die Erhöhung des Fahrkomforts der vorausschauenden Ansteuerung gegenüber dem Regler ohne Vorausschau ist in den Kurven deutlich sichtbar und im Fahrzeug deutlich spürbar.

In Abbildung 6.11 sind die Ergebnisse für die Verwendung der Kamera bei Überfahrt der 2 m langen und 4 cm hohen Schwelle mit 30 km/h gezeigt. Diese Schwelle ist auch in Abbildung 6.1 zu sehen. Im ersten Diagramm wird ersichtlich, dass durch die Unebenheitserkennung die Form der Schwelle erhalten bleibt und die Ungenauigkeit im Straßenprofil auf der ebenen Fläche vor und nach der Schwelle eliminiert wird. Im Diagramm links unten wird sichtbar, dass mit der vorausschauenden Regelung deutlich vor der Regelung ohne Vorausschau, also proaktiv, eingegriffen und mit maximaler Aktorgeschwindigkeit der Unebenheit ausgewichen wird. Dies ergibt im Diagramm rechts oben eine Reduktion des RMS-Wertes der Hubbeschleunigung der vorausschauenden Ansteuerung von -38 % gegenüber dem gesperrten Fahrwerk und -44 % gegenüber dem Regler ohne Vorausschau. Bei der Nickrate sind dies -77 % bzw. -66 %. Die Reduktion der Maximalwerte der vorausschauenden Regelung gegenüber der Regelung ohne Vorausschau ist in den Diagrammen eingezeichnet. Es wird somit gezeigt, dass bei diesem Hindernis durch die Vorausschau ein deutlich spürbarer Effekt gegenüber einer Regelung ohne Vorausschau erzielt wird.

Wird die Schwelle nur mit einer Spur überfahren, funktioniert dies ebenso gut und resultiert in einer Reduktion der Maximalwerte an der ausgeprägtesten Stelle von -32 % in der Hubbeschleunigung, -65 % in der Nickrate und -39 % in der Wankrate gegenüber dem Regler ohne Vorausschau. Des Weiteren ist der Effekt auch bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten gegeben. Die Komfortverbesserung durch Vorausschau beim Überfahren der Schwelle ist bei den genannten Manövern für jeden Fahrer deutlich spürbar. Mit Vorausschau entspricht die Überfahrt der Schwelle nahezu einer Fahrt auf ebener Straße. Das Anziehen der Räder und die Beruhigung des Fahrzeugaufbaus ist auch von außen hervorragend zu beobachten.

In Abbildung 6.12 wird die Komfortverbesserung bei der Überfahrt einer langen Fahrbahnswelle mit 15 km/h gezeigt. Die Reduktion des Maximalwertes der Hubbeschleunigung beträgt -30 % der Regelung ohne Vorausschau gegenüber der gesperrten Aktorik und -54 % der

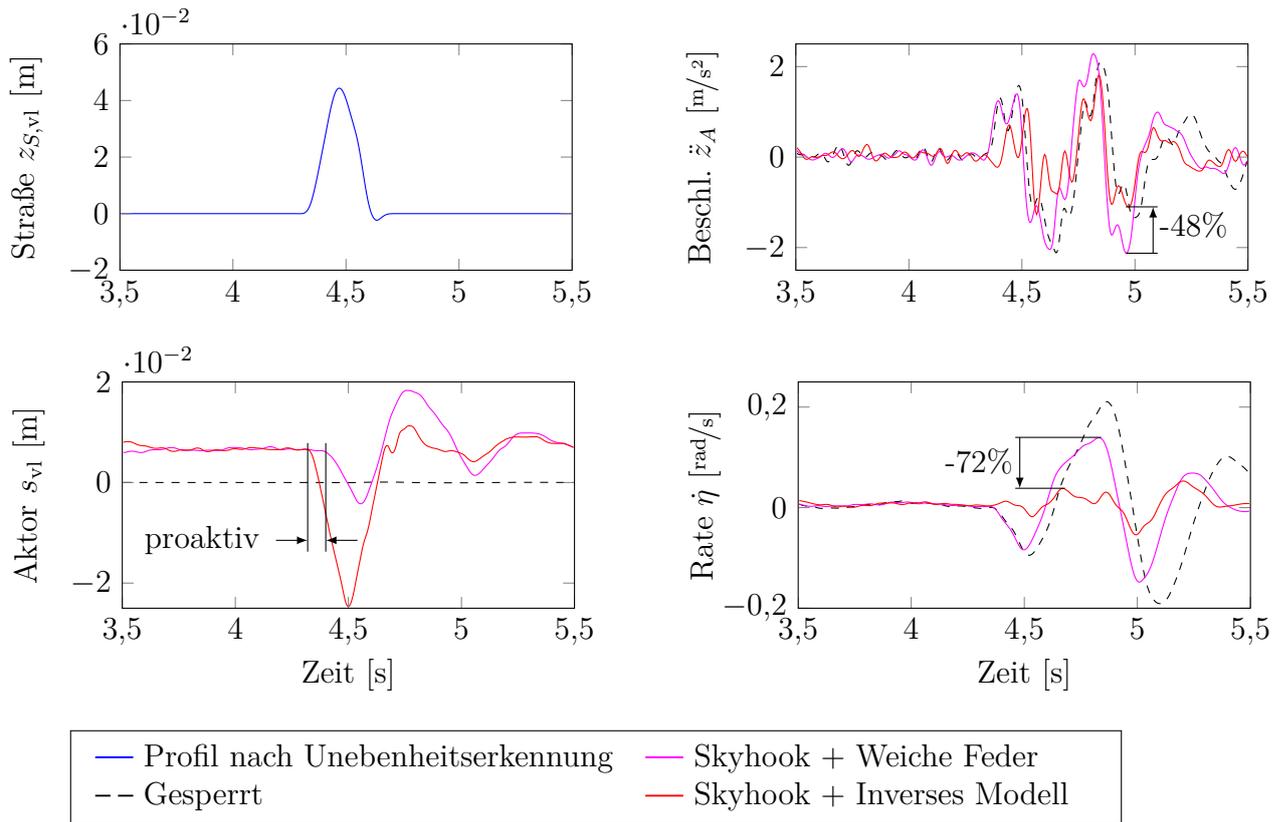


Abbildung 6.11: Überfahrt Schwelle mit 30 km/h und Kamera

vorausschauenden Regelung gegenüber der gesperrten Aktorik. Bei der Nickrate betragen diese Werte -36 % und -56 %. Die Verbesserung durch die Vorausschau ist jeweils im Diagramm eingezeichnet.

In Abbildung 6.13 fährt das Fahrzeug über eine Fahrbahnabsenkung mit 20 km/h. Die Reduktion des RMS-Wertes der eingezeichneten Hubbeschleunigung der Regelung ohne Vorausschau gegenüber der gesperrten Aktorik beträgt -24 %, der vorausschauenden Regelung gegenüber der gesperrten Aktorik -28 %. Die Reduktion in der Nickrate beträgt -39 % für die Regelung ohne Vorausschau und -66 % für die Regelung mit Vorausschau, jeweils verglichen mit der gesperrten Aktorik.

In Abbildung 6.14 ist die Überfahrt einer Bodenwelle mit 20 km/h gezeigt. Es ist das Fahrzeug mit gesperrter Aktorik verglichen mit dem Regler ohne Vorausschau, mit der reinen Vorsteuerung aus der Vorausschau durch das inverse Modell und mit der Kombination dieser Vorsteuerung mit dem *Skyhook*-Regler. Es wird sichtbar, dass die reine Vorsteuerung aus der Vorausschau einen Großteil der Komfortverbesserung verursacht und die Kombination mit dem *Skyhook*-Regler dies noch leicht verbessert.

Die vorausschauende Ansteuerung hat den Vorteil, dass sie nur dann aktiv ist, wenn eine spürbare Verbesserung des Fahrkomforts zu erzielen ist. Dies ist energieeffizient. Der Regler ohne Vorausschau basierend auf Rückführung muss hingegen immer aktiv sein. Es wird auch deutlich, dass für eine Komforterhöhung durch Vorausschau über Unebenheiten gefahren werden muss, welche sowohl robust von der Sensorik erkannt werden, als auch im Frequenzbereich der Aktorik liegen.

Fazit: Es wurde in einem Testfahrzeug mit seriennaher Sensorik gezeigt, dass die vorge-

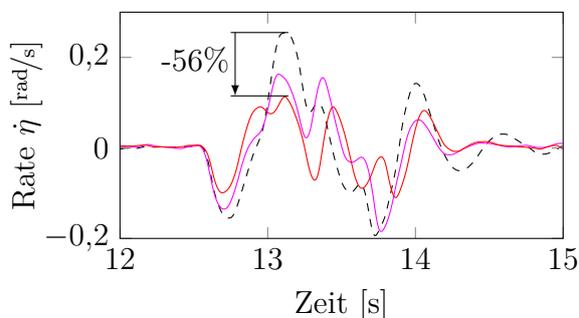
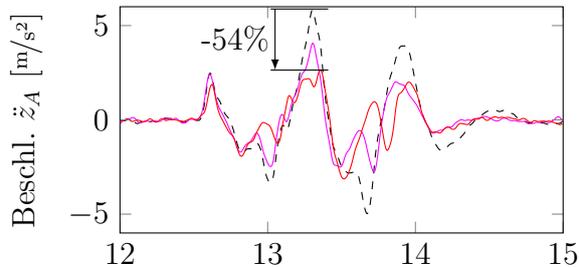


Abbildung 6.12: Reduktion Hubbeschleunigung und Nickrate bei Überfahrt Fahrbahnschwelle mit 15 km/h und Kamera

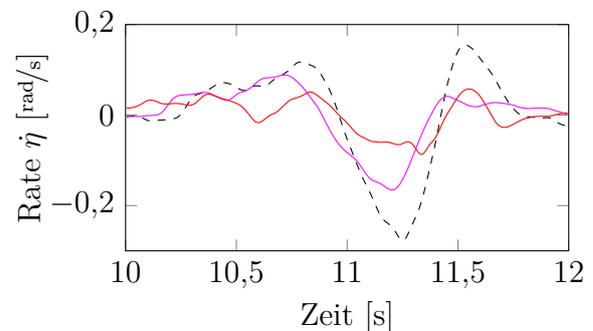
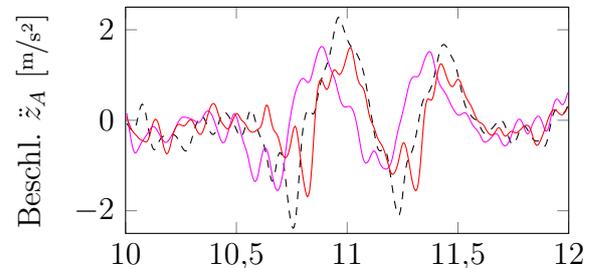


Abbildung 6.13: Reduktion Hubbeschleunigung und Nickrate bei Überfahrt Fahrbahnabsenkung mit 20 km/h und Kamera



schlagene Erstellung des Straßenhöhenprofils und die entwickelte vorausschauende Ansteuerung kombiniert mit einer Regelung ohne Vorausschau eine deutlich spürbare Komfortverbesserung über Unebenheiten ermöglicht.

6.3 Entwurf eines Beobachters des Straßenhöhenprofils

In diesem Abschnitt werden Möglichkeiten vorgestellt, das bereits überfahrene Straßenhöhenprofil unabhängig von der Umfeldsensorik anhand der Fahrzeugreaktion zu bestimmen. Dies kann im Fahrzeug zur Plausibilisierung des von den Umfeldsensoren gemessenen Höhenprofils verwendet werden. Des Weiteren steht mit einem solchen Beobachter eine Referenz zur Weiterentwicklung und Optimierung der Algorithmen zur Erstellung des Straßenhöhenprofils nach der Messfahrt zur Verfügung. Eine Ermittlung des Straßenhöhenprofils aus der Fahrzeugreaktion

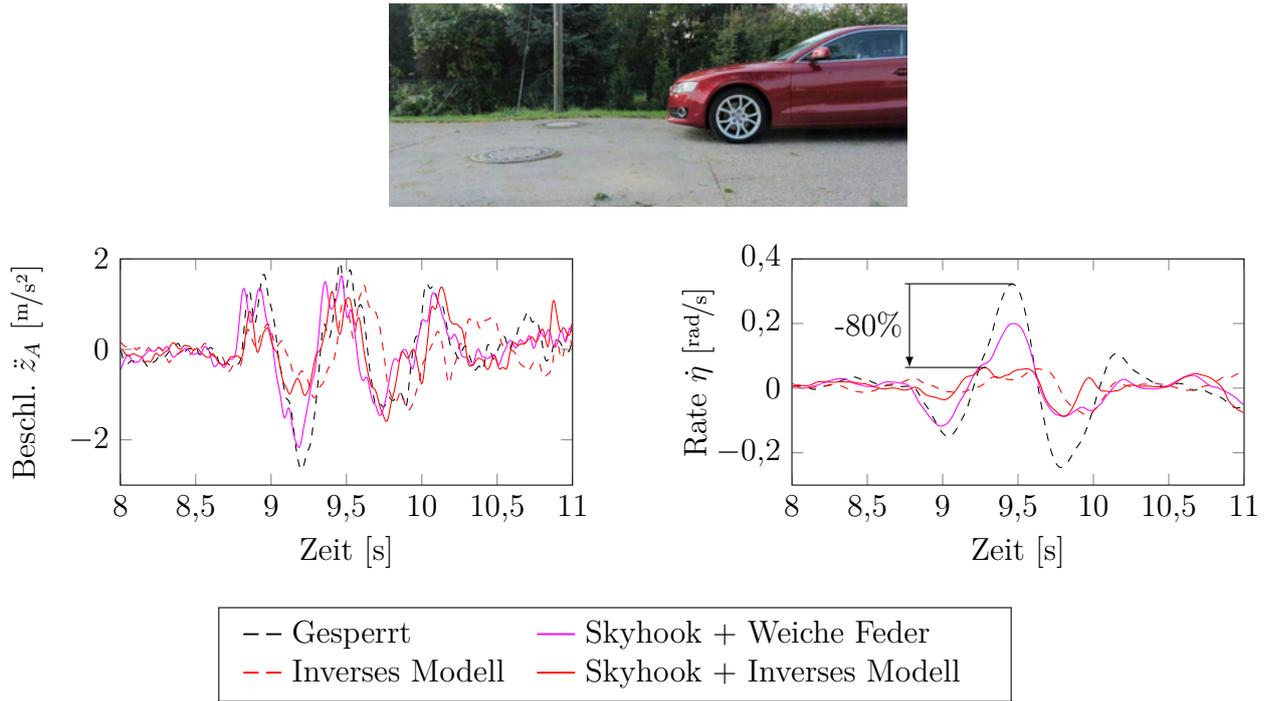


Abbildung 6.14: Reduktion Hubbeschleunigung und Nickrate bei Überfahrt einer Fahrbahnwelle mit 20 km/h und Kamera

zur Plausibilisierung des Höhenprofils aus der Umfeldsensorik wird auch bei Mercedes [25, 136] durchgeführt. Es wird in den Veröffentlichungen jedoch nicht darauf eingegangen, mit welchen Algorithmen dies durchgeführt wird.

Als im Serienfahrzeug vorhandene Messgrößen werden die Nickrate η , die Wankrate $\dot{\omega}$, die Hubbeschleunigung \ddot{z}_A , die vier Radeinfederungen $l_{z,ii}$ und gegebenenfalls der Aktorstellweg \underline{s} der Federfußpunktverstellung angenommen. Es wird ein Störgrößenbeobachter unter Verwendung der Systemdynamik vorgeschlagen, wofür das reduzierte Gesamtfahrzeugmodell (2.14) verwendet wird. Dieses Modell hat die Struktur

$$\dot{\underline{x}} = \mathbf{A}\underline{x} + \mathbf{B}_u \begin{pmatrix} \underline{s} \\ \underline{f} \end{pmatrix} + \mathbf{B}_w \begin{pmatrix} \underline{z}_S \\ \underline{\dot{z}}_S \end{pmatrix} \quad \underline{x}(0) = \underline{x}_0 \quad (6.6)$$

mit den sechs Zuständen $\underline{x} = (z_A \ \eta \ \omega \ \dot{z}_A \ \dot{\eta} \ \dot{\omega})^T$. Soll die Störgröße $\underline{w} = (\underline{z}_S \ \underline{\dot{z}}_S)^T$ beobachtet werden, muss diese als Zustand formuliert und eine Stördynamik definiert werden:

$$\dot{\underline{w}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \mathbf{0}_4 & \mathbf{I}_4 \\ \mathbf{0}_4 & \mathbf{0}_4 \end{pmatrix}}_{\mathbf{W}} \underline{w} \quad \underline{w}(0) = \underline{w}_0 \quad (6.7)$$

Dies ergibt folgende Systemdarstellung mit den zusätzlichen acht Zuständen der Straßeninformation:

$$\begin{pmatrix} \dot{\underline{x}} \\ \dot{\underline{w}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_w \\ \mathbf{0}_{8 \times 6} & \mathbf{W} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{x} \\ \underline{w} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{B}_u \\ \mathbf{0}_{8 \times 7} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{s} \\ \underline{f} \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

Da die Radeinfederungssensoren aufgrund von Zuladung oder Kurvenfahrt oft mit Abweichungen behaftet sind, wird vorgeschlagen die Signale der Radeinfederungssensoren einmal abzuleiten und dies zusammen mit der Nick- und der Wankrate sowie der Hubbeschleunigung als Korrektursignal eines Kalman-Filters [137] zu verwenden. Der entsprechende Ausgang des Systems (6.8) berechnet sich wie folgt:

$$\begin{pmatrix} \dot{\eta} \\ \dot{\omega} \\ \ddot{z}_A \\ \dot{l}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{I}_2 & \mathbf{0}_{2 \times 4} & \mathbf{0}_{2 \times 4} \\ & \mathbf{A}_{4 \times \dots} & & \mathbf{B}_{w,4 \times \dots} & \\ \mathbf{0}_{4 \times 3} & \mathbf{T}_G^T & & \mathbf{0}_{4 \times 4} & -\mathbf{I}_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{x} \\ \underline{w} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 7} \\ \mathbf{B}_{u,4 \times \dots} \\ \mathbf{0}_{4 \times 7} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{s} \\ \underline{f} \end{pmatrix} \quad (6.9)$$

Die Geometriematrix \mathbf{T}_G wurde in Gleichung (2.1) eingeführt. Die Notation $\bullet_{4 \times \dots}$ bezeichnet alle Einträge der vierten Zeile der Matrix \bullet .

Es wird eine Prädiktion basierend auf dem Systemmodell (6.8) durchgeführt, diese mit den genannten Messgrößen korrigiert und somit werden die Zustände der Straßenhöhe geschätzt. Das System ist zeitinvariant, die Kovarianzmatrizen \mathbf{Q} und \mathbf{R} sind konstant und die Kalman-Verstärkung konvergiert nach wenigen Zeitschritten. Diese kann somit einmal im Voraus berechnet werden. Die so geschätzten Straßenhöhenwerte unter den Rädern weisen eine niederfrequente Abweichung auf. Dies ist unproblematisch, falls die interessierenden Frequenzen zwischen 0,5 Hz und 5 Hz des Höhenprofils richtig abgebildet werden.

Als weitere Variante wird eine rein signalbasierte modellfreie Schätzung des Straßenhöhenprofils untersucht. Hierfür wird die Vertikalbewegung des Fahrzeugaufbaus über dem jeweiligen Rad aus Hubbeschleunigung, Nick- und Wankrate über Integration berechnet und hiervon die Radeinfederung abgezogen. Die gemessenen Beschleunigungen und Drehraten werden vor der Integration jeweils mit einem Hochpass gefiltert. Das geschätzte Straßenhöhenprofil $z_{S,vi}$ und $z_{S,vr}$ berechnet sich zu

$$z_{S,vi} = \int \int \ddot{z}_A - \int \dot{\eta} \cdot l_v \pm \int \dot{\omega} \cdot t_v - l_{z,vi}. \quad (6.10)$$

Dieser Berechnungsansatz ist unabhängig von der Aktoransteuerung und von Fahrzeugparametern und das berechnete Höhenprofil ist aufgrund der Hochpassfilterung ohne niederfrequente Abweichung.

In Abbildung 6.15 sind im ersten Diagramm die Ergebnisse der vorgeschlagenen Methoden zur Schätzung des Straßenhöhenprofils unter den Rädern für eine Fahrt mit aktiver vorausschauender Regelung über die dreieckförmige 2 m lange und 4 cm hohe Schwelle gezeigt. Die Kontur der Schwelle kann auch der Abbildung 4.2c entnommen werden. Durch die vorausschauende Regelung wird der Aufbau nahezu ruhig gehalten. Es wird sichtbar, dass der Störgrößenbeobachter einen niederfrequenten Trend aufweist, da keine Hochpassfilterung der Signale durchgeführt wird. Die Hochpassfilterung wird in einem zweiten Schritt durch phasenfreies Filtern über das gesamte Signal durchgeführt, um eine möglichst genaue Referenz der überfahrenen Straße zu erzeugen. Im Diagramm links unten wird sichtbar, dass das Ergebnis des Störgrößenbeobachters nach der Filterung mit einem 0,5 Hz-Hochpass gut mit der wirklichen Kontur übereinstimmt. Sowohl mit dem Störgrößenbeobachter als auch mit dem signalbasierten Ansatz wird die Schwelle mit einer Höhe von 5 cm und einer Dauer von 0,25 s erkannt. Dies entspricht 2,08 m bei der gegebenen Geschwindigkeit.

In Abbildung 6.16 ist dieselbe Fahrt mit gesperrter Aktorik abgebildet, hierbei bewegt sich der Fahrzeugaufbau deutlich mehr. Es wird sichtbar, dass in diesem Fall der signalbasierte

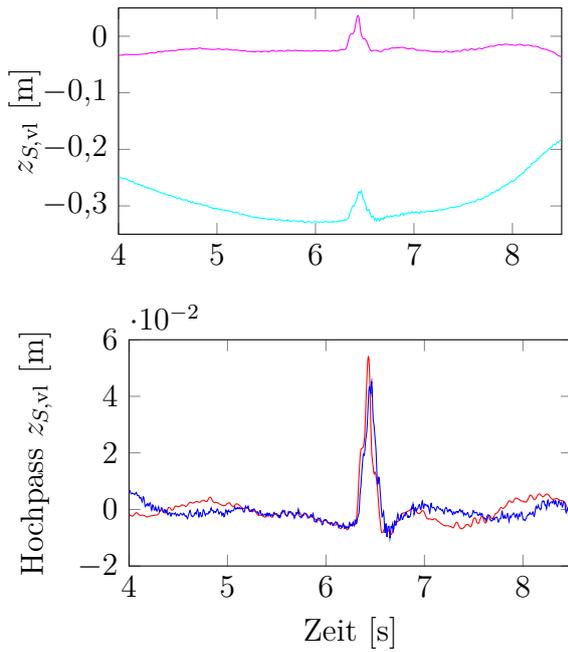


Abbildung 6.15: Straßenbeobachter; Überfahrt Schwelle mit 30 km/h und vorausschauender Regelung

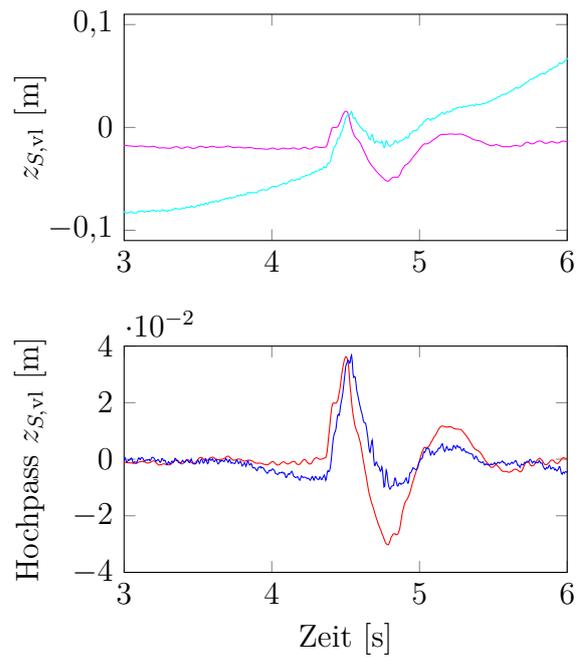


Abbildung 6.16: Straßenbeobachter; Überfahrt Schwelle mit 30 km/h und gesperrter Aktorik



Ansatz ungünstiger abschneidet und der Störgrößenbeobachter nach der Filterung die Kontur der Schwelle korrekt erfasst. Mit dem Störgrößenbeobachter wird eine Höhe von 4 cm und eine Dauer von 0,3s, dies entspricht 2,5 m, erkannt.

In Abbildung 6.17 sind die Ergebnisse einer Testfahrt über die Straße mit der 30 cm hohen und 45 m langen Bodenwelle mit 70 bis 120 km/h und gesperrter Aktorik gezeigt. Es wird das Beobachtersignal wiederum nach der Fahrt offline mit einem 0,5 Hz-Hochpass phasenfrei gefiltert. Ebenso das Referenzprofil, welches über das im Fahrzeug verbaute GPS-basierte System zugeordnet werden kann. Wie diese Zuordnung durchgeführt wird, wurde in Abschnitt 2.2.1 erläutert. Zwischen gefiltertem Beobachtersignal und gefiltertem Referenzprofil ist eine Übereinstimmung mit hoher Güte festzustellen.

Diese Methode der phasenfreien Hochpassfilterung des Beobachtersignals offline nach der Fahrt eignet sich vor allem, um nach der Messfahrt eine Referenz für das aus den Umfeldsensordaten generierte Höhenprofil zu erhalten. Zur Plausibilisierung des von Umfeldsensoren gemessenen Höhenprofils online während der Fahrt kann ein gewöhnlicher Hochpassfilter verwendet werden.

Fazit: Es wurde gezeigt, dass mit einem Beobachter die interessierenden Frequenzanteile der Straße hochgenau geschätzt werden können und somit eine geeignete Methode zur Validierung des Straßenhöhenprofils zur Verfügung steht.

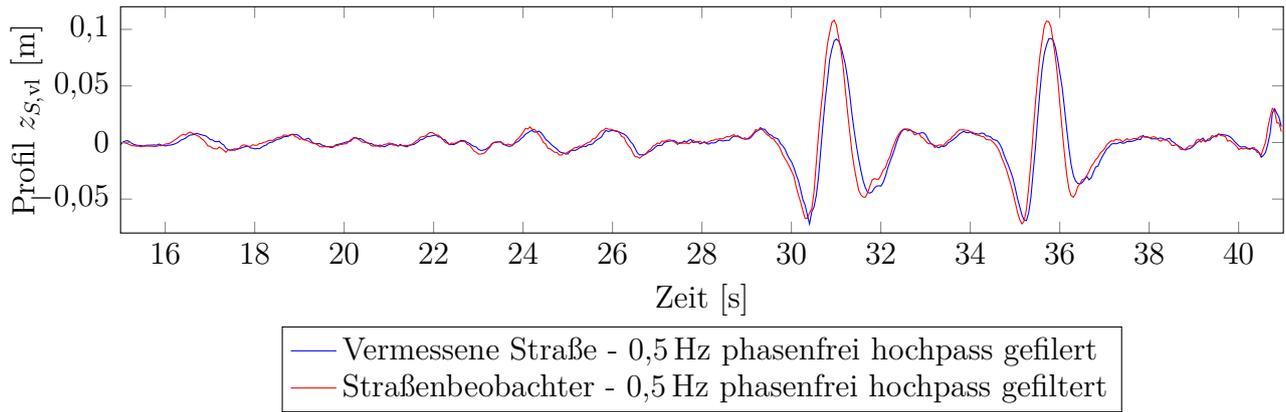


Abbildung 6.17: Beobachtetes Höhenprofil auf der Strecke mit der 30 cm hohen und 45 m langen Bodenwelle; Fahrgeschwindigkeit zwischen 70 und 120 km/h

7 Schlussfolgerung und Zusammenfassung

7.1 Bewertung der entwickelten Konzepte und Empfehlung

Fahrwerksregelung

Es wurden in dieser Arbeit zwei prinzipielle Gesamtkonzepte der vorausschauenden Fahrwerksregelung vorgeschlagen. Für das erste Gesamtkonzept wurde in mehreren Ausprägungen eine modellprädiktive Regelung hergeleitet.

Bei der modellprädiktiven Regelung wurden explizit der beschränkte Verstellweg und die beschränkte Verstellgeschwindigkeit einer Federfußpunktverstellung berücksichtigt. Es wurde in der Fahrzeugimplementierung gezeigt, dass durch die Optimierung das Fahrzeug bei Überfahrt einer hohen Bodenwelle angehoben wird, sobald die Unebenheit in Sicht ist, um den verfügbaren Verstellweg der Aktoren zum Anziehen der Räder zu erhöhen. Des Weiteren werden bei vorhandenem genauen Straßensignal lange Bodenwellen mit beispielsweise 120 km/h vollständig kompensiert.

Es wird trotzdem das zweite vorgeschlagene Gesamtkonzept, bestehend aus einer Vorsteuerung aus den vorausschauend bekannten Straßenhöhenwerten kombiniert mit einem *Skyhook*-Regler, für eine serienmäßige Umsetzung empfohlen.

Die Komforterrhöhung liegt in einem ähnlichen Bereich wie mit der modellprädiktiven Regelung, falls das Straßensignal geeignet vorbearbeitet wird. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in der getrennten Abstimbarkeit und Funktionsweise der Module zur Wank- und Nickabstützung, zur Niveauregulierung, des Weiteren zur Komforterrhöhung ohne Vorausschau und mit Vorausschau. Die Vorsteuerung mit inversem Modell gleicht im Gegensatz zu der gesamtheitlichen Optimierung der modellprädiktiven Regelung nur Anregungen aus dem von Umfoldsensoren gemessenen Höhenprofil aus.

Erstellung des Straßenhöhenprofils

Für dieses modulare Konzept wird das Straßenhöhenprofil derart vorbearbeitet, dass nur auszugleichende Frequenzen enthalten sind. Für die genutzte phasenfreie Filterung wird das Höhenprofil für einen Bereich von der Vergangenheit bis zur Vorausschauweite erstellt. Diese Höhenkarte kann in jedem Zeitschritt in variiert orientierter Orientierung im Koordinatensystem liegen. Wichtig ist, dass das Höhenprofil der Kontur der Straße in diesem Bereich entspricht.

Die Verdrehung wird durch die örtliche Hochpassfilterung eliminiert. Es wurden mehrere Koordinatensysteme vorgeschlagen, die Sensordaten zu akkumulieren. Entweder in einem inertialen Koordinatensystem, in einem sensorfesten Koordinatensystem oder in einem profilbezogenen Koordinatensystem. Des Weiteren ist ein Ansatz aus der Literatur bekannt, bei welchem die neuen Sensordaten in die bereits erstellte Höhenkarte transformiert werden. Mit der entwickelten Weiterverarbeitung der Daten führen diese Methoden zum prinzipiell gleichen Ergebnis. Aufgrund der einfacheren Durchführbarkeit wird empfohlen, die vergangenen Daten in die ak-

tuellen Sensordaten zu transformieren, entweder in einem sensorfesten oder profilbezogenen Koordinatensystem.

Darauffolgend werden die Sensordaten redundant gemessener Straßenabschnitte akkumuliert. Hier wird ein gewichtetes arithmetisches Mittel, welches eine konstante Verteilung der Standardabweichung der Sensormessung über der Entfernung berücksichtigt, verwendet. Für das Gütemaß wird die Varianz der wirklichen Messwerte verwendet, da diese durch Wetterbedingungen von der ursprünglich festgelegten Standardabweichung abweichen können.

Ein wichtiger Punkt ist die Berechnung der Transformation der Sensordaten von einem Zeitschritt zum nächsten aufgrund der Bewegung des karosseriefesten Sensors. Es wird aufbauend auf einer bestehenden Arbeit das Verfahren weiterverfolgt, die Sensordaten zweier Zeitschritte im Sinne kleinster Fehlerquadrate mit einem *Matching* zur Übereinstimmung zu bringen. Hierbei werden Differenzwerte für Huben, Nicken und Wanken des Höhenprofils durch Lösen eines Optimierungsproblems berechnet. Es wird zudem empfohlen, die im Fahrzeug gemessenen Beschleunigungen und Drehraten sowie die Fahrgeschwindigkeit zur Ermittlung einer guten ersten Schätzung und zur Plausibilisierung des *Matching*-Ergebnisses zu verwenden.

Bearbeitung des Straßenhöhenprofils

Ein weiterer zentraler Aspekt, welcher zum ersten Mal in dieser Arbeit erwähnt wird, besteht in der Extraktion von definierten Unebenheiten aus dem Straßenhöhenprofil, um an diesen Stellen die vorausschauende Ansteuerung durchzuführen. Dies ist energetisch günstig und ein Vorteil gegenüber einer Regelung ohne Vorausschau, da die vorausschauende Funktion nur bei einer Unebenheit, bei welcher der Fahrkomfort spürbar verbessert werden kann, ein Stellsignal generiert.

Es wurden drei Konzepte zur Erkennung definierter Unebenheiten entwickelt. Der Vergleich mit definierten Geometrien ist robust und eignet sich für Unebenheiten, die gesamtheitlich im Sensorsichtbereich gesehen werden. Die Überprüfung der Amplitude ist ebenfalls robust und hat gute Ergebnisse erzielt. Das entwickelte Verfahren zum Suchen nach Extrema der ersten und zweiten Ableitung des gefilterten Höhenprofils ist anfälliger für Fehlerkennungen, jedoch ein allgemeingültiger Ansatz, da anhand der Krümmung im Straßensignal auch Unebenheiten deutlich länger als der Sensorsichtbereich erkannt werden.

Die schlussendliche Auswahl der geeigneten Methode muss im Fahrzeug bei der gegebenen Sensorik und unterschiedlichen Umweltbedingungen ermittelt werden. Es ist auch eine Kombination mehrerer Methoden denkbar.

Grundarchitektur der vorgeschlagenen Algorithmen

Bei der vorausschauenden Fahrwerksregelung ist es notwendig, die Aktoransteuerung mit möglichst wenig Zeitverlust, beginnend ab der Umfeldsensormessung, durchzuführen. Dies wird erschwert, da große Datenmengen verarbeitet und zwischen Steuergeräten ausgetauscht werden müssen. Die auftretende Latenz kann zwar kompensiert werden, indem das Straßenhöhenprofil weiter vorne abgetastet wird, jedoch verringert sich die nutzbare Vorausschau, da das Fahrzeug während der Latenz einen Teil der Strecke schon überfährt.

Des Weiteren ist das erstellte Höhenprofil bis ca. 4 m vor der Vorderachse am genauesten, da dort der Abschattungsbereich der Motorhaube beginnt und schon sämtliche Messungen vorheriger Zeitschritte in die Höhenwerte integriert sind. Bei einer großen Latenz und schneller

Fahrgeschwindigkeit müssen somit ungenauere Höhenwerte, welche ursprünglich weiter entfernt in der Karte akkumuliert wurden, als Eingang der Fahrwerksansteuerung verwendet werden.

Es muss also neben einer kurzen Berechnungszeit darauf geachtet werden, möglichst wenige Daten über den Bus von einem Steuergerät zum nächsten zu übertragen, da dies bei derart großen Datenmengen sequentiell erfolgen müsste und somit eine zusätzliche Latenz erzeugen würde.

7.2 Zusammenfassung

Ausgehend vom Stand der Technik wird in dieser Arbeit eine Modellbildung der Vertikaldynamik eines Gesamtfahrzeugmodells durchgeführt. Hierbei werden ein semi-aktives Fahrwerk, ein Fahrwerk mit Federfußpunktverstellung und passivem Dämpfer, ein Fahrwerk mit Federfußpunktverstellung kombiniert mit einem Verstelldämpfer sowie ein vollaktives Fahrwerk betrachtet. Es wird vorgeschlagen, das reduzierte Fahrzeugmodell zu invertieren, indem eine zusätzliche Gleichung zum Eliminieren der Verspannung eingeführt wird. Die vertikaldynamischen Modelle werden mit den Messdaten einer Testfahrt validiert. Hierfür wird eine Umgebung aufgebaut, um eine Zuordnung der Positionsmessung eines im Fahrzeug verbauten GPS-basierten Systems zu dem hochgenau vermessenen Höhenprofil einiger Teststrecken durchzuführen.

Eine lineare modellprädiktive Regelung zur vorausschauenden Optimierung der Aktorstellgrößen wird unter Berücksichtigung der Aktorbeschränkungen formuliert. Für ein semi-aktives Fahrwerk wird als Referenzlösung zusätzlich eine nichtlineare modellprädiktive Regelung entworfen. In einem zweiten Ansatz werden Trajektorien für Huben, Nicken und Wanken, formuliert als B-Splines, über dem Vorausschauhorizont optimiert. Das Ziel besteht ebenfalls in einer möglichst geringen Aufbaubeschleunigung, mit dem Vorteil der geringeren Anzahl an Optimierungsvariablen, da drei Aufbaufreiheitsgrade und keine vier Stellgrößen optimiert werden. Der dritte entwickelte Ansatz besteht aus einer Vorsteuerung, berechnet aus den vorausschauend gemessenen Straßenhöhenwerten, mit einem inversen Modell. Hierbei muss das Straßensignal vorbearbeitet werden, um die Beschränkungen der Stellgrößen nicht zu überschreiten. Diese Vorsteuerung wird mit einem *Skyhook*-Regler kombiniert.

Es wird in dieser Arbeit ein gewünschtes Höhenprofil als Reglereingang definiert, entstehend aus einer phasenfreien Filterung des absoluten Höhenprofils mit einem Hochpass- sowie einem Tiefpassfilter. Darauffolgend werden unterschiedliche Koordinatensysteme, inertial, sensorfest und profilbezogen, vorgeschlagen, um die Entfernungsmessungen des im Fahrzeug mitbewegten Sensors zu einem Höhenprofil zu akkumulieren. Zur Transformation der Sensordaten aufgrund der Karosseriebewegung wird ein bestehender Ansatz weiterentwickelt, indem die Sensordaten zweier Zeitschritte zur Übereinstimmung gebracht werden. Um aus dem, sich aufgrund der Fahrzeugeigenbewegung im Koordinatensystem von Zeitschritt zu Zeitschritt verdrehenden Höhenprofil das eingangs definierte gewünschte Höhenprofil zu erhalten, wird in dieser Arbeit eine Hochpassfilterung des Höhenprofils durchgeführt. Des Weiteren werden drei Ansätze zur Extraktion von definierten Unebenheiten aus dem Straßenhöhenprofil entwickelt, und dort die vorausschauende Ansteuerung durchzuführen.

In einer Simulationsumgebung werden bei der Überfahrt einer definierten Straße Entfernungsmessungen eines spezifizierten karosseriefesten Sensors zur Straße berechnet. Somit wird die Erstellung des Straßenhöhenprofils und die darauffolgende Fahrwerksansteuerung im geschlossenen Kreis simuliert.

In einem ausführlichen Simulationskapitel wird gezeigt, dass die modellprädiktive Regelung durch explizite Berücksichtigung der Aktorbeschränkungen das Fahrzeug vor Überfahrt einer hohen Unebenheit anhebt, um den nutzbaren Aktorstellweg zu vergrößern. Des Weiteren werden die Aktoren bei Überfahrt eines Einzelhindernisses, falls nötig, proaktiv angezogen. Dieselben Effekte werden mit der entwickelten Vorsteuerung und einer geeigneten Aufbereitung des Höhenprofils erzielt.

Für schnellere Geschwindigkeiten kann eine langsam aktive Federfußpunktverstellung nur Bodenwellen ausgleichen, welche länger als der Sensorsichtbereich sind. Wird ein inertialfest erstelltes Höhenprofil als Eingangssignal der modellprädiktiven Regelung verwendet, reicht eine Vorausschau von 8 m vor der Vorderachse aus, um Bodenwellen in Sinusform mit 35 m Periodenlänge auszugleichen. Auch das empfohlene Gesamtkonzept basierend aus Vorsteuerung und *Skyhook*-Regler ist so entwickelt, dass bei genügend genauen Sensordaten im gesamten Geschwindigkeitsbereich Unebenheiten, welche im Frequenzbereich der Aktorik liegen, kompensiert werden.

Abschließend lässt sich sagen, dass für eine Federfußpunktverstellung bei genauen Sensordaten das Potential zur Komfortverbesserung gegenüber einem Regler ohne Vorausschau deutlich vorhanden ist. Bei einem semi-aktiven System ist das Potential deutlich geringer, da sich der Dämpfer bei einem Regler ohne Vorausschau standardmäßig in der Weichkennung befindet. Dies ist die beste Möglichkeit, eine Unebenheit zu überfahren. Bei der Kombination einer Federfußpunktverstellung mit einem Verstelldämpfer besteht der Hauptvorteil darin, dass ein weicherer Dämpfer verwendet werden kann. Dieser wird verhärtet, falls es für die Fahrdynamik nötig ist.

Für die Fahrzeugimplementierung steht ein Testfahrzeug mit Federfußpunktverstellung zur Verfügung. Hierbei wird zunächst gezeigt, dass bei genauem Höhenprofil, eingespielt mithilfe eines GPS-basierten Systems im Fahrzeug, bis 160 km/h der Fahrzeugaufbau bei der Überfahrt von Bodenwellen nahezu in Ruhe gehalten wird.

Des Weiteren werden Verfahren entwickelt, um das bereits überfahrene Höhenprofil anhand der Fahrzeugreaktion hochgenau zu ermitteln und somit die Umfeldsensormessung zu validieren. Unter Verwendung seriennaher Sensorik und des neu entwickelten Gesamtkonzepts von der Erstellung des Straßenhöhenprofils bis zur Fahrwerksansteuerung wurde in dieser Arbeit eine deutlich spürbare Komfortverbesserung über definierte Unebenheiten dargestellt.

A Erweitertes Gütemaß für optimalen vorausschauenden Regler

Der Ausgang des Systems

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A}\underline{x} + \underline{B}_u\underline{u} + \underline{B}_w\underline{w} \quad \underline{x}(t_0) = \underline{x}_0 \quad (\text{A.1})$$

berechnet sich allgemein zu $\underline{y} = \underline{C}\underline{x} + \underline{D}_u\underline{u} + \underline{D}_w\underline{w}$. Einsetzen dieses Ausgangs in ein quadratisches Gütemaß

$$\tilde{J} = \frac{1}{2}\underline{x}^T(T)\underline{P}_T\underline{x}(T) + \frac{1}{2}\int_{t=0}^T \underline{y}^T \underline{Q}\underline{y} + \underline{u}^T \underline{R}\underline{u} dt \quad (\text{A.2})$$

und Zusammenfassen der Terme sowie Eliminieren von konstanten Summanden führt zu

$$\tilde{J} = \frac{1}{2}\underline{x}^T(T)\underline{P}_T\underline{x}(T) + \frac{1}{2}\int_0^T \underline{x}^T \underline{Q}_1 \underline{x} + \underline{u}^T \underline{R}_1 \underline{u} + 2\underline{x}^T \underline{N} \underline{u} + 2\underline{x}^T \underline{Q}_2 \underline{w} + 2\underline{u}^T \underline{N}_2 \underline{w} dt, \quad (\text{A.3})$$

mit $\underline{Q}_1 = \underline{C}^T \underline{Q} \underline{C}$, $\underline{R}_1 = \underline{D}_u^T \underline{Q} \underline{D}_u + \underline{R}$, $\underline{N} = \underline{C}^T \underline{Q} \underline{D}_u$, $\underline{Q}_2 = \underline{C}^T \underline{Q} \underline{D}_w$ und $\underline{N}_2 = \underline{D}_u^T \underline{Q} \underline{D}_w$. Des Weiteren werden folgende Matrizen definiert:

$$\begin{aligned} \underline{A}_n &= \underline{A} - \underline{B}_u \underline{R}_1^{-1} \underline{N}^T \\ \underline{B}_n &= \underline{B}_w - \underline{B}_u \underline{R}_1^{-1} \underline{N}_2 \\ \underline{Q}_n &= \underline{Q}_1 - \underline{N} \underline{R}_1^{-1} \underline{N}^T \\ \underline{N}_n &= \underline{Q}_2 - \underline{N} \underline{R}_1^{-1} \underline{N}_2 \end{aligned}$$

Eine analoge Herleitung zu Abschnitt 1.2 führt auf folgende optimale Stellgröße:

$$\underline{u}(t) = -\underline{R}_1^{-1} \left(\left(\underline{B}_u^T \bar{\underline{P}} + \underline{N}^T \right) \underline{x}(t) + \underline{B}_u^T \underline{r}(t) + \underline{N}_2 \underline{w}(t) \right) \quad (\text{A.4})$$

$\bar{\underline{P}}$ ergibt sich aus der algebraischen Ricatti-Gleichung:

$$\mathbf{0} = \bar{\underline{P}} \underline{A}_n + \underline{A}_n^T \bar{\underline{P}} - \bar{\underline{P}} \underline{B}_u \underline{R}_1^{-1} \underline{B}_u^T \bar{\underline{P}} + \underline{Q}_n \quad (\text{A.5})$$

Die Bestimmungsgleichung für $\underline{r}(t)$ lautet:

$$\begin{aligned} \underline{r}(t) &= \int_0^T e^{\underline{A}_c^T \sigma} \left(\bar{\underline{P}} \underline{B}_n + \underline{N}_n \right) \underline{w}(t + \sigma) d\sigma \\ \underline{A}_c &= \underline{A}_n - \underline{B}_u \underline{R}_1^{-1} \underline{B}_u^T \bar{\underline{P}} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

B Berechnung der Matrizen zur Prädiktion der Systemzustände

Es ist eine lineare, zeitdiskrete Zustandsraumdarstellung in MIMO Form mit dem bekannten Störeingang \underline{w} gegeben:

$$\begin{aligned}\underline{x}[k+1] &= \mathbf{\Phi}\underline{x}[k] + \mathbf{\Gamma}_u\underline{u}[k] + \mathbf{\Gamma}_w\underline{w}[k] \\ \underline{y}[k] &= \mathbf{C}\underline{x}[k] + \mathbf{D}_u\underline{u}[k] + \mathbf{D}_w\underline{w}[k] \\ \underline{x}[k] &= \underline{x}_k \quad \underline{u}[k] = \underline{u}_k\end{aligned}\tag{B.1}$$

Es folgt für den folgenden Zeitschritt:

$$\begin{aligned}\underline{x}[k+2] &= \mathbf{\Phi}(\mathbf{\Phi}\underline{x}[k] + \mathbf{\Gamma}_u\underline{u}[k] + \mathbf{\Gamma}_w\underline{w}[k]) + \mathbf{\Gamma}_u\underline{u}[k+1] + \mathbf{\Gamma}_w\underline{w}[k+1] \\ \underline{y}[k+1] &= \mathbf{C}(\mathbf{\Phi}\underline{x}[k] + \mathbf{\Gamma}_u\underline{u}[k] + \mathbf{\Gamma}_w\underline{w}[k]) + \mathbf{D}_u\underline{u}[k+1] + \mathbf{D}_w\underline{w}[k+1]\end{aligned}\tag{B.2}$$

Für allgemein p Prädiktionsschritte des Ausgangs \underline{y} folgt

$$\begin{aligned}\hat{\underline{y}} &= \hat{\mathbf{\Phi}}\underline{x}[k] + \hat{\mathbf{\Gamma}}_{u,k}\underline{u}[k] + \hat{\mathbf{\Gamma}}_u\hat{\underline{u}} + \hat{\mathbf{\Gamma}}_w\hat{\underline{w}} \\ \hat{\underline{y}} &= \begin{pmatrix} \underline{y}[k+1] \\ \vdots \\ \underline{y}[k+p] \end{pmatrix} \quad \hat{\underline{u}} = \begin{pmatrix} \underline{u}[k+1] \\ \vdots \\ \underline{u}[k+p] \end{pmatrix} \quad \hat{\underline{w}} = \begin{pmatrix} \underline{w}[k] \\ \vdots \\ \underline{w}[k+p] \end{pmatrix},\end{aligned}\tag{B.3}$$

mit

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{\Phi}} &= \begin{pmatrix} \mathbf{C}\mathbf{\Phi} \\ \mathbf{C}\mathbf{\Phi}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{\Phi}^p \end{pmatrix} \quad \hat{\mathbf{\Gamma}}_{u,k} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}\mathbf{\Gamma}_u \\ \mathbf{C}\mathbf{\Phi}\mathbf{\Gamma}_u \\ \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{\Phi}^{p-1}\mathbf{\Gamma}_u \end{pmatrix} \\ \hat{\mathbf{\Gamma}}_u &= \begin{pmatrix} \mathbf{D}_u & & & & \\ \mathbf{C}\mathbf{\Gamma}_u & \mathbf{D}_u & & & \\ \mathbf{C}\mathbf{\Phi}\mathbf{\Gamma}_u & \mathbf{C}\mathbf{\Gamma}_u & \mathbf{D}_u & & \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \\ \mathbf{C}\mathbf{\Phi}^{p-2}\mathbf{\Gamma}_u & \mathbf{C}\mathbf{\Phi}^{p-3}\mathbf{\Gamma}_u & \dots & \mathbf{C}\mathbf{\Gamma}_u & \mathbf{D}_u \end{pmatrix} \\ \hat{\mathbf{\Gamma}}_w &= \begin{pmatrix} \mathbf{C}\mathbf{\Gamma}_w & \mathbf{D}_w & & & \\ \mathbf{C}\mathbf{\Phi}\mathbf{\Gamma}_w & \mathbf{C}\mathbf{\Gamma}_w & \mathbf{D}_w & & \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \\ \mathbf{C}\mathbf{\Phi}^{p-1}\mathbf{\Gamma}_w & \mathbf{C}\mathbf{\Phi}^{p-2}\mathbf{\Gamma}_w & \dots & \mathbf{C}\mathbf{\Gamma}_w & \mathbf{D}_w \end{pmatrix}.\end{aligned}\tag{B.4}$$

C Herleitung der B-Spline Darstellung in Matrix Form

Es wird die Herleitung der Matrixnotation kubischer B-Splines aus der Rekursionsformel von Cox und de Boor durchgeführt. Die Rekursionsformel lautet:

$$\begin{aligned}
 b_{j,0}(t) &:= \begin{cases} 1, & \text{für } t_j \leq t < t_{j+1} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \\
 b_{j,n}(t) &:= \frac{t-t_j}{t_{j+n}-t_j} b_{j,n-1}(t) + \frac{t_{j+n+1}-t}{t_{j+n+1}-t_{j+1}} b_{j+1,n-1}(t) \\
 & \quad j = 0, \dots, m-n-2
 \end{aligned} \tag{C.1}$$

Für kubische B-Splines mit dem Grad $n = 3$ ergibt sich hieraus eine stückweise Definition der Basisfunktionen in vier Abschnitten:

$$b_{j,3} = \begin{cases} \frac{t-t_j}{t_{j+3}-t_j} \frac{t-t_j}{t_{j+2}-t_j} \frac{t-t_j}{t_{j+1}-t_j} & \text{für } t_j \leq t \leq t_{j+1} \\ \frac{t-t_j}{t_{j+3}-t_j} \left(\frac{t-t_j}{t_{j+2}-t_j} \frac{t_{j+2}-t}{t_{j+2}-t_{j+1}} + \frac{t_{j+3}-t}{t_{j+3}-t_{j+1}} \frac{t-t_{j+1}}{t_{j+2}-t_{j+1}} \right) & \text{für } t_{j+1} \leq t \leq t_{j+2} \\ + \frac{t_{j+4}-t}{t_{j+4}-t_{j+1}} \frac{t-t_{j+1}}{t_{j+3}-t_{j+1}} \frac{t-t_{j+1}}{t_{j+2}-t_{j+1}} & \\ \frac{t-t_j}{t_{j+3}-t_j} \frac{t_{j+3}-t}{t_{j+3}-t_{j+1}} \frac{t_{j+3}-t}{t_{j+3}-t_{j+2}} & \text{für } t_{j+2} \leq t \leq t_{j+3} \\ + \frac{t_{j+4}-t}{t_{j+4}-t_{j+1}} \left(\frac{t-t_{j+1}}{t_{j+3}-t_{j+1}} \frac{t_{j+3}-t}{t_{j+3}-t_{j+2}} + \frac{t_{j+4}-t}{t_{j+4}-t_{j+2}} \frac{t-t_{j+2}}{t_{j+3}-t_{j+2}} \right) & \\ \frac{t_{j+4}-t}{t_{j+4}-t_{j+1}} \frac{t_{j+4}-t}{t_{j+4}-t_{j+2}} \frac{t_{j+4}-t}{t_{j+4}-t_{j+3}} & \text{für } t_{j+3} \leq t \leq t_{j+4} \end{cases} \tag{C.2}$$

Ein kubischer B-Spline z ist als Summe der mit den Kontrollpunkten P_i multiplizierten Basisfunktionen b_i definiert: $z(t) = \sum_{i=0}^{m-5} P_i b_i(t)$ $t \in [t_3, t_{m-4}]$. Dies wurde in Abbildung 3.3 veranschaulicht. Mit der Definition der Basisfunktion (C.2) ergibt sich die stückweise Definition des B-Splines:

$$\begin{aligned}
 z_i &= P_{i-1} \cdot b_{j,3} \text{ für } t_{j+3} \leq t \leq t_{j+4} \Big|_{j=i-1} + P_i \cdot b_{j,3} \text{ für } t_{j+2} \leq t \leq t_{j+3} \Big|_{j=i} \\
 & \quad + P_{i+1} \cdot b_{j,3} \text{ für } t_{j+1} \leq t \leq t_{j+2} \Big|_{j=i+1} + P_{i+2} \cdot b_{j,3} \text{ für } t_j \leq t \leq t_{j+1} \Big|_{j=i+2}
 \end{aligned} \tag{C.3}$$

Hieraus folgt die Matrixnotation

$$z_i(t) = \begin{pmatrix} \mathcal{A}_i(t) & \mathcal{B}_i(t) & \mathcal{C}_i(t) & \mathcal{D}_i(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \end{pmatrix} \quad (\text{C.4})$$

$$t \in [t_{i+2}, t_{i+3}] \quad i \in \{1, 2, \dots, m-7\},$$

mit

$$\mathcal{A}_i(t) = \frac{t_{i+3} - t}{t_{i+3} - t_i} \frac{t_{i+3} - t}{t_{i+3} - t_{i+1}} \frac{t_{i+3} - t}{t_{i+3} - t_{i+2}} \quad (\text{C.5})$$

$$\mathcal{B}_i(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+3} - t_i} \frac{t_{i+3} - t}{t_{i+3} - t_{i+1}} \frac{t_{i+3} - t}{t_{i+3} - t_{i+2}} + \frac{t_{i+4} - t}{t_{i+4} - t_{i+1}} \left(\frac{t - t_{i+1}}{t_{i+3} - t_{i+1}} \frac{t_{i+3} - t}{t_{i+3} - t_{i+2}} + \frac{t_{i+4} - t}{t_{i+4} - t_{i+2}} \frac{t - t_{i+2}}{t_{i+3} - t_{i+2}} \right) \quad (\text{C.6})$$

$$\mathcal{C}_i(t) = \frac{t - t_{i+1}}{t_{i+4} - t_{i+1}} \left(\frac{t - t_{i+1}}{t_{i+3} - t_{i+1}} \frac{t_{i+3} - t}{t_{i+3} - t_{i+2}} + \frac{t_{i+4} - t}{t_{i+4} - t_{i+2}} \frac{t - t_{i+2}}{t_{i+3} - t_{i+2}} \right) + \frac{t_{i+5} - t}{t_{i+5} - t_{i+2}} \frac{t - t_{i+2}}{t_{i+4} - t_{i+2}} \frac{t - t_{i+2}}{t_{i+3} - t_{i+2}} \quad (\text{C.7})$$

$$\mathcal{D}_i(t) = \frac{t - t_{i+2}}{t_{i+5} - t_{i+2}} \frac{t - t_{i+2}}{t_{i+4} - t_{i+2}} \frac{t - t_{i+2}}{t_{i+3} - t_{i+2}}. \quad (\text{C.8})$$

Die Knotenpunkte t_i bis t_{i+5} werden einmal festgelegt und definieren die zeitliche Anordnung der Basisfunktionen. Die Ableitung des B-Splines wird über die zeitliche Ableitung der Terme $\mathcal{A}_i(t)$, $\mathcal{B}_i(t)$, $\mathcal{C}_i(t)$ und $\mathcal{D}_i(t)$ berechnet. Dies kann mit mathematischen Algebra Programmen ausgeführt werden.

D Berechnung der Fouriertransformation

Es soll kurz erläutert werden, wie eine Fouriertransformation zeitdiskreter, aperiodischer Signale durchgeführt wird. Die Vorgehensweise ist beispielsweise in [100] nachzulesen. Als Beispiel wird ein Sinussignal mit der Frequenz $f = 2\text{ Hz}$ gewählt. Dies ergibt die kontinuierliche Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$. Die zeitdiskrete Frequenz ergibt sich zu $\Omega = \omega/f_s$, wobei im Beispiel die Taktfrequenz f_s zu 25 Hz gewählt wird. Das zeitdiskrete Sinussignal $x = \sin[\Omega n]$ wird für die N Punkte im Bereich $n = \{0, 1, \dots, 1,4 \cdot f_s\}$ in Abbildung D.1 gezeichnet. Wird dieses Signal mit der diskreten Fouriertransformation (DFT) transformiert, ergeben sich N komplexe Fourierkoeffizienten. Im Allgemeinen wird der Algorithmus *Fast Fourier Transform* (FFT) benutzt. Das diskrete, 2π -periodische Amplitudenspektrum berechnet sich aus dem Betrag der Koeffizienten: $|x(e^{j\omega})| = |\text{fft}(x)|/N$. Die zugehörige, zeitkontinuierliche Frequenz zu den berechneten Fourierkoeffizienten ergibt sich, beginnend mit dem Gleichspannungsanteil, zu $f_k = 1/N \cdot f_s \cdot k$ mit $k = \{0, 1, \dots, N - 1\}$.

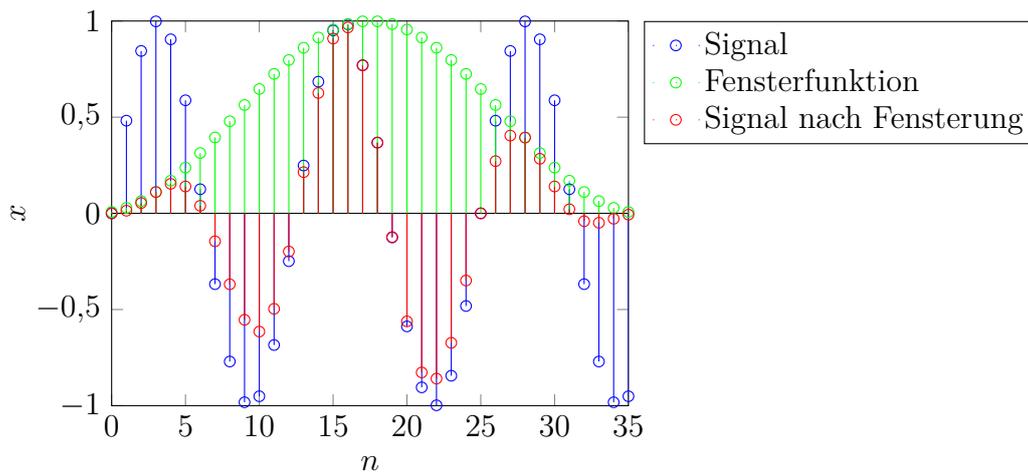


Abbildung D.1: Zu transformierendes Signal

Das Amplitudenspektrum über der Frequenz ist in Abbildung D.2 gezeichnet. Dies ist begrenzt durch die Nyquist-Frequenz und symmetrisch von $-f_s/2$ bis $f_s/2$. Bei der Nutzung der FFT in Matlab muss darauf geachtet werden, dass die negativen Frequenzen im Bereich zwischen $f_s/2$ und f_s aufgetragen sind. Im Spektrum wird bei $\pm 2\text{ Hz}$ die Frequenz des Originalsignals erkannt, jedoch auch weitere Frequenzen. Dies wird Leck-Effekt¹ genannt, tritt wegen dem endlichen Beobachtungsintervall auf und kann durch Verwendung einer Fensterfunktion reduziert werden. Im Beispiel ist ein *Hanning*-Fenster verwendet. Die Amplitude des beidseitigen Spektrums des Signals mit dem Rechteckfenster beträgt jeweils $0,5$. Normalerweise wird das Spektrum einseitig und mit doppelter Amplitude aufgetragen, wodurch die Amplitude mit dem Originalsignal übereinstimmt.

¹engl. leakage effect

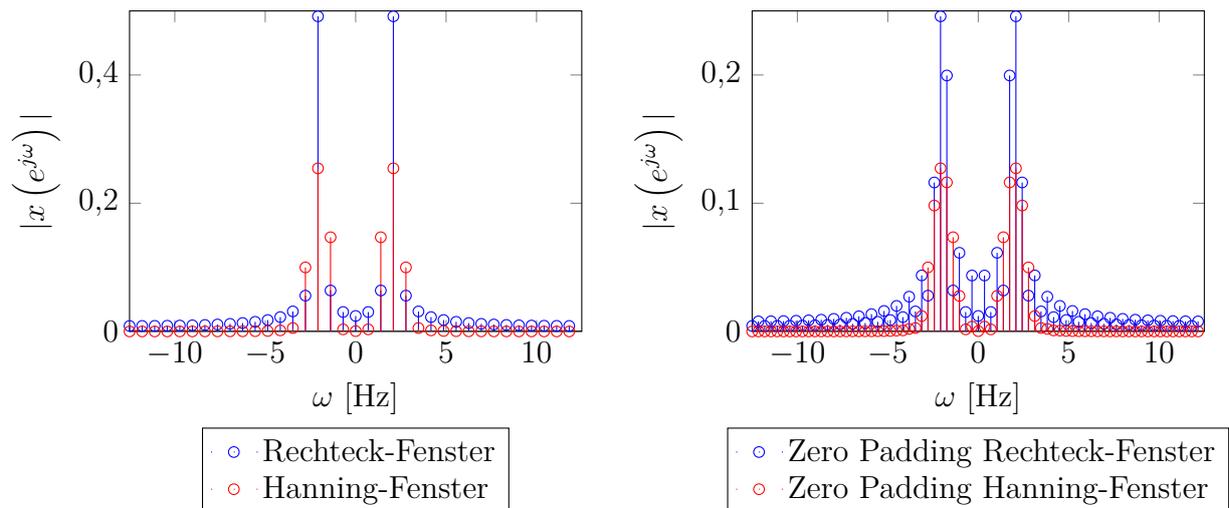


Abbildung D.2: Fouriertransformiertes Signal

Eine weitere, oft angewendete Methode zur effizienten Interpolation des Signals im Frequenzbereich ist das Hinzufügen von Nullen an das Zeitsignal vor der FFT-Berechnung. Dies wird *zero padding* genannt. Im rechten Diagramm in Abbildung D.2 ist das Ergebnis für das Hinzufügen von N Nullen zu sehen. Das Rechteckfenster multipliziert mit dem Signal im Zeitbereich ergibt im Frequenzbereich eine Faltung mit der sinc-Funktion, diese Schwingungen sind durch die Interpolation nun im Spektrum zu sehen. Bei der Verwendung einer Fenster-Funktion wird diese zuerst mit dem Zeitsignal multipliziert und daraufhin die Nullen hinzugefügt, um das Zeitsignal ohne Sprünge periodisch fortsetzen zu können.

In dieser Arbeit wird ein *Hanning*-Fenster verwendet, das einseitige Spektrum, welches als diskrete Punkte gegeben ist, mit einer kontinuierlichen Linie gezeichnet und die Ordinate mit der Bezeichnung FFT beschriftet.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung der unterschiedlichen Fahrwerksaktoren	12
1.2	Fahrzeug mit vorausschauender Fahrwerksregelung	13
1.3	Zielfunktionalität einer Fahrwerksansteuerung mit Vorausschau	14
1.4	Funktionsprinzipien von Verstelldämpfern	16
1.5	Funktionsprinzipien aktiver Fahrwerke	17
1.6	Grenzen der Fahrwerksaktorik	18
1.7	Prinzipieller Einfluss der Feder und des Dämpfers auf Fahrkomfort und Fahr- dynamik; beispielhaft simuliert auf einer schlechten Landstraße	19
1.8	Lineare Fahrzeugmodelle der Vertikaldynamik in der Literatur	20
1.9	Vorausschauende Fahrwerksregelung bei Bender [12]	22
1.10	Fahrzeugaufbau bei Sugai et al. (Bild aus [122])	29
1.11	Schematische Darstellung der Entfernungsbestimmung mit einem Kamerasystem	30
1.12	Schematische Darstellung der Entfernungsbestimmung eines Lasersensors	31
1.13	Akkumulation der Höhenwerte durch Transformation der neuen Sensordaten in die bereits erstellte Höhenkarte; Bezugslinie in Rot und Höhenprofil in Schwarz .	32
2.1	Gesamtfahrzeugmodell der Vertikaldynamik	35
2.2	Allgemeines Aktorikmodell	36
2.3	Aktor mit Drehfeder	36
2.4	Freigeschnittenes Rad mit Reifen	38
2.5	Gesamtfahrzeugmodell ohne Radmassen	41
2.6	Modellinvertierung	42
2.7	Kompensation der nichtlinearen Dämpferkennlinie in jedem Zeitschritt	44
2.8	Höhenprofilvermessung im OpenCRG Format	46
2.9	Vergleich von Fahrzeugmessungen mit Simulationsresultaten; Fahrt über Straße mit zwei hohen Bodenwellen	48
2.10	Vergleich Fahrzeugmessung mit Simulationsresultaten; Fahrt über Straße mit Bodenwellen und 116 km/h	49
3.1	Funktionsweise der modellprädiktiven Regelung mit fünf Prädiktionsschritten; dargestellt für einen Aktor	51
3.2	Begrenzen der Dämpferkraft, falls diese außerhalb des realisierbaren Kennfeldes liegt	56
3.3	Nicht-äquidistanter B-Spline mit $m = 11$	60
3.4	Störgrößenkompensation mit einem inversen Modell	63
3.5	Realisierung einer weichen Feder durch die Aktorik	65
3.6	Regelungsstruktur modulare vorausschauende Fahrwerksregelung	66
3.7	Regelungsstruktur modellprädiktive vorausschauende Fahrwerksregelung	66

4.1	Definition des gewünschten Höhenprofils als Eingangssignal für die vorausschauende Fahrwerksregelung	67
4.2	Erzeugung des gewünschten Höhenprofils aus dem absoluten Höhenprofil durch eine Hochpassfilterung mit 0,5 Hz und eine Tiefpassfilterung mit 5 Hz	69
4.3	Sensorfeste Akkumulation: Berechnung der Höhenwerte bezüglich einer sensorfest definierten Bezugsebene, Transformation der Höhenkarte und Akkumulation; Bezugsebene in Rot und Höhenprofil in Schwarz	70
4.4	Profilbezogene Akkumulation: Berechnung der Höhenwerte bezüglich einer Ausgleichsebene in den Rohdaten, Transformation der Höhenkarte und Akkumulation; Bezugsebene in Rot und Höhenprofil in Schwarz	70
4.5	Akkumulation der Höhenwerte im inertialen Koordinatensystem	71
4.6	Gesamtheitliche Simulation von der Erstellung des Straßenhöhenprofils bis zur Fahrwerksansteuerung	72
4.7	Definition von Vektoren und Koordinatensystemen	73
4.8	Berechnung exakter Sensormessdaten in der Simulation; Fahrt über Bodenwellen mit 35 m Periodenlänge und 120 km/h	75
4.9	Simulierte exakte Sensormessdaten im karosseriefesten Koordinatensystem	76
4.10	Akkumulation der Höhenwerte in einem diskreten Schieberegister	77
4.11	Vergleich Kalman-Filter und arithmetisches Mittel zur Akkumulation eines Messsignals mit konstantem Erwartungswert und konstanter Standardabweichung	79
4.12	Berechnung der Transformation der Sensordaten aus der Fahrzeugeigenbewegung	81
4.13	Ermittlung der Transformation basierend auf den Sensordaten	81
4.14	Ideales Tiefpassfilter im Frequenz- und im Zeitbereich	88
4.15	Unebenheit mit Rauschen und Ergebnis einer Filterung mit einem 5 Hz Tiefpass für 30 km/h	91
4.16	Zu suchende Geometrien im Straßenhöhenprofil	91
4.17	Gaußsche Normalverteilung für zwei Standardabweichungen	92
4.18	Unebenheitserkennung basierend auf der 1. und 2. Ableitung des gefilterten Höhenprofils	93
4.19	Prinzipielle Erläuterung der Sensordatenaufbereitung für die Überfahrt der Schwelle	96
5.1	Aufbau der Simulation mit Reglermodell entspricht Streckenmodell und gegebenem Höhenprofil als Eingang	98
5.2	Simulationsergebnisse MPC Federfußpunktverstellung mit und ohne Aktorbegrenzung und Reglermodell entspricht Streckenmodell	99
5.3	Simulationsergebnisse MPC Verstelldämpfer und Reglermodell entspricht Streckenmodell; Fahrt über schlechte Landstraße mit 60 km/h	101
5.4	Simulationsergebnisse MPC Verstelldämpfer und Federfußpunktverstellung und Reglermodell entspricht Streckenmodell; Fahrt über schlechte Landstraße mit 60 km/h	103
5.5	Aufbau der Simulation mit nichtlinearem Simulationsmodell für die Regelung und die Vorsteuerung	104
5.6	Simulation Federfußpunktverstellung mit nichtlinearem Simulationsmodell; Fahrt über schlechte Landstraße mit linear steigender Geschwindigkeit von 36 km/h bis 120 km/h	105

5.7	Simulation Federfußpunktverstellung mit nichtlinearem Simulationsmodell; Fahrt über Bodenwellen mit 35 m Periodenlänge und linear steigend 115 km/h bis 135 km/h	107
5.8	Simulation Federfußpunktverstellung mit nichtlinearem Simulationsmodell; Überfahrt einer 4 cm hohen und 2 m langen Schwelle mit 30 km/h	107
5.9	Simulation Federfußpunktverstellung mit nichtlinearem Simulationsmodell; Überfahrt hohe Bodenwelle mit 100 km/h; Profil Bodenwelle als Reglereingang	108
5.10	Simulation Federfußpunktverstellung mit nichtlinearem Simulationsmodell; Überfahrt hohe Bodenwelle mit 100 km/h; 0,5 Hz-gefiltertes Profil als Reglereingang . .	108
5.11	Simulation der Komforterhöhung für eine Federfußpunktverstellung durch Vorausschau bei exakter Straßeninformation verglichen mit dem Regler <i>Weiche Feder</i> ohne Vorausschau	109
5.12	Simulation Federfußpunktverstellung mit modellprädiktiver Regelung und 0,25 s Vorausschau; Überfahrt der Bodenwellen mit 35 m Periodenlänge mit 120 km/h; absolutes Höhenprofil als Eingangssignal	112
5.13	Simulation der Komfortverbesserung eines Fahrwerks mit Verstelldämpfer und exakten Vorausschadaten	113
5.14	Simulation der Komfortverbesserung eines Fahrwerks mit Verstelldämpfer und Federfußpunktverstellung mit exakten Vorausschadaten; Überfahrt schlechte Landstraße mit 36 km/h bis 120 km/h	114
5.15	Simulation der Sensorrohdaten mit 5 cm Standardabweichung, <i>Matching</i> der Sensordaten, Filterung des Höhenprofils und vorausschauende Aktoransteuerung; Überfahrt Schwelle mit 30 km/h	116
5.16	Sensorfeste Akkumulation; Höhenprofil im sensorfesten Koordinatensystem zu zwei Zeitschritten	117
5.17	Simulation der Erstellung des Höhenprofils und der Fahrwerksansteuerung; Fahrt über Bodenwellen mit 35 m Periode und 120 km/h	118
5.18	Entfernungsmessung zur Straße vor einer Spur in einem Zeitschritt	120
6.1	Versuchsfahrzeug mit Federfußpunktverstellung und Kamera	122
6.2	Prädiktion der Fahrtrajektorie basierend auf Kreisgleichung	122
6.3	GPS-basiertes Höhenprofil; Bodenwellen mit 35 m Periode und 120 km/h	124
6.4	GPS-basiertes Höhenprofil; unterschiedliche Bodenwellen zwischen rechter und linker Spur mit 120 km/h	124
6.5	Bodenwellen mit 35 m Periode und 120 km/h; Vergleich Stellsignal des <i>Skyhook</i> -Moduls bei Kombination mit Vorsteuerung aus inversem Modell	125
6.6	GPS-basiertes Höhenprofil; Bodenwellen mit 35 m Periode und 160 km/h	126
6.7	GPS-basiertes Höhenprofil; hohe Bodenwelle mit 100 km/h; Reglereingang Profil Bodenwelle	127
6.8	GPS-basiertes Höhenprofil; hohe Bodenwelle mit 100 km/h; Reglereingang Profil 0,5 Hz-Hochpass gefiltert	127
6.9	Überfahrt einer einseitigen Unebenheit mit 20 km/h; Erläuterung der Sensordatenaufbereitung und der Filterung der rechten Spur	128
6.10	Reduktion Hubbeschleunigung und Nickrate bei Überfahrt der einseitigen Unebenheit mit 20 km/h und Kamera	129
6.11	Überfahrt Schwelle mit 30 km/h und Kamera	130

6.12	Reduktion Hubbeschleunigung und Nickrate bei Überfahrt Fahrbahnschwelle mit 15 km/h und Kamera	131
6.13	Reduktion Hubbeschleunigung und Nickrate bei Überfahrt Fahrbahnabsenkung mit 20 km/h und Kamera	131
6.14	Reduktion Hubbeschleunigung und Nickrate bei Überfahrt einer Fahrbahnwelle mit 20 km/h und Kamera	132
6.15	Straßenbeobachter; Überfahrt Schwelle mit 30 km/h und vorausschauender Regelung	134
6.16	Straßenbeobachter; Überfahrt Schwelle mit 30 km/h und gesperrter Aktorik	134
6.17	Beobachtetes Höhenprofil auf der Strecke mit der 30 cm hohen und 45 m langen Bodenwelle; Fahrgeschwindigkeit zwischen 70 und 120 km/h	135
D.1	Zu transformierendes Signal	147
D.2	Fouriertransformiertes Signal	148

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
ABC	Active Body Control
<i>clipped optimal</i>	Begrenzen der Aktorikkraft auf einen realisierbaren Wert
GPS	Global Positioning System
HA	Hinterachse
HK	Hartkennlinie
LQR	Linear-quadratic regulator
<i>Matching</i>	Zur Übereinstimmung bringen der Sensordaten zwischen zwei Zeitschritten basierend auf einer ersten Schätzung der Fahrzeugeigenbewegung
MIMO	Multi Input Multi Output
MPC	Model Predictive Control
QP	Quadratisches Programm
RMS	root mean square
SISO	Single Input Single Output
<i>Skyhook</i>	Regler ohne Vorausschau basierend auf Aufbaugeschwindigkeiten
SP	Schwerpunkt
VA	Vorderachse
<i>Weiche Feder</i>	Regler ohne Vorausschau, der den Radeinfederungen nachgibt
WK	Weichkennlinie

Notationen

Notation	Erläuterung
ii	$ii \in \{vl, vr, hl, hr\}$: vorne links, vorne rechts, hinten links, hinten rechts
\bullet_{ii}	Größe $\bullet_{vl vr hl hr}$
$\underline{\bullet}$	Bei den entsprechenden Größen: $\underline{\bullet} = (\bullet_{vl} \ \bullet_{vr} \ \bullet_{hl} \ \bullet_{hr})^T$
\underline{v}	Ein Spaltenvektor
\underline{v}^T	Transponierte eines Vektors
M	Eine Matrix
I_4	Einheitsmatrix mit 4 Diagonaleinträgen
$O_{4 \times 7}$	Eine 4x7 Nullmatrix
$\dot{\bullet}$	Ableitung nach der Zeitvariablen
$\frac{d}{dx} \bullet$	Ableitung von \bullet nach x

\bullet'	Ableitung von \bullet nach x
$\frac{d^2}{dx^2}\bullet$	Zweite Ableitung von \bullet nach x
\bullet''	Zweite Ableitung von \bullet nach x
\bullet^R	Operator zum Umkehren der Zeilen des Vektors \bullet bzw. der Matrix \bullet
$\bullet \cdot \bullet$	Skalarprodukt zweier Matrizen bzw. Vektoren
$\bullet * \bullet$	Faltung zweier Signale: $y[n] = h[n] * x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k] \cdot x[n-k]$
$\text{diag}(Q_1 \ Q_2)$	Matrix mit den Einträgen Q_1 und Q_2 in den Diagonalelementen
$\tilde{w} \sim \mathcal{N}(0, Q)$	Rauschen \tilde{w} ist normalverteilt mit Erwartungswert 0 und Varianz Q
$\text{Var}(X)$	Varianz von X
$\min_{\underline{x}} F(\underline{x})$	Minimiere $F(\underline{x})$ durch Ermitteln des optimalen Vektors \underline{x}
$\sum_{i=1}^n X_i$	Summe $X_1 + X_2 + \dots + X_n$
$\prod_{i=1}^n X_i$	Multiplikation $X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n$
$\Delta\bullet$	Differenz des Wertes \bullet , beispielsweise zwischen zwei Zeitschritten
\mathcal{F}	Fouriertransformation
\mathcal{F}^{-1}	Inverse Fouriertransformation
$\text{sinc}[n]$	Sinc-Funktion: $\text{sinc}[n] = \frac{\sin[\pi n]}{\pi n}$
FFT \bullet	Amplitudenspektrum der diskreten Fouriertransformation des Signals \bullet

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Erläuterung
a_i		Koeffizienten eines Filters im Nenner der Übertragungsfunktion; Def. in (4.24)
\mathbf{A}		Systemmatrix der kontinuierlichen Zustandsraumdarstellung $\dot{\underline{x}}(t) = \mathbf{A}\underline{x}(t) + \mathbf{B}_u\underline{u}(t) + \mathbf{B}_w\underline{w}(t)$
\mathcal{A}_i		Faktor $\mathcal{A}_i(t)$ zur Berechnung von B-Splines in Matrix Form; Def. in (3.17), (C.5)
\mathbf{A}_i		Matrix $\mathbf{A}_i(t)$ mit $\mathcal{A}_i(t)$ in den vier Diagonalelementen
b_i		In Abschnitt 4.6.1: Koeffizienten eines Filters im Zähler der Übertragungsfunktion; Def. in (4.24)
b_i		In Abschnitt 3.2: Basisfunktion $b_i(t)$ eines B-Splines
$\mathbf{B}_{u w}$		Eingangsmatrix $\mathbf{B}_u, \mathbf{B}_w$ der kontinuierlichen Zustandsraumdarstellung $\dot{\underline{x}}(t) = \mathbf{A}\underline{x}(t) + \mathbf{B}_u\underline{u}(t) + \mathbf{B}_w\underline{w}(t)$
\mathcal{B}_i		Faktor $\mathcal{B}_i(t)$ zur Berechnung von B-Splines in Matrix Form; Def. in (3.17), (C.6)
\mathbf{B}_i		Matrix $\mathbf{B}_i(t)$ mit $\mathcal{B}_i(t)$ in den vier Diagonalelementen
c_1	N/m	Federkonstante der Feder in Serie zur Federfußpunktverstellung
c_2	N/m	Federkonstante der Feder zwischen Querlenker und Fahrzeugaufbau
c_R	N/m	Vertikale Federkonstante des Reifens
\mathbf{C}		Matrix zur Berechnung des Systemausgangs mit $\underline{y} = \mathbf{C}\underline{x} + \mathbf{D}_u\underline{u} + \mathbf{D}_w\underline{w}$

$\underline{\mathbf{C}}_c \mathbf{C}_p$		Vektor und Matrix zur Berechnung der Stellgröße über dem Vorausschauhorizont \hat{u} aus den Kontrollpunkten der B-Splines \hat{p} und der Straßeninformation \hat{w} ; Def. in (3.22)
$\underline{\mathbf{C}}_{cr} \mathbf{C}_{pr}$		Vektor und Matrix zur Berücksichtigung der beschränkten Aktorverstellgeschwindigkeit in der modellprädiktiven Trajektoriengenerierung; Def. in (3.25)
\mathbf{C}_i		Faktor $\mathbf{C}_i(t)$ zur Berechnung von B-Splines in Matrix Form; Def. in (3.17), (C.7)
\mathbf{C}_i		Matrix $\mathbf{C}_i(t)$ mit $\mathbf{C}_i(t)$ in den vier Diagonalelementen
d	N s/m	Dämpfungskonstante des Dämpfers
d_{ij}	m	Entfernungsmessung vom Sensor zur Straße des Sensorstrahls mit den Winkeln η_i und φ_j
$\mathbf{D}_{u w}$		Matrix zur Berechnung des Systemausgangs mit $\underline{y} = \mathbf{C}\underline{x} + \mathbf{D}_u\underline{u} + \mathbf{D}_w\underline{w}$
\mathcal{D}_i		Faktor $\mathcal{D}_i(t)$ zur Berechnung von B-Splines in Matrix Form; Def. in (3.17), (C.8)
\mathcal{D}_i		Matrix $\mathcal{D}_i(t)$ mit $\mathcal{D}_i(t)$ in den vier Diagonalelementen
\underline{e}		Vektor zur Berechnung des <i>Matchings</i> der Sensordaten; Def. in (4.17)
\mathbf{E}		Matrix zur Berechnung des <i>Matchings</i> der Sensordaten; Def. in (4.17)
\underline{f}	(N Nm Nm) ^T	Äußere Kräfte und Momente auf den Fahrzeugaufbau zum Abbilden einer Kurvenfahrt, Beschleunigungsvorgängen und Zuladung; Def. in (2.1)
$F_{c1,ii}$	N	Federkraft der Feder in Serie zur Federfußpunktverstellung am Rad <i>ii</i>
$F_{c2,ii}$	N	Federkraft der Feder zwischen Querlenker und Fahrzeugaufbau am Rad <i>ii</i>
$F_{d,ii}$	N	Dämpferkraft des Dämpfers <i>ii</i>
F_z	N	Äußere Kraft auf den Fahrzeugaufbau in vertikaler Richtung
$g[x]$		Gaußsche Normalverteilung gefaltet mit dem Höhenprofil: $g[x] = G[x] * h[x]$
\underline{g}		Gradientenvektor des linear-quadratischen Optimierungsproblems; Def. in (3.6)
$G(x)$		Kontinuierliche Gaußsche Normalverteilung
$G[x]$		Gaußsche Normalverteilung an diskreten Punkten
$h[x]$		Höhenprofil für diskrete Punkte x
\mathbf{H}		Hesse-Matrix des linear-quadratischen Optimierungsproblems; Def. in (3.6)
$H(\Omega)$		Zeitdiskrete Übertragungsfunktion eines Filters
\mathbf{H}_{c1}		Matrix mit den Übersetzungen $i_{c1,VA}$, $i_{c1,HA}$ in den Diagonalelementen
\mathbf{H}_d		Matrix mit den Übersetzungen $i_{d,VA}$, $i_{d,HA}$ in den Diagonalelementen
i_{c1}		Übersetzung der Feder c_1 zum Rad; Def. in (2.4)
i_d		Übersetzung vom Dämpfer zum Rad; Def. in (2.4)

i_{ii}	A	Ansteuerstrom des Verstelldämpfers zur Realisierung der gewünschten Dämpferkraft am Rad ii
ii		$ii \in \{vl, vr, hl, hr\}$: vorne links, vorne rechts, hinten links, hinten rechts
I		Inertialfestes Koordinatensystem; Def. Abb. 4.7
J_η	kg s ²	Trägheitsmoment um den Schwerpunkt in Nickrichtung
J_ω	kg s ²	Trägheitsmoment um den Schwerpunkt in Wankrichtung
k		Verspannung des Fahrzeugaufbaus
K		Karosseriefestes (\cong sensorfestes) Koordinatensystem mit Ursprung im Aufstandspunkt Mitte Hinterachse, (x, y) im Stationärzustand auf der ebenen Straße; Def. Abb. 4.7
$\mathbf{K}_{0 1 2 3}$		Konstante Matrizen $\mathbf{K}_0, \mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3$ des inversen Modells; Def. in (2.19)
\mathbf{K}_{c1}		Matrix mit den Federsteifigkeiten $c_{1,VA}, c_{1,HA}$ in den Diagonalelementen
\mathbf{K}_{cR}		Matrix mit den vertikalen Reifensteifigkeiten c_R in den Diagonalelementen
\mathbf{K}_d		Matrix mit den Dämpferkonstanten d_{VA}, d_{HA} in den Diagonalelementen
$\mathcal{K}_{0 1 2 3}$		Matrix \mathcal{K}_0 mit der Matrix \mathbf{K}_0 in den Diagonalelementen, analog für die Indizes 1,2,3; Def. in (3.22)
l_v	m	Abstand Fahrzeugschwerpunkt zur Vorderachse
l_h	m	Abstand Fahrzeugschwerpunkt zur Hinterachse
$l_{z,ii}$	m	Radeinfederung: Vertikaler Abstand zwischen Radmittelpunkt und Karosserieeckpunkt am Rad ii
m		Anzahl der Knotenpunkte eines B-Splines
m_A	kg	Masse des Fahrzeugaufbaus
M_η	Nm	Äußeres Moment auf den Fahrzeugaufbau um den Schwerpunkt in Nickrichtung
M_ω	Nm	Äußeres Moment auf den Fahrzeugaufbau um den Schwerpunkt in Wankrichtung
\mathbf{M}		Matrix für die linearen Beschränkungen des linear quadratischen Optimierungsproblems
$\mathbf{M}_{0 1 2 3 4}$		Matrizen $\mathbf{M}_0, \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3, \mathbf{M}_4$ zur Berechnung des inversen Modells; Def. in (2.17)
\underline{n}_{ij}		Richtungsvektor des Sensorstrahls mit den Winkeln η_i und φ_j ; Def. Abb. (4.2)
\mathbf{O}		Matrix zur Prädiktion des Ausgangs der Filterung; Def. in (4.31)
p		Anzahl Prädiktionszeitschritte der modellprädiktiven Regelung
$\underline{\hat{p}}$		Vektor der zu optimierenden Kontrollpunkte für die modellprädiktive Trajektoriengenerierung
P_i		Kontrollpunkt eines B-Splines zum Gewichten der Basisfunktion b_i
\mathbf{Q}		Matrix zum Gewichten des Ausgangs bzw. des Zustands im quadratischen Gütemaß
$\underline{r}_{O \rightarrow SP}^K$	(m m) m) ^T	Vektor von Mitte Hinterachse Boden zum Schwerpunkt im Koordinatensystem K

$\underline{r}_{\text{SP} \rightarrow S}^K$	$(m \ m \ m)^T$	Vektor vom Schwerpunkt zum Sensor im Koordinatensystem K
\underline{r}_{ij}	$(m \ m \ m)^T$	Gleichung des Sensorstrahls mit den Winkeln η_i und φ_j
\mathbf{R} $\mathbf{R}_{\omega\eta}$		Matrix zum Gewichten der Stellgröße im quadratischen Gütemaß Drehmatrix zur Transformation vom I - ins K -System; Def. über Inverse in (4.1)
s_{ii} S	m	Stellweg der Federfußpunktverstellung eines Aktors Karosseriefestes ($\hat{=}$ sensorfestes) Koordinatensystem mit Ursprung im Sensor; Def. Abb. 4.7
$\underline{f}_{0 1 2}$		Vektor zur Berechnung der zweiten Ableitung (\underline{f}_2), der ersten Ableitung (\underline{f}_1) und des B-Splines (\underline{f}_0) der drei Trajektorien des Fahrzeugaufbaus über dem Vorausschauhorizont; Def. in (3.21)
$\mathbf{S}_{0 1 2}$		Matrix zur Berechnung der zweiten Ableitung (\mathbf{S}_2), der ersten Ableitung (\mathbf{S}_1) und des B-Splines (\mathbf{S}_0) der drei Trajektorien des Fahrzeugaufbaus über dem Vorausschauhorizont; Def. in (3.18)
t	s	Zeitvariable
t_i	s	Knotenpunkt eines B-Splines
t_v	m	Halbe Spurweite vorne
t_h	m	Halbe Spurweite hinten
\underline{T}		Vektor der Knotenpunkte $\underline{T} = (t_4 \ \dots \ t_{m-4})$, an denen die Gütefunktion und die Beschränkungen der modellprädiktiven Trajektoriengenerierung ausgewertet werden
T_A		Zeitkonstante des PT1-Verhaltens der Federfußpunktverstellung
\mathbf{T}_{c1}		Matrix berechnet aus $\mathbf{T}_G \cdot \mathbf{H}_{c1}$
\mathbf{T}_d		Matrix berechnet aus $\mathbf{T}_G \cdot \mathbf{H}_d$
\mathbf{T}_G		Geometriematrix berechnet aus Radstand und Spurweite; Def. in (2.1)
T_s	s	Taktzeit
\underline{u}		Systemeingang Aktorstellgröße
\hat{u}		Stellgröße \underline{u} über dem Vorausschauhorizont mit p Schritten
$(u \ v)$		Gekrümmtes Koordinatensystem entlang der Referenzachse des vermessenen Höhenprofils im OpenCRG-Format; Def. Abb. 2.8
\mathbf{U}		Matrix zur Prädiktion des Ausgangs der Filterung; Def. in (4.31)
v	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
\tilde{v}		Messrauschen bei der Formulierung des Kalman-Filters
\tilde{w}		Prozessrauschen bei der Formulierung des Kalman-Filters
\underline{w}		Straßenhöhenprofil
\hat{w}		Störgröße \underline{w} über den Vorausschauhorizont mit p Schritten
x	m	Längsrichtung der Fahrzeugbewegung
$x[n]$		Eingang des Filters für den Zeitpunkt n
x_i		Messung mit Standardabweichung σ_i
x_{HA}	m	Position der Hinterachse in Fahrtrichtung
$(x \ y)$		In Abschnitt 2.2.1: Kartesisches Koordinatensystem mit x nach Norden und y nach Osten zur Referenzierung der Höhendaten im OpenCRG-Format; Def. Abb. 2.8

$(x \ y \ z)^S$	$(m \ m \ m)^T$	Vektoren im karosseriefesten Koordinatensystem S mit Ursprung im Sensor und parallel zum Koordinatensystem K ; Def. Abb. 4.7
$(x \ y \ z)^K$	$(m \ m \ m)^T$	Vektoren im karosseriefesten Koordinatensystem K mit Ursprung im Aufstandspunkt Mitte Hinterachse; x in Fahrtrichtung, y nach links, z nach oben; Def. Abb. 4.7
$(x \ y \ z)^I$	$(m \ m \ m)^T$	Vektoren im inertialfesten Koordinatensystem I , x in Fahrtrichtung, y nach links, z nach oben; Def. Abb. 4.7
\underline{x}		Zustandsvektor
$X(\Omega)$		Eingang des Filters
$y[n]$		Ausgang des Filters für den Zeitpunkt n
\underline{y}		Systemausgang
\underline{y}_{fb}		Ausgangsvektor der Vorwärts-Rückwärtsfilterung eines Signals
$\hat{\underline{y}}$		Prädiktion des Ausgangs \underline{y} für p Prädiktionsschritte
$\hat{\underline{y}}_{\text{ref}}$		Referenzwerte für den Ausgang über dem Prädiktionshorizont $\hat{\underline{y}}$
$Y(\Omega)$		Ausgang des Filters
z_A	m	Huben (z -Bewegung) des Fahrzeugaufbaus
$z_{R,ii}$	m	Vertikale Radposition des Rades ii
$z_{S,ii}$	m	Straßenhöhe unter dem Rad ii
$z_{\text{rel},c1,ii}$	m	Vertikaler Abstand zwischen Querlenker am Angriffspunkt der Feder c_1 und Fahrzeugaufbau am Rad ii ; Def. in (2.9)
$\dot{z}_{\text{rel},d,ii}$	m/s	Dämpferrelativgeschwindigkeit: Relativgeschwindigkeit zwischen dem Querlenker am Angriffspunkt des Dämpfers d und Fahrzeugaufbau am Rad ii ; Def. in (2.9)
\underline{z}		Flacher Ausgang des Systems, für reduziertes Fahrzeugmodell: $\underline{z} = (z_A \ \eta \ \omega)^T$
$\underline{z}_S(t)$	m	Höhenprofil unter den Rädern in Abhängigkeit der Zeit
$\underline{z}_S(x)$	m	Höhenprofil unter den Rädern in Abhängigkeit der überfahrenen Strecke

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Erläuterung
$\Gamma_{u w}$		Eingangsmatrix $\Gamma_u = \int_0^{T_s} e^{A\sigma} \mathbf{B}_u d\sigma$, Γ_w der zeitdiskreten Zustandsraumdarstellung $\underline{x}[k+1] = \Phi \underline{x}[k] + \Gamma_u \underline{u}[k] + \Gamma_w \underline{w}[k]$
$\hat{\Gamma}_{u w}$		Matrix zur Prädiktion des Systemausgangs mit $\hat{\underline{y}} = \hat{\Phi} \underline{x}[k] + \hat{\Gamma}_{u,k} \underline{u}[k] + \hat{\Gamma}_u \hat{\underline{u}} + \hat{\Gamma}_w \hat{\underline{w}}$
δ	rad	Lenkwinkel
η	rad	Nickwinkel (Drehung um Querachse) des Fahrzeugaufbaus
η_i	rad	Winkel des Sensorstrahls in Nickrichtung mit $i \in \{1, \dots, n\}$; Def. Abb. 4.7
Θ_R		Matrix mit den Radmassen in den Diagonalelementen
Θ_A		Trägheitsmatrix des Fahrzeugaufbaus; Def. in (2.1)
μ		Erwartungswert
σ		Standardabweichung
σ_i		Standardabweichung der Messung x_i

φ_j	rad	Winkel des Sensorstrahls in Gierrichtung mit $j \in \{1, \dots, m\}$; Def. Abb. 4.7
Φ		Transitionsmatrix $\Phi = e^{AT_s}$ der zeitdiskreten Zustandsraumdarstellung $\underline{x}[k+1] = \Phi \underline{x}[k] + \Gamma_u \underline{u}[k] + \Gamma_w \underline{w}[k]$
$\hat{\Phi}$		Matrix zur Prädiktion des Systemausganges mit $\hat{\underline{y}} = \hat{\Phi} \underline{x}[k] + \hat{\Gamma}_{u,k} \underline{u}[k] + \hat{\Gamma}_u \hat{\underline{u}} + \hat{\Gamma}_w \hat{\underline{w}}$
ω	rad	Wankwinkel (Drehung um Längsachse) des Fahrzeugaufbaus
ω	rad/s	In Abschnitt 4.6.1: Kontinuierliche Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ mit Frequenz f
Ω	rad	Zeitdiskrete Frequenz

Literaturverzeichnis

- [1] ABDEL-HADY, M.B.A. ; CROLLA, D.A.: Active suspension control algorithms for a four-wheel vehicle model. In: *International Journal of Vehicle Design* 13 (1992), Nr. 2, S. 144–158
- [2] AHLVERS, Udo ; ZÖLZER, Udo: 3D-Auswertung von Stereobildern / Forschungsmagazin der Helmut Schmidt Universität - Universität der Bundeswehr Hamburg. 2005. – Forschungsbericht
- [3] AHMED, M. ; SVARICEK, F.: Preview Control of Vehicle Semi-active Suspension Using Model Predictive Control Based on Fast Fourier Transform. In: *6. VDIVDE Fachtagung Autoreg 2013 - Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren* Bd. 2196. Düsseldorf : VDI Verlag, Juni 2013
- [4] AKBARI, A. ; KOCH, G. ; PELLEGRINI, E. ; SPIRK, S. ; LOHMANN, B.: Multi-objective preview control of active vehicle suspensions: Experimental results. In: *2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC)* Bd. 3, 2010, S. 497 –502
- [5] AKBARI, Ahmad: *Multi-objective H_∞/GH_2 preview control of active vehicle suspensions*, Technische Universität München, Diss., 2009
- [6] AKBARI, Ahmad ; LOHMANN, Boris: Output feedback H_∞/GH_2 preview control of active vehicle suspensions: a comparison study of LQG preview. In: *Vehicle System Dynamics* 48 (2010), Nr. 12, S. 1475–1494
- [7] ALBRECHT, Sven: VW Touareg: Das Fahrwerk. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) extra* (2010), März, S. 36–39
- [8] ALDRICH, John: RA Fisher and the making of maximum likelihood 1912-1922. In: *Statistical Science* 12 (1997), Nr. 3, S. 162–176
- [9] ARNOLD, Eckhard: *Numerische Methoden der Optimierung und Optimalen Steuerung*. Institut für Systemdynamik (ISYS) - Universität Stuttgart, 2009
- [10] BALZER, L. A.: Optimal control with partial preview of disturbances and rate penalties and its application to vehicle suspension. In: *International Journal of Control* 33 (1981), Nr. 2, S. 323–345
- [11] BEN-TAL, Aharon ; GHAOUI, Laurent E. ; NEMIROVSKI, Arkadi: *Robust Optimization*. Princeton University Press, 2009
- [12] BENDER, E.K.: Optimum linear preview control with application to vehicle suspension. In: *Journal of Basic Engineering* 100 (1968), S. 213–221

- [13] BEVLY, David M. ; SHERIDAN, Robert ; GERDES, J C.: Integrating INS sensors with GPS velocity measurements for continuous estimation of vehicle sideslip and tire cornering stiffness. In: *Proceedings of the 2001 American Control Conference* Bd. 1 IEEE, 2001, S. 25–30
- [14] BOCK, HG ; PLITT, KJ: A multiple shooting algorithm for direct solution of optimal control problems. In: *9th IFAC World Congress*, Pergamon Press: Oxford, 1984, S. 243–247
- [15] BOOR, Carl de: *A Practical Guide to Splines*. Springer-Verlag New York, Inc., 1978
- [16] BRAGHIN, F. ; RESTA, F. ; SABBIONI, E.: A modal control for active/semi-active suspension systems. In: *IEEE/ASME international conference on Advanced intelligent mechatronics*, 2007, S. 1–6
- [17] BUMA, S. ; CHO, J. ; KANDA, R. ; KAJINO, H.: Development of Electric Active Suspension Actuator. In: *Review of Automotive Engineering* Bd. 30, 2009, S. 143–150
- [18] BUMA, S. ; KAJINO, H. ; TAKAHASHI, T. ; DOI, S.: Consideration of a human dynamic characteristic and performance evaluation of an electric active suspension. In: *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2008, S. 1030–1036
- [19] CANALE, M. ; MILANESE, M. ; NOVARA, C.: Semi-Active Suspension Control Using "Fast" Model-Predictive Techniques. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 14 (2006), Nr. 6, S. 1034–1046. – ISSN 1063–6536
- [20] CANNY, John: A computational approach to edge detection. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (1986), Nr. 6, S. 679–698
- [21] CARON, Francois ; DUFLOS, Emmanuel ; POMORSKI, Denis ; VANHEEGHE, Philippe: GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: introduction of contextual aspects. In: *Information Fusion* 7 (2006), Nr. 2, S. 221–230
- [22] CHO, B.-K. ; RYU, G. ; SONG, S. J.: Control strategy of an active suspension for a half car model with preview information. In: *International Journal of Automotive Technology* 6 (2005), S. 243–249
- [23] CHO, Byung: Active suspension controller design using MPC with preview information. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 13 (1999), S. 168–174. – ISSN 1738–494X
- [24] CROLLA, D.A. ; ABDEL-HADY, M.B.A.: Active Suspension Control; Performance Comparisons Using Control Laws Applied to a Full Vehicle Model. In: *Vehicle System Dynamics* 20 (1991), Nr. 2, S. 107–120
- [25] CYTRYNSKI, S. ; SCHWARZ, T.: Das vorausschauende aktive Fahrwerk der neuen S-Klasse. In: *VDI Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn*, 2013

-
- [26] DE BRUYNE, S. ; VAN DER AUWERAER, H. ; ANTHONIS, J. ; DESMET, W. ; SWEVERS, J.: Preview control of a constrained hydraulic active suspension system. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2012, S. 4400–4405
- [27] DISSANAYAKE, MWM G. ; NEWMAN, Paul ; CLARK, Steve ; DURRANT-WHYTE, Hugh F. ; CSORBA, Michael: A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 17 (2001), Nr. 3, S. 229–241
- [28] DO, A. L. ; SENAME, O. ; DUGARD, L. ; SOUALMI, B.: Multi-objective optimization by genetic algorithms in H_∞ /LPV control of semi-active suspension. In: *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, 2011
- [29] DO, Anh L. ; SENAME, Olivier ; DUGARD, Luc ; SAVARESI, Sergio ; SPELTA, Cristiano ; DELVECCHIO, Diego u. a.: An extension of mixed sky-hook and ADD to magnetorheological dampers. In: *4th IFAC Symposium on System, Structure and Control*, 2010
- [30] DOMAHIDI, Alexander ; ZGRAGGEN, Aldo U. ; ZEILINGER, Melanie N. ; MORARI, Manfred ; JONES, Colin N.: Efficient interior point methods for multistage problems arising in receding horizon control. In: *IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC) IEEE*, 2012, S. 668–674
- [31] DONAHUE, Mark D.: *Implementation of an Active Suspension, Preview Controller for Improved Ride Comfort*, The University of California at Berkeley, Master thesis, 2001
- [32] EI-DEMERDASH, S.M. ; CROLLA, D.A.: Hydro-pneumatic Slow-active Suspension with Preview Control. In: *Vehicle System Dynamics* 25 (1996), Nr. 5, S. 369–386
- [33] EICHLER, Nico: *Entwurf und Simulation von Algorithmen zur Erzeugung eines vorausschauenden Straßenhöhenprofils mittels Fahrzeugsensorik*, Universität Stuttgart, Bachelorarbeit, 2013
- [34] FERREAU, Hans J. u. a.: *qpOASES User's Manual*. Optimization in Engineering Center (OPTEC) and Department of Electrical Engineering, K.U. Leuven, June 2009
- [35] FERREAU, H.J.: *Model Predictive Control Algorithms for Applications with Millisecond Timescales*, K.U. Leuven, Diss., 2011
- [36] FERREAU, H.J. ; BOCK, H.G. ; DIEHL, M.: An online active set strategy to overcome the limitations of explicit MPC. In: *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 18 (2008), Nr. 8, S. 816–830
- [37] FISHER, Ronald A. u. a.: On an absolute criterion for fitting frequency curves. In: *Messenger of Mathematics* 41 (1912), S. 155–160
- [38] FOAG, Q. ; GRÜBEL, G.: Multi-Criteria Control Design for preview vehicle -suspension systems. In: *IFAC 10th Triennial World Congress, Munich*, 1987
- [39] FOAG, W: A Practical Control Concept for Passenger Car Active Suspensions with Preview. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 203 (1989), Nr. 4, S. 221–230

- [40] FRÜH, Christian ; HERMANN, Jochen ; TIETKE, Michael ; NIESTEGGE, Michael ; SCHEYHING, Frank ; NETELER, Andre ; STELLER, Gerhard: E-Klasse: Komfort bei erlebbarer Dynamik und Agilität. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) extra* (2009), Januar, S. 128–143
- [41] FRÜHAUF, F. ; KASPER, R. ; LÜCKEL, J.: Design of an active suspension for a passenger vehicle model using input processes with time delays. In: *Vehicle System Dynamics* 15 (1986), S. 126–138
- [42] FROHNMAYER, Steffen: *Aktive Fahrwerksregelung mittels LQR und Vorausschau*, Universität Stuttgart, Studienarbeit, 2012
- [43] GARCÍA, Carlos E. ; PRETT, David M. ; MORARI, Manfred: Model predictive control: Theory and practice - A survey. In: *Automatica* 25 (1989), Nr. 3, S. 335 – 348. – ISSN 0005–1098
- [44] GIORGETTI, N. ; BEMPORAD, A. ; TSENG, H. E. ; HROVAT, D.: Hybrid model predictive control application towards optimal semi-active suspension. In: *International Journal of Control* 79 (2006), Nr. 5, S. 521–533
- [45] GIORGETTI, N. ; BEMPORAD, A. ; TSENG, H.E. ; HROVAT, D.: Hybrid Model Predictive Control Application Towards Optimal Semi-Active Suspension. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2005, S. 391 – 398
- [46] GLASER, Horst ; ROSSIÉ, Thomas ; NIEBOER, Remco ; RÜGER, Jürgen ; REVELANT, Stephan ; HOPF, Angelika ; WAGNER, Richard ; SPENGLER, Hans G.: Audi Q3: Fahrwerk. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) extra* (2011), Juli, S. 32–39
- [47] GÖHRLE, Christoph ; SCHINDLER, Andreas ; WAGNER, Andreas ; SAWODNY, Oliver: Design and Vehicle Implementation of Preview Active Suspension Controllers. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* PP (2013)
- [48] GÖHRLE, Christoph ; SCHINDLER, Andreas ; WAGNER, Andreas ; SAWODNY, Oliver: Model Predictive Control of semi-active and active suspension systems with available road preview. In: *European Control Conference (ECC) IEEE*, 2013, S. 1499–1504
- [49] GÖHRLE, Christoph ; WAGNER, Andreas ; SCHINDLER, Andreas ; SAWODNY, Oliver: Active Suspension Controller using MPC based on a full-car model with preview information. In: *American Control Conference (ACC) IEEE*, 2012, S. 497–502
- [50] GUSTAFSSON, F.: Determining the initial states in forward-backward filtering. In: *IEEE Transactions on Signal Processing* 44 (1996), Nr. 4, S. 988–992. – ISSN 1053–587X
- [51] HAC, A.: Optimal linear preview control of active vehicle suspension. In: *Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control*, 1990, S. 2779 –2784 vol.5
- [52] HAC, A. ; YOUN, I.: Optimal Design of Active and Semi-Active Suspensions including time delays and Preview. In: *Journal of Vibration and Acoustics* 115 (1993), S. 498–505
- [53] HAC, Aleksander: Optimal Linear Preview Control of Active Vehicle Suspension. In: *Vehicle System Dynamics* 21 (1992), Nr. 1, S. 167–195

-
- [54] HAC, Aleksander ; YOUN, Iljoong: Optimal Semi-Active Suspension with Preview based on a Quarter Car Model. In: *American Control Conference*, 1991, S. 433–438
- [55] HAYAKAWA, K. ; MATSUMOTO, K. ; YAMASHITA, M. ; SUZUKI, Y. ; FUJIMORI, K. ; KIMURA, H.: Robust H_∞ -output feedback control of decoupled automobile active suspension systems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 44 (1999), Nr. 2, S. 392–396. – ISSN 0018–9286
- [56] HEISSING, Bernd ; ERSOY, Metin: *Fahrwerkhandbuch*. Bd. 2. Auflage. Vieweg + Teubner Verlag, 2008
- [57] HOFFMANN, Andreas: *Regelung und Straßensignalaufbereitung für ein vorausschauendes aktives Fahrwerksystem*, Universität Stuttgart, Bachelorarbeit, 2013
- [58] HROVAT, D.: Survey of Advanced Suspension Developments and Related Optimal Control Applications. In: *Automatica* 33 (1997), Nr. 10, S. 1781 – 1817. – ISSN 0005–1098
- [59] HUANG, Shoudong ; DISSANAYAKE, Gamini: Convergence and consistency analysis for extended Kalman filter based SLAM. In: *IEEE Transactions on Robotics* 23 (2007), Nr. 5, S. 1036–1049
- [60] HUDHA, K ; JAMALUDDIN, Hishamuddin ; SAMIN, PM ; RAHMAN, RA: Effects of control techniques and damper constraint on the performance of a semi-active magnetorheological damper. In: *International journal of vehicle autonomous systems* 3 (2005), Nr. 2, S. 230–252
- [61] HUISMAN, R.G.M. ; VELDPAUS, F.E. ; VAN HECK, J.G.A.M. ; KOK, J.J.: Preview Estimation and Control for (Semi-) Active Suspensions. In: *Vehicle System Dynamics* 22 (1993), Nr. 5-6, S. 335–346
- [62] HUISMAN, R.G.M. ; VELDPAUS, F.E. ; VOETS, H.J.M. ; KOK, J.J.: An Optimal Continuous Time Control Strategy for Active Suspensions with Preview. In: *Vehicle System Dynamics* 22 (1993), Nr. 1, S. 43–55
- [63] JAUTZE, Marcus ; BOGNER, Andreas ; EGGENDINGER, Jochen ; REKEWITZ, Gert ; STUMM, Andreas: BMW 7er: Das Verstelldämpfersystem - Dynamische Dämpfer Control. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) extra* (2008), November, S. 100–103
- [64] JONES, W.D.: Easy ride: Bose Corp. uses speaker technology to give cars adaptive suspension. In: *IEEE Spectrum* 42 (2005), Nr. 5, S. 12–14. – ISSN 0018–9235
- [65] KAJINO, Hidenori: *Suspension system for vehicle*. United States Patent, US 8240679 B2, Date of Patent: Aug. 14, 2012, Toyota
- [66] KAJINO, Hidenori ; BUMA, Shuuichi ; CHO, Jae-Sung ; KANDA, Ryo: Electric active suspension system development with driver’s motion analysis. In: *Proceedings of the FISITA 2008 World Automotive Congress*. 2008
- [67] KANG, Okhyun ; PARK, Youngjin ; PARK, Youn-sik ; SUH, Moonsuk: Look-ahead preview control application to the high-mobility tracked vehicle model with trailing arms. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 23 (2009), Nr. 4, S. 914–917. – ISSN 1738–494X

- [68] KARNOPP, D ; CROSBY, MJ ; HARWOOD, RA: Vibration control using semi-active force generators. In: *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry* (1974), May
- [69] KARNOPP, D. ; HEES, G.: Electronically Controllable Vehicle Suspensions. In: *Vehicle System Dynamics* 20 (1991), Nr. 3-4, S. 207–217
- [70] KARNOPP, Dean: Active Damping in Road Vehicle Suspension Systems. In: *Vehicle System Dynamics* 12 (1983), Nr. 6, S. 291–311
- [71] KARNOPP, Dean: Theoretical Limitations in Active Vehicle Suspensions. In: *Vehicle System Dynamics* 15 (1986), Nr. 1, S. 41–54
- [72] KARNOPP, Dean: Permanent Magnet Linear Motors Used as Variable Mechanical Dampers for Vehicle Suspensions. In: *Vehicle System Dynamics* 18 (1989), Nr. 4, S. 187–200
- [73] KARNOPP, Dean ; MARGOLIS, Donald: Adaptive Suspension Concepts for Road Vehicles. In: *Vehicle System Dynamics* 13 (1984), Nr. 3, S. 145–160
- [74] KIM, Hyo-Jun ; YANG, Hyun S. ; PARK, Young-Pil: Improving the vehicle performance with active suspension using road-sensing algorithm. In: *Computers and Structures* 80 (2002), Nr. 18-19, S. 1569 – 1577. – ISSN 0045–7949
- [75] KIM, Kiduck ; JEON, Doyoung: Vibration Suppression in an MR Fluid Damper Suspension System. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 10 (1999), Nr. 10, S. 779–786
- [76] KITCHING, K.J. ; CEBON, D. ; COLE, D.J.: An Experimental Investigation of Preview Control. In: *Vehicle System Dynamics* 32 (1999), Nr. 6, S. 459–478
- [77] KOCH, Guido: *Adaptive control of mechatronic vehicle suspension systems*, Technische Universität München, Diss., 2011
- [78] KOCH, Guido ; FRITSCH, Oliver ; LOHMANN, Boris: Potential of low bandwidth active suspension control with continuously variable damper. In: *Control Engineering Practice* 18 (2010), Nr. 11, S. 1251 – 1262. – ISSN 0967–0661
- [79] KOCH, Guido ; SPIRK, Sebastian ; PELLEGRINI, Enrico ; PLETSCHEN, Nils ; LOHMANN, Boris: Experimental validation of a new adaptive control approach for a hybrid suspension system. In: *American Control Conference (ACC) IEEE*, 2011, S. 4580–4585
- [80] KOK, J.J. ; HECK, J.G.A.M. van ; HUISMAN, R.G.M. ; MUIJDERMAN, J.H.E.A. ; VELDPAUS, F.E.: Active and semi-active control of suspension systems for commercial vehicles based on preview. In: *American Control Conference Bd. 5*, 1997, S. 2992 –2996
- [81] LANGLOIS, R. G. ; ANDERSON, R. J.: Preview Control Algorithms for the Active Suspension of an Off-Road Vehicle. In: *Vehicle System Dynamics* 24 (1995), Nr. 1, S. 65–97
- [82] LINSENMAYER, Steffen: *Vorsteuerungsentwurf für ein aktives Fahrwerkssystem mit Vorausschau*, Universität Stuttgart, Bachelorarbeit, 2012

-
- [83] LÖFBERG, Johan: *Minimax approaches to robust model predictive control*, Linköping University, Diss., 2003
- [84] LOUAM, N. ; WILSON, D. A. ; SHARP, R. S.: Optimal Control of a Vehicle Suspension Incorporating the Time Delay between Front and Rear Wheel Inputs. In: *Vehicle System Dynamics* 17 (1988), Nr. 6, S. 317–336
- [85] LOUAM, N. ; WILSON, D.A. ; SHARP, R.S.: Optimization and Performance Enhancement of Active Suspensions for Automobiles under Preview of the Road. In: *Vehicle System Dynamics* 21 (1992), Nr. 1, S. 39–63
- [86] MARTINUS, D. ; SOENARKO, B. ; NAZARUDDIN, Y.Y.: Optimal control design with preview for semi-active suspension on a half-vehicle model. In: *Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control* Bd. 3, 1996. – ISSN 0191–2216, S. 2798–2803 vol.3
- [87] MARZBANRAD, Javad ; AHMADI, Goodarz ; ZOHOOR, Hassan ; HOJJAT, Yousef: Stochastic optimal preview control of a vehicle suspension. In: *Journal of Sound and Vibration* 275 (2004), Nr. 3-5, S. 973 – 990. – ISSN 0022–460X
- [88] MATTINGLEY, Jacob ; BOYD, Stephen: Automatic code generation for real-time convex optimization. In: *Convex optimization in signal processing and communications* (2009), S. 1–41
- [89] MATTINGLEY, Jacob ; BOYD, Stephen: CVXGEN: a code generator for embedded convex optimization. In: *Optimization and Engineering* 13 (2012), Nr. 1, S. 1–27
- [90] MAYNE, D.Q. ; RAWLINGS, J.B. ; RAO, C.V. ; SCOKAERT, P.O.M.: Constrained model predictive control: Stability and optimality. In: *Automatica* 36 (2000), Nr. 6, S. 789 – 814. – ISSN 0005–1098
- [91] MEHRA, R.K. ; AMIN, J.N. ; HEDRICK, K.J. ; OSORIO, C. ; GOPALASAMY, S.: Active suspension using preview information and model predictive control. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications*, 1997. – ISSN 1085–1992, S. 860 –865
- [92] MICHALSKI, Ralph ; TIETKE, Michael ; KRÜGER, Gerald ; SCHEYHING, Frank ; STELLER, Gerhard ; KLINGEL, Ralph: C-Klasse: Fahrwerk: Neudefinition der Synthese von Komfort und Agilität. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) extra* (2007), S. 82–101
- [93] MILAM, M.B. ; MUSHAMBI, K. ; MURRAY, R.M.: A new computational approach to real-time trajectory generation for constrained mechanical systems. In: *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control* Bd. 1, 2000. – ISSN 0191–2216, S. 845 –851
- [94] MITSCHKE, Manfred ; WALLENTOWITZ, Henning: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Bd. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004
- [95] MÜNSTER, M. ; MAIR, U. ; GILSDORF, J. ; THOMÄ, A. ; MÜLLER, C. ; HIPPE, M. ; HOFFMANN, J.: Electromechanical Active Body Control. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* 9 (2009), 03
-

- [96] MORAN, A. ; NAGAI, M.: Optimal Preview Control of Rear Suspension Using Nonlinear Neural Networks. In: *Vehicle System Dynamics* 22 (1993), Nr. 5-6, S. 321–334
- [97] MORITA, Takao ; TANAKA, Tadao ; KISHIMOTO, Naohiro ; KISHI, Makoto: Ride comfort improvement using preview sensor. In: *Proceedings of the International Symposium on Advanced Vehicle Control*, 1992
- [98] MUIJDERMAN, J.H.E.A. ; KOK, J.J. ; HUISMAN, R.G.M. ; VELDPAUS, F.E. ; HECK, J.G.A.M. van: Preview-Based Control of Suspension Systems for Commercial Vehicles. In: *Vehicle System Dynamics* 32 (1999), Nr. 2-3, S. 237–247
- [99] NYENHUIS, Markus ; FRÖHLICH, Martin: Das Verstelldämpfersystem des BMW X5 - Entwicklung des Sensor- und Beobachterkonzepts. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* (2007), März, S. 248–255
- [100] OPPENHEIM, Alan V. ; WILLSKY, Alan S.: *Signale und Systeme*. VCH Verlagsgesellschaft, 1989
- [101] PELLEGRINI, Enrico: *Model-Based Damper Control for Semi-Active Suspension Systems*, Technischen Universität München, Diss., Dezember 2012
- [102] PETIT, Nicolas ; MILAM, Mark B. ; MURRAY, Richard M.: Inversion Based Constrained Trajectory Optimization. In: *5th IFAC symposium on nonlinear control systems*, 2001
- [103] PHAM, Truc: *Entwurf und Validierung eines Kalman Filters zur Beobachtung der Eigenbewegung eines Kraftfahrzeuges*, Universität Stuttgart, Bachelorarbeit, 2012
- [104] PILBEAM, C. ; SHARP, R.S.: Performance Potential and Power Consumption of Slow-Active Suspension Systems with preview. In: *Vehicle System Dynamics* 25 (1996), S. 169–183
- [105] ROH, Hyoun-Surk ; PARK, Youngjin: Observer-based wheelbase preview control of active vehicle suspensions. In: *KSME International Journal* 12 (1998), Nr. 5, S. 782–791. – ISSN 1738–494X
- [106] RYU, Jihan ; GERDES, J C.: Integrating inertial sensors with GPS for vehicle dynamics control. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 126 (2004), Nr. 2, S. 243–254
- [107] SAVARESI, Sergio M. ; POUSSOT-VASSAL, Charles ; SPELTA, Cristiano ; SENAME, Olivier ; DUGARD, Luc: *Semi-active suspension control design for vehicles*. Access Online via Elsevier, 2010
- [108] SAVARESI, Sergio M. ; SPELTA, Cristiano: Mixed sky-hook and ADD: Approaching the filtering limits of a semi-active suspension. In: *Journal of dynamic systems, measurement, and control* 129 (2007), Nr. 4, S. 382–392
- [109] SCHAAF, Uli: *AUDI AG*. Persönliche Mitteilung, 2012
- [110] SCHINDLER, Andreas: *Neue Konzeption und erstmalige Realisierung eines aktiven Fahrwerks mit Preview-Strategie*, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2009

-
- [111] SCHÖPFEL, Armin ; STINGL, Hanno ; SCHWARZ, Ralf ; DICK, Wolfgang ; BIESALSKI, Adam: Audi A4: Audi drive select. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* (2007), September, S. 124–138
- [112] SCHWARZ, Ralf ; BIESALSKI, Adam ; SCHÖPFEL, Armin ; STINGL, Hanno: Audi Q5: Audi drive select. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) extra* (2008), Juni, S. 61–64
- [113] SENTHIL, S. ; NARAYANAN, S.: Optimal Preview Control of a two-dof Vehicle Model using Stochastic optimal control theory. In: *Vehicle System Dynamics* 25 (1996), S. 413–430
- [114] SHARP, R.S. ; PILBEAM, C.: On the Ride Comfort Benefits available from Road Preview with Slow-active Car Suspensions. In: *Vehicle System Dynamics* 23 (1994), S. 437–448
- [115] SMITH, Malcolm C. ; WANG, Fu-Cheng: Controller parameterization for disturbance response decoupling: application to vehicle active suspension control. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 10 (2002), Nr. 3, S. 393–407
- [116] SONNTAG, Marcus: *Institut für Systemdynamik (ISYS), Universität Stuttgart*. <http://www.isys.uni-stuttgart.de/mitarbeiter/sonntag/msqlp/msqlp.html>, 2013
- [117] SPIRK, S. ; HU, C.: Traktionsorientierte Regelung aktiver Fahrwerke mittels Straßenprofilabtastung oder radstandbasierter Schätzung. In: *6. VDIVDE Fachtagung Autoreg 2013 - Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren* Bd. 2196. Düsseldorf : VDI Verlag, Jun 2013
- [118] SPIRK, Sebastian ; HENNING, Kay-Uwe: Wheel Load Oriented Control of Semi-Active and Active Suspension Systems Using Pre-Located Road Sampling. In: *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress* Bd. 201. Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978–3–642–33831–1, S. 167–182
- [119] STREITER, Ralph: *Entwicklung und Realisierung eines analytischen Regelkonzeptes für eine aktive Federung*, Technische Universität Berlin, Diss., 1996
- [120] STREITER, Ralph: ABC Pre-Scan: Das aktive Fahrwerk mit Vorausschau. In: *Aachener Kolloquium*, 2008
- [121] STREITER, Ralph: ABC Pre-Scan im F700 - Das vorausschauende aktive Fahrwerk von MercedesBenz. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* (2008), Mai, S. 388–397
- [122] SUGAI, Haruhiko ; BUMA, Shuuichi ; KANDA, Ryo ; YOSHIOKA, Kenshiro ; HASEGAWA, Masaaki: Preview Ride Comfort Control for Electric Active Suspension. In: *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress* Bd. 198. Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978–3–642–33794–9, S. 147–161
- [123] SUN, Weichao ; GAO, Huijun ; KAYNAK, Okyay: Finite frequency H_∞ control for vehicle active suspension systems. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 19 (2011), Nr. 2, S. 416
- [124] SUNWOO, MyoungHo ; C.CHEOK, Ka ; HUANG, N. J.: Model reference adaptive control for vehicle active suspension systems. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 38 (1991), Nr. 3, S. 217–222. – ISSN 0278–0046

- [125] THOMPSON, A. G.: An Active Suspension with Optimal Linear State Feedback. In: *Vehicle System Dynamics* 5 (1976), Nr. 4, S. 187–203
- [126] THOMPSON, A.G. ; DAVIS, B.R. ; PEARCE, C.E.M.: An optimal Linear Active Suspension with finite road preview. In: *Society of Automotive Engineers, Inc*, 1980
- [127] THOMPSON, A.G. ; PEARCE, C.E.M.: Physically Realisable Feedback Controls for a Fully Active Preview Suspension Applied to a Half-Car Model. In: *Vehicle System Dynamics* 30 (1998), Nr. 1, S. 17–35
- [128] TOMIZUKA, Masayoshi: Optimum Linear Preview Control With Application to Vehicle Suspension. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 98 (1976), Nr. 3, S. 309–315
- [129] TSENG, H.E. ; HEDRICK, J.K.: Semi-Active Control Laws - Optimal and Sub-Optimal. In: *Vehicle System Dynamics* 23 (1994), Nr. 1, S. 545–569
- [130] UNGER, Andreas: *Serientaugliche quadratisch optimale Regelung für semiaktive Pkw-Fahrwerke*. Cuvillier Verlag Göttingen, Technische Universität München, Diss., 2012
- [131] UNGER, Andreas: *AUDI AG. Persönliche Mitteilung*, 2013
- [132] VALÁŠEK, Michael ; NOVAK, M ; ŠIKA, Z ; VACULIN, O: Extended ground-hook - New concept of semi-active control of truck's suspension. In: *Vehicle system dynamics* 27 (1997), Nr. 5-6, S. 289–303
- [133] VAN DER AA, M. A. H. ; MUIJDERMAN, J. H. E. A. ; VELDPAUS, F. E.: Constrained Optimal Control of Semi-Active Suspension Systems with Preview. In: *Vehicle System Dynamics* 28 (1997), Nr. 4-5, S. 307–323
- [134] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE (VDA): *Jahresbericht 2013*
- [135] WANG, Jun ; WILSON, David A. ; HALIKIAS, George D.: H_∞ robust-performance control of decoupled active suspension systems based on LMI method. In: *Proceedings of the American Control Conference* Bd. 4 IEEE, 2001, S. 2658–2663
- [136] WEIST, U. ; MISSEL, J. ; CYTRYNSKI, S. ; MEHREN, D. ; SCHWARZ, T. ; KERN, S.: Fahrkomfort der Extraklasse. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) extra* (2013), Juli, S. 124–128
- [137] WELCH, Greg ; BISHOP, Gary: *An introduction to the Kalman filter*. July 2006
- [138] WINNER, Hermann ; HAKULI, Stephan ; (HRSG.), Gabriele W.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Bd. 2. Auflage. Vieweg + Teubner Verlag, 2012
- [139] WÜRL, Julian: *Validierung und Parameteroptimierung von vertikaldynamischen Kraftfahrzeugmodellen*, Universität Stuttgart, Bachelorarbeit, 2013
- [140] YAMASHITA, Masashi ; FUJIMORI, Kazuo ; HAYAKAWA, Kisaburo ; KIMURA, Hidenori: Application of H_∞ control to active suspension systems. In: *Automatica* 30 (1994), Nr. 11, S. 1717–1729

- [141] YAN, Li ; SHAOJUN, Liu: Preview Control of an Active Vehicle Suspension System Based on a Four-Degree-of-Freedom Half-Car Model. In: *Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)* Bd. 1, 2009, S. 826–830
- [142] YEH, Edge C. ; TSAO, Y. J.: A fuzzy preview control scheme of active suspension for rough road. In: *International Journal of Vehicle Design* 15 (1994), S. 167–180
- [143] YI, K ; SONG, B. S.: A new adaptive sky-hook control of vehicle semi-active suspensions. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 213 (1999), Nr. 3, S. 293–303
- [144] YOUN, Iljoong: Optimal design of discrete time preview controllers for semi-active and active suspension systems. In: *KSME International Journal* 14 (2000), Nr. 8, S. 807–815. – ISSN 1738–494X
- [145] ZEIPERT, Sascha: *Potentialanalyse von Regelstrategien für aktive Fahrwerke mit Vorausschau*, Technische Universität Braunschweig, Diplomarbeit, 2009
- [146] ZEITZ, Michael: Differenzielle Flachheit: Eine nützliche Methodik auch für lineare SISO-Systeme, Differential Flatness: A Useful Method also for Linear SISO Systems. In: *at - Automatisierungstechnik* 01 (2010), S. 5–13
- [147] ZEITZ, Michael: Flatness-based Design of Linear Time-variant SISO Systems. In: *at - Automatisierungstechnik* 07 (2010), S. 351–360