



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN**

Vienna University of Technology

## Dissertation

# Charakterisierung von Lenksystemen mit Hilfe eines Lenksystemprüfstands

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

**Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Horst Ecker**

eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Maschinenwesen und  
Betriebswissenschaften

von

Rico Schimpf, M.Sc.

Matrikelnummer: 0928568

Johann-Schmaus-Straße 3, 80637 München

geboren am 23. Juni 1979, Erbach (Odenwald)

Wien, 22. Juni 2016



## Vorwort

Diese Arbeit entstand in Kooperation mit der Technischen Universität Wien während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Maschinenbau, Fahrzeugtechnik und Flugzeugtechnik an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München. Die Inhalte und Ergebnisse dieser Dissertation wurden in einem von mir geleiteten Industrieprojekt erarbeitet. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Horst Ecker für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Die Zusammenarbeit und die intensiven wissenschaftlichen Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit haben mich stets motiviert und angetrieben. Weiterhin gilt mein besonderer Dank Prof. Dr. Peter E. Pfeffer von der Hochschule München für die Initiierung und Betreuung dieser Arbeit und die fachlichen Diskussionen und inhaltlichen Anregungen. Weiterhin möchte ich mich für die überaus erfolgreiche und freundschaftliche Zusammenarbeit in den zahlreichen Industrieprojekten rund um das Thema Lenksysteme und die Etablierung des Lenksystemprüfstands als Industriebenchmark bedanken.

Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Plöchl und Assistent Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Edelmann von der Technischen Universität Wien danke ich sehr herzlich für die motivierenden Gespräche und Anregungen zum Gelingen dieser Arbeit.

Nicht minder aufreibend waren die vergangenen Jahre für meine Familie. Für die Geduld und Entbehrungen in dieser Zeit möchte ich in besonderer Weise meiner Frau Svenja danken. Meinen Eltern bin ich dankbar für Ihrer Unterstützung während meiner gesamten akademischen Ausbildung. Weiterhin bin ich meinem verstorbenen Großvater in besonderem Dank für seine Unterstützung und Motivation verbunden.

Für die wertvollen Diskussionen und intensiven Gespräche möchte ich Herrn Jan Hlawatschek und Christian Scheiblegger danken. Frau Dr. Jin Huai Lin, Alessandro Contini und Andreas Michels danke ich für ihre Unterstützung. Mein Dank gilt auch den beteiligten Mitarbeitern der Hochschule München. Die freundschaftliche Kollegialität und das gute Arbeitsklima werden mir in sehr guter Erinnerung bleiben.

Allen beteiligten Firmen und Industriepartnern möchte für die Unterstützung während meiner Arbeit am Lenksystemprüfstand der Hochschule München danken. Besonders die erfolgreichen Le Mans Prototypen (LMP1) Projekte werden mir in freudiger Erinnerung bleiben.

München, im Juni 2016

für  
Maximilian

## Kurzfassung

Die steigende Komplexität von mechatronischen Fahrzeugkomponenten und gleichzeitige Verkürzung der Entwicklungszyklen bedingt eine zunehmende Fahrzeugentwicklung in einem (teil-) virtuellen Umfeld. Im Fahrwerksbereich sind verstärkt elektromechanische Lenksysteme im Einsatz. Anforderungen an die einzelnen Funktionalitäten und die Funktionssicherheit steigern den Testaufwand enorm. Die potentiell geringere Rückmeldedefreudigkeit einer elektromechanischen Lenkung (EPS) erfordert zudem einen größeren Abstimmungsumfang von Softwaremodulen im Gesamtfahrzeug. Um eine Komponentenentwicklung in diesem Spannungsfeld zu gewährleisten, müssen entsprechende Methodiken genutzt bzw. entwickelt werden. Hierzu stellt die Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulation ein effizientes Mittel auf Gesamtfahrzeugebene dar. Auf sogenannten Hardware-in-the-Loop Prüfständen können Fahrzeugtests kostengünstig und von Prototypen unabhängig getestet werden. Dies gewährleistet einen effizienten Entwicklungsprozess. Jedoch müssen diese geeigneten Prüfeinrichtungen entwickelt und qualifiziert werden. In der Konzeptphase und in der virtuellen Welt werden Lenksystemmodelle mit einer hohen Güte benötigt. Für eine entsprechende Parametrierung müssen die Systemeigenschaften detailliert ermittelt werden. Zur Ermittlung bietet sich eine Charakterisierung an, um die Systemeigenschaften gesamthaft zu erfassen und detailliert zu dokumentieren. Hieraus leitet sich die Motivation und der Handlungsbedarf ab eine Prüfeinrichtung für Lenksysteme zu konzipieren und Testreihen zur Charakterisierung auf System- und Gesamtfahrzeugebene zu entwickeln und umzusetzen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst der aktuelle Stand der Technik bei Prüfeinrichtungen für Lenksysteme ermittelt. Die bei Lieferanten eingesetzten Prüfeinrichtungen dienen meist dem Nachweis der Betriebsfestigkeit und sind auf bestimmte Fahrmanöver wie Parkieren ausgelegt. Andere Prüfeinrichtungen stammen beispielsweise aus der Schwingungstechnik und decken wiederum Prüfbereiche wie die Kleinsignalanregung ab. Anhand dieser Recherche werden die Vor- und Nachteile der Konzepte erläutert und daraus die Anforderungen für eine Prüfeinrichtung für Lenksysteme definiert. Als Ergebnis dieser Konzeptarbeit wird in dieser Arbeit ein Prüfstand für Lenksysteme mit zwei Linearmotoren und einem Schrittmotor aufgebaut. Die Komponenten werden mit einem Fahrzeug- und Umgebungsmodell gekoppelt und über eine zentrale Echtzeitumgebung gesteuert. Mit dieser Entwicklungsumgebung ist es möglich eine große Bandbreite an Testmöglichkeiten darzustellen. Die Testreihen teilen sich in die Bereiche Charakterisierung durch Systemtests, Charakterisierung des Übertragungsverhaltens und Charakterisierung durch Fahrmanöver auf. Grundlage für diese Testreihen stellen u.a. die in der Lenksystementwicklung standardisierten Fahrzeugtests (z.B. Weave-Test) dar. Die Testreihen mit erweiterter Sensorik zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens bieten die Möglichkeit in verschiedenen Konfigurationen den Einfluss von Lenksystemkomponenten zu ermitteln.

Durch den entwickelten Testkatalog steht eine neue Testmethodik zur Verfügung, mit welcher eine umfangreiche Charakterisierung von Lenksystemen durchgeführt werden kann. Unter anderem wird zum Nachweis der Leistungsfähigkeit von Lenksystemen eine Wirkungsgradmessung durchgeführt, welche die Charakteristik des Lenksystems über den gesamten Betriebsbereich zeigt. Weiterhin ergeben sich neue Erkenntnisse in Bezug auf den Lasteinfluss und die Zahnstangengeschwindigkeit auf die Durchschiebkraft. An Hand von einem konventionellen hydraulischen und zwei elektromechanischen Lenksystemen mit unterschiedlichen Regelungskonzepten wird eine Charakterisierung im Vergleich aufgezeigt und die verschiedenen Systemeigenschaften dargestellt und analysiert. Die Analyse ergibt wichtige Erkenntnisse in Bezug auf das Übertragungsverhalten der Lenksystemkonzepte und des Einflusses des Regelungskonzeptes. Es zeigt sich, dass das Übertragungsverhalten eines elektromechanischen Lenksystems im Bereich bis ca. 10 - 15 Hz durch das Regelungskonzept an ein konventionelles hydraulisches Lenksystem angenähert werden kann. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit können zukünftig die Systemeigenschaften eines Lenksystems vor allem in Bezug auf das Übertragungsverhalten detailliert ermittelt und optimiert werden. Weiterhin wird die Möglichkeit geschaffen Fahrzeugtests in die teil-virtuelle Welt auf einen Lenksystemprüfstand zu verlagern. Es können die Systemeigenschaften auf Gesamtfahrzeugebene ermittelt und standardisierte Testreihen aus der Lenksystementwicklung unter robusten Testbedingungen durchgeführt werden.

## Abstract

The increasing complexity of mechatronic vehicle components and the concurrent reduction of development cycles require a cumulative vehicle development in a semi-virtual environment. In the field of chassis technologies there are electric power steering (EPS) systems increasingly in use. Requirements for individual steering functions and the functional safety run up the testing effort immensely. The potentially lower feedback of an electric power steering also requires a higher application effort of software modules at vehicle level. To ensure a component development in this field of conflict, appropriate methods must be used or even developed. The hardware-in-the-loop (HiL) simulation is an efficient method at vehicle level. At so-called hardware-in-the-loop test benches vehicle tests can be done independently and cost effective without using prototypes. This ensures an efficient development process. However, these suitable testing facilities must be developed and qualified. In the early phase and in the virtual world steering system models are needed with a high quality. For a corresponding parameter setting the system characteristics must be investigated in detail. For the investigation a characterization offering itself to capture the system characteristics overall and to document in detail. Therefrom the motivation and the need of action are derived to design a test device for steering systems, to develop test series for the characterization at system and vehicle level and to implement these test series.

In this study the current state of the art in testing equipment for steering systems is investigated firstly. The test equipment used by suppliers mostly used for the proof of endurance strength and are designed for specific driving conditions such as parking. Other test equipment for example coming from the vibration control and cover up test fields as the small-signal excitation. Based on this research, the advantages and disadvantages of the concepts are explained and the requirements for a testing device for steering systems are defined. As a result of this concept work a test bench for steering systems with two linear motors and a step motor is configured in this work. The components are coupled to a vehicle and environment model and controlled by a central real-time environment. With this development environment it is possible to describe a wide range of testing capabilities. The tests series are divided into the fields of characterization in system testing, characterization of the transfer behavior and characterization by driving maneuvers. Among others standardized vehicle tests (e.g. Weave-Test) in the steering system development provide the basis for these test series. The test series with an extended sensor setting for measuring the transfer characteristics of the steering system offer the possibility in various configurations to determine the influence of the steering system components.

With the developed test catalog a new test method is available, which allows to conduct an extensive characterization of steering systems. Among others for the detection of the performance of steering systems an efficiency measurement is carried out, which shows the characteristic of the steering system over the whole operating range. Furthermore new findings in relation to the load influence and the rack velocity on the system friction have been resulted. On the basis of a conventional hydraulic and two electric steering systems with different controller concepts a characterization in comparison is presented and the various system characteristics are illustrated and analyzed. The analysis reveals important insights regarding the transfer behavior of the steering system concepts and the influence of the controller concept. It turns out, that the transfer behavior of an electric power steering system in the range up to 10 - 15 Hz can be approximated by the controller concept to a conventional hydraulic steering system. In future with the results of this work the system characteristics of a steering system can be determined and optimized in detail especially with focus on the transfer behavior. Furthermore the possibility is created to transfer vehicle tests to the semi- virtual world on a steering system test bench. The system characteristics at vehicle level can be investigated and standardized tests from the steering system development can be executed under robust testing conditions.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Stand der Technik</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	2
1.2	Lenksysteme in Fahrzeugen . . . . .	3
1.2.1	Hydraulische Lenksysteme (HPS) . . . . .	5
1.2.2	Elektromechanische Lenksysteme (EPS) . . . . .	6
1.3	Lenkgefühl . . . . .	11
1.3.1	Fahrmanöver zur objektiven Beurteilung . . . . .	12
1.3.2	Open-Loop Fahrmanöver . . . . .	13
1.3.3	Closed-Loop Fahrmanöver . . . . .	14
1.4	Funktionssicherheit . . . . .	15
1.5	Entwicklungsmethoden . . . . .	16
1.5.1	Model-in-the-Loop (MiL) . . . . .	16
1.5.2	Software-in-the-Loop (SiL) . . . . .	17
1.5.3	Hardware-in-the-Loop (HiL) . . . . .	18
1.5.4	X-in-the-Loop (XiL) . . . . .	19
1.6	Testmöglichkeiten für Lenksysteme . . . . .	20
1.7	Zielsetzung und Rahmenbedingungen . . . . .	23
1.8	Aufbau der Arbeit . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Anforderungen an Lenksysteme und resultierende Testanforderungen</b>	<b>27</b>
2.1	Resultierende Anforderungen an den Test von Lenksystemen . . . . .	31
2.2	Resultierende Anforderungen an eine Prüfeinrichtung für Lenksysteme . . .	33
2.3	Resultierende Anforderungen an einen Hardware-in-the-Loop Betrieb . . .	35
<b>3</b>	<b>Aufbau und Entwicklung des Lenksystemprüfstands mit HiL- Funktio- nalität</b>	<b>39</b>
3.1	Prüfstandskonzept - Komponenten und Technik . . . . .	39
3.1.1	Schnittstelle Lenksystemprüfstand - Lenksystem . . . . .	39
3.1.2	Auswahl der Aktuatorik . . . . .	41
3.1.3	Antriebsart und Aktuatorikkonzept . . . . .	42
3.1.4	Anregungsart und Anregung . . . . .	43
3.1.5	Gesamtkonzept . . . . .	43

3.2	Charakteristik des Lenksystemprüfstands . . . . .	44
3.2.1	Spurstangenkraftaktor (Linearmotor) . . . . .	46
3.2.2	Lenkradaktor (Torquemotor) . . . . .	50
3.2.3	Systemvernetzung . . . . .	53
3.2.4	Signalfluss und Zykluszeiten . . . . .	55
3.2.5	Prüfstandsensorik . . . . .	56
3.2.6	Modellbasierte Lenksystemprüfstandssteuerung . . . . .	57
3.2.7	Betriebsarten und Einstellungen . . . . .	59
3.3	Integration von Lenksystemen . . . . .	61
3.3.1	Mechanischer Aufbau . . . . .	61
3.3.2	Hydraulisches Lenksystem . . . . .	65
3.3.3	Elektromechanisches Lenksystem . . . . .	71
3.4	Hardware-in-the-Loop Betrieb . . . . .	75
3.4.1	Integration des Fahrzeug- und Umgebungsmodell . . . . .	77
3.4.2	Validierung des Fahrzeug- und Umgebungsmodell . . . . .	77
3.4.3	Anwendungsbereich der Hardware-in-the-Loop Simulation . . . . .	78
3.5	Testautomatisierung . . . . .	80
<b>4</b>	<b>Charakterisierung von Lenksystemen am Lenksystemprüfstand</b>	<b>81</b>
4.1	Prüfkonfiguration . . . . .	83
4.2	Charakterisierung durch Systemtests . . . . .	85
4.2.1	Systemreibung . . . . .	86
4.2.2	Leerdurchdrehmoment . . . . .	93
4.2.3	Systemsteifigkeit . . . . .	100
4.2.4	Verstärkungskennlinie . . . . .	105
4.2.5	Lenkübersetzung . . . . .	108
4.2.6	Wirkungsgrad (Lenkleistung) . . . . .	110
4.3	Charakterisierung des Übertragungsverhaltens . . . . .	114
4.3.1	Analyse des Führungsverhaltens . . . . .	115
4.3.2	Analyse des Rückmeldeverhaltens . . . . .	120
4.4	Charakterisierung durch Fahrmanöver . . . . .	136
4.4.1	Weave-Test (Sinuslenken) . . . . .	139
4.4.2	Transition-Test (stationäres Anlenken) . . . . .	143
4.4.3	Lenkwinkelsprung . . . . .	145
4.4.4	Stationäre Kreisfahrt . . . . .	148
4.4.5	Fahrmanöver mit Störanregung . . . . .	148
4.5	Betriebslastennachfahrversuche (BLNV) . . . . .	151
<b>5</b>	<b>Charakterisierung von Lenksystemen im Vergleich</b>	<b>153</b>
5.1	Untersuchte Lenksysteme . . . . .	153

---

5.2	Charakterisierung durch Systemtests . . . . .	156
5.2.1	Systemreibung . . . . .	156
5.2.2	Systemsteifigkeit . . . . .	158
5.3	Charakterisierung des Übertragungsverhalten . . . . .	159
5.3.1	Analyse des Führungsverhaltens . . . . .	159
5.3.2	Analyse des Rückmeldeverhaltens . . . . .	162
5.4	Charakterisierung durch Fahrmanöver . . . . .	171
5.4.1	Weave-Test . . . . .	172
5.4.2	Transition-Test . . . . .	174
5.4.3	Lenkwinkelsprung . . . . .	175
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>179</b>

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ABS	Antiblockiersystem
APA	Achsparelle
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
BLDC	Brushless DC electric motor (Bürstenloser Gleichstrommotor)
BLNV	Betriebslastennachfahrversuch
CAN	Controller Area Network (serielles Bussystem)
CAX	computer-aided (computerunterstützt)
DSS	Druckstückspiel
ECU	Electronic Control Unit (Steuergerät)
EHPS	Electric Hydraulic Power Steering (elektrohydraulisches Lenksystem)
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EPS	Electric Power Steering (elektromechanisches Lenksystem)
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
E/E	Electric/Electronic
FlexRay	serielles deterministisches Bussystem
HiL	Hardware-in-the-Loop
HPS	Hydraulic Power Steering (hydraulisches Lenksystem)
HiL	Hardware-in-the-Loop
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
KGT	Kugelgewindetrieb
LZW	Lenkzwischenwelle
MiL	Model-in-the-Loop
NVH	Noise Vibration Harshness
SiL	Software-in-the-Loop
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
XCP	Extended Calibration Protocol
XiL	X-in-the-Loop

## Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
$A_C$	mm <sup>2</sup>	Grundfläche Arbeitszylinder (hydraulisches Lenksystem)
$C_{GD}$	N/°	Gesamtdrehsteifigkeit des Lenksystems
$C_{DS}$	N/°	Steifigkeit des Drehstabs (Drehmomentsensor)
$C_{LS}$	N/°	Steifigkeit des Lenksystems (Restanteile ohne Drehstabsteifigkeit)
$C_{GZ}$	N/m	Gesamtsteifigkeit des Lenksystems
$F_G$	N	Grundreibung
$F_{hydr}$	N	Kraft resultierend aus der hydraulischen Lenkunterstützung
$F_L$	N	Reibung resultierend aus einer äußeren Last (Lenkradmoment)
$F_{LM}$	N	Kraft resultierend aus einer aufgeprägten äußeren Last (Lenkradmoment)
$F_{mech}$	N	Kraft resultierend aus dem Fahrerhandmoment
$F_{SR}$	N	resultierende Systemreibung (Gesamtreibung)
$F_{UE}$	N	resultierende Kraft aus der Lenkunterstützungseinheit
$F_Z$	N	Zahnstangenkraft
$i_{KGT}$	-	Übersetzungsverhältnis Kugelgewindetrieb
$i_{RT}$	-	Übersetzungsverhältnis Riementrieb
$i_R$	-	Übersetzungsverhältnis Lenkgetrieberitzel
$i_L$	-	kinematische Lenkübersetzung des Lenksystems
$I_{UE}$	A	Strom E-Motor Unterstützungseinheit
$\varphi_{LR}$	°	Lenkradwinkel
$\varphi_{MS}$	°	Drehwinkel an der Messstelle
$\dot{\varphi}_{LR}$	°/s	Lenkradwinkelgeschwindigkeit
$p_C$	bar	Druck im Arbeitszylinder (hydraulisches Lenkgetriebe)
$P_A$	W	Ausgangsleistung
$P_E$	W	Eingangsleistung
$P_H$	W	Leistung resultierend aus dem Fahrerhandmoment
$P_{UE}$	W	Leistung der Unterstützungseinheit
$P_{ZS}$	W	Leistung resultierend aus der Zahnstangenkraft
$r_R$	m	Ritzelradius
$r_{Rv}$	m	variabler Ritzelradius
$s_{ZS}$	mm	Zahnstangenweg

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$T_{DS}$	Nm	Drehstabmoment
$T_G$	Nm	Drehmoment aus der Grundreibung
$T_L$	Nm	Reibung resultierend aus einer äußeren Last (Zahnstangenkraft)
$T_{LDM}$	Nm	resultierendes Leerdurchdrehmoment (Gesamtreibung)
$T_{LG}$	Nm	Drehmoment aus der Reibung im Lenkgetriebe
$T_{LS}$	Nm	Drehmoment aus der Reibung in der Lenksäule
$T_{LM}$	Nm	Lenkradmoment
$T_M$	Nm	Motormoment (Lenkunterstützungseinheit)
$T_{UE}$	Nm	Drehmoment aus der Lenkunterstützungseinheit
$T_Z$	Nm	Drehmoment resultierend aus einer aufgeprägten äußeren Last (Zahnstangenkraft)
$T_{mp}$	°C	Temperatur
$U_{Bat}$	V	Batteriespannung
$v_{Fzg}$	km/h	Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{ZS}$	mm/s	Zahnstangengeschwindigkeit
$\mu_{EPS}$	-	Gesamtwirkungsgrad des Lenksystems

# 1 Einleitung und Stand der Technik

In modernen Kraftfahrzeugen werden in den letzten zwei Jahrzehnten stetig mehr mechatronische Komponenten eingesetzt. Diese Systeme verbessern die aktive und passive Sicherheit, den Komfort und die Information des Fahrers. Zudem wären die heutigen Emissionsgrenzwerte ohne den Einsatz hoch komplexer Motorsteuerungen kaum einzuhalten. Die größten Fortschritte wurden im Bereich von Komfort und Sicherheit geschaffen angefangen vom ABS über das ESP bis hin zu Allradlenkungen bestehend aus elektromechanischer Vorder- und Hinterachslenkung. Dabei erhöhen sich der Entwicklungsaufwand und die Entwicklungszeiten für das Gesamtfahrzeug überproportional.

Dem gegenüber stehen die Forderungen nach kurzen Entwicklungszeiten, niedrigen Entwicklungskosten und einer Vielfalt an Produktvarianten. Da viele Funktionen nicht unabhängig voneinander arbeiten, sondern in einem Netzwerkverbund miteinander kommunizieren, resultiert eine komplexe Entwicklungsaufgabe. Höhere Anforderung von Seiten der Kunden und des Gesetzgebers lassen die Anzahl der Funktionen im Fahrzeug weiterhin ansteigen. Durch die Entwicklung von immer leistungsfähigeren Mikroprozessoren können zukünftig mehr Funktionalitäten auf einem Steuergerät untergebracht werden. Um den bereits genannten Anforderungen gerecht zu werden, müssen schon in der Frühphase des Entwicklungsprozesses Komponenten erprobt werden, ohne dass bereits das Gesamtfahrzeug existiert. Modelle bilden das Gesamtfahrzeug oder die noch nicht vorhandenen Komponenten ab und die Soft- bzw. Hardware kann bereits erprobt werden.

Durch den zunehmenden Einsatz von elektromechanischen Lenksystemen steigt auch in diesem Bereich der Systementwicklungsaufwand verglichen mit hydraulischen Lenksystemen enorm an. Gründe hierfür sind die Vielfalt an möglichen Funktionalitäten, Anforderungen an die Funktionssicherheit und die Erfüllung von Kundenwünschen hinsichtlich Fahrkomfort, Assistenzsystemen und Fahrerlebnis. Gleichzeitig verkürzen sich aus Kostengründen und verringerten Produktlaufzeiten die Entwicklungszyklen. Dieses Spannungsfeld stellt die Lenksystementwicklung vor große Herausforderungen. Dies führt zu einer stetigen Verlagerung der Entwicklung in die Simulation und in die teil-virtuelle Erprobung unter Verwendung von CAx Methoden. Hiermit können das reale Lenksystem oder Teile davon ohne existierendes Gesamtfahrzeug getestet werden. Für diese Entwicklungsstufe müssen geeignete Lenksystemprüfstände zur Verfügung stehen, welche die erforderlichen Schnittstellengrößen in der geforderten Güte zur Verfügung stellen.

### 1.1 Motivation

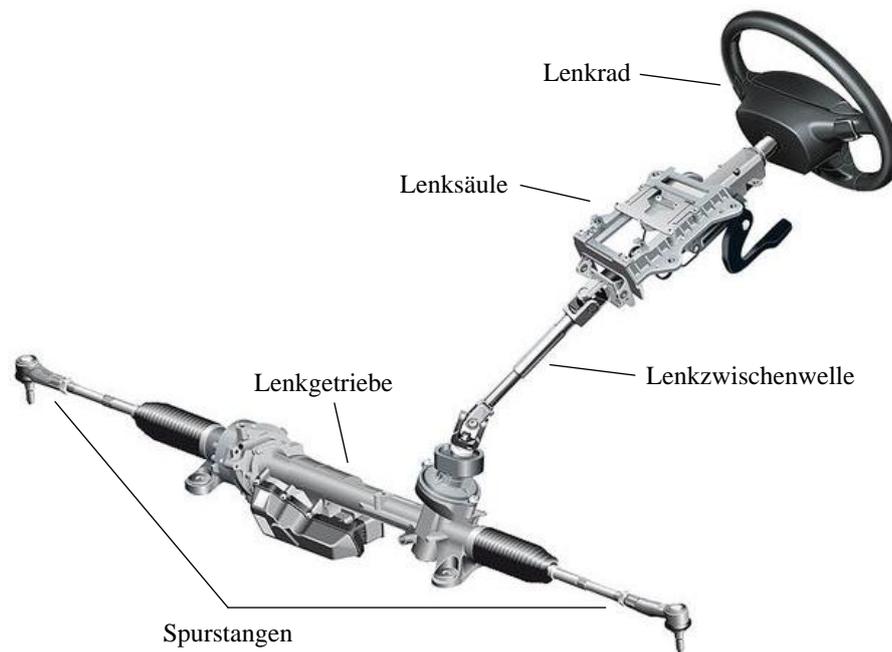
Neue Entwicklungstrends und der Einzug von mechatronischen Systemen im Fahrwerksbereich von Kraftfahrzeugen verlangen nach einer Vielzahl von Innovationen im Entwicklungsprozess. Durch die Komplexität eines elektromechanischen Lenksystems und der möglichen Parametervariationen von einzelnen Softwaremodulen steigt der Testaufwand exponentiell an, zumal die Komponente Lenksystem oftmals als Basisprodukt auf einer gesamten Modellplattform verwendet wird [16]. Ein Teil dieser Testreihen kann durch Softwaretests zur der Prüfung der Funktionslogik und der Funktionssicherheit oder Simulationen abgedeckt werden. Speziell für Simulationen müssen die Systemeigenschaften des realen Lenksystems hinreichend untersucht werden, um diese in einer Vollfahrzeugsimulation modellieren, parametrisieren und optimieren zu können. Zur Ermittlung der Systemeigenschaften bietet sich eine Charakterisierung an, um diese Eigenschaften gesamthaft zu erfassen und detailliert zu dokumentieren. Hierdurch können die komplexen technischen Zusammenhänge besser verstanden und mit einer hohen Güte modelliert werden. Testreihen zur Abstimmung der Lenkunterstützung, des Lenkgefühls oder des Rückmeldeverhaltens werden bisher weitgehend im Fahrzeug durchgeführt. Zudem muss jede neue Hardware- und Softwarevariante durch eine umfangreiche Testprozedur im Fahrversuch freigegeben werden.

Zu Beginn einer Produktentwicklung stehen wenige bis keine Prototypenfahrzeuge zur Verfügung. Aber auch im Entwicklungsprozess selbst sind diese Fahrzeuge nicht in der erforderlichen Anzahl vorhanden, so dass Fahrzeugtests auf Komponentenprüfstände verlagert werden müssen. In diesem Fall wird das reale Fahrzeug als digitaler Prototyp abgebildet und die Fahrzeugtests in einer teil-virtuellen Testumgebung abgebildet. In Vorentwicklungsthemen, beispielsweise neuartige Reglerkonzepte oder Softwaremodule, können in der ersten Entwicklungsphase mit einem realen Lenksystem Testreihen fast ausschließlich auf einem Prüfstand durchgeführt werden, da die Funktionssicherheit noch nicht gewährleistet ist. Fahrmanöver im Grenzbereich und Prüfungen zur Reglerstabilität führen zu keiner Gefährdung des Fahrers oder des Umfelds. Im Rahmen der Entwicklung des hoch- bzw. vollautomatisierten Fahrens werden zukünftig eine Vielzahl von Testfällen zwingend auf Prüfständen dargestellt werden müssen, um die Funktionssicherheit nachweisen zu können. Ein weiterer Vorteil einer teil-virtuellen Testumgebung ist die einfache Austauschbarkeit einer Lenkung in einem digitalen Prototyp. Damit ergibt sich die Möglichkeit verschiedene Lenksystemtypen im selben virtuellen Fahrzeug zu testen. In einem realen Fahrzeug wäre dies ohne umfangreiche Umbaumaßnahmen kaum möglich.

Die folgenden Abschnitte zeigen den aktuellen Stand der Technik von Lenksystemen, von Entwicklungsmethoden, von Lenksystemprüfständen sowie der Bewertung des Lenkgefühls. Aus dieser Recherche leitet sich abschließend der Aufbau, die Rahmenbedingungen sowie die Zielsetzung dieser Arbeit ab.

## 1.2 Lenksysteme in Fahrzeugen

Lenksysteme in Fahrzeugen dienen der Fahrzeugquerführung durch den Fahrer und geben diesem in umgekehrter Wirkrichtung eine Rückmeldung über den aktuellen Fahrbahnzustand. Je nach Bauform und Systemauslegung des Lenksystems werden diese Aufgaben mehr oder minder erfüllt. Ein Lenksystem besteht aus den Bauteilen Lenkrad, Lenksäule, Lenkzwischenwelle (Lenkspindel), Lenkgetriebe und den Spurstangen. In Personenkraftwagen sind Lenkgetriebe meistens als Ritzel-Zahnstangen ausgeführt [57] und unterscheiden sich hinsichtlich der Unterstützungsart. Diese kann hydraulisch oder elektromechanisch ausgeführt sein.

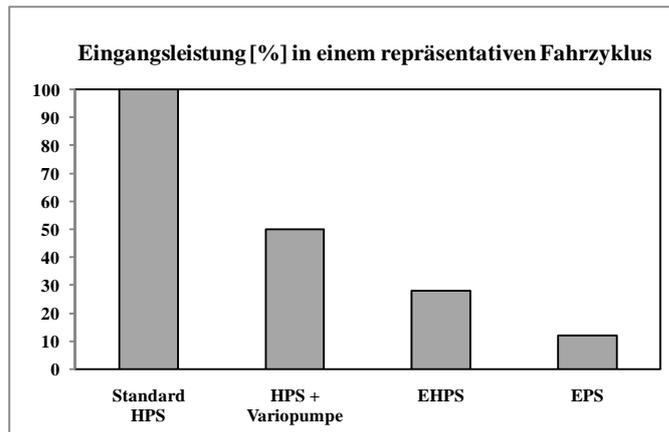


**Abbildung 1.1:** Aufbau eines Lenksystems [39]

Grundsätzlich stellen sich folgende Anforderungen an Lenksysteme [57]:

- geringer Lenkaufwand beim Parkieren
- Zielgenauigkeit und guter Geradeauslauf
- spontanes Ansprechen und Feinfühligkeit
- Rückmeldung Kraftschluss Reifen/Fahrbahn
- Rückstellverhalten zur Mittellage
- Gutes Mittengefühl

Um den zunehmenden Anforderungen nach einer effektiven Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen Rechnung zu tragen, werden in Personenkraftwagen mechatronische Systeme eingesetzt. Bei Lenksystemen zeigt sich dieser Trend durch die Umstellung auf elektromechanische Lenksysteme (EPS). Diese verdrängen konventionelle hydraulische (HPS) sowie elektrohydraulische (EHPS) Lenksysteme. Die benötigte elektrische Leistung wird nur während des Lenkvorgangs abgerufen (“Power-On-Demand”), was zu einem positiven Verbrauchsverhalten im Vergleich zu hydraulischen Systemen führt (Abb. 1.2).



**Abbildung 1.2:** Leistungsaufnahme Lenksysteme [60]

Elektromechanische Lenksysteme der neusten Generation können zu einer Verbrauchsreduzierung von bis zu 0,3 l Kraftstoff auf 100 km beitragen [39, 4, 3, 12, 16]. Der Wegfall von Hydraulikflüssigkeit, Hydraulikbehälter, Hydraulikpumpe und Hydraulikschläuche sind weitere Maßnahmen für den Umweltschutz und vereinfacht die Logistik in der Produktion [39]. Weiterhin steigt durch diese Maßnahmen die Zuverlässigkeit und die Ausfallquote reduziert sich enorm. Funktional bieten elektromechanische Lenksysteme eine geschwindigkeitsabhängige Lenkunterstützung, aktiven Rücklauf oder die Kompensation der Reibung. Zusätzlich ermöglichen diese Lenksysteme die Einbindung von Komfort- und Sicherheitsfunktionen wie beispielsweise der Einpark- oder Spurhalteassistent [61]. Bei Hybrid- oder Elektro-Fahrzeugen können EPS Systeme dauerhaft die Lenkunterstützung mit der elektromotorischen Energieversorgung aufrechterhalten, da keine vom Verbrennungsmotor abhängigen Nebenaggregate benötigt werden [56, 16].

### 1.2.1 Hydraulische Lenksysteme (HPS)

Mitte der 1950er Jahren hielten hydraulisch unterstützte Lenksysteme (HPS) Einzug in Personenkraftwagen, da durch eine steigende Vorderachslast die Lenkkräfte deutlich anstiegen. Hydraulische Lenksysteme konnten die Lenkkräfte reduzieren und den Lenkungscomfort und die Sicherheit steigern [6]. Die Lenkunterstützung wird in Form einer hydraulischen Kraft an der Zahnstange erzeugt und wird der mechanischen Kraft, resultierend aus dem Fahrerhandmoment, überlagert (Abb. 1.3). Im Vergleich zu elektromechanischen Lenksystemen sind hydraulische kostengünstig in der Herstellung. Nachteilig bei hydraulischen Lenksystemen ist, dass über die Geometrie des im Drehstab integrierten Ventils nur eine Unterstützungskennlinie abgebildet werden kann.

Inzwischen existieren hydraulische Lenksysteme, welchen über eine Steuerung der Durchflussmenge auch geschwindigkeitsabhängig mehrere Unterstützungskennlinien abbilden können [57]. Durch den Dauerbetrieb der Förderpumpe am Verbrennungsmotor haben hydraulische Lenksysteme systembedingt einen hohen Energieverbrauch. Beim Parkieren werden hohe Pumpenleistungen bei gleichzeitig niedriger Motordrehzahl benötigt. Dieser Bedarfsfall beträgt ca. 10 % für reale Fahrzyklen. Dies führt zu hohen Verlustleistungen bei konventionellen Pumpen. Zur Reduktion der Verlustleistung wurden alternative Pumpen entwickelt, die das Fördervolumen der Pumpe drehzahlabhängig verstellen oder den Systemvolumenstrom über ein Magnetventil reduziert [46]. Diese Maßnahmen verringern den Energieverbrauch aber nicht im selben Maße wie ein elektrohydraulisches Lenksystem (EHPS). Elektrohydraulische Lenksysteme haben eine Förderpumpe, die elektromotorisch angetrieben wird, und nur im Bedarfsfall aktiv ist. Im nicht aktiven Modus wird nur Energie für die Erzeugung des Systemdrucks, der vorgehalten wird, und das Steuergerät (ECU) benötigt. Bei beiden Lenksystemen handelt es sich um unidirektionale Lenksysteme, wodurch kaum Fahrer- oder Fahrassistenzsysteme realisierbar sind.

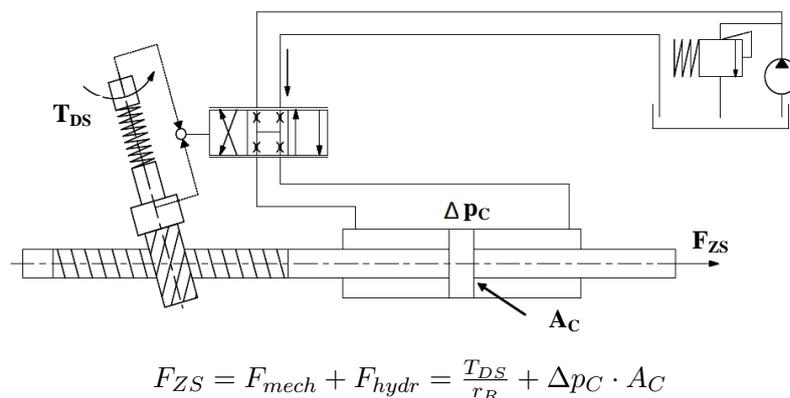


Abbildung 1.3: Prinzipieller Aufbau eines hydraulischen Lenksystems [57]

Der Test- und Applikationsaufwand für hydraulische und elektrohydraulische Lenksysteme ist auch mit konventionellen Entwicklungsmethoden beherrschbar. Heutige hydraulische Zahnstangenlenkungen zeichnen sich durch ein sehr direktes Übertragungsverhalten aus. Diese Eigenschaft führt dazu, dass der Fahrer eine optimale Rückmeldung von der Fahrbahn erfährt [27, 26]. Negativ wirkt sich diese Eigenschaft auf unerwünschte Schwingungen in Form von Unwuchten oder Reifen- und Bremskraftschwankungen aus, die vom Fahrer am Lenkrad als Stößigkeit oder Lenkunruhe wahrgenommen werden [51]. Eine aktive Kompensation ist bei einem konventionellen hydraulischen System kaum möglich.

Bauform	Position UE	Fr	Vorteile	Nachteile
HPS (konventionell)	Zahnstange (Zylinder + Kolben)	bis 15 kN (abhängig von Kolbenfläche und Pumpen- leistung)	+ hohe Zahnstangenkräfte + kompakte Bauweise	- hohe Leistungsaufnahme - eine Ventilkennlinie für alle Lenkbereich und Situationen
HPS (Servotronic)	Zahnstange (Zylinder + Kolben)		+ variable Ventilkennlinie	- höhere Kosten
HPS (Vario-Pumpe)	Zahnstange (Zylinder + Kolben)		+ reduzierte Leistungsaufnahme	- Kosten
E-HPS	Zahnstange (Zylinder + Kolben)		+ Energieverbrauch + Package + Abstimmungsvari- anten	- höhere Kosten erhöhter Entwicklungs- und Applikationsaufwand

**Tabelle 1.1:** HPS Bauformen

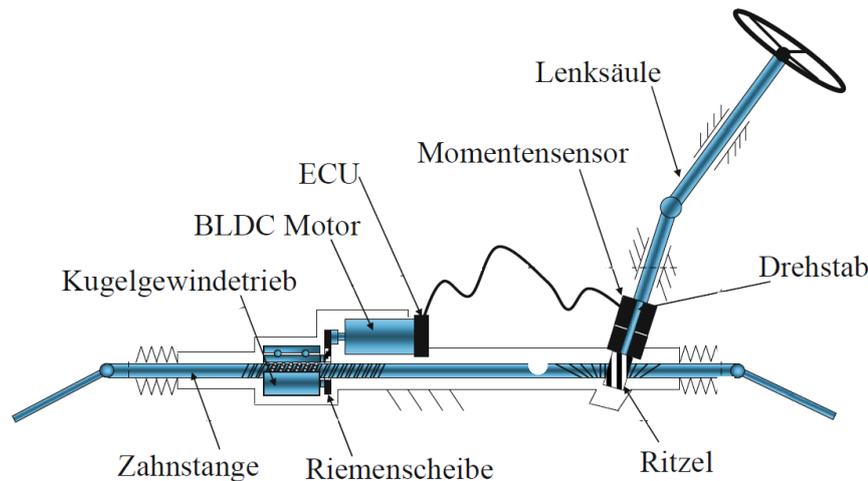
### 1.2.2 Elektromechanische Lenksysteme (EPS)

Aktuell werden von den Lenksystemherstellern verschiedene Bauformen von elektromechanische Lenksysteme auf dem Markt angeboten. Je nach Bauraum und Zahnstangenkraftbedarf werden verschiedene Konzepte angewandt (Abb. 1.2) [61]. Beginnend am Lenkrad kann die Unterstützungseinheit (Power Pack), bestehend aus Elektromotor und Steuergerät (Power Pack), an der Lenksäule (EPS<sub>c</sub>), am Zahnstangenritzel (EPS<sub>p</sub>, EPS<sub>dp</sub>) oder an der Zahnstange angeordnet sein (EPS<sub>rc</sub>, EPS<sub>apa</sub>) [57].

Bauform	Position UE	Fr	Vorteile	Nachteile
EPSc (column)	Lenksäule	10 kN	+ geringere Anforderungen bzgl. Temperaturbereich und Wasserdichtigkeit	- limitierte Lenkkräfte - Crashverhalten - Akustikverhalten
EPSp (pinion)	Lenkritzeln	10 kN	+ höhere Lenkleistung vgl. EPSc + Crashverhalten	- höhere Anforderungen bzgl. Temperaturbereich und Wasserdichtigkeit - Einbauraum kaum variabel
EPSdp (dual pinion)	Separates Ritzeln	12 kN	+ Antriebsübersetzung unabhängig von Lenkübersetzung + höhere Variabilität des Einbauraums vgl. EPSp + Crashverhalten	- höhere Anforderungen bzgl. Temperaturbereich und Wasserdichtigkeit
EPSapa (axle parallel)	Zahnstange	16 kN	+ hoher Wirkungsgrad + variabler Einbauraum + kleinerer E-Motor durch Übersetzungsstufe des Riementrieb + Crashverhalten	- höhere Anforderungen bzgl. Temperaturbereich und Wasserdichtigkeit
EPSrc (rack concentric)	Zahnstange	16 kN	+ relativ kompakt + Crashverhalten	- größerer E-Motor wg. fehlender Übersetzungsstufe - höhere Anforderungen bzgl. Temperaturbereich und Wasserdichtigkeit

Tabelle 1.2: EPS Bauformen

Alle Bauformen sind bidirektional und können in Verbindung mit Fahrzeugumfeldsensorik mit Fahrdynamik- und Fahrerassistenzfunktionen ausgestattet werden [61]. Dazu zählen Park- und Spurhalteassistent, Seitenwindkompensation oder Lenkradmomentenempfehlung bei  $\mu$ -split Bremsungen [4, 3]. Verschiedene Kennfeldeinstellungen bei der Lenkunterstützung geben dem Fahrer die Möglichkeit zwischen einer sportlichen oder komfortablen Einstellung zu wählen [3]. Im Entwicklungsprozess sind Abstimmungen durch einfache Änderung von Parametern in der Software möglich anstatt aufwändig die Ventilgeometrien wie bei HPS Lenksystemen zu ändern. Die Entwicklung von Leitungen, Pumpen, Riemen für verschiedene Verbrennungsmotorvarianten entfällt gänzlich [12]. Die Auslegungsvarianten führen aufgrund der Systemkomplexität trotz des Entfalls der genannten Entwicklungsschritte zu einem hohen Arbeitsaufwand in der Entwicklung. Durch die Elektrifizierung des Lenksystems werden hohe Anforderungen an die Funktionale Sicherheit gestellt.



**Abbildung 1.4:** Systemaufbau einer EPSapa [56]

Abbildung 1.4 zeigt den Systemaufbau eines elektromechanischen Lenksystems am Beispiel einer achsparallelen Anordnung der Unterstützungseinheit (EPSapa). Über den zwischen Lenksäule und Ritzel angeordneten Drehstab wird das Lenkmoment sensiert. Die ECU der Unterstützungseinheit berechnet aus dem Lenkmoment das Soll Drehmoment für den Elektromotor. Über eine Riemenscheibe und einen Kugelgewindetrieb wird die Unterstützungskraft auf die Zahnstange aufgeprägt. Die Vernetzung mit anderen Fahrdynamikregelsystemen erfolgt über eine CAN- Schnittstelle. Elektromechanische Lenksysteme der neuesten Generation sind über eine FlexRay Schnittstelle mit den Fahrdynamiksteuergereäten verbunden. Damit können auch Sicherheitskritische Fahrerassistenzfunktionen auf einem Lenksystemsteuergerät ausgeführt werden.

### Softwarearchitektur von EPS Lenksystemen

Das Softwarekonzept moderner EPS Lenksysteme besteht aus einzelnen Modulen, welche verschiedene Lenkfunktionen beinhalten. Die zentrale Softwarefunktion ist das Kennlinienfeld für die Lenkkraftunterstützung. In diesem sind abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit verschiedene Kennlinien hinterlegt, woraus das Unterstützungsmoment des Elektromotors berechnet wird. Weitere Lenkfunktionsmodule wie aktiver Rücklauf, Reibungskompensation, Trägheitskompensation oder eine aktive Dämpfung berechnen ein zusätzliches Moment. Degradierungsfunktionen für den Bauteilschutz folgen der Berechnung des Unterstützungsmoments und reduzieren bei Bedarf das angeforderte Unterstützungsmoment. Die in Abbildung 1.5 dargestellte Architektur ist beispielhaft für ein modernes elektromechanisches Lenksystem. [8]

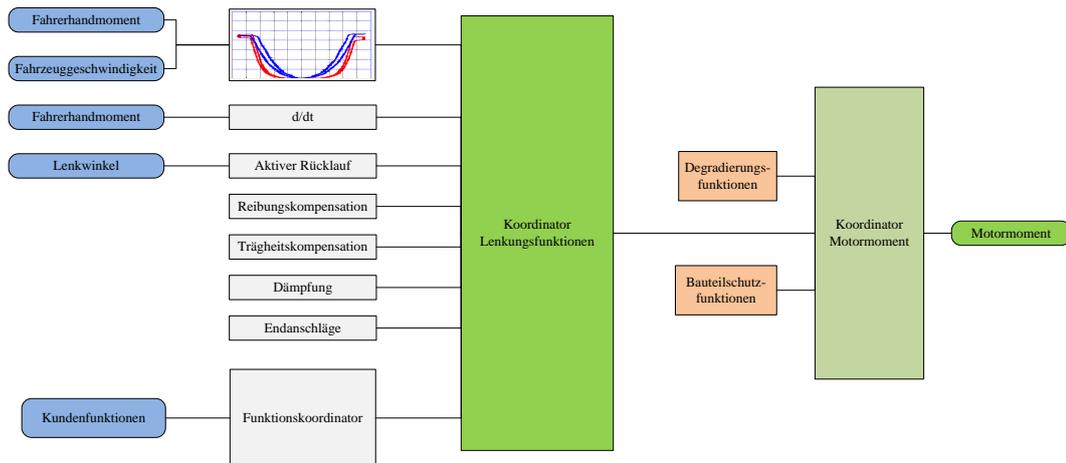


Abbildung 1.5: EPS Softwarearchitektur [8]

Je nach Anforderung des Fahrzeugherstellers können maßgeschneiderte Zusatzmodule für Fahrdynamik- oder Fahrerassistenzsysteme (Kundenfunktionen) integriert werden. Weiterhin können unerwünschte Eigenschaften der Achsgeometrie (teil-) kompensiert werden.

### Regelungsstrategien von EPS Lenksystemen

Seit der Markteinführung von elektromechanischen Lenksystemen unterliegen die Hard- und Softwarekomponenten einer fortlaufenden Weiterentwicklung. Im Bereich der Regelungsstrategien existieren verschiedene Ansätze, wobei folgender Grundsatz gilt:

*“Störinformationen sollten minimiert bzw. gedämpft werden, während Nutzinformationen der Fahrbahn fühlbar sein müssen” [12, 27]*

Die meisten aktuell (2012) am Markt verfügbaren elektromechanischen Lenksysteme basieren auf einem konventionellen Regelungsansatz [28], welcher sich vom Funktionsprinzip hydraulischer Lenksysteme ableitet. Je stärker die Verdrehung des Ventils, desto mehr Unterstützung durch Öffnung der Ventilkanaäle. Bei elektromechanischen Lenksystemen berechnet eine Softwarefunktion (Verstärkungskennlinien) aus Drehstabmoment und Fahrzeuggeschwindigkeit die Sollkraft bzw. das Solldrehmoment des Aktuators der Unterstützungseinheit. Im eigentlichen Sinne ist dies eine Steuerung. Der Regelkreis wird erst durch die Schleife Fahrer-Fahrzeug geschlossen.



Abbildung 1.6: Konventionelles Regelungskonzept einer EPS

Elektromechanische Lenksysteme mit einem konventionellen Regelungskonzept (Abb.1.6) haben bedingt durch den Systemaufbau ein deutlich schlechteres Rückmeldeverhalten im Vergleich zu hydraulischen Lenksystemen (Abb.1.7) [26, 21]. Die hohe Trägheit der bewegten Massen (Zahnstange, KGT, BLDC-Motor) minimiert die Störkräfte, führt zum anderen aber zu einer schlechten Fahrbahnrückmeldung [56]. Bei den ersten elektromechanischen Lenksystemen auf dem Markt und bei aktuellen Varianten wird dieses Verhalten in der Fachpresse sehr oft beanstandet.

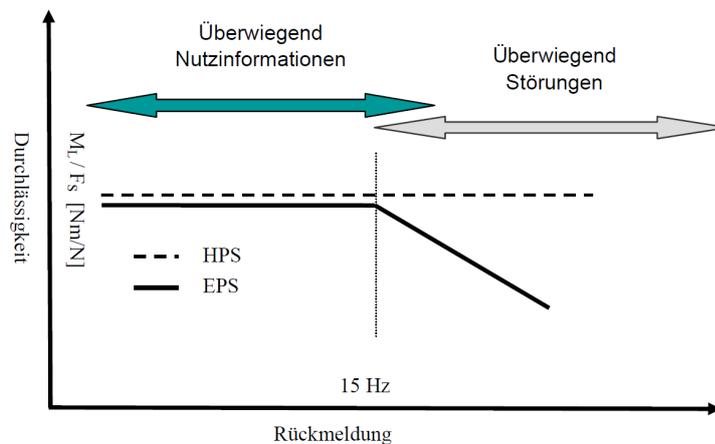


Abbildung 1.7: Rückmeldeverhalten von Lenksystemen [24]

Durch geeignete Regelungsstrategien kann das Rückmeldeverhalten an eine HPS angenähert werden, ohne dabei die Filtereigenschaften von Störsignalen zu verlieren. Eine eingehende Beschreibung dieser Regelungsstrategien ist in Abschnitt 5.1 zu finden. Die Reduzierung der Trägheiten der mechanischen Bauteile erzielt auch eine Verbesserung des Rückmeldeverhaltens. Diese Maßnahme wirkt sich gegebenenfalls negativ auf die akustischen Anforderungen des Lenksystems aus [28].

## 1.3 Lenkgefühl

In der Fahrzeugentwicklung wird das Lenkgefühl von Testfahrern im Fahrversuch subjektiv bewertet und abgestimmt. Diese iterative Herangehensweise erfordert erfahrene Ingenieure [57]. Durch die steigenden Applikationsmöglichkeiten moderner Lenksysteme gestaltet sich diese Aufgabe umfangreicher. Gleichzeitig wird die Anzahl an Prototypenfahrzeugen reduziert. Hierdurch getrieben wird sich zukünftig die Bewertung des Lenkgefühls teilweise in die Simulation und auf Prüfstände verlagern müssen. Die Variantenvielfalt an Applikationsständen kann auf Prüfständen deutlich reduziert werden. Zukünftig wird es das Ziel sein in einem digitalen Prototyp eine Grundapplikation zu parametrieren. Dabei spielen die Objektivierung des Lenkgefühls und die daraus resultierenden Kriterien eine entscheidende Rolle, um das Lenkverhalten eindeutig zu beschreiben. Die subjektive Abstimmung wird stets am Ende des Applikationsprozesses stehen. Die Applikation in der digitalen Welt befindet sich noch in der Anfangsphase und ist als eine hilfreiche Ergänzung des Applikationsprozesses im Fahrzeug zu sehen.

Nach [25] ist das Lenkgefühl wie folgt definiert:

*“Lenkgefühl ist die Summe der optischen, kinästhetischen und haptischen Sinneseindrücke des Fahrers beim Lenken eines Fahrzeugs und entspricht einer subjektiv empfundenen komplexen Erfahrung”*

Das Lenkgefühl ist hiernach von zentraler Bedeutung zur sichern Führung eines Fahrzeuges. Es ist eine haptische Informationsquelle über den dynamischen Zustand des Fahrzeuges. Der Fahrer bildet einen Regelkreis mit dem Fahrzeug (Abb. 1.10). Folgende Anforderungen stellen sich nach [25] an das Lenkgefühl:

***Lenkungsführungsverhalten (Lenkpräzision):***

*präzises Lenkradmoment aus der Nulllage heraus bis zu hohen Fahrzeugquerbeschleunigungen*

***Lenkungsrückmeldung:***

*Übermittlung von Fahrzustands- und Fahrbahninformationen*

***Lenkkomfort:***

*je nach Fahrsituation angepasstes Lenkradmoment, aktiver Lenkungsrücklauf*

Prägend für die Charakteristik eines Lenksystems sind das Führungsverhalten und das Rückmeldeverhalten. Der für das Lenkgefühl relevante fahrdynamische Leistungsbereich ist in Abbildung 1.8 dargestellt. Dieser Leistungsbereich wird durch den Fahrer, das Fahrzeug und der Fahrbahn zwischen 80 km/h und 120 km/h bestimmt. Die Bereiche von niedriger und mittlerer Beschleunigung von bis zu  $4 \text{ m/s}^2$  treten am häufigsten auf. Die Auswertung in Abbildung 1.8 zeigt die relative Häufigkeit der Fahrzeugquerbeschleunigungsanteile während einer Landstraßenfahrt. Die Verteilung lässt sich nach [26] für andere Fahrbereiche verallgemeinern und stellt den Leistungsbereich hinsichtlich der Querbeschleunigungsanteile für einen Normalfahrer dar. Die hieraus resultierenden Lenkradwinkelfrequenzen liegen bei 0.5 Hz. Moderne Lenksysteme sind für Lenkradwinkelfrequenzen von bis zu 3 Hz ausgelegt, welche bei einem doppelten Spurwechsel auftreten können [56]. Für eine Darstellung der Fahrmanöver auf einem Lenksystemprüfstand müssen die Schnittstellengrößen (Spurstangenkräfte und Lenkradmoment bzw. Lenkradwinkel) in entsprechender Güte zur Verfügung gestellt werden. Die Aktuatoren des Lenksystemprüfstands müssen auf diese Dynamik ausgelegt werden. Des weiteren ist ein vollständig validierte Fahrzeugmodellumgebung nötig um die Fahrmanöver virtuell darzustellen.

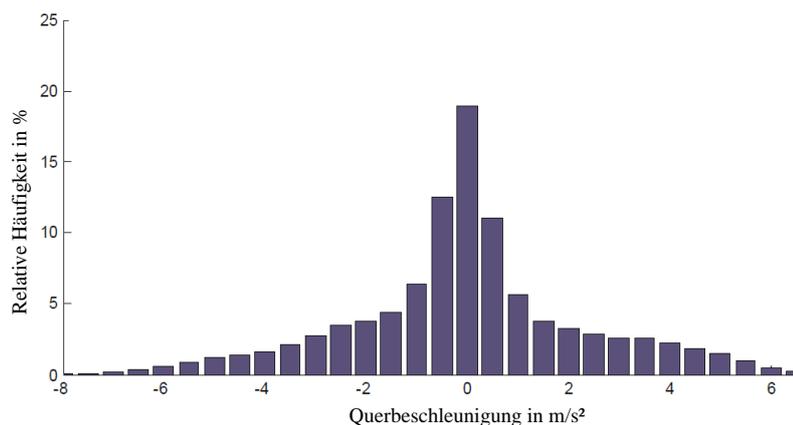


Abbildung 1.8: Fahrdynamisch relevanter Leistungsbereich für das Lenkgefühl[56, 26]

#### 1.3.1 Fahrmanöver zur objektiven Beurteilung

In einer Beurteilung wird zwischen subjektiver und objektiver Bewertung unterschieden. Unter subjektiver Bewertung versteht man allgemein die Bewertung eines Sachverhaltes nach Kriterien und Voraussetzungen, welche durch das Subjekt selbst festgelegt werden. Die objektive Bewertung definiert sich im Gegensatz dazu über Kriterien und Voraussetzungen, welche sich auf einem Objekt begründen. Hieraus ergibt sich eine Unabhängigkeit vom Subjekt. Projiziert auf die Lenksystementwicklung bedeutet dies, dass für die objektive Bewertung physikalische Werte oder Parameter aus Zeitdaten festgelegt werden müssen (Objekt), welche aus Messungen gewonnen werden [25]. Diese sind unabhängig von der Be-

wertung des Fahrers (Subjekt). Für die Anforderungen an das Lenkgefühl existieren eine Vielzahl von Fahrmanövern in der Lenksystementwicklung zur Bewertung des Lenkverhaltens. Jedes dieser Fahrmanöver ist für einen speziellen Fahrzustand zugeschnitten. Man unterscheidet zwischen Open-Loop Fahrmanövern und Closed-Loop Fahrmanövern. Bei Closed-Loop Fahrmanövern ist der Fahrer in den Regelkreis eingebunden, d.h. er fungiert als Regler und führt das Fahrzeug und korrigiert ggf. die Fahrzeugreaktion auf Lenkradeingaben. Bei Open-Loop Fahrmanövern hingegen ist die Lenkradeingabe fest definiert und die Fahrzeugreaktion wird nicht korrigiert.

### 1.3.2 Open-Loop Fahrmanöver

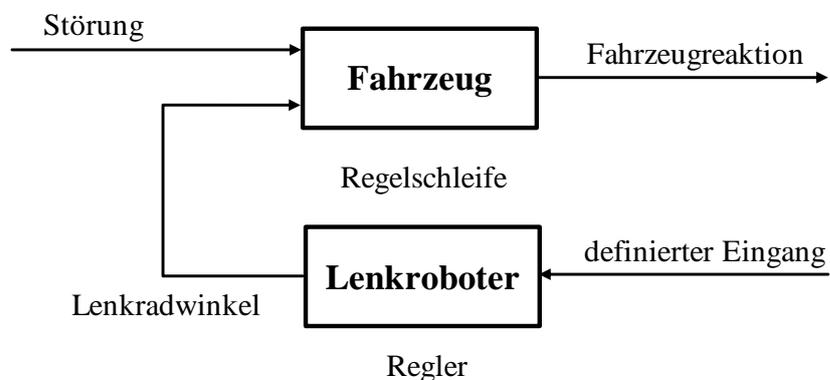


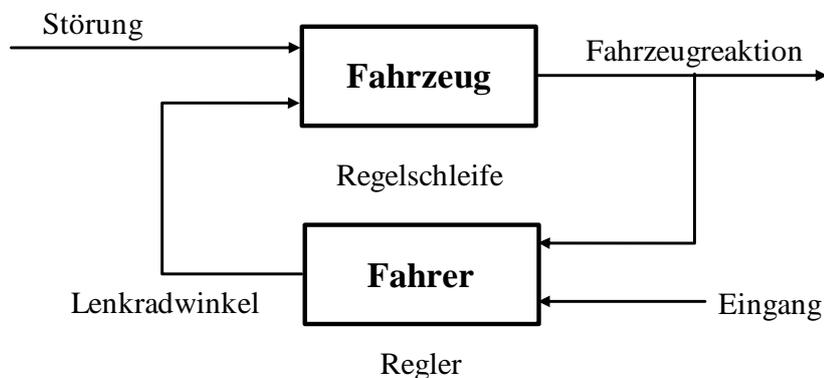
Abbildung 1.9: Open-Loop Manöver

Für einen hohen Grad an Reproduzierbarkeit sollte bei Open-Loop Fahrmanövern im Fahrzeug ein Lenkroboter eingesetzt werden. Die Lenkradeingabe kann durch den Lenkroboter sehr präzise umgesetzt werden. Beispielsweise bei Fahrmanövern für das Mittengefühl (OnCenter) können hierdurch sehr gute Messergebnisse erzielt werden [26]. Am einem Lenksystemprüfstand können die Reproduzierbarkeit und die Qualität der Messergebnisse nochmals gesteigert werden. Einfache Integration von erweiterter Messtechnik und die Minimierung von Umwelteinflüssen bieten weitere Vorteile im Vergleich zum Fahrzeugtest. Die Auswahl der folgenden Fahrmanöver sind in der Lenksystementwicklung standardisiert und werden zur Bewertung des Lenkverhaltens herangezogen:

- Weave-Test ISO 13674-1 [33]
- Transition-Test ISO 13674-2 [34]
- Lenkradwinkelsprung (Step-Input-Test) ISO 7401 [37]
- Steady-State Circular Test ISO 4138 [36]
- Frequency Response Test ISO 8726 [38]

Aus den Messdaten werden Zeitverläufe und Frequenzgänge erstellt und nach testspezifischen Werten und Parametern des jeweiligen Fahrmanövers objektiv bewertet. In der Literatur [25, 19] wird auf diese Tests verwiesen um ein umfangreiches Bild der Lenksystemeigenschaften zu erlangen. Daher sind diese Tests von zentraler Bedeutung in der Lenksystementwicklung und werden zur Charakterisierung durch Fahrmanöver am Lenksystemprüfstand herangezogen. Eine detaillierte Beschreibung der Test und der Bewertungskriterien erfolgt in Kapitel 4.

#### 1.3.3 Closed-Loop Fahrmanöver



**Abbildung 1.10:** Closed-Loop Manöver

Fahrmanöver zur subjektive Beurteilung werden meist im Closed-Loop durchgeführt [19]. Closed-Loop Fahrmanöver sind für die Objektivierung von Systemeigenschaften weitestgehend ungeeignet, da sich durch den Einfluss des Fahrers und der Randbedingungen eine hohe Reproduzierbarkeit kaum darstellen lässt. An einem Lenksystemprüfstand können diese negativen Einflüsse nahezu vollständig kompensiert werden. Durch die Verwendung eines Fahrzeug- und Fahrermodells wird eine hohe Reproduzierbarkeit erzielt. Daher kön-

nen auch Fahrmanöver wie eine Fahrt auf einem Handlingkurs für die Objektivierung herangezogen werden. Ist jedoch auf eine entsprechende Parametrierung des Fahrermodells für die jeweilige Kursführung zu achten.

## 1.4 Funktionssicherheit

Durch den zunehmenden Einsatz von elektronischen Bauteilen und Softwarefunktionalitäten steigt die Komplexität des Systems. Damit einhergehend ist eine Komplexitätssteigerung des Entwicklungsprozesses und eine Reduzierung der Gesamtbeherschbarkeit. Daher werden die einzelnen Fahrzeugkomponenten systematisch entwickelt. Eine Beispiel hierfür ist im Entwicklungsprozess von mechatronischen Systemen das V-Modell (Abb. 1.11). Bei der Entwicklung nach diesem Modell werden zunächst die Anforderungen (Anforderungsmanagement) in einem Lastenheft definiert nach denen das Produkt entwickelt und später verifiziert wird, d.h. das Ergebnis der Entwicklung wird mit den Anforderungen abglichen. Dies wird sowohl auf Software, Hardware als auch auf Gesamtsystemebene durchgeführt. Eine Produktentwicklung mit einer hohen Systemsicherheit setzt allerdings voraus, dass bereits im Anforderungsmanagement die entsprechenden Sicherheitsstandards berücksichtigt wurden. Diese richten sich meist nach dem Stand der Technik, welcher in Normen und Standards zusammengefasst ist. Vor diesem Hintergrund wurde die ISO 26262 [35] für Personenkraftwagen verfasst und ist eine Anpassung der Grundnorm IEC 61508. Die Norm beinhaltet rechtliche, technische und methodische Aspekte in der Entwicklung von Personenkraftwagen [45].

Aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen an die Führung eines Fahrzeugs sind elektromechanische Lenksysteme nach ASIL-D abzusichern. So werden zunächst die einzelnen Softwarekomponenten verifiziert, welche dann in der Gesamtsoftware nochmals getestet werden. Dieser Softwarestand wird anschließend auf der Zielhardware nach einem Testkatalog getestet. Nach einem abschließenden Fahrzeugtest anhand einem Fahrmanöverkatalog erhält die Software eine Straßenfreigabe [8]. Letztere Absicherungstests eignen sich im Besonderen auf einer Hardware-in-the-Loop Prüfeinrichtung durchgeführt zu werden. Hieraus würden sich enorme Effizienz- und Qualitätssteigerungen ergeben. Der besondere Vorteil der Nutzung einer Prüfeinrichtung für Lenksysteme im Gegensatz zum Fahrzeug ist, dass auch Fehler provozierende, also z.B. gefährliche Fahrsituationen nachgestellt werden können. Automatisierte Tests können über Nacht auch in Abwesenheit von Personal durchlaufen werden, so dass im Vergleich zu einer manuellen Testdurchführung umfangreichere Tests in derselben Zeit möglich sind. Dies wirkt sich wiederum positiv auf die Sicherheit und Zuverlässigkeit der freigegebenen Software aus. Im Hinblick auf Steer-by-Wire Systeme kommt diesem Aspekt eine gesteigerte Bedeutung zu. Bei einem gesamten Ausfall des Lenksystems hat der Fahrer keine Möglichkeit mehr den Fahrzeugkurs vorzugeben. Dieses deutlich erhöhte Sicherheitsrisiko erfordert eine umfangreichere Absicherung im Vergleich

zu konventionellen Lenksystemkonzepten. Der resultierende Testaufwand ist ohne den Einsatz von Hardware-in-the-Loop Prüfeinrichtung in der geforderten Entwicklungszeit nicht mehr zu leisten.

## 1.5 Entwicklungsmethoden

Die mechatronischen Systeme eines Fahrzeugs werden parallel und getrennt voneinander entwickelt und getestet. Jedoch müssen diese im späteren Fahrzeugverbund miteinander kommunizieren und agieren. Beim traditionellen Systementwurf wurden Elektrik/Elektronik, Mechanik und Informationsverarbeitung eines Fahrzeuges getrennt entwickelt. Abstimmungen oder eine vernetzte Entwicklung gab es nur an wenigen Punkten. Durch die sich stetig stärker überschneidenden Systemgrenzen dieser Felder, vor allem innerhalb von Fahrzeugbaugruppen, haben sich in der Automobilindustrie für die jeweiligen Entwicklungsstufen interdisziplinäre Entwurfsmethodiken entwickelt. Diese gewährleisteten einen effizienten und abgesicherten Entwicklungsprozess. Üblicherweise wird innerhalb der E/E-Entwicklung von mechatronischen Komponenten die modellbasierte Entwurfsmethodik nach dem V-Modell angewandt. Die wichtigsten Schritte sind in den folgenden Unterkapitel beschrieben.

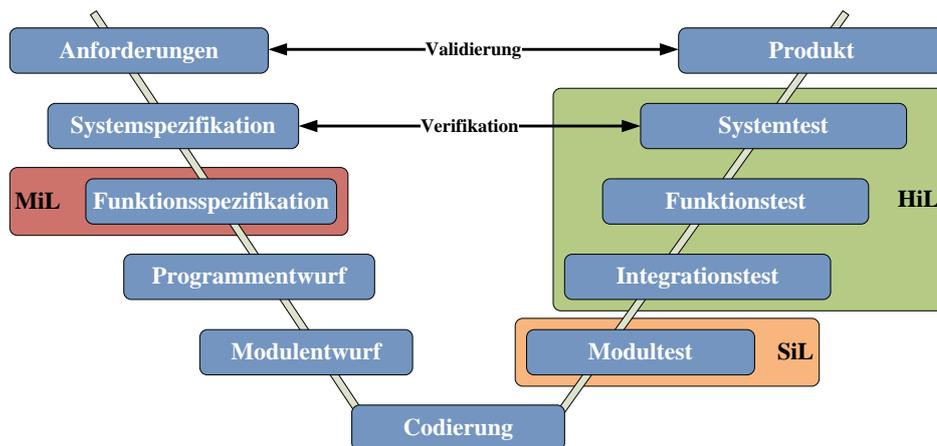
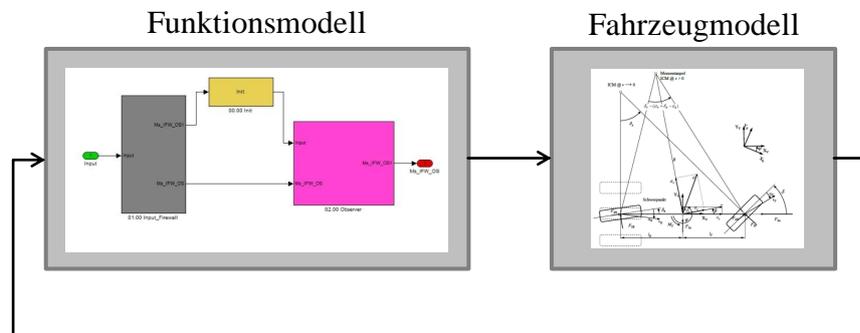


Abbildung 1.11: V-Modell im Softwareentwicklungsprozess

### 1.5.1 Model-in-the-Loop (MiL)

Bei der Model-in-the-Loop (MiL) Simulation wird die zu spezifizierende Funktion aus dem Lastenheft, das Fahrzeug und die Umwelt auf einem Computer simuliert. Das Fahrzeug und die Umwelt sind als Regelstrecke in einem sogenannten Umgebungsmodell modelliert. Dieses kann Fahrzeug spezifisch parametrisiert werden. Die Funktion, z.B. eine Fahrdynamikregelung, wird in einer grafischen Programmiersprache (z.B. Matlab-Simulink) entwickelt und liegt als Blockschaltbild vor und wird mit dem Umgebungsmodell an den entsprechenden Schnittstellen verknüpft. In einer Simulation kann die Funktion nun erstmals im

geschlossenen Regelkreis untersucht werden und Fehler in den spezifizierten Anforderungen im Lastenheft bereits in der Frühphase aufgedeckt werden [22, 8].



**Abbildung 1.12:** Model-in-the-Loop (MiL) Simulation

In der Vorentwicklungsphase von Fahrzeugfunktionen wird häufig die MiL Simulation in Kombination mit Rapid-Prototyping Systemen angewandt. Hierbei kann die Funktion direkt im Fahrzeug oder am Prüfstand getestet und optimiert werden. Das Rapid-Prototyping System ist als Bypass in die reale Umgebung eingebunden. In diesem Fall wird die Funktion mit einem Codegenerator in C-Code kompiliert, um auf der Rapid-Prototyping Hardware lauffähig zu sein. Die Grenze zur Software-in-the-Loop Simulation ist hier fließend, da in diesem Entwicklungsschritt bereits mit C-Code gearbeitet wird. Dieser unterscheidet sich jedoch erheblich von späterem Seriencode.

### 1.5.2 Software-in-the-Loop (SiL)

Unter Software-in-the-Loop (SiL) versteht man die Integration von realem Seriensoftwarecode in eine Simulationsumgebung [8]. Die gesamte Simulation wird auf einem Standard-PC gerechnet. Da die Simulation nicht zwingend Echtzeit fähig sein muss, können rechenintensive Teilmodelle für komplexere Untersuchungen verwendet werden [32]. Softwarecodes aus verschiedenen Systemen können in einem Gesamtmodell getestet werden, ohne dass eine Zielhardware vorhanden sein muss. Aber auch klassische Softwaremodultests von Steuerungs- oder Überwachungsfunktionen gliedern sich unter Begriff Hardware-in-the-Loop [63]. Da als Entwicklungsressource lediglich ein PC mit der entsprechenden Entwicklersoftware benötigt wird, können Auslegungsvarianten und Grundsatzuntersuchungen effizient und kostengünstig durchgeführt werden. Zukünftig können somit auch Applikationsaufgaben in diese Entwicklungsphase verlagert werden.

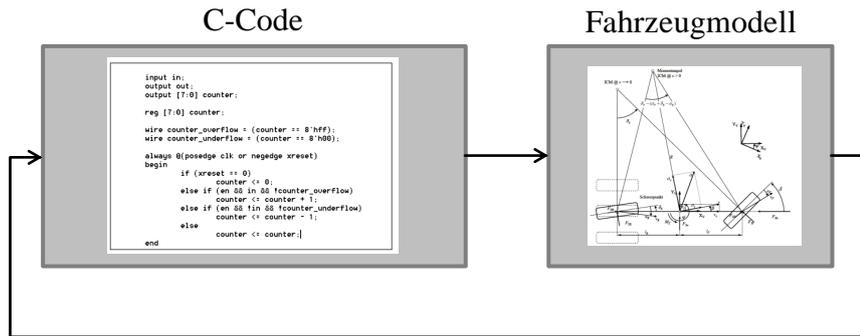


Abbildung 1.13: Software-in-the-Loop (SiL) Simulation

### 1.5.3 Hardware-in-the-Loop (HiL)

Als Bindeglied zwischen Software-in-the-Loop (SiL) und der Fahrzeugerprobung dient die Hardware-in-the-Loop Simulation. Diese ist definiert als die Integration einer realen Hardware, beispielsweise ein Steuergerät oder eine mechatronische Fahrzeugkomponente, in ein Fahrzeugteil- oder Gesamtmodell [32].

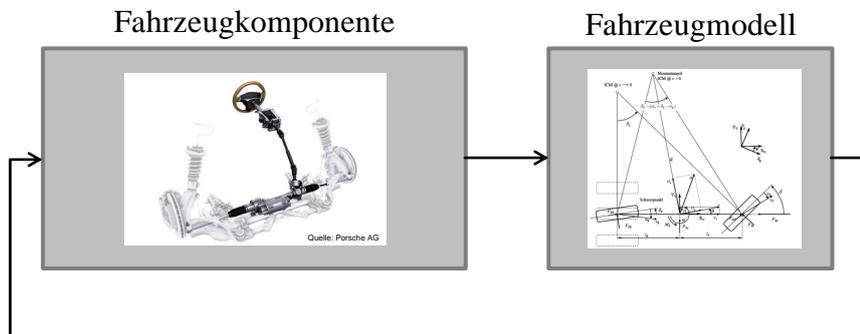


Abbildung 1.14: Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulation

Im Gegensatz zur Software-in-the-Loop Simulation muss die Hardware-in-the-Loop Simulation zwingend echtzeitfähig sein, da ein reales Steuergerät nur in Echtzeit betrieben werden kann [63]. Das Echtzeitverhalten des Umgebungsmodells erfordert jedoch je nach Modellgenauigkeit und Komplexität der verwendeten Modelle einen sehr hohen Rechenaufwand. Deshalb werden in Teilen Modellvereinfachungen getroffen, um die Simulation in Echtzeit rechnen zu können. Da die Funktionalitäten der Testkomponente jederzeit gewährleistet sein müssen, werden bei Simulationen meist nur komplexe Teilmodelle verwendet, die auf die jeweilige Testkomponente zugeschnitten sind. Bei der HiL- Simulation eines Fahrdynamikregelsystems mit einem Fahrzeugmodell kann beispielsweise auf ein vereinfachtes An-

triebsstrangmodell zurückgegriffen werden. Lediglich die Fahrdynamiksimulation muss alle Eigenschaften, die ein realitätsnahen Betrieb der Komponente erfordert, haben. Zunächst beschränkte sich die HiL- Simulation im Entwicklungsprozess nur auf Teilkomponenten wie ein Steuergerät. In den letzten Jahren werden Fahrdynamikregelsysteme zunehmend auch am HiL- Prüfstand getestet, da mittlerweile Rechner mit einer entsprechenden Leistung zur Verfügung stehen [11]. Die Simulationshardware und die spezifischen Fahrzeugteilm-odelle variieren von Hersteller zu Hersteller. Viele Anbieter haben sich auf ein Teilgebiet spezialisiert und liefern den Automobilherstellern auf ihre Bedürfnisse zugeschnitten HiL-Plattformen und Modelle.

Charakteristisch für einen HiL- Prüfstand ist die Systemgrenze zwischen Hardware und Software. Diese definiert, welche Komponenten als reale Hardware und welche als Modell am Prüfstand realisiert werden. Je nach Anwendung muss entschieden werden, wie die zu erprobenden Funktionen möglichst real dargestellt werden können. Im Falle einer HiL- Simulation für elektromechanische Lenksysteme können das gesamte Lenksystem oder nur Teilkomponenten wie Steuergerät oder das Powerpack (E-Motor + ECU) getestet werden. Bei allen Anwendungsfällen werden von der Echtzeitumgebung die nötigen elektrischen Schnittstellen und Fahrzeuginformationen über eine dynamische Restbussimulation zur Verfügung gestellt [65]. Ziel einer HiL- Simulation ist es, stets reproduzierbare Ergebnisse zu liefern, die mit dem realen Fahrversuch vergleichbar sind [32].

#### 1.5.4 X-in-the-Loop (XiL)

In den bisher vorgestellten Methoden werden die Hardware und Software von verschiedenen Fahrzeugkomponenten isoliert voneinander entwickelt. Das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten auf Gesamtfahrzeugebene wird erst zu einem späteren Zeitpunkt im Entwicklungsprozess getestet und validiert. Um bereits in der Frühphase der Entwicklung auf Gesamtfahrzeugebene zu testen und zu validieren wurde der X-in-the-Loop Ansatz entwickelt. X-in-the-Loop (XiL) bedeutet die durchgängige Verwendung aller Komponenten und Systeme – ob als Modell, Software oder Hardware – in einem virtuellen Gesamtfahrzeug [67]. Dadurch entsteht ein virtueller Prototyp, welcher mit den Werkzeugen und Methoden der virtuellen Fahrzeugentwicklung in jeder Entwicklungsphase umfassend anhand einheitlicher Bewertungskriterien getestet werden kann.

Diese integrierte Gesamtfahrzeugsicht bietet folgende Vorteile. Es ist jederzeit möglich zu bestimmen, wie sich eine bestimmte Komponente im Verbund mit allen anderen Systemen auf die Eigenschaften des Gesamtfahrzeugs auswirkt. Unerwünschte Wechselwirkungen in den Wirkketten werden frühzeitig erkannt und Maßnahmen zur Lösung können eingeleitet werden. Diese Vorgehensweise im Entwicklungsprozess kann Zusatzkosten und Verzögerungen vermeiden, welche sich zu einem späteren Zeitpunkt ergeben könnten. Projiziert auf die Lenksystementwicklung kann der Beitrag von Lenksystemen auf die Fahrdynamik des

Gesamtfahrzeugs im gesamten Entwicklungsprozess evaluiert werden. Dies führt zu einer weiteren Qualitäts- und Effizienzsteigerung [57]. Der X-in-the-Loop Ansatz stellt somit eine Weiterentwicklung des klassischen Entwicklungsprozesses nach dem V-Modell (Abb.1.11) dar.

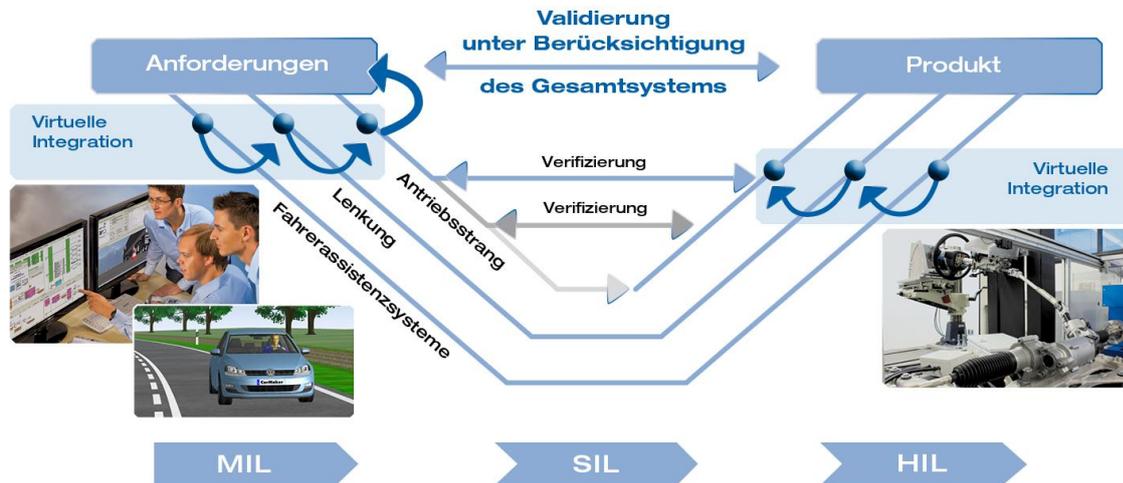


Abbildung 1.15: Methode des X-in-the-Loop (XiL) Ansatzes [67]

## 1.6 Testmöglichkeiten für Lenksysteme

In der Literatur existieren sehr wenige Veröffentlichungen von Prüfeinrichtungen zur umfassenden Charakterisierung von Lenksystemeigenschaften. Die ersten Prüfeinrichtungen für die Untersuchung der Lenksystemeigenschaften wurden bereits 1968 entwickelt [31]. Diese waren jedoch Gesamtfahrzeugprüfstände, was bedeutet, dass das reale Fahrzeug vorhanden sein muss. Das Lenksystem konnte daher auch nur hinsichtlich der Eigenschaften im Gesamtfahrzeug untersucht werden. Im Rahmen der technischen Möglichkeiten war dies die einzige Möglichkeit Lenksystemtests abseits der Straße durchzuführen. Erst durch den Fortschritt der Rechnertechnologie konnten nach und nach Tests in die Simulation verlagert oder Fahrzeugkomponenten virtuell dargestellt werden. Heutige Prüfeinrichtungen sind speziell für bestimmte Anwendungszwecke konzipiert wie Festigkeitsnachweise, Identifikation von Lenkungsphänomenen oder zur Funktionsabsicherung. Andere Prüfeinrichtungen stammen beispielsweise aus der Schwingungstechnik und decken wiederum Prüfbereiche wie die Kleinsignalanregung ab. In diesem Abschnitt werden Konzepte vorgestellt, welche bisher in der Automobilindustrie umgesetzt wurden.

Eine Prüfeinrichtungen mit HiL- Funktion für die Erprobung und funktionale Absicherung einer Überlagerungslenkung wurde von [23, 1] erstellt. Schwerpunkt ist der Test von Funktionen im Verbund mit Partnersteuergeräten. Als Systemprüfstand sind die Ermittlung von Systemeigenschaften oder die Optimierung und Applikation von Funktionen möglich. Durch die Implementierung eines Fahrzeugmodells können Fahrmanöver abgebildet werden. Eine Besonderheit stellt die Ausbaustufe mit einer Klimakammer dar. Hiermit können Temperatureinflüsse untersucht werden.

Für den Schwerpunkt Lenkgefühl entwickelten [29] eine Prüfeinrichtung. Dieser ist als reiner Force-Feedback Prüfstand konzipiert und dient zur Untersuchung des Lenkgefühl auf simulativer Basis. Der Aufbau besteht aus einem Elektromotor und einem Echtzeitsimulator mit einem Lenkungsmodell. Der Motor überträgt das durch das Simulationsmodell berechnete Lenkmoment auf das Lenkrad. Durch die haptische Rückmeldung kann das Lenkgefühl subjektiv beurteilt werden. Die Qualität dieser Methode hängt von der Güte des Lenkungsmodells und der Performance des Force-Feedback Aktuators ab. Das Lenksystem ist nur als Simulationsmodell vorhanden. Damit eignet sich die Prüfeinrichtung für Konzeptuntersuchungen ohne vorhandene Hardware.

Das Phänomen der Lenkraddehnschwingungen konnte auf einer von [54] entwickelten Prüfeinrichtung untersucht werden. Die Prüfeinrichtung ist als Komplettfahrzeugprüfstand ausgeführt und speziell für die Untersuchung von Lenkraddehnschwingungen ausgelegt. Die Anregung des Lenksystems erfolgt über reibungsarm gelagerte Rutschplatten mit Freiheitsgraden in Längs- und Querrichtung sowie um die Hochachse. Die Vorderräder können in Längsrichtung Weg- oder Kraft geregelt in einem Frequenzband von 0 - 30 Hz angeregt werden.

Zur Untersuchung der Übertragung von Radkraftschwankungen auf das Lenksystem, was auch Lenkraddehnschwingungen mit einschließt, konzipierte [51] eine Prüfeinrichtung. Auf der Prüfeinrichtung wird nur das Lenksystem in starrem Verbund mit dem Maschinenbett verbaut. Die Straßenanregung wird über einen elektrodynamischen Aktuator erzeugt. Die Reaktion des Lenksystems auf die Anregung wird mit Sensoren an definierten Messstellen und entsprechender Auswerteelektronik erfasst. Ein Lenkradaktuator ist nicht vorgesehen, d.h. das Lenkrad schwingt frei.

Zur Entwicklung eines Bewertungsverfahrens hinsichtlich des Einflusses von Lenksystemen auf den Kraftstoffverbrauch konzipierte [69] eine Prüfeinrichtung mit HiL- Funktion. Der Prüfstandaufbau ist für den Test von Lenksystemen verschiedener Bauformen (HPS, EHPS, EPS) ausgelegt. Die äußeren Kräfte und Momente werden durch einen Handkraft- und Radkraftaktuator aufgeprägt. Der Handkraftaktuator ist ein Synchronmotor, welcher über ein Zwischengetriebe die Fahrereingabe umsetzt. Ein Hydraulikzylinder bildet als Rad-

kraftaktuator die Zahnstangenstangenkräfte ab. Im Verbund mit einer simulierten Fahrzeugumgebung, welche auf einem Echtzeitsystem berechnet wird, werden die Lenksysteme energetisch untersucht und verglichen.

Generell sind für den Aufbau und die Inbetriebnahme, je nach Ausbaustufe, hohe Investitionskosten nötig. Diese amortisieren sich aber im Laufe des Entwicklungsprozesses [11]. Alleine durch Einsparung von Fahrzeugversuchen und von Prototypen selbst rechnet sich die Anschaffung einer Prüfeinrichtung für Lenksysteme in der Fahrzeugentwicklung. Zudem lassen sich die Kosten auf mehrere Lenksystementwicklungsprojekte verteilen. Während des Betriebs kann mit einer Testautomatisierung die Testeffizienz weiter gesteigert werden. Lenksystemprüfstände zeichnen sich durch eine Vielzahl von Stärken im Vergleich zu Fahrzeugmessungen aus. Die Zugänglichkeit des Lenksystems ermöglicht die Integration von erweiterter Messsensorik, die im Fahrzeug kaum oder nur mit erheblichem Aufwand installierbar wäre. Bei einer mobilen Messeinrichtung ist zudem die Art und Anzahl der verfügbaren Messkanäle begrenzt. Die Beeinflussung der Testrandbedingungen (Wetter, Fahrbahn) erhöht die bereits erwähnte Reproduzierbarkeit der Testergebnisse [11]. Durch die individuellen Ansteuerung der Aktuatoren eine Prüfeinrichtung für Lenksysteme können mittels synthetischer Eingangssignale maßgeschneiderte Tests für Betriebszustände oder Fahrmanöver generiert werden. Über die externen Vorgaben der Restbus- oder Bordnetzsimulation können definierte Betriebszustände des Fahrzeugs eingestellt werden.

Zur Veranschaulichung der verschiedenen Konzepte von Prüfeinrichtungen für Lenksysteme wurde in Anlehnung an [11] eine Klassifikation mit den in Abbildung 1.16 aufgeführten Prüfmöglichkeiten erstellt. Die Recherche zeigt, dass die bisher eingesetzten Prüfeinrichtungen für Lenksysteme nur für bestimmte Phänomene oder Problemstellungen entwickelt und eingesetzt wurden. Diese Prüfeinrichtungen waren zudem nur für Betrieb von mechanischen, hydraulischen oder elektromechanischen Lenksystemen ausgelegt und erfüllen jeweils nur einen schmalen Teilbereich der Prüfmöglichkeiten. Für eine umfassende Charakterisierung von Lenksystemeigenschaften wird eine Prüfeinrichtung benötigt, welche einen Großteil der in Abbildung 1.16 aufgeführten Prüfmöglichkeiten erfüllen kann.

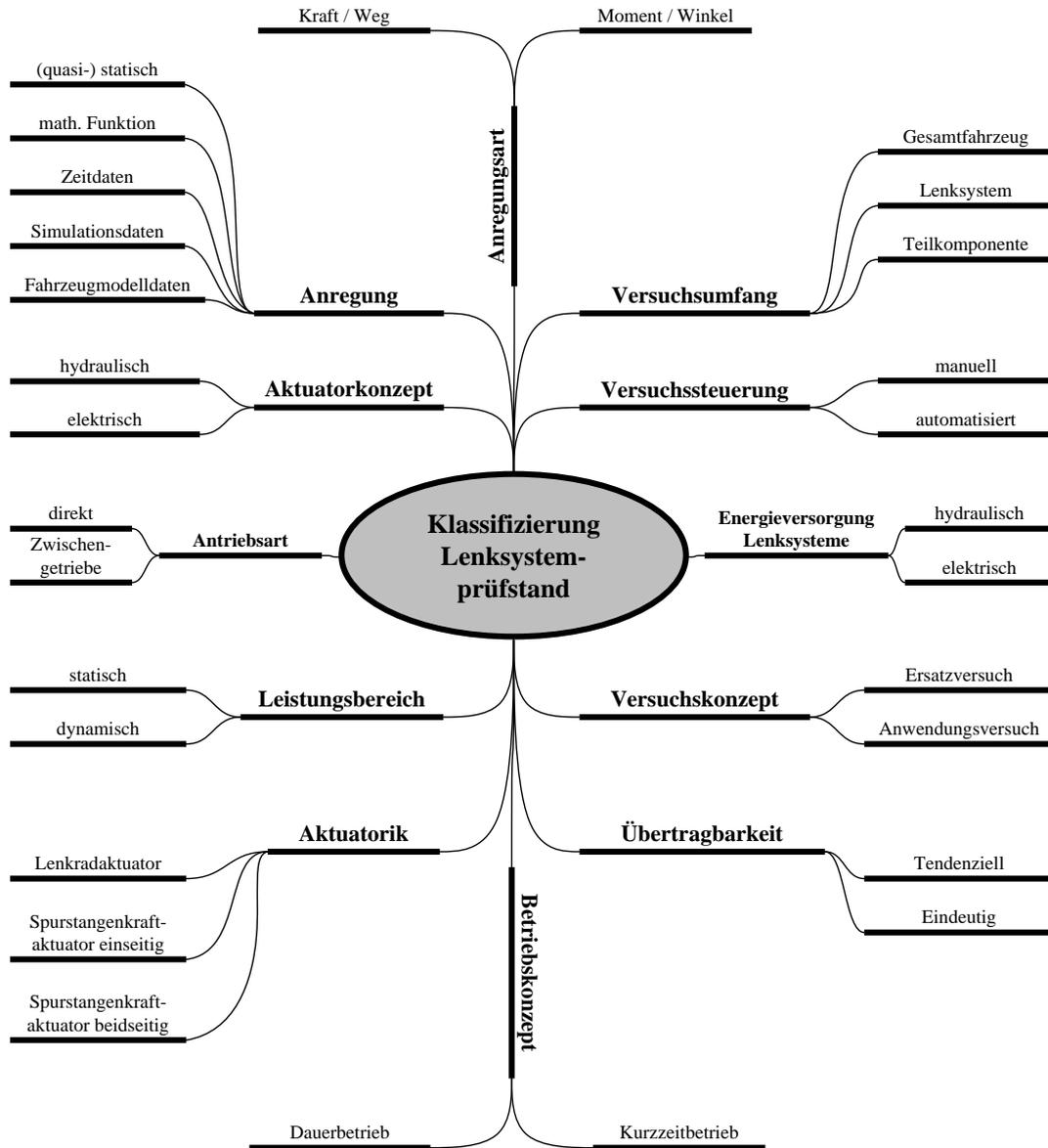


Abbildung 1.16: Klassifizierung von Prüfeinrichtung für Lenksysteme

## 1.7 Zielsetzung und Rahmenbedingungen

In dieser Arbeit werden erstmalig die Testmöglichkeiten von Lenksystemen auf Prüfeinrichtung umfassend analysiert und realisiert. Schwerpunkte bilden die Lenksystemcharakterisierung und Fahrmanövertests u.a. zur Evaluierung des Lenkgefühls. Um dieses Ziel zu erreichen, muss zwingend eine Testumgebung entwickelt werden, welche einen Großteil der Prüfmöglichkeiten aus der Klassifizierung (Abb. 1.16) erfüllt. Bisher wurden auf Prüfeinrichtungen für Lenksysteme lediglich punktuelle Phänomene oder bestimmte Problem-

stellungen eines Lenksystems untersucht. Daher wird zunächst der Aufbau und die Qualifizierung einer Prüfeinrichtung zur Charakterisierung von Lenksystem durchgeführt. Die Prüfeinrichtung für Lenksysteme bietet die Möglichkeit eine große Bandbreite an Testvarianten, u.a. im HiL- Modus, durchzuführen und verschiedene Konzepte von Lenksystemen zu testen. Hierdurch wird ein wichtiger Beitrag zum Aufbau von vollwertigen Prüfeinrichtungen für Lenksysteme geliefert.

Aus der vorangegangenen Recherche der verschiedenen Teilbereiche der Lenksystementwicklung zeigte sich weiterhin, dass im Entwicklungsprozess eines komplexen Lenksystems eine Komponenten - und Hardware-in-the-Loop Erprobung zukünftig einen hohen Stellenwert haben wird. Davon leitet sich die zentrale Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ab, Lenksysteme systematisch an Prüfständen zu charakterisieren. Diese Charakterisierung wird neue Erkenntnisse, wie das Übertragungsverhalten von hydraulischen und elektromechanischen Lenksystemen im direkten Vergleich, erbringen. In bisherigen Veröffentlichungen wurde an Prüfeinrichtungen für Lenksysteme nur die Charakteristik von hydraulischen Lenksystemen untersucht [51]. Für elektromechanische Lenksysteme existieren kaum Veröffentlichung auf diesem Forschungsgebiet. Es wurden lediglich Simulationsstudien von Teilgebieten eines Lenksystems veröffentlicht [27, 68, 21, 47]. Im Vergleich zu hydraulischen Lenksystemen sind bei elektromechanischen Lenksystemen bedingt durch Nichtlinearitäten und Funktionalitäten wie variable Lenkunterstützung oder spezielle Funktionen für das Mittengefühl deutlich mehr Einflussgrößen auf die Lenksystemeigenschaften gegeben. Eine umfassende Untersuchung der Lenksystemeigenschaften von elektromechanischen Lenksystemen stellt somit einen wichtigen und neuen Beitrag auf diesem Forschungsgebiet dar. Als Ergebnis liefert diese Arbeit einen umfassenden und hinreichenden Testkatalog, um Lenksysteme auf einer Prüfeinrichtung charakterisieren zu können.

Die Charakterisierung von Lenksystemen beschränkt sich in dieser Arbeit auf Prüfstandsversuche. Die Testreihen zur Charakterisierung an einer Prüfeinrichtung werden mit einem hydraulischen und mit zwei elektromechanischen Lenksystemen mit unterschiedlichen Regelungskonzepten durchgeführt und bewertet. Alle drei Systeme sind bereits industrialisierte Serienprodukte und werden in einer Fahrzeugklasse mit einer maximal spezifizierten Zahnstangenkraft von 9 kN eingesetzt. Bei den elektromechanischen Lenksystemen ist eine zusätzliche Variation von Lenksystemparametern kaum möglich, da diese mit Seriensteuergeräten und -softwareständen ausgestattet sind. Jedoch wird der Einfluss der geschwindigkeitsabhängigen Lenkunterstützung bei den elektromechanischen Lenksystemen bei den Messungen berücksichtigt und variiert. Die verwendeten Lenksysteme werden von Industriepartnern zur Verfügung gestellt und im Rahmen von Forschungsprojekten getestet.

## 1.8 Aufbau der Arbeit

Nachdem in Kapitel 1 der aktuelle Stand der Technik der Lenksystementwicklung und der Testmöglichkeiten für Lenksysteme dargestellt wurden, werden in den folgenden Kapiteln dieser Arbeit die Anforderungen präzisiert und ausgearbeitet.

In Kapitel 2 erfolgt zunächst die Definition der Anforderungen an Lenksysteme. Hieraus leiten sich die Anforderungen an die Prüfeinrichtung (unter Berücksichtigung der Prüfmöglichkeiten in Abb. 1.16) und das Verfahren zur Charakterisierung von Lenksystemen ab.

In Kapitel 3 werden die definierten Anforderungen aus Kapitel 2 umgesetzt, um aussagekräftige Resultate zur Charakterisierung von Lenksystemen zu generieren. Dazu zählen die Leistungsanforderungen, die Einbindung eines Fahrzeugmodells und die Integration von Lenksystemen für einen Fahrzeug äquivalenten Betrieb. Weiterhin werden die Optimierungspotentiale untersucht. Die Prüfstandumgebung an der Hochschule München stellt die Basisumgebung dar, welche auf die zuvor definierten Anforderungen qualifiziert wird. Zunächst wird die Charakteristik der Prüfeinrichtung dargestellt und mit Messung bestätigt. Aus diesen Ergebnisse erfolgt ein Abgleich mit den bereits definierten Anforderungen hinsichtlich Leistung und Dynamik. Hierzu gehört auch der Abgleich der Prüfstandsensoren hinsichtlich Messbereich und Auflösung. Zentraler Punkt des Kapitels stellt die Integration und der realitätsnahe Betrieb von Lenksystemen auf einer Prüfeinrichtung für Lenksysteme dar. Die Weiterentwicklung zu einem Hardware-in-the-Loop Prüfstand durch die Einbindung eines Fahrzeugmodells und die Umsetzung einer effizienten Testautomatisierung schließen das Kapitel ab.

Kapitel 4 beschreibt die Testverfahren, welche zur systematischen Charakterisierung von Lenksystemen auf der Prüfeinrichtung umgesetzt werden. Grundlage für diese Testverfahren stellen die in der Lenksystementwicklung standardisierten Komponenten- und Fahrzeugtests dar. Es wird ein Testkatalog entwickelt, welcher die Charakteristik eines Lenksystems umfassend und hinreichend beschreibt. Für die Untersuchungen der Rückmeldeeigenschaften (Übertragung von Störgrößen) werden die aus der Literatur recherchierten Randbedingungen erörtert und in neuen Testreihen umgesetzt. Zur Identifikation der charakteristischen Lenksystemeigenschaften ist die richtige Auswahl der Sensorik und der Signalauflösung von zentraler Bedeutung. Neben der Definition der Testreihen zur Charakterisierung wird in Kapitel 4 anhand eines elektromechanischen Lenksystems eine umfangreiche Charakterisierung durchgeführt, ausgewertet und analysiert.

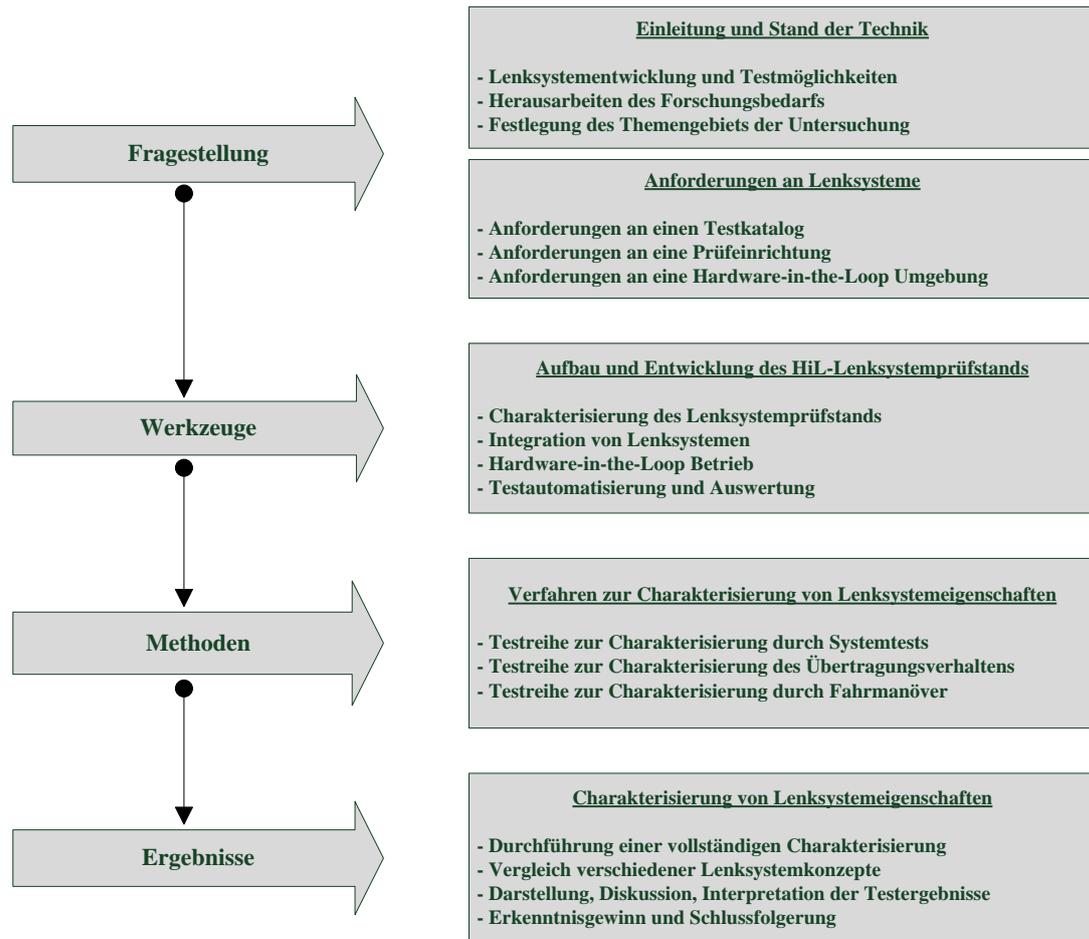


Abbildung 1.17: Struktureller Aufbau der Arbeit

Ein Vergleich von Lenksystemen erfolgt in Kapitel 5 durch Untersuchungen von einem hydraulischen und zwei elektromechanischen Lenksystemen mit unterschiedlichen Regelungskonzepten. Es werden die wichtigsten Erkenntnisse der verschiedenen Lenksystemkonzepte und deren spezifischen Eigenschaften im direkten Vergleich an Hand einer Auswahl von Testreihen vorgestellt. In Form von Diagrammen werden die Ergebnisse aus den Untersuchungen dargestellt, diskutiert und interpretiert. Die Untersuchungen werden weiterhin aufzeigen, dass eine Prüfeinrichtung eine wichtige Säule in der Lenksystementwicklung darstellt, vor allem um die Systemeigenschaften eines elektromechanischen Lenksystems zu ermitteln.

Die vorliegende Arbeit wird in Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick abgeschlossen.

## 2 Anforderungen an Lenksysteme und resultierende Testanforderungen

Moderne Lenksysteme werden nach einer Vielzahl von Anforderungen entwickelt. In Kapitel 1 wurden bereits erste Erkenntnisse hierzu gewonnen. Abbildung 2.1 zeigt einen Überblick von Themengebieten der allgemeinen Anforderungen nach welchen Lenksysteme entwickelt werden. Diese allgemeinen Anforderungen decken die wesentlichen Themengebiete in der Lenksystementwicklung ab [57].

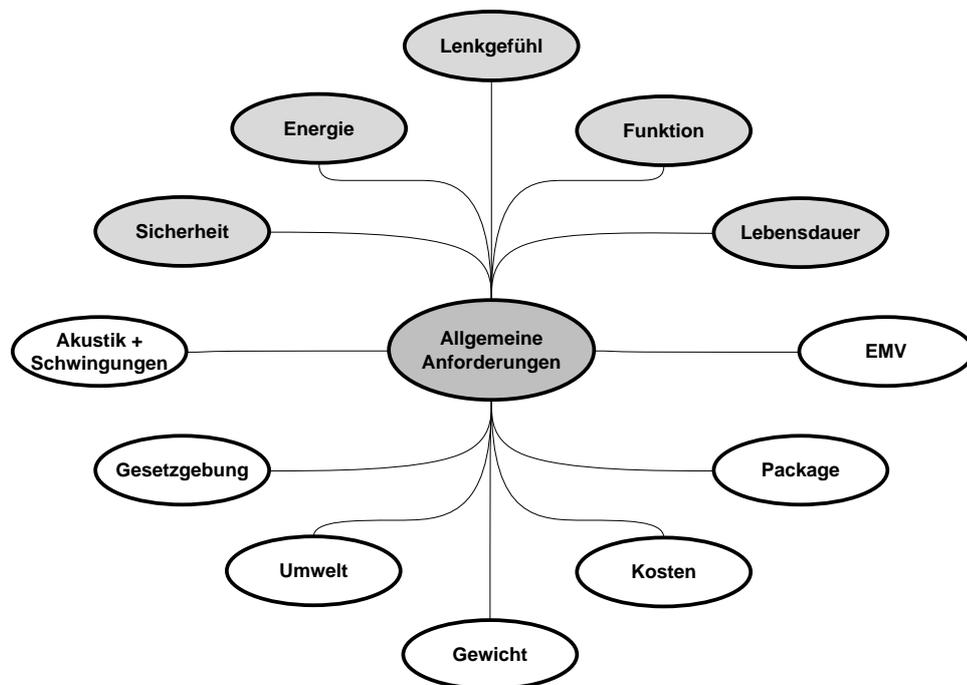


Abbildung 2.1: Allgemeine Anforderungen an Lenksysteme

Die Anforderungen gliedern sich in die Themengebiete Lenkgefühl, Energie, Funktion, Sicherheit, Lebensdauer, Akustik und Schwingungen, EMV, gesetzliche Anforderungen, Bau- raum (Package), Umwelt, Kosten und Gewicht. Die grau hinterlegten Themengebiete eignen sich besonders für Untersuchungen auf einer Prüfeinrichtung für Lenksysteme. Akustik und Schwingungen sowie die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) können auch auf

---

Prüfständen untersucht werden. Jedoch bedarf es hierfür spezieller und kostenintensiver Messtechnik (Abschnitt 1.6). Zudem bieten sich speziell auf diese Themen ausgelegte Prüfeinrichtungen an, um bestimmte Phänomene gezielt untersuchen zu können. Daher werden aus den allgemeinen Anforderungen für die Themengebiete Lenkgefühl, Energie, Funktion, Sicherheit und Lebensdauer die Lenksystemtests definiert und zusammengestellt, welche zur Charakterisierung von Lenksystemen auf einer Prüfeinrichtung erforderlich sind.

Von zentraler Bedeutung in der Lenksystementwicklung ist das Lenkgefühl. Dieses vermittelt dem Fahrer je nach den Anforderungen des Herstellers und der Fahrzeugklasse ein entsprechendes Fahrerlebnis. Das Lenksystem stellt zudem einen Rückmeldekanal für Fahrbahnhinrichtungen dar und ist hierdurch nicht nur für das Fahrerlebnis, sondern auch für die Fahrsicherheit entscheidend. Die Anforderungen an das Lenkgefühl wurden in Abschnitt 1.3 dargelegt und sind in Abbildung 2.2 zusammengestellt. Zur Bewertung des Lenkgefühls im Fahrzeug werden standardisierte Lenksystemtests [33, 34, 36, 37, 38] durchgeführt. Aus diesen Tests leiten sich die Anforderungen an den Teilbereich des Testkatalogs für eine objektive Bewertung des Lenkgefühls auf einer Prüfeinrichtung ab.



**Abbildung 2.2:** Anforderungen an das Lenkgefühl

Zunächst sind aber während des Entwicklungsprozesses die Lenksystemeigenschaften zu ermitteln, um ein Lenksystem nach den definierten Kundenanforderungen zu entwickeln und zu validieren. Es werden weitere Anforderungen für Tests aus den Themengebieten “Energie” und “Funktion” definiert, welche für die Systementwicklung von zentraler Bedeutung sind. Diese Tests sind im Fahrzeug nur mit erheblichem Aufwand durchführbar oder, falls noch keine Prototypenfahrzeuge zur Verfügung stehen, nicht darstellbar. Tests zur Lebensdauer runden das Testportfolio zur Charakterisierung ab. Aus der Summe dieser Entwicklungsanforderungen werden die Anforderungen für einen umfassenden Testkatalog mit der dazugehörigen Prüfeinrichtung abgeleitet. Das Themengebiet “Sicherheit” beinhaltet die Bauteil- und die funktionale Sicherheit. Ersteres wird durch Lebensdauerversuche überprüft. Die funktionale Sicherheit wird im Rahmen von Softwaretests im Laborversuch und Freigabeteests im Fahrzeug sichergestellt.

Abbildung 2.3 zeigt eine vereinfachte Darstellung eines Entwicklungsprozesses für Lenksysteme. Die Entwicklung von modernen Lenksystemen startet mit der Berechnung und Grundausslegung in der Konzeptphase. Es werden die Bauform und die Leistungsanforderungen festgelegt. Um diese Anforderungen zu präzisieren wird bereits in der Konzeptphase der Lenksystementwicklung auf Simulationsmodelle (“Virtuelle Komponente”) zurückgegriffen. Die Parametrierung der Modelle erfolgt mit den Daten aus der Berechnung oder vergleichbaren Versuchsdaten. Der Vorteil der Auslegung mit einer Simulation besteht in der einfachen Parametervariation der mechanischen Eigenschaften des Lenksystems. Am realen Lenksystem wären diese Änderungen in der späteren Entwicklungsphase mit hohen Kosten verbunden.



**Abbildung 2.3:** Vereinfachte Darstellung des Entwicklungsprozesses eines Lenksystems

Im nächsten Schritt stehen die ersten Prototypenlenksysteme (Musterbauteile) zur Verfügung und können im Fahrzeug verbaut werden. Dies führt im Wesentlichen zu einer ersten Applikation und subjektiven Beurteilung der Grundausslegung eines Lenksystems hinsichtlich des Lenkgefühls. Durch den zunehmende Systementwicklungsaufwand von modernen Lenksystemen müssen neue Lösungsansätze im Entwicklungsprozess gefunden werden, um ein Lenksystem zur Serienreife zu bringen. Ein Lösungsansatz stellt die Erprobung in der teil- virtuellen Welt dar, die bisher in der Tiefe der Lenksystementwicklung noch wenig Anwendung findet [8]. Auf Lenksystemprüfständen können bereits Musterbauteile erprobt werden, ohne dass bereits Prototypenfahrzeuge zur Verfügung stehen müssen (Bestätigungsphase). Hier kann die Grundausslegung des Lenksystems objektiv bewertet und eine umfangreiche Charakterisierung der mechatronischen Eigenschaften durchgeführt werden. Dies beinhaltet die mechanischen Eigenschaften wie Reibung und Steifigkeit sowie die elektrischen Eigenschaften hinsichtlich Lenkleistung und Wirkungsgrad (Themengebiete “Funktion” und “Energie”). Weiterhin können in Verbindung mit einem Fahrzeugmodell bereits Tests auf Gesamtfahrzeugebene durchgeführt werden und erste Erkenntnisse hinsichtlich des Lenkgefühls gewonnen werden. Um die Komplexität eines modernen Lenksystems zukünftig in einem gestrafften Entwicklungszyklus beherrschen zu können, werden stetig mehr

Tests auf Prüfeinrichtungen verlagert werden. Die in der Industrie bisher eingesetzten Prüfeinrichtungen für Lenksysteme bilden lediglich bestimmte Phänomene oder Eigenschaften von Lenksystemen ab (Abschnitt 1.6). Hierzu zählen unter anderem Prüfeinrichtungen für sogenannte Betriebslastennachfahrversuche (BLNV) (Themengebiet "Lebensdauer"). Diese Versuche dienen dem Festigkeitsnachweis für Fahrmanöver wie Parkieren oder Schlechtwegstrecken. In diesen Versuchen werden reale Daten, aufgezeichnet an der Schnittstelle Fahrzeug-Lenksystem-Fahrer, auf das Lenksystem aufgeprägt. In den folgenden Abschnitten werden für diese neuen Herausforderungen die Anforderungen für einen umfassenden Testkatalog und eine Prüfeinrichtungen für Lenksysteme definiert. Im Gegensatz zu den bisher eingesetzten Prüfeinrichtungen soll die neu konzipierte Prüfeinrichtung ein breites Spektrum an Testmöglichkeiten abdecken. Zur Definition der Anforderungen an eine Prüfeinrichtung werden die Leistungsanforderungen des Testkatalogs und die Klassifizierung aus Abbildung 1.16 herangezogen.

Die folgende Übersicht (Abb. 2.4) zeigt eine mögliche Klassifizierung von Lenksystemtests in der Entwicklung von Lenksystemen, welche aus den bisher gewonnen Erkenntnissen erarbeitet wurde. Die verschiedenen Ebenen spiegeln die zunehmende Testtiefe wieder. Ebene 1 beschreibt die Versuchsfelder Fahrzeugtests (Fahrversuch), Prüfstandtests und Labortests in der Lenksystementwicklung. Im Fahrversuch werden ISO-Fahrmanöver und Hersteller spezifische Fahrmanöverkataloge durchgeführt [19].

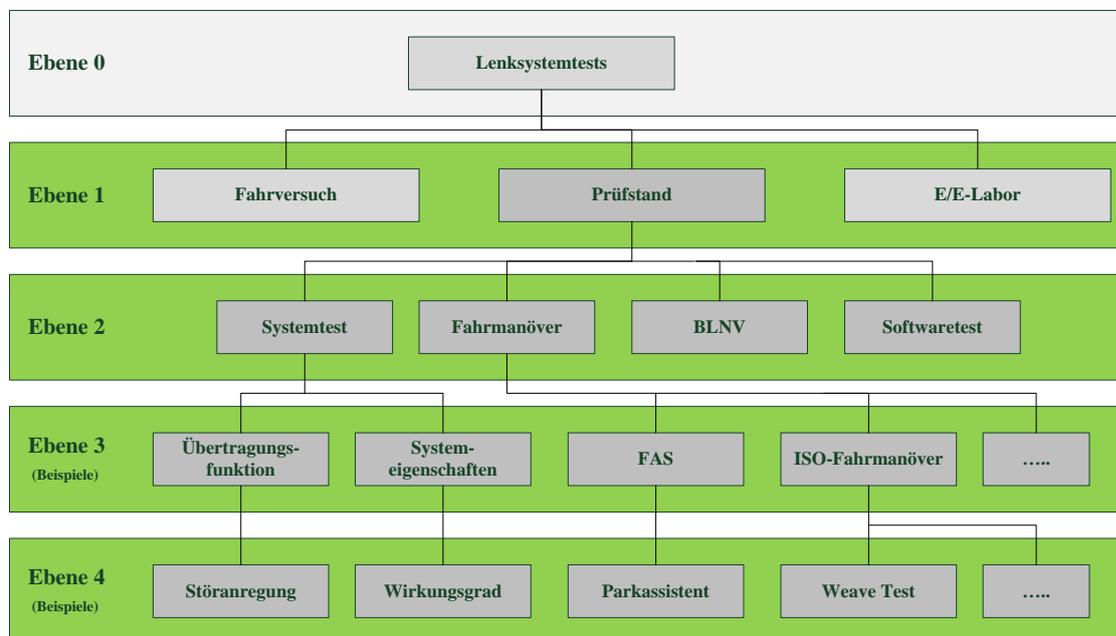


Abbildung 2.4: Klassifizierung von Lenksystemtests

Schwerpunkt der Einteilung von Lenksystemtests in Abb. 2.4 bilden die Testreihen auf einer Prüfeinrichtungen für Lenksysteme. Diese Tests teilen sich auf Ebene 2 in die Kategorien Systemtest, Fahrmanöver, Betriebslastennachfahrversuche und Softwaretest auf. Letztere Kategorie umfasst die Prüfung von Softwareständen, einzelnen Funktionsblöcken und Modulen oder der Interaktion mit dem Fahrzeugbordnetz (Degradierung). Im Gegensatz zu den Labortests können diese Testreihen auf einer Prüfeinrichtung unter realen Bedingung mit der Aufprägung von äußeren Lasten durchgeführt werden. Weiterhin werden Testreihen zum Reglerentwurf oder der Optimierung von Reglern dieser Kategorie zugeordnet. Durch die synthetische Einstellung von definierten Betriebszuständen (Bordnetz, Fahrmanöver) bietet die Prüfumgebung maßgeschneiderte Betriebsbedingungen. Testreihen zur Reglerentwicklung können ohne Gefährdung von Fahrzeug, Fahrer und Umwelt durchgeführt werden. Reglerparametrierungen können einfach geändert und Testreihen automatisiert durchgeführt werden. In dieser Arbeit bleibt diese Kategorie unberücksichtigt, da diese für eine Charakterisierung von Lenksystemen nicht zwingend erforderlich ist. Auf Ebene 3 und Ebene 4 sind exemplarische Beispiele für die Kategorien der Ebene 2 dargestellt.

## 2.1 Resultierende Anforderungen an den Test von Lenksystemen

Systemtest, Fahrmanöver, Betriebslastennachfahrversuche bilden die drei Hauptkategorien eines umfassenden Testkataloges zur Charakterisierung von Lenksystemen. In Tabelle 2.1 wurden hierzu die Tests der einzelnen Kategorien hinsichtlich der erforderlichen Aktuatorik, der Leistungsanforderung und den Messgrößen präzisiert. Für die Kategorien Fahrmanöver und Betriebslastennachfahrversuche ist es ausreichend einen Testrahmen mit den maximalen Anforderungen zu definieren. Die erforderlichen Tests für die Kategorie Systemtest werden bereits in Tabelle 2.1 aufgeschlüsselt und detailliert beschrieben, da diese Tests unterschiedliche Anforderungen und Prüfstandkonfigurationen verlangen. Die Testbeschreibungen sind für die spätere Definition der Anforderungen an eine Prüfeinrichtung notwendig. Abgeleitet wurden die Testreihen in der Kategorie Systemtest aus den Anforderungen an eine Grundauslegung eines Lenksystems. Nach [57] teilen sich die Anforderungen auf folgende Bereiche auf: Zahnstangenkraft, Lenkradmoment, Lenkdynamik, Lenkleistung, Lenksystemreibung und Übertragungsverhalten. Die Leistungsanforderungen orientieren sich an den Leistungsdaten von modernen elektromechanischen Lenksystemen. Für die Ermittlung bzw. Validierung der Anforderungen an die Grundauslegung eines Lenksystems müssen entsprechende Tests zu den jeweiligen Bereichen entworfen werden. Diese sind in Tabelle 2.1 aufgelistet. Weiterhin leiten sich aus den Leistungsanforderungen der verschiedenen Bereiche der Grundauslegung die Anforderungen an Aktuatorik, Leistung und Messgröße für den jeweilige Test ab.

## 2.1. Resultierende Anforderungen an den Test von Lenksystemen

Kategorie	Aktuatorik	Anforderung	Messgrößen
<b>Systemtest</b>			
Systemreibung (Durchschiebekraft)	Spurstangenaktuator (Positionsregelung)	$F = +/- 2000 \text{ N}$ $s = +/- 100 \text{ mm}$ $v = 5 - 200 \text{ mm/s}$	Zahnstangenkraft Zahnstangenweg Zahnstangengeschwindigkeit
Leerdurchdrehmoment (Durchlenken)	Lenkradaktuator (Positionsregelung)	$T = +/- 15 \text{ Nm}$ $\phi = +/- 600^\circ$ $\phi_p = 10 - 1200^\circ/\text{s}$	Lenkradmoment Lenkradwinkel Lenkradwinkelgeschwindigkeit
Verstärkungskennlinie	Lenkradaktuator (Momentenregelung) Spurstangenaktuator (Positionsregelung)	$T = +/- 10 \text{ Nm}$ $F = +/- 16000 \text{ N}$ $\phi = +/- 15^\circ$	Zahnstangenkraft Lenkradmoment Stromaufnahme ECU Daten
Systemsteifigkeit	Lenkradaktuator (Momentenregelung) Spurstangenaktuator (Positionsregelung)	$T = +/- 40 \text{ Nm}$ $F = +/- 6000 \text{ N}$ $\phi = +/- 25^\circ$	Lenkradmoment Lenkradwinkel
Lenkübersetzung	Lenkradaktuator (Positionsregelung)	$s = +/- 100 \text{ mm}$ $\phi = +/- 600^\circ$	Zahnstangenweg Lenkradwinkel
Wirkungsgrad	Lenkradaktuator (Positionsregelung) Spurstangenaktuator (Kraftregelung)	$T = +/- 15 \text{ Nm}$ $F = +/- 16000 \text{ N}$ $\phi_p = +/- 1400^\circ$ $v = 5 - 200 \text{ mm/s}$	Zahnstangenkraft Zahnstangengeschwindigkeit Lenkradmoment Stromaufnahme Versorgungsspannung
Übertragungsverhalten	Spurstangenaktuator (Kraftregelung)	$F = +/- 1000 \text{ N}$ (30 Hz) $s = +/- 1 \text{ mm}$ (30 Hz)	Zahnstangenkraft Zahnstangenweg Lenkradmoment ECU Daten
<b>Fahrmanöver</b>			
	Lenkradaktuator (Positions- oder Momentenregelung) Spurstangenaktuatoren beidseitig (Kraftregelung)	$T = +/- 15 \text{ Nm}$ $\phi = +/- 600^\circ$ $\phi_p = +/- 1400^\circ$ $F = +/- 16000 \text{ N}$ $s = +/- 100 \text{ mm}$ $v = 5 - 150 \text{ mm/s}$	Zahnstangenkraft Lenkradwinkel Lenkradmoment Stromaufnahme Fahrzeugmodelldaten ECU Daten
<b>BLNV</b>			
	Lenkradaktuator (Positionsregelung) Spurstangenaktuatoren beidseitig (Kraftregelung)	$T = +/- 50 \text{ Nm}$ $\phi = +/- 500^\circ$ $\phi_p = +/- 1400^\circ$ $F = +/- 25000 \text{ N}$ $s = +/- 100 \text{ mm}$ $v = 5 - 150 \text{ mm/s}$	Zahnstangenkraft Lenkradwinkel Lenkradmoment Stromaufnahme ECU Daten

**Tabelle 2.1:** Testkatalog und resultierende Anforderungen an eine Prüfeinrichtung

Eine detaillierte Aufstellung und Beschreibung des Testkataloges und der erforderlichen Leistungsdaten für komplette Lenksysteme oder Teilkomponenten (Lenkgetriebe) in den drei Kategorien ist in Kapitel 4 zu finden (Ebene 3 und Ebene 4 nach Abbildung 2.4).

## 2.2 Resultierende Anforderungen an eine Prüfeinrichtung für Lenksysteme

Zusammenfassend werden über alle Testreihen die maximalen Leistungsanforderungen und Betriebsmodi (Aktuatorik) ermittelt. Die ermittelten Werte stellen die Leistungsanforderungen an eine Prüfeinrichtung dar. Die Leistungsanforderungen an eine Prüfeinrichtung gliedern sich in zwei Teilbereiche. Der erste Teilbereich befasst sich mit der Auslegung hinsichtlich Aktuatorik und Sensorik (Tab. 2.2, Tab. 2.3). Der zweite Teilbereich beschreibt die allgemeinen Anforderungen bzw. Betriebsmöglichkeiten (Tab. 2.4) nach der Klassifizierung in Abbildung 1.16. Hiernach werden die konzeptionellen Anforderungen definiert, um die geforderten Testmöglichkeiten (Tab. 2.4) abbilden zu können .

<b>Aktuator</b>	<b>Stellgröße</b>	<b>Stellbereich</b>	<b>Dynamik</b>
<b>Lenkrad</b>	Lenkradwinkel	+/- 600 °	1800 °/s / 1600 °/s <sup>2</sup>
	Lenkradmoment	50 Nm	- 3 dB bei 15 Hz
<b>Zahnstange</b>	Zahnstangenweg	+/- 150 mm	0,5 m/s / 20 m/s <sup>2</sup>
	Zahnstangenkraft	+/- 25 kN	- 3 dB bei 25 Hz

**Tabelle 2.2:** Anforderungen an die Aktuatorik der Prüfeinrichtung

<b>Sensor</b>	<b>Messgröße</b>	<b>Messbereich</b>	<b>Auflösung</b>
<b>Lenkradwinkel</b>	Winkel	min. +/- 900 °	0,05 °
<b>Lenkradmoment</b>	Moment	min. 50 Nm	0,05 Nm
<b>Zahnstangenweg</b>	Zahnstangenweg	min. +/- 150 mm	+/- 5 µm
<b>Zahnstangenkraft</b>	Zahnstangenkraft	min. +/- 25 kN	0,1 N

**Tabelle 2.3:** Anforderungen an die Aktuatorik der Prüfeinrichtung

Die Leistungsanforderungen der Tests und der Prüfeinrichtung richten sich nach der Leistungsklasse des Lenksystems. Bei den Leistungsanforderungen in Tabelle 2.1 diente die Grundausslegung eines elektromechanischen Lenksystems der höchsten Leistungsklasse als Ausgangsbasis (Tab. 1.2). Die Prüfeinrichtung soll nicht nur ein breites Spektrum an Testreihen abbilden, sondern auch hinsichtlich der prüfbareren Lenksysteme. Somit können auf einer Testplattform unter gleichen Randbedingungen verschiedene Lenksysteme getestet werden. Dies gewährleistet bei zukünftigen Testkampagnen mit unterschiedlichen Lenksystemen eine hohe Qualität im Hinblick auf die Vergleichbarkeit. Weiterhin ist bei der maximalen Leistungsanforderung berücksichtigt Fahrprofile mit hohen Kraftamplituden und einer hohen Dynamik abzubilden.

Für die Ermittlung der Übertragungsfunktion werden im Gegensatz dazu kleine Kraft- oder Wegamplituden mit einer hohen Dynamik gefordert. Dieses Spannungsfeld soll die zukünftige Prüfeinrichtung abdecken. In Tabelle 2.4 sind die erforderlichen Betriebseigenschaften einer Prüfeinrichtung bewertet. Die sehr spezifischen Anforderungen für den Hardware-in-the-Loop Betrieb werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

<b>Eigenschaft</b>	<b>Möglichkeit</b>	<b>Bewertung</b>
<b>Anregungsart</b>	Kraft	X
	Weg	X
	Moment	X
	Winkel	X
<b>Anregung</b>	(quasi-) statisch	X
	math. Funktion	X
	Zeitdaten	X
	Simulationsdaten	X
	Fahrzeugmodelldaten	X
<b>Versuchsumfang</b>	Gesamtfahrzeug	X
	Lenksystem	X
	Teilkomponente	X
<b>Aktuatorkonzept</b>	hydraulisch	Kapitel 3
	elektrisch	Kapitel 3
<b>Aktuatorik</b>	Lenkradaktuator	X
	Spurstangenkraftaktuator einseitig	
	Spurstangenkraftaktuator beidseitig	X
<b>Antriebsart</b>	direkt	X
	Zwischengetriebe	
<b>Versuchssteuerung</b>	manuell	X
	automatisiert	X
<b>Energieversorgung Lenksysteme</b>	hydraulisch	X
	elektrisch	X
<b>Leistungsbereich</b>	statisch	X
	dynamisch	X
<b>Versuchskonzept</b>	Ersatzversuch	X
	Anwendungsversuch	X
<b>Übertragbarkeit</b>	Tendenziell	X
	Eindeutig	X
<b>Betriebskonzept</b>	Kurzzeitbetrieb	
	Dauerbetrieb	X

**Tabelle 2.4:** Erforderliche Betriebseigenschaften der Prüfeinrichtung nach Abb.1.16

## 2.3 Resultierende Anforderungen an einen Hardware-in-the-Loop Betrieb

Der Test eines Lenksystems im Hardware-in-the-Loop (HiL) Betrieb stellt spezielle Anforderungen an die Prüfeinrichtung. In diesem Abschnitt werden die Anforderungen für einen HiL- Betrieb definiert, welche eine Prüfeinrichtung erfüllen muss. Durch die Implementierung eines Fahrzeug- und Umgebungsmodells auf einer Echtzeitsystemumgebung wird die Prüfeinrichtung für die HiL- Betrieb ertüchtigt. Das zeitliche Verhalten der Prüfeinrichtung sowie des Fahrzeug- und Umgebungsmodells wird echtzeitfähig, d.h. die Zeit zwischen Ein- und Ausgabe an die Aktuatoren der Prüfeinrichtung ist akzeptabel klein und vorhersehbar um realitätsnahe Ergebnisse zu generieren. Die Echtzeitfähigkeit ist nach [66] definiert als die reale Fähigkeit eines Rechnersystems alle anstehenden Aufgaben und Funktionen unter allen Betriebszuständen immer rechtzeitig und ohne Ausnahme erledigen zu können. Echtzeitfähigkeit ist keine exakte Definition, sondern eine variable Größe, die sich nach den Anforderungen der jeweiligen Anwendung und deren zeitlichen Rahmenbedingungen richtet. Ein Echtzeitsystem ist ein eingebettetes System, welches Echtzeitanforderungen besitzt und mit Hilfe eines Echtzeitbetriebssystems implementiert werden kann. Echtzeitbetriebssysteme enthalten spezielle Algorithmen (sog. Scheduler) für die Planung der zeitlichen Reihenfolge der Rechenapplikation [63].

Die Rechenapplikation einer Prüfeinrichtung für Lenksysteme besteht aus den drei Hauptkomponenten Prüfstandsteuerung, Kommunikationsschnittstelle zum Lenksystem sowie dem Fahrzeug- und Umgebungsmodell (Abb. 2.5). Bei den am Markt für HiL- Systeme verfügbaren Echtzeitsystemen (IPG, dSpace, MicroNova, ...) liegt der Standardrechenzyklus bei 1ms. Dieser Wert kann theoretisch noch verkleinert werden, jedoch schränkt diese Maßnahme die Anzahl der Rechenoperationen deutlich ein. Aus den Randbedingungen der Rechenapplikation der Prüfeinrichtung leitet sich die folgende Anforderung ab. Die Simulation der Buskommunikation des Fahrzeuges verlangt nach hohen Aktualisierungsraten. Je nach Spezifikation werden einige Nachrichten im Zyklus von 5 ms versendet. Da in speziellen prototypischen Anwendungen dieser Wert durchaus kleiner sein kann, sollte als Vorhalt ein Rechenzyklus  $< 5$  ms vorgesehen werden. Für die Ansteuerung des Prüfstands gilt die Anforderung einer minimal möglichen Zykluszeit. Hier muss ein sinnvoller Kompromiss zwischen Zykluszeit und möglichen Rechenoperationen gefunden werden. Die Einbindung eines Fahrzeugmodells erfordert einen erhöhten Rechenbedarf und variiert je nach Komplexität des Modells. Tabelle 2.5 zeigt in einer Zusammenstellung die Anforderungen der drei Hauptkomponenten der Rechenapplikation. Hieraus ergibt sich eine Zykluszeit von 1 ms, was ein Kompromiss hinsichtlich Rechenoperationen und Zykluszeit darstellt. Diese Anforderung an das Echtzeitsystem gilt explizit für den Hardware-in-the-Loop Betrieb der Prüfeinrichtung.

Applikation	Anforderung	Zykluszeit
<b>Prüfstands- steuerung</b>	maximal mögliche Zykluszeit	$\leq 1 \text{ ms}$
<b>Kommunikation Lenksystem</b>	nach Busspezifikation	$\leq 5 \text{ ms}$
<b>Fahrzeug-/ Umgebungsmodell</b>	abhängig vom Rechenbedarf	$\geq 1 \text{ ms}$
<b>resultierende Anforderung</b>		$= 1 \text{ ms}$

**Tabelle 2.5:** Anforderungen an die Zykluszeit

Für den Gesamtverbund aus Echtzeitsystem, Prüfeinrichtung und Lenksystem ergeben sich weitere Echtzeitanforderungen. Es handelt sich um eine Interaktion zwischen Simulation, realem Lenksystem und der Prüfeinrichtung selbst. Innerhalb einer vorgegebenen Zeit sind die Stellgrößen zu verarbeiten und die Reaktion des Lenksystems mittels Messgrößen auszuwerten um das Lenksystem mit neuen Stellgrößen zu versorgen. Dies geschieht indirekt über die Aktuatorik der Prüfeinrichtung. Die Prüfeinrichtung muss diesen Informationsfluss innerhalb einer definierten Zeit gewährleisten. Der Informationsfluss direkt zum Lenksystem erfolgt über das Lenksystem spezifische Bus- und Nachrichtenprotokoll, welches vom Fahrzeughersteller spezifiziert wird. Eine dynamische Restbussimulation gemäß dieser Spezifikation gewährleistet die Erfüllung der Anforderungen. Der Hauptaspekt in der Interaktion Echtzeitumgebung-Prüfstand-Lenksystem ist die Ansteuerung und Messwerterfassung der Aktuatorik. Hier ergeben sich zwangsläufig Zeitverzögerungen durch den Datentransfer, dem Aufprägen der Kräfte/Momente und der Messwerterfassung. Da sich der Gesamtzeitverzug nicht vollständig reduzieren lässt, muss eine entsprechende Anforderung definiert werden, welche den maximal zulässigen Zeitverzug spezifiziert. Diese ergibt sich zum einen aus einer theoretischen Abschätzung der Zeitverzögerungen der Datenverarbeitung und zum anderen aus den fahrdynamischen Auswirkungen eines zu großen Zeitverzugs. In der Realität haben Störgrößen, welche zu einer Änderung des Lenkradmoments führen, ein Übertragungsverhalten. Zudem werden diese Störungen, z.B. durch Fahrbahnunebenheiten, durch Fahrer verzögert wahrgenommen. Fiala [15] untersuchte dieses Verhalten und veröffentlichte einen Mindestwert von 0.24 sec zwischen Störung und Wahrnehmung vom Fahrer in Form einer Lenkradmomentenänderung.

Aus dem Blickwinkel der Datenverarbeitung der Prüfeinrichtung ergibt sich folgende Überlegung. Nach der Generierung der Aktuatorstellgrößen werden diese Größen über eine Kommunikationsstelle des Echtzeitsystems an die Steuereinheit der Aktuatorik gesendet. Bei einer hydraulischen Aktuatorik handelt es sich um die elektrohydraulische Ventile zur Regelung des Fluids, bei einer elektrischen Aktuatorik um Umrichter zur Regelung des Stroms. Nach der Generierung der Kräfte/Momente durch die Aktuatorik werden die Messwerte erfasst und an das Echtzeitsystem zurückgesendet. Auf Grund fehlender Erfahrungswerte kann an dieser Stelle nur eine grobe Abschätzung des zeitlichen Verhaltens erfolgen, welche bei ca. 15 ms liegt. Zur Spezifikation einer belastbaren Anforderung ist der Vergleich mit einem Fahrdynamikregelverbund im Fahrzeug hilfreich. Steuergeräte und deren Funktionen in der Fahrdynamikregelung arbeiten mit einer Zykluszeit von  $>10$  ms [63]. Dies bedeutet, dass auch hier Störgrößen nicht zum eigentlichen Zeitpunkt der Störung verarbeitet werden. Die sogenannte Wirkkette einer Fahrdynamikfunktion im realen Fahrzeug, bestehend aus Messgrößenerfassung, Berechnung der Funktion und Stellgrößenausgabe an einen Aktuator, unterliegt somit auch Zeitverzügen, welche, bedingt durch die Rechen- und Übertragungszeit, größer 10 ms sind. Zusammenfassend ergibt sich aus der Recherche somit eine Obergrenze von ca. 20 ms, bis zu welcher noch ein Echtzeitverhalten im HiL-Betrieb der Prüfeinrichtung gewährleistet ist. Als Zielwert und Anforderung für den Gesamtzyklus der Prüfeinrichtung im HiL-Betrieb wird eine maximale Zeit von 15 ms hier spezifiziert. Durch die Reduzierung der maximalen Zykluszeit im Gesamtzyklus um 5 ms besteht die Möglichkeit in die Stell-/Messkette der Prüfeinrichtung später Zusatzkomponenten einzubinden ohne die maximale Zykluszeit von 20 ms zu verletzen.

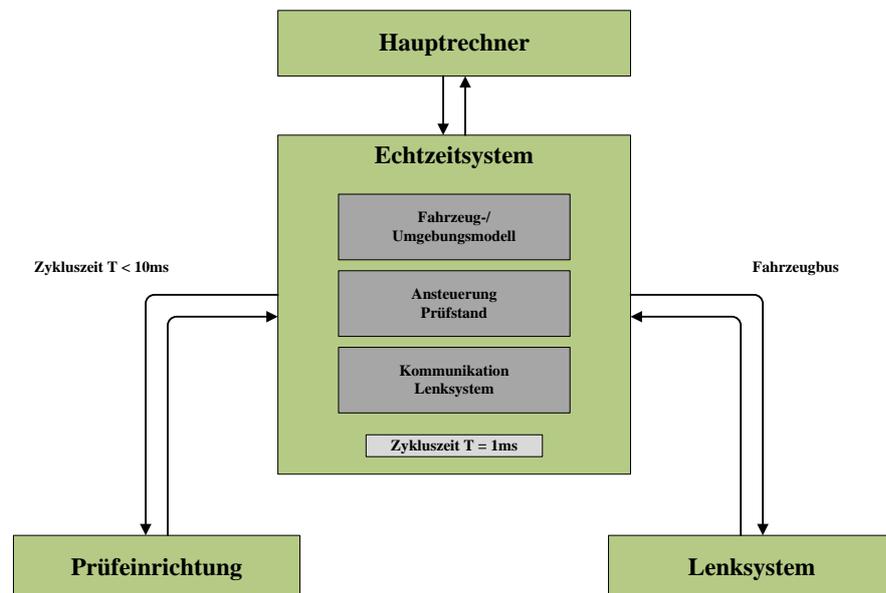


Abbildung 2.5: Kommunikationskonzept für einen HiL- Betrieb

## 2.3. Resultierende Anforderungen an einen Hardware-in-the-Loop Betrieb

Neben den bereits vorgestellten Hauptkomponenten einer Prüfeinrichtung (Echtzeitsystem, Prüfstand -> Aktuatorik, Lenksystem) sind in Tabelle 2.6 weitere Komponenten aufgeführt und deren Anforderungen definiert, welche für einen Hardware-in-the-Loop Betrieb benötigt werden.

Bereich	Anforderung	Technik	Anmerkung
<b>Energieversorgung (elektromechanische Lenksysteme)</b>	Darstellung des Fahrzeugbordnetzes hinsichtlich Spannungs- und Stromgrößen	min. 15 V / 100 A incl. Spannungs- und Strommessung	Optional: Programmierung von Starterkennlinien und Spannungseinbrüchen
<b>Energieversorgung (hydraulische Lenksysteme)</b>	Darstellung des Fahrzeughydrauliksystems hinsichtlich Volumenstrom und Systemdruck	min. 8 l/min und 100 bar incl. Messtechnik für Volumenstrom, Druck und Fluidtemperatur	Kennfeld (Messung Fahrzeugsystem) basierte Regelung des Volumenstroms
<b>externe Messtechnik</b>	Strom Kraft Winkel	min. +/- 100 A Kleinsignalbereich (0.1 N) ext. Lenkradwinkelsensor	
<b>Buskommunikation</b>	Simulation der Fahrzeugbus-Kommunikation	CAN FlexRay	gemäß Fahrzeugspezifikation (dbc, FIBEX)
<b>Fahrzeugmodell</b>	Parametrierung und Darstellung von div. Fahrzeugkonzepten (Schwerpunkt Fahrdynamik )	Echtzeitfähig Graphische Modellierung (z.B. Simulink)	Schwerpunkt Fahrdynamik: Verschiedene Achskonzepte, Reifenmodelle
<b>Umgebungsmodell</b>	Programmierung und visuelle Darstellung von Lenksystemfahrmanövern	Streckenprofile Objektmodellierung Fahrereingaben	
<b>Testautomatisierung</b>	Generierung von Testvektoren und Parametervariationen innerhalb der Testreihen zur Effizienzsteigerung	Benutzeroberfläche zur Erstellung von Testrahmen und Varianten zur Automatisierung des Testbetriebs	

**Tabelle 2.6:** Komponenten und Anforderungen an den HiL- Betrieb

# 3 Aufbau und Entwicklung des Lenksystemprüfstands mit HiL-Funktionalität

Für eine umfassende Charakterisierung von Lenksystemen wird eine Prüfeinrichtung konzipiert und aufgebaut, welche eine große Bandbreite an Prüfbereichen und Prüfmöglichkeiten abdeckt. Für den Test auf Gesamtfahrzeugebene ist die Einbindung eines Fahrzeugmodells auf einem Echtzeitsystem erforderlich. Hierdurch entsteht eine vollwertige Hardware-in-the-Loop Prüfeinrichtung für die Charakterisierung von Lenksystemen mit Fahrmanövern. Die Anforderungen und technischen Rahmenbedingungen der Prüfeinrichtung für Lenksysteme wurden in Kapitel 2 definiert und erläutert. Innerhalb dieses Rahmens ist gewährleistet, dass alle Testreihen zur Charakterisierung von Lenksystemen durchgeführt werden können. Da die Prüfeinrichtung zum Test von Lenksystemen dient, wird im Folgenden die Prüfeinrichtung als Lenksystemprüfstand bezeichnet.

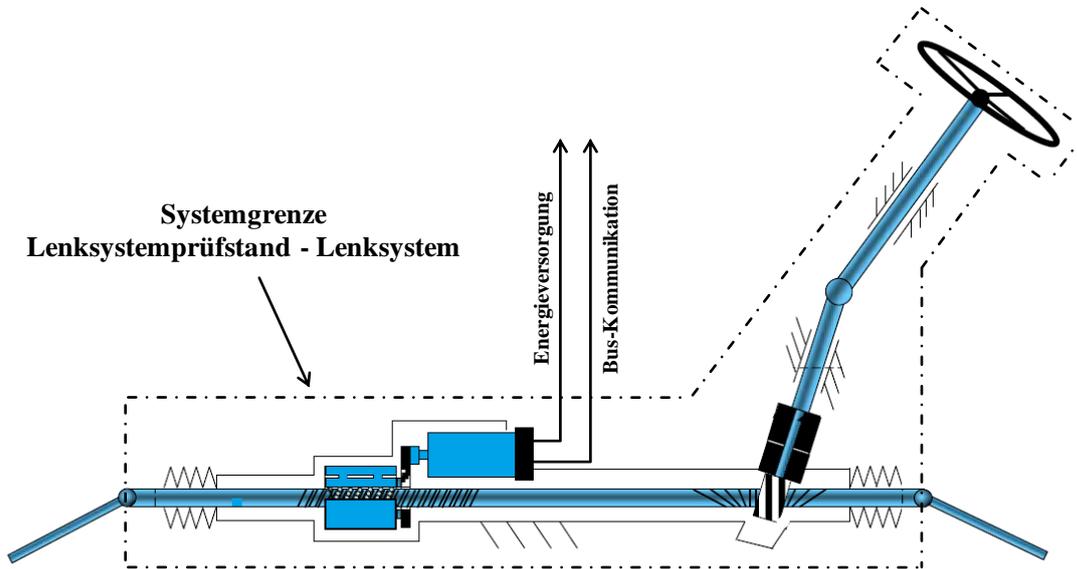
## 3.1 Prüfstandskonzept - Komponenten und Technik

Das Prüfstandskonzept leitet sich aus den in Tabelle 2.4 spezifizierten Betriebseigenschaften ab. Zuvor wurden in Kapitel 1.7 an Hand einer Klassifizierung die möglichen Betriebsmöglichkeiten aufgezeigt. Diese wurden in Abschnitt 2.2 zu Anforderungen (Betriebseigenschaften) spezifiziert und werden in diesem Abschnitt in einem Prüfstandskonzept umgesetzt. Die globale Anforderung an die Prüfeinrichtung (Lenksystemprüfstand) lautet, Lenksysteme nach einer definierten Testreihen zu charakterisieren. Ein Lenksystem besteht aus den Bauteilen Lenkrad, Lenksäule, Lenkzwischenwelle (Lenkspindel), Lenkgetriebe und den Spurstangen (Abb. 1.1).

### 3.1.1 Schnittstelle Lenksystemprüfstand - Lenksystem

Lenkrad, Spurstangen und die Befestigung im Fahrzeug stellen die Systemgrenzen eines Lenksystems dar. Das Lenkrad ist die Schnittstelle zum Fahrer und setzt dessen Lenkbefehle um. An einem Lenksystemprüfstand werden die Fahrereingaben durch einen Aktuator auf das Lenksystem aufgeprägt.

Die Systemgrenze zu den Vorderachsradschächern links und rechts sind die Spurstangen, welche die Fahrereingabe der Zahnstange übertragen. Die beiden Schnittstellen, Lenkrad und Spurstangen, werden auch am Lenksystemprüfstand als Systemgrenzen definiert (Abb. 3.1).



**Abbildung 3.1:** Systemgrenzen Lenksystemprüfstand - Lenksystem

Die Befestigung des Lenksystems im Fahrzeug erfolgt auf dem Vorderachsträger (Hilfsrahmen). Je nach Anwendung und Testanforderung kann an einem Lenksystemprüfstand eine feste Aufspannung an einem Haltersystem oder auf dem original Hilfsrahmen gewählt werden. Um gezielt Einflüsse einzelner Komponenten eines Lenksystems zu untersuchen, kann die Systemgrenze zwischen Lenksystemprüfstand (Aktuatorik) und Lenksystem auch auf einzelne Komponenten des Lenksystems verschoben werden. Die Varianten der Systemgrenzen sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Entsprechend den Einbaulagen und Befestigungsmöglichkeiten sind spezielle Adaptierungen zu konstruieren und zu fertigen.

Lenksystemkomponente	Systemgrenze A	Systemgrenze B
Lenkgetriebe	Ritzelwelle	Zahnstange
Lenksäule	Lenkrad	Lenksäulenausgang
Lenksäule + Lenkzwischenwelle	Lenkrad	Kreuzgelenk Ritzelwelle
Lenkzwischenwelle	Kreuzgelenk Lenksäule	Kreuzgelenk Ritzelwelle

**Tabelle 3.1:** Systemgrenzen von Lenksystemkomponenten

### 3.1.2 Auswahl der Aktuatorik

Zur Nachbildung der Lasten an der Zahnstange und der Fahreingabe am Lenkrad werden jeweils ein Zahnstangenkraftaktor und ein Lenkradaktor benötigt. Dieses Konzept wurde bereits bei Lenksystemprüfständen in Industrie [23] und Forschung [69] angewendet. Die Mindestanforderung an einen Fahrzeug äquivalenten Betrieb werden auch bei der Konzeption eines Lenksystemprüfstands für eine umfangreiche Charakterisierung von Lenksystemen erfüllt. Darüber hinaus müssen die in Tabelle 2.2 spezifizierten Anforderungen erfüllt werden. Entsprechend leistungsfähige Aktuatoren werden benötigt. Im realen Fahrzeug werden die Kräfte, übertragen durch Fahrbahn, Reifen und Fahrwerk, beidseitig auf die Zahnstange aufgeprägt. Zur Darstellung dieser Kräfte an einem Lenksystemprüfstand wäre ein Aktuator ausreichend, der die Summe aus beiden Spurstangenkräften als resultierende Zahnstangenkraft nachbildet.

Die bisher bekannten Prüfstände verfolgen dieses Konzept. Nachteile hat dieses Konzept bei einer höheren Dynamik und hohen Zahnstangenkräften hinsichtlich einer realitätsnahen Nachbildung. Die Spurstangenkräfte verursachen zusätzlich zur Verdrehung des Lenkgetrieberitzels auch eine Querbewegung zwischen Zahnstange und Zahnstangenführung im Lenkgetriebegehäuse (z.B. Druckstück). Dies führt zu einer Veränderung der Reibung im Lenkgetriebe und zu Auswirkungen auf das Übertragungsverhalten des Lenksystems. Untersuchungen zu diesem Phänomen werden in Kapitel 4 durchgeführt. Für eine exakte Darstellung der Kraftübertragung wie im realen Fahrzeug wäre zusätzlich die Nachbildung der Bewegung der Spurstangen erforderlich. Für dieses Konzept wäre eine komplexe Aktuatorik zur Darstellung der Spurstangenbewegung nötig. Aus der Sicht von Kosten, Aufwand und Nutzen wird bei der Konzeption des Lenksystemprüfstands auf diese Variante verzichtet.

Ein zweiter Spurstangenkraftaktor wird im Konzept des Lenksystemprüfstands berücksichtigt. Im Hardware-in-the-Loop Betrieb wird durch das beidseitige Aufprägen der durch das Fahrzeugmodell berechneten Spurstangenkräften eine realitätsnahe Abbildung derer gewährleistet. Hierdurch ergibt sich über die Charakterisierung hinaus ein größeres Potential für die Entwicklung zukünftiger Testreihen. Weiterhin können an beiden Spurstangen Beugungswinkel statisch eingestellt werden. Im Hinblick auf Missbrauchs- oder Festigkeitsuntersuchungen bietet diese Option weitere Freiheitsgrade bei der Definition von Testreihen. Zusätzlich erweitert ein 2-Aktuatorenkonzept die Nutzungsmöglichkeiten über Lenksysteme an der Vorderachse hinaus, beispielsweise bei der Integration von Hinterradlenkungen. Das Aktuatorikonzept des Lenksystemprüfstands besteht somit aus folgenden Hauptkomponenten: Zwei Linearaktuatoren zum beidseitigen Aufprägen der Spurstangenkräfte und einem Lenkradaktor.

#### 3.1.3 Antriebsart und Aktuatorkonzept

Alle Aktuatoren werden gemäß den erforderlichen Betriebseigenschaften in Tabelle 2.4 als Direktantriebe ausgeführt, d.h. die Aktuatoren sind direkt mit dem Lenksystem verbunden. Ein mechanisches Übersetzungsglied zur Übertragung der Bewegung entfällt. Dadurch sind keine Umkehrspiele und Elastizitäten im Regelkreis des Antriebs vorhanden. Reibung entsteht nur im Führungssystem des Antriebs. Aus diesen Eigenschaften resultiert ein sehr dynamisches Verhalten und eine hohe Genauigkeit der Antriebsregelung [20]. Durch den Entfall eines Zwischengetriebes weist der Antrieb eine höhere mechanische Steifigkeit und somit eine höhere mechanische Eigenfrequenz auf. Dies erlaubt eine höhere Dynamik bei der Reglerauslegung [40]. Weitere Vorteile sind der geringe Wartungsaufwand, der verschleißarme Antrieb, keine Getriebeverluste und niedrige Geräuschemissionen.

Durch diese Eigenschaften wird die Anforderung hinsichtlich eines Dauerbetriebs erfüllt. Gegenüber konventionellen Antrieben mit mechanischen Übersetzungsgliedern sind die Kosten jedoch deutlich höher. Zudem muss der Antrieb selbst leistungsfähiger und maßgeschneidert auf den Anwendungsbereich dimensioniert werden. Die Kombination Antrieb-Übersetzungsglied bietet mehr Möglichkeiten durch die größere Variantenvielfalt (Baukastensystem). Für die Anwendung an einem Lenksystemprüfstand überwiegen aber die Vorteile durch die hohe Dynamik und Genauigkeit der Regelung. Die Technologie und die Vorteile der Direktantriebe werden seit einigen Jahren im Werkzeugmaschinenbau angewandt [20]. Der Lenkradaktor wird als rotatorischer Direktantrieb (Torquemotor) und beide Spurstangenkraftaktuatoren werden als linearer Direktantrieb ausgeführt.

Bei den in der Industrie bisher eingesetzten Lenksystemprüfständen wurden ebenfalls Direktantriebe eingesetzt. Dabei ist der Spurstangenkraftaktor hydraulisch ausgeführt [1]. Oftmals sind Lenksystemprüfstände in der Industrie Teil eines Prüffelds für Fahrwerkskomponenten. Eine zentrale leistungsstarke Hydraulikversorgung dient zur Energieversorgung des gesamten Prüffelds. Eine Erweiterung der Aktuatorik und die Integration dieser in die Hydraulikversorgung ist einfach und kostengünstig möglich. Bei der Konzeption eines Lenksystemprüfstands, welcher nicht an ein Prüffeld angeschlossen ist, d.h. eine eigene Energieversorgung benötigt, sind diese Vorteile nicht nutzbar. Tabelle 3.2 zeigt eine Bewertung der Eigenschaften von hydraulischen und elektrischen Aktuatoren zur Konzeption eines Lenksystemprüfstands mit eigener Energieversorgung.

Beurteilungskriterium	hydraulisch	elektrisch
Regelung (Dynamik)	+	++
Regelung (Genauigkeit)	+	++
Maximalkräfte	++	+
Energieversorgung	-	++
Prüfstandsleitwarte	-	+
Platzbedarf	-	-
Schallemissionen	+	+
Systemkomplexität	-	-
Kosten	+	+
Wartung	-	++
Sicherheit	-	+

**Tabelle 3.2:** Vergleich zwischen einem hydraulischen und elektrischen Direktantrieb für einen Lenksystemprüfstand

Es zeigt sich, dass für einen Lenksystemprüfstand mit eigener Energieversorgung die Vorteile des elektrischen Direktantriebs überwiegen. Besonders bei die Kriterien Regeldynamik und Regelgenauigkeit bietet ein elektrischer Direktantrieb Vorteile im Vergleich zu einem hydraulischen Direktantrieb.

### 3.1.4 Anregungsart und Anregung

Zur Darstellung des in Abschnitt 2.1 definierten Testumfangs und der daraus resultierenden Leistungsanforderungen werden eine Kraft- und Wegregelung der Spurstangenkraftaktuatoren benötigt. Entsprechend muss der rotatorische Direktantrieb (Lenkradaktor) eine Momenten- oder Winkelregelung unterstützen. Für die verschiedenen Leistungsbereiche können bei Bedarf spezifische Regelparametersätze appliziert werden. Diese Einstellmöglichkeiten gewährleisten eine Anregung mit Signalen, welche aus einer mathematischen Funktion (Sinus, Rampe), aus Zeitdaten, Simulationsdaten, Fahrzeugmodelldaten oder (quasi-) statischen Werten generiert wurden.

### 3.1.5 Gesamtkonzept

Das Ergebnis des Gesamtkonzepts eines Lenksystemprüfstands zur Charakterisierung von Lenksystemen ist zusammenfassend in Abbildung 3.2 dargestellt. Die in den vorherigen Kapiteln und Abschnitten definierten Anforderungen sind in dieses Konzept eingeflossen. Nach der Konzepterstellung erfolgt die Präzisierung des Konzepts durch die Auswahl der Komponenten des Lenksystemprüfstands.

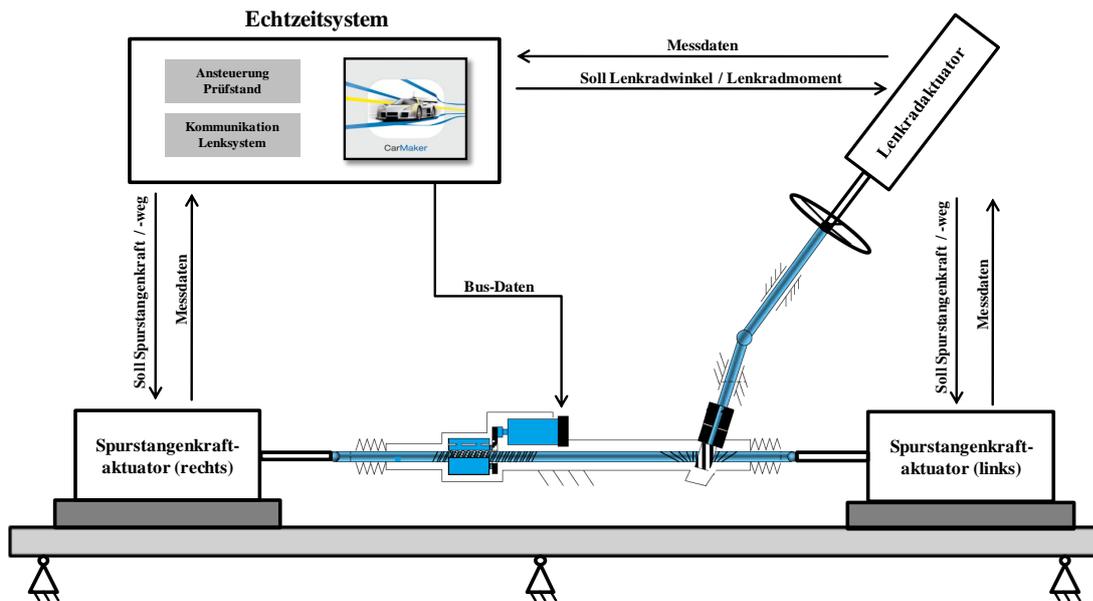


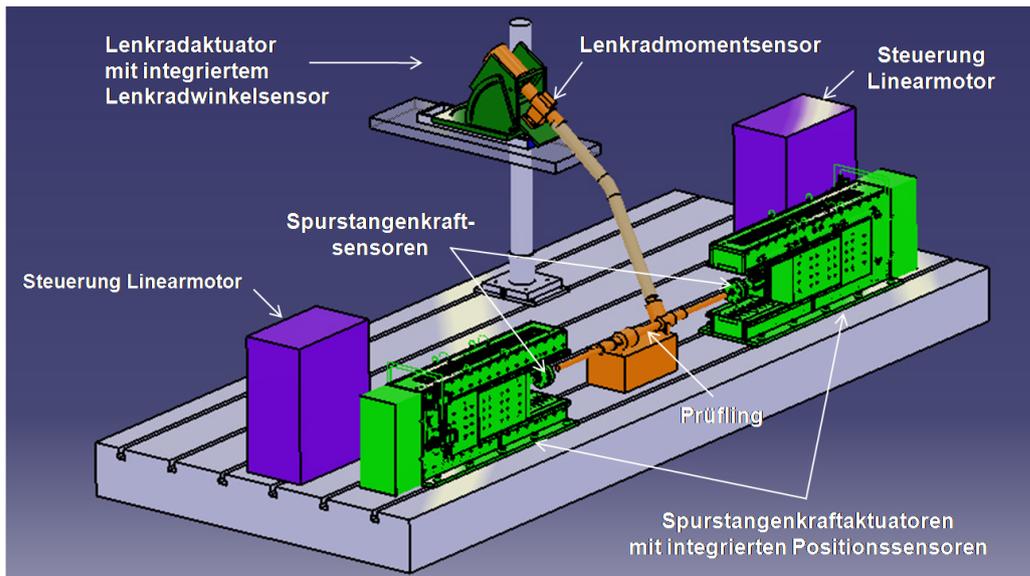
Abbildung 3.2: Konzept Lenksystemprüfstand

## 3.2 Charakteristik des Lenksystemprüfstands

Aus den Ergebnissen der Konzepterstellung in Abschnitt 3.1 ist entsprechend den erarbeiteten Anforderungen ein Lastenheft spezifiziert worden. Am Markt für Prüfstandstechnologien existieren verschiedene Anbieter, welche eine Aktuatorik anbieten, die für einen Lenksystemprüfstand geeignet ist. Prüfstände können im Allgemeinen als schlüsselfertige Lösung gekauft werden oder auch nur einzelne Komponenten. Die Vorteile bei einer schlüsselfertigen Ausführung liegen darin, dass man ein maßgeschneidertes Produkt entsprechend den Anforderungen termingerecht erhält. Dem gegenüber stehen hohe Kosten in der Anschaffung und ein fehlender Wissensaufbau und -transfer in der Prüfstandstechnologie selbst. Bei späteren mechanischen oder elektrischen Anpassungen muss stets auf die Expertise des Systemlieferanten zurückgegriffen werden. Aus dem wissenschaftlichen Ansatz heraus und der Anforderung eine große Bandbreite an Testmöglichkeiten abzudecken wurden für den Lenksystemprüfstand zur Charakterisierung von Lenksystemen entschieden die Aktuatoren sowie die Ansteuerung und Regelung der Aktuatoren extern zu beschaffen. Der Aufbau selbst und die Integration der Lenksysteme erfolgt als Teil dieser Arbeit. Durch diese Vorgehensweise wird eine Wissensbasis für Prüfstandstechnologien und eine Flexibilität im Entwurf von Lenksystemtests geschaffen. Darüber hinaus bietet sich die Möglichkeit Studenten im Rahmen von Projekt- und Abschlussarbeiten an komplexe Prüfstandstechnologien und Lenksysteme heranzuführen.

An Hand des Lastenheftes wurde als Systemlieferant für die Aktuatoren sowie die Ansteuerung und Regelung der Aktuatoren die Firma SilverAtena ausgewählt. Die Komponenten für den Lenksystemprüfstand erfüllen gemäß den Lieferantangaben die im Lastenheft definierten Anforderungen an die Aktuatorik des Lenksystemprüfstands. Die Aktuatoren sind elektrische Direktantriebe. Wie in den vorangegangenen Unterabschnitten detailliert beschrieben bieten elektrische Direktantriebe bei der Umsetzung der Testreihen zu Charakterisierung von Lenksystemen Vorteile hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Regelgüte. Die Charakteristik und Leistungsfähigkeit der Aktuatoren und der Systemaufbau wird in den folgenden Unterabschnitten untersucht und beschrieben. Das Arbeitsmodell beim Systemaufbau sieht vor, dass die Aktuatoren und die dazu gehörigen Komponenten Leistung des Systemlieferanten sind. Die Befähigung zu einem Hardware-in-the-Loop Prüfstand und die Gestaltung des Prüfstandumfelds sind Bestandteil dieser Arbeit. Dazu gehören die Infrastruktur, Aufspannplatte und Halterungen, der Aufbau und Inbetriebnahme der Lenksysteme sowie die messtechnische Erweiterung für der Untersuchung von spezielle Lenksystemphänomenen. Die Befähigung zu einem HiL- Prüfstand erfolgt durch Einbindung eines Fahrzeugmodells in die Echtzeitumgebung. Für die Prüfstandsteuerung und Überwachung wird ein Softwarerahmen mit einer Benutzereingabemaske erstellt. In der Gesamtbetrachtung ergibt sich mit diesem Arbeitsmodell eine effiziente und flexible Umsetzung der im Lastenheft definierten Anforderungen.

Abbildung 3.3 zeigt den Systemaufbau des Lenksystemprüfstands. Der Aufbau und die Fixierung der Aktuatoren und der Systemkomponenten des Lenksystemprüfstands erfolgt auf einer massiven Stahlplatte mit T-Nuten. Die Abmaße sind 5x2 m und das Gewicht beträgt 5 t. Zur Schwingungsisolation und Entkopplung von äußeren Einflüssen ist die Stahlplatte auf fein justierbaren Keilschuhen horizontal gelagert. Die Größe der Prüfstandplatte bietet ausreichend Fläche für die Fixieren von Nebenaggregaten wie eine Hydraulikkreislauf inklusive einer Pumpeneinheit oder ein Fahrzeugbordnetz dargestellt durch einen Generator und Ersatzlasten. Die Aktuatoren können individuell je nach Testkonfiguration angeordnet werden. Die Möglichkeit zum Test von diversen Lenksystembauformen und Lenksystemkonzepten erfordert unterschiedliche Schnittstellen zwischen Lenksystemprüfstand und dem mechanischen und elektronischen Aufbau des Lenksystems. Zur Realisierung dieser umfangreichen Anforderungen zeichnet sich der Lenksystemprüfstand durch ein modulares Konzept aus.



**Abbildung 3.3:** Systemaufbau Lenksystemprüfstand

Die Aktuatoren sind in bestimmten Grenzen auf einem Maschinenbett in x- und y-Richtung frei positionierbar. Der Aufbau des Lenkradaktuators ist zusätzlich in z-Richtung justierbar. Durch diese Einstellmöglichkeiten können unterschiedliche Positionen zwischen Lenksäule und Lenkgetriebe eingestellt werden. Mit einem Verfahrweg der Läufer der Linearaktuatoren von 300 mm können in der Grundausrichtung bereits verschiedene Lenksysteme aufgespannt werden ohne die Aktuatoren auf dem Maschinenbett neu zu positionieren. Dies wirkt sich positiv auf die Rüstzeiten aus. Weiterhin befinden sich die Steuerungseinheiten der Aktuatoren auf der Aufspannplatte. Die Steuerungseinheiten bestehen aus den Umrichtern der Aktuatoren und der messtechnischen Signalverarbeitung. An den Aktuatoren befindet sich die entsprechende Sensorik für die jeweilige Regelungsstrategie. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Sensorik ist Kapitel 3.2.5 zu finden.

#### 3.2.1 Spurstangenkraftaktor (Linearmotor)

Die Anforderung in Tabelle 2.2 bilden die Grundlage für die Auswahl der Aktuatorik. Die beiden Linearmotoren des Systemlieferanten SilverAtena erfüllen diese Anforderungen bzw. übertreffen diese in Teilbereichen und können je nach Testkonfiguration sowohl in Position oder Kraft geregelt werden. Im Vergleich zu konventionellen hydraulischen Aktuatoren zeichnen sich die verwendeten Linearmotoren durch eine hohe Dynamik und gute Regelbarkeit aus. Es handelt sich bei den Linearmotoren um eine Kleinserie, welche speziell auf die Anforderungen zum Test von Lenksystemen zugeschnitten ist. Abbildung 3.4 zeigt das Leistungsdiagramm (Kraft/Geschwindigkeit) eines der verwendeten Linearmotoren. Hiernach können Kräfte von über 30 kN erzeugt werden.

Die maximale Geschwindigkeit liegt bei ca. 1.6 m/s. In der Konfiguration am Lenksystemprüfstand werden diese Leistungswerte auf Grund der verwendeten Kraftsensoren nicht ausgenutzt. Der maximale Messbereich begrenzt die Aktuatoren bei +/-25 kN. Dieser Maximalwert ist ausreichend um Lenksysteme aller Fahrzeug- und der unteren Nutzfahrzeugklasse zu testen. Durch den großen Messbereich reduziert sich allerdings die Messgenauigkeit der Kraftsensoren auf 50 N. Diese Eigenschaft verursacht Einbußen bei der Regelgüte im unteren Kraftbereich (50-200 N).

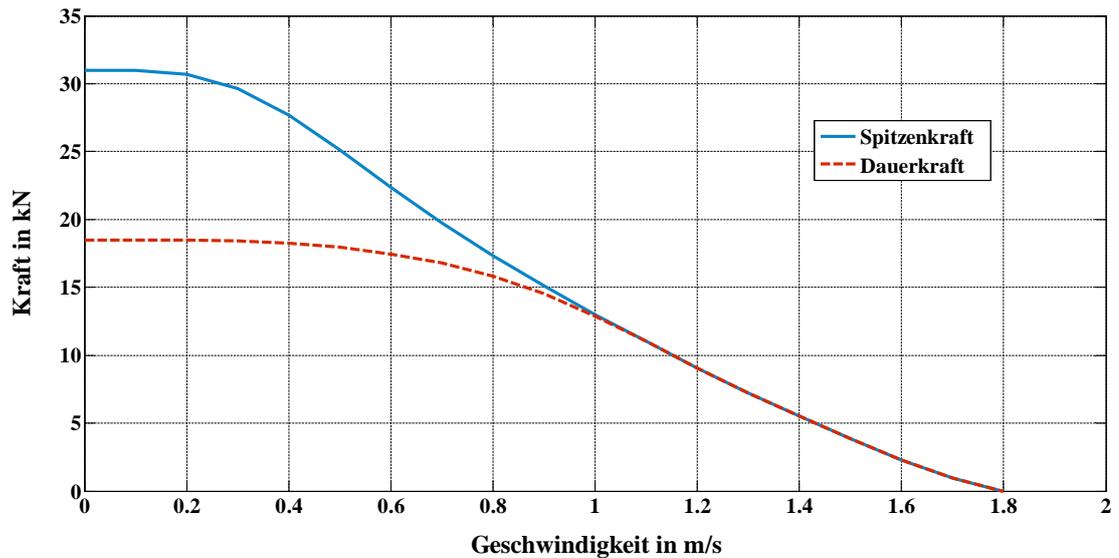


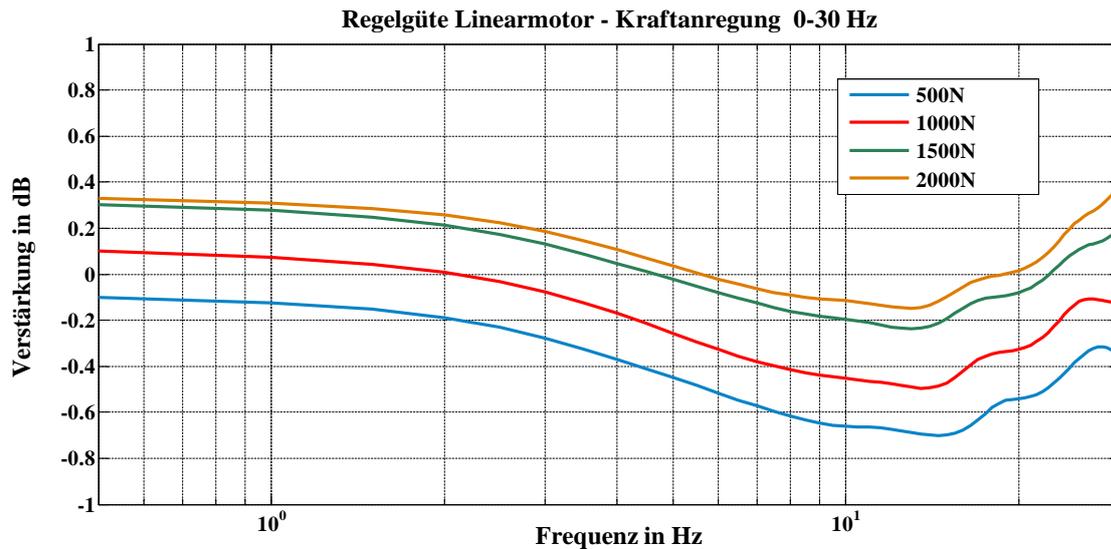
Abbildung 3.4: Leistungsdiagramm des Linearmotors (SilverAtena)

Im Dauerbetrieb bzw. beim statischen Aufprägen einer Kraft kann eine Kraft von 18.9 kN durch die Linearmotor erzeugt werden. Die Dynamik des Linearmotors wird durch die Maximalwerte der Geschwindigkeit von 1.6 m/s und der Beschleunigung von 20 m/s<sup>2</sup> begrenzt. Die Leistungskennwerte sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

<b>Motortyp:</b>	Linearantrieb
<b>Nennkraft:</b>	18,9 kN
<b>Maximalkraft:</b>	25 kN
<b>Weg:</b>	+/- 150 mm
<b>max. Geschwindigkeit:</b>	1,6 m/s
<b>max. Beschleunigung:</b>	20 m/s <sup>2</sup>

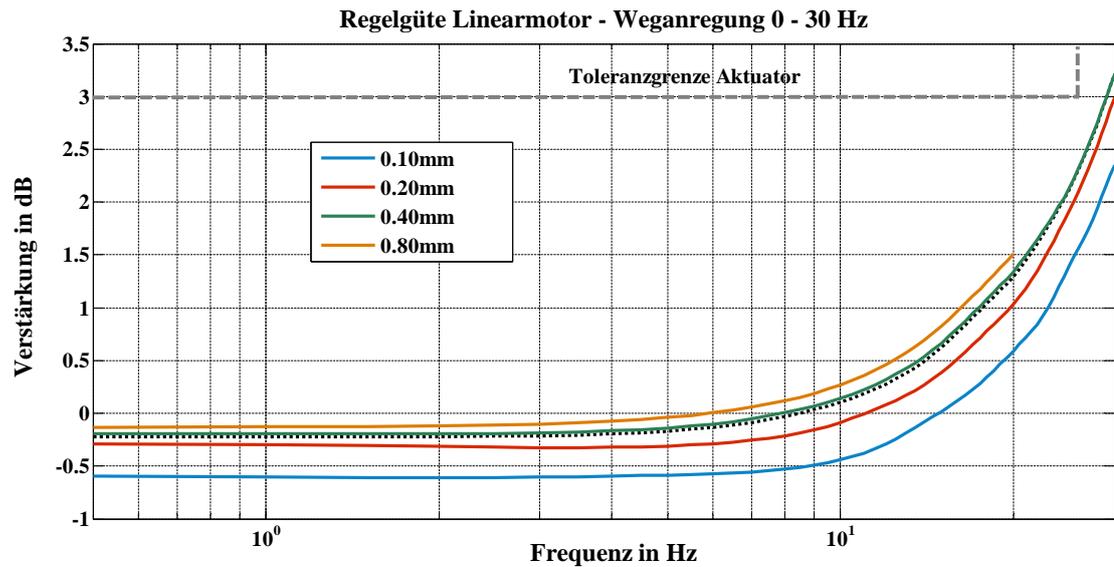
Tabelle 3.3: Leistungsdaten des Linearmotors (SilverAtena)

Mit den in Tabelle 3.3 aufgeführten Leistungsdaten können ein Großteil der Tests aus Tabelle 2.1 durchgeführt werden. Zur Untersuchung des Rückmeldeverhaltens von Lenksystemen sind die Systemeigenschaften der Linearmotoren im Frequenzbereich von 0-30 Hz von zentraler Bedeutung (Kapitel 4). Zur Ermittlung der Systemeigenschaften des Linearmotors im Frequenzbereich von 0-30 Hz wurden Testreihen in den Regelmodi Kraftanregung und Weganregung durchgeführt. Zusätzlich wurden in den Testreihen jeweils die Amplituden in Kraft bzw. Weg variiert.



**Abbildung 3.5:** Regelgüte des verwendeten Linearmotors im Regelmodus Kraftanregung - Läufer verspannt

Abbildung 3.5 zeigt die Regelgüte des Linearmotors im Regelmodus Kraftanregung. Als Regelgüte wird in dieser Testreihe das Verhältnis von Ausgabe (gemessene Kraft des Linearmotors) und Vorgabe (synthetische Sinusschwingung aus einem Signalgenerator), dargestellt in Dezibel (dB), bezeichnet. Der Läufer des Linearmotors wurde an einem steifen Winkel verspannt. Das Frequenzband von 0-30 Hz wurde diskret durchlaufen. In Frequenzschritten von 0.5 Hz wurde eine Sinusschwingung mit 10 Perioden und der entsprechenden Amplitude aufgeprägt. Diese Testdurchführung gewährleistet bei jeder Frequenz einen eingeschwungenen Zustand. Um den Einfluss der Amplitude zu untersuchen wurde diese im Bereich zwischen 500 N und 2000 N bei einer Schrittweite von 500 N variiert. Über den Frequenzbereich von 0-30 Hz befindet sich die Regelgüte in einer Bandbreite von 1 dB. Das charakteristische Verhalten über dem Frequenzbereich bleibt mit steigender Amplitude gleich, jedoch steigt die Regelgüte des Linearmotors. Die Regelgüte ist für die Untersuchung des Übertragungsverhaltens von Lenksystemen ausreichend und erfüllt bzw. übertrifft die gestellte Anforderung (Tab. 2.2) im Regelmodus Kraftanregung.



**Abbildung 3.6:** Regelgüte des verwendeten Linearmotors im Regelmodus Weganregung - Läufer frei

Die Testreihen im Regelmodus Weganregung (Abb. 3.6) wurden analog zu den Testreihen im Regelmodus Kraftanregung durchgeführt. Die Amplitude wurde in einem Band von 0.1 mm und 0.8 mm variiert. Auf Grund der hohen Dynamik wurde die Testreihe bei 0.8 mm bei einer Frequenz von 20 Hz beendet, was die Aussagekraft über das charakteristische Verhalten des Linearmotors nicht beeinträchtigt. Der Läufer des Linearmotors war in den Testreihen frei. Bis zu einer Frequenz von ca. 10 Hz zeigt das charakteristische Verhalten des Linearmotors eine konstante und sehr gute Regelgüte. Oberhalb von 10 Hz nimmt die Regelgüte deutlich ab, bleibt aber noch innerhalb der tolerierten dynamischen Bandbreite von 3 dB bei 25 Hz nach Herstellerangabe. Im Regelmodus Weganregung ist der Einfluss der steigenden Amplitude über den Frequenzbereich sichtbar. Im Vergleich zum Regelmodus Kraftanregung fällt dieser deutlich geringer aus. Mit dem im Linearmotor integrierten Wegmesssystem ist laut Herstellerangabe eine Regelgenauigkeit von 0.2 mm realisierbar. In Summe bestätigen die Testreihen die Herstellerangaben und damit die Anforderungen für eine Untersuchung des Übertragungsverhaltens von Lenksystemen bei einer Weganregung.

### 3.2.2 Lenkradaktuator (Torquemotor)

Zur Umsetzung der Fahrereingabe wird als Lenkradaktuator ein Schrittmotor verwendet, welcher in Position (Lenkradwinkel) und Moment (Lenkradmoment) geregelt werden kann. Hersteller des Motors ist die Firma ALXION. Es handelt sich um den Typ 145ST2M. Die Leistungsfähigkeit des Torquemotors ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Das maximale nutzbare Moment beträgt 50 Nm und ist durch den verwendeten Drehmomentsensor auf diesen Maximalwert begrenzt. Neben dem maximalen Moment stellt die maximale (Lenkrad-) Winkelgeschwindigkeit ein wichtiges Kriterium dar. In der Konfiguration für den Lenksystemprüfstand liegt die maximale Winkelgeschwindigkeit bei 2100 deg/s (350 U/min). Lenkradmomentspitzen bis zu 30 Nm können in diesem Bereich des Leistungsdiagramms aufgeprägt werden.

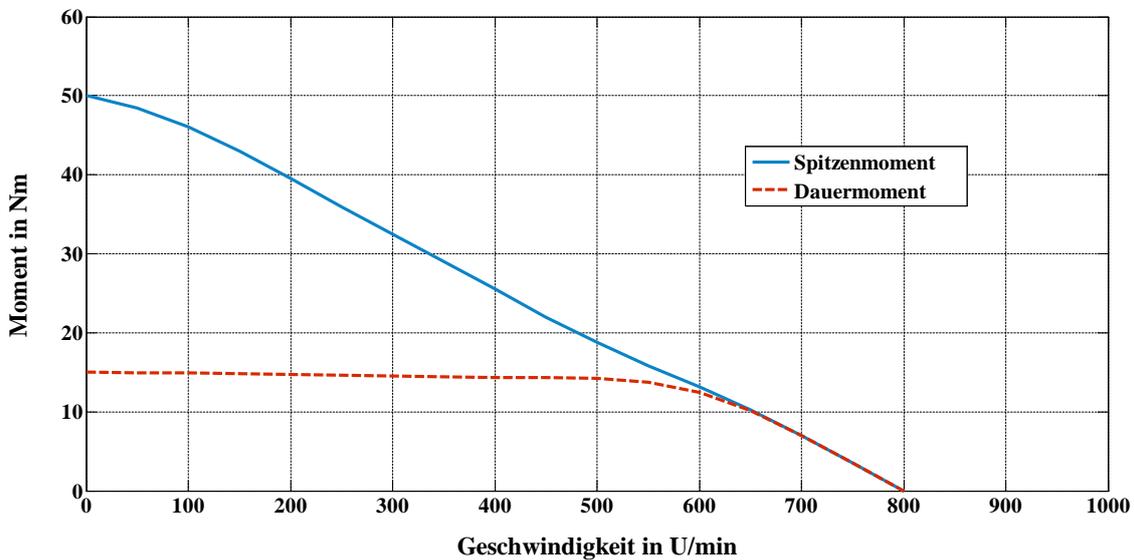


Abbildung 3.7: Leistungsdiagramm des Torquemotors (ALXION 145ST2M)

Auswertungen von Lenksystemtests, beispielsweise beim sogenannten „Anreißen“, ergaben, dass die maximalen Lenkradwinkelgeschwindigkeiten von Testfahrern im Fahrversuch bei ca. 1600 deg/s liegen. Mit der erzielbaren Dynamik und dem maximalen verfügbaren Moment des Lenkradaktuators können die Fahrereingaben (Winkel oder Moment geregelt) von Fahrmanövern oder Betriebslastennachfahrversuchen in der Lenksystementwicklung abgebildet werden.

<b>Motortyp:</b>	Schrittmotor
<b>Nennmoment:</b>	19 Nm
<b>Maximalmoment:</b>	50 Nm
<b>Winkel:</b>	+/- 1440 deg
<b>max. Geschwindigkeit:</b>	2100 deg/s
<b>max. Beschleunigung:</b>	20000 deg/s <sup>2</sup>

**Tabelle 3.4:** Leistungsdaten des Torquemotors (ALXION 145ST2M)

In Tabelle 3.4 sind die Leistungsdaten des Lenkradaktuators zusammengefasst. Der begrenzte Winkel resultiert aus der Signalverarbeitung der verwendeten Sensorik. Zur Untersuchung des Führungsverhaltens von Lenksystemen sind die Systemeigenschaften des Torquemotors im Frequenzbereich von 0-40 Hz von zentraler Bedeutung (Kapitel 4). Zur Ermittlung der Systemeigenschaften des Torquemotors im Frequenzbereich von 0-40 Hz wurden Testreihen in den Regelmodi Momentanregung und Winkelanregung durchgeführt. Zusätzlich wurden in den Testreihen jeweils die Amplituden in Moment bzw. Winkel variiert. Die Testreihen wurden analog zu den Testreihen der verwendeten Linearmotoren durchgeführt. Eine Sinusschwingung mit 10 Perioden wurde in Frequenzschritten von 0.5 Hz und entsprechender Amplitude (Moment, Weg) generiert. Die Amplitude wurde im Regelmodus Momentanregung in einem Band von 2-15 Nm und im Regelmodus Winkelanregung in einem Band zwischen 2.5 ° und 15 ° variiert.

In Abbildung 3.8 ist die Regelgüte des Torquemotors im Regelmodus Momentenanregung zu sehen. In dieser Testreihe wurde die Antriebswelle des Torquemotors verspannt. Bis ca. 20 Hz ist eine konstante Regelgüte vorhanden. Ein signifikanter Abfall der Regelgüte ist erst ab 25 Hz ersichtlich, bleibt aber bis 40 Hz stets in einem Toleranzband von 2 dB. Die gestellte Anforderung an die Dynamik (Tab. 2.2) beschreibt eine Eckfrequenz von -3 dB bei 15 Hz. Die Eckfrequenz wird in der Testreihe nicht erreicht und somit ist eine deutlich bessere Regelgüte erzielbar. Mit steigender Momentenamplitude stellt sich eine geringfügig bessere Regelgüte ein. Die Regelgüte im Regelmodus Winkelanregung ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Die Antriebswelle des Torquemotors war frei. Die Regelgüte bleibt bis zu einer Frequenz von ca. 12 Hz nahezu konstant bei 0 dB. Die Eckfrequenz von -3 dB wird bei ca. 30 Hz erreicht und die Verstärkung fällt bis 40 Hz deutlich ab.

### 3.2. Charakteristik des Lenksystemprüfstands

Bei einer Winkelregelung liegt die Herstellerangabe zur Eckfrequenz von -3 dB bei 20 Hz. In der Testreihe wird diese Frequenz abhängig von der Amplitude im Frequenzband von 25-40 Hz erreicht. Ein Amplitudeneinfluss wird erst in einem Bereich ab 23 Hz sichtbar.

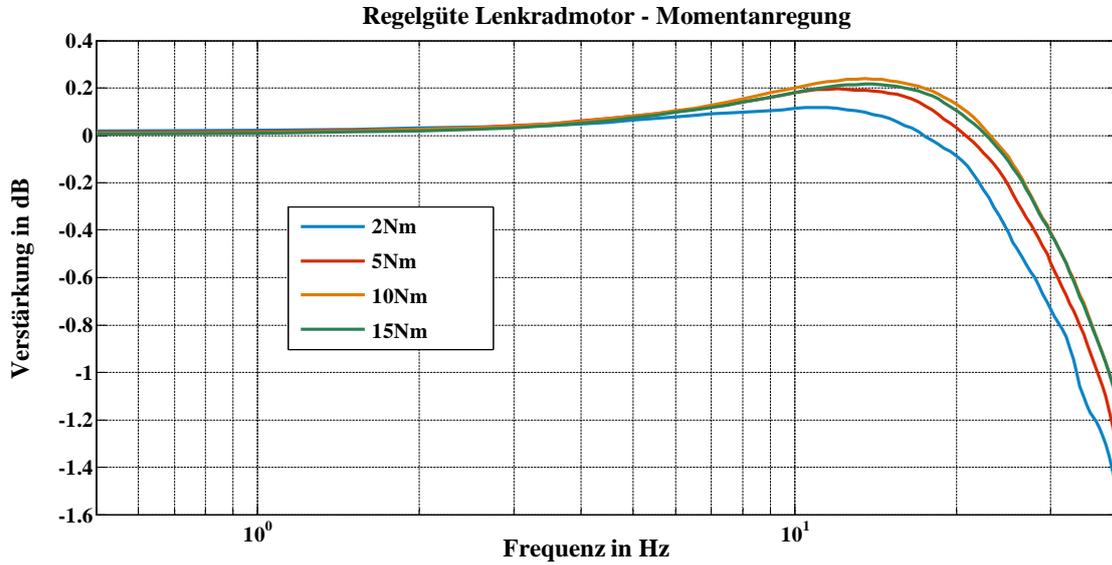


Abbildung 3.8: Regelgüte des verwendeten Torquemotors im Regelmodus Momentanregung - Antriebswelle verspannt

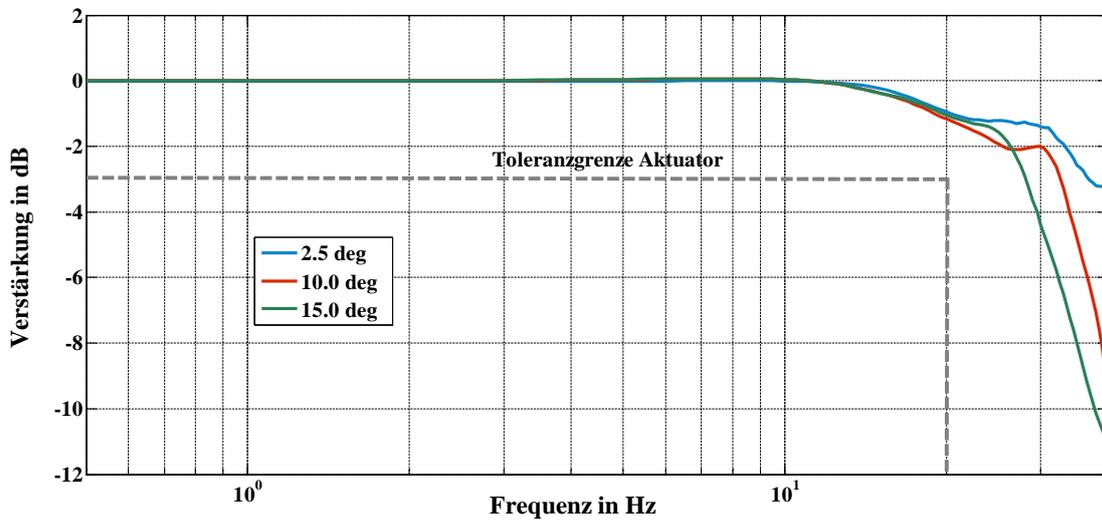


Abbildung 3.9: Regelgüte des verwendeten Torquemotors im Regelmodus Winkelanregung - Antriebswelle frei

### 3.2.3 Systemvernetzung

Die beiden Linearmotoren, der Torquemotor und das Lenksystem werden in einem Systemverbund betrieben. Dieser Systemverbund besteht aus verschiedenen Komponenten, welche zur Steuerung, zur Regelung und zum Betrieb der Aktuatoren und des Lenksystems benötigt werden. In Abbildung 3.10 sind die Komponenten, Sensoren und die Signalpfade in einem Blockschaltbild zusammengefasst. Ein Steuerungsschrank, eine Breakoutbox und die Grundplatte des Prüfstands bilden die drei Hauptbaugruppen des Systemverbunds. Im Steuerungsschrank befindet sich neben der Sicherheitselektrik die Echtzeitumgebung als zentrale Steuerungseinheit. Über diese und eine Benutzerschnittstelle auf dem Hauptrechner werden alle Ein- und Ausgaben für die Aktuatoren und das Lenksystem zentral umgesetzt. Es vereint die Automotivewelt, dargestellt durch ein reales Lenksystem, und die Automatisierungswelt mit Aktuatoren des Lenksystemprüfstands. Das Echtzeitsystem besteht aus der Prozessorkarte mit dem Echtzeitbetriebssystem und den Schnittstellenkarten für unterschiedliche Signalarten (Sensoren, Bussysteme).

Eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) stellt die zentrale Einheit im Systemverbund der Aktuatoren dar. Hier werden die eingehenden Signale für die Aktuatoren sowie die Messsignale umgesetzt und über einen Feldbus (Ethernet POWERLINK) an die Umrichter gesendet. Ein Teil der Regelung (Kraft oder Weg bzw. Moment oder Winkel) ist auf die SPS ausgelagert. Die Stromregelung ist auf den Umrichtern partitioniert. Die Kommunikation zwischen SPS und Echtzeitumgebung erfolgt für jeden Aktuator über einen eigenen CAN-Bus Kanal. Das Lenksystem kommuniziert direkt mit der Echtzeitumgebung über das Lenksystem spezifische Bussystem (CAN oder FlexRay). Eine dynamische Restbussimulation auf der Echtzeitumgebung simuliert die Fahrzeugkommunikation und stimuliert die erforderlichen Signale (Abschnitt 3.3). Die Energieversorgung und Simulation des Bordnetzes wird über ein leistungsfähiges Labornetzgerät realisiert. Ein Vector VN7900 Interface ermöglicht das Applizieren und Messen von Steuergeräten internen Größen von elektromechanischen Lenksystemen mit dem XCP Protokoll über das Bussystem.

Für den Betrieb von hydraulischen Lenksystemen steht eine universelle Hydraulikversorgung mit einer Messeinrichtung für Druck, Temperatur und Volumenstrom zur Verfügung, welche über die Echtzeitumgebung gesteuert bzw. geregelt wird. Zur besseren Übersicht wurde auf eine Darstellung der Hydraulikversorgung in Abbildung 3.10 verzichtet. Verschiedene Lenksysteme und Konzepte können schnell und flexibel über die Breakoutbox mit der Echtzeitumgebung verbunden werden. Alle zur Verfügung stehenden Schnittstellenkanäle der Echtzeitumgebung sind über die Breakoutbox nutzbar. Somit können flexibel externe Sensoren und Prüflinge angeschlossen werden.

### 3.2. Charakteristik des Lenksystemprüfstands

Dieser Mehrwert erlaubt die Untersuchung von Lenkungsphänomenen mit spezieller Sensorik ohne aufwendige Umbaumaßnahmen. Mit der vorhandenen Einheit zur Fehleraufschaltung und Signalmanipulation können sicherheitskritische Testreihen für Softwarefreigaben durchgeführt werden.

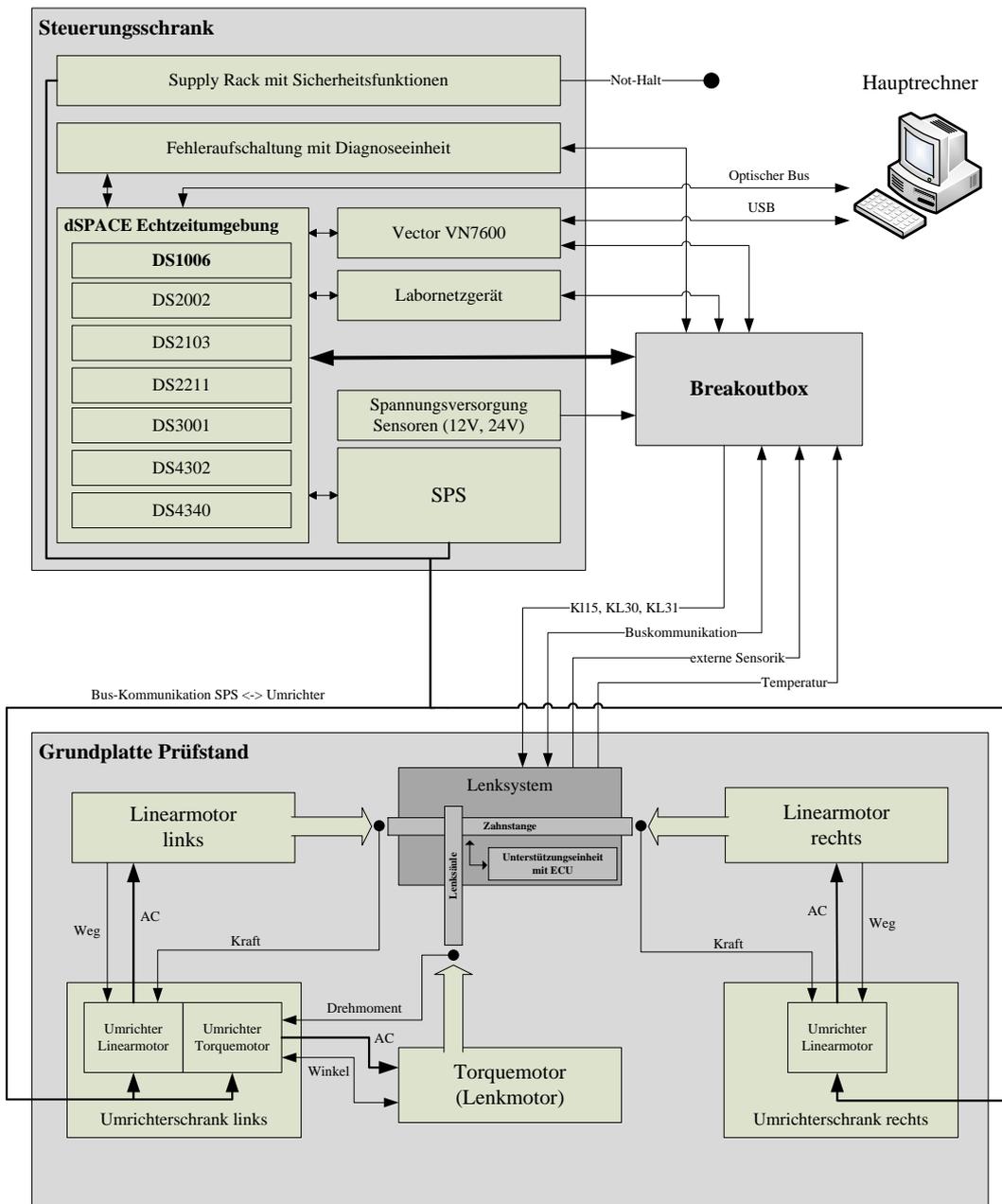


Abbildung 3.10: Systemvernetzung der Komponenten des Lenksystemprüfstands

### 3.2.4 Signalfluss und Zykluszeiten

Der Signalflosskette zwischen den einzelnen Komponenten der Steuerung des Lenksystemprüfstands ist in Abbildung 3.11 in Form eines Flussdiagramms für einen der Linearmotoren detailliert dargestellt (analog für den Torquemotor). Die Abbildung teilt sich vertikal in vier Ebenen für jeweils eine Komponente auf. Die Signalvorgabe bzw. -generierung erfolgt manuell oder automatisiert auf der Echtzeitumgebung (dSPACE). Die Vorgabesignale werden für jeden Aktuator über einen eigenen CAN-Kanal an die SPS gesendet. Die SPS sendet die Signale an den jeweiligen Umrichter weiter. Das Versenden an die Umrichter erfolgt für alle Aktuatoren zeitgleich. Dieses Verhalten ist vor allem für Betriebslastenachfahrversuche erforderlich, um die Zeitsignale an allen Aktuatoren synchron aufzuprägen. Bei Hardware-in-the-Loop Anwendungen ist die Gesamtzykluszeit entscheidend, da die Messsignale (Zahnstangenweg/-geschwindigkeit/-beschleunigung) als Reaktion auf die aufgeprägten Kraftsignale im Fahrzeugmodell weiterverarbeitet werden. In Abschnitt 2.2 wurden in Tabelle 2.5 die Anforderungen an die Zykluszeiten des Lenksystemprüfstands im Hardware-in-the-Loop Betrieb spezifiziert. Für eine Verifizierung der Anforderungen wurde eine Gesamtbetrachtung des Signalflosses zwischen Signalgenerierung - Aufprägung - und Rückmessung der Sensorsignale durchgeführt.

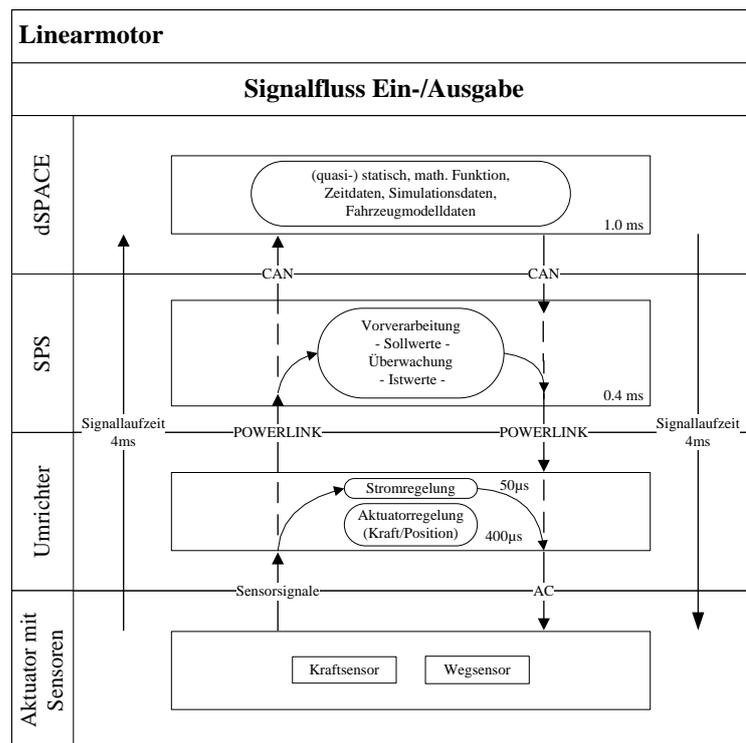


Abbildung 3.11: Signalfluss und Zykluszeiten

Die Gesamtzykluszeit beträgt 8 ms und erfüllt somit die gestellten Anforderungen. Weiterhin sind die Zykluszeiten der einzelnen Komponenten im Flussdiagramm angegeben. Die Taskzeit der Echtzeitumgebung beträgt 1 ms, da neben der Ansteuerung der Aktuatoren und des Lenksystems das Fahrzeugmodell gerechnet werden muss. Die beiden Lenksystemprüfstandskomponenten SPS und Umrichter rechnen mit einer Taskzeit von 0.4 ms. Auf diesen Komponenten ist die Regelung (Kraft/Weg bzw. Moment/Winkel) partitioniert. Für die Generierung von hochfrequenten synthetischen Signalen (Sinusanregung) steht eine erweiterte Funktionalität des Lenksystemprüfstands zur Verfügung. Dabei ist der Signalgenerator des Sinus auf die SPS ausgelagert, wodurch mit einer Taskzeit von 0.4 ms gerechnet werden kann (Unterabschnitt 3.2.7).

#### 3.2.5 Prüfstandsensorik

Die am Lenksystemprüfstand verwendete Messtechnik teilt sich in zwei Bereiche auf. Sensoren, welche zur Regelung der Aktuatoren verwendet werden, und Sensoren, welche spezifische externe Messgrößen am Lenksystem erfassen. Für die Messwerterfassung und Regelung eines Linearmotors in Kraft oder Weg sind ein Kraftsensor und Wegmesssystem am Antrieb fest verbaut. Am Torquemotor sind zur Regelung und Erfassung von Position und Moment ein Winkelsensor und Drehmomentsensor vorhanden. Die technischen Daten der Aktuatorsensorik sind aus Tabelle 3.5 zu entnehmen. Die Messgrenzen der Sensorik sind gleichzeitig die Grenzen des Leistungsbereichs der Aktuatoren. Die Auswahl der Sensorik stellt ein Kompromiss zwischen hohen Leistungsdaten und möglichst genauer Auflösung im Kleinsignalbereich dar.

Messgröße	Sensortyp	Messbereich		Einheit
<b>Kraft</b>	DMS	-25	25	kN
<b>Weg</b>	Inkrementalgeber	-150	150	mm
<b>Winkel</b>	Inkrementalgeber	-999	999	deg
<b>Moment</b>	DMS	-50	50	Nm

**Tabelle 3.5:** Messbereiche der Sensoren der Aktuatoren

Um weitere Messgrößen am Lenksystemprüfstand und am Lenksystem zu erfassen, können zusätzliche Sensoren integriert und frei positioniert werden. Diese decken Kleinsignalbereiche ab, welche nicht hinreichend genau für einzelne Testreihen durch die Sensoren der Aktuatoren aufgelöst werden. Ein Piezokraftsensor liefert ein hochpräzises Kraftsignal mit einer Genauigkeit von 0.1 N. Für die Erfassung von Positionen können hochauflösende Wegsensoren (1  $\mu\text{m}$ ) an den spezifischen Messstellen am Lenksystem (Ritzel, Lenkzwischenwelle, Zahnstange) angebracht werden. Zur Messung von Lenkraddrehschwingungen stehen Beschleunigungssensoren zur Verfügung.

Messgröße	Sensortyp	Messbereich		Einheit
Kraft	Piezo	-35	35	kN
Weg	Inkrementalgeber	0	12600	$\mu\text{m}$
Weg	Inkrementalgeber	0	12600	$\mu\text{m}$
Weg	Lasersensor	-2500	2500	$\mu\text{m}$
Beschleunigung	kapazitiv	-20	20	$\text{m/s}^2$
Winkel	AMR	-780	780	deg
Temperatur	Pt100	-50	250	$^{\circ}\text{C}$

Tabelle 3.6: Messbereiche der externen Sensoren

### 3.2.6 Modellbasierte Lenksystemprüfstandssteuerung

Die gesamte Ansteuerung des Lenksystemprüfstands und des Lenksystems erfolgt zentral über eine Echtzeitumgebung. Hierdurch werden die Vorgaben (Lenksystemprüfstand und Lenksystem) über eine Hard- und Softwareschnittstelle umgesetzt und alle Messsignale von Lenksystemprüfstand und Lenksystem zeit-synchron aufgezeichnet. Der Aufbau des Modells gliedert sich in Subsysteme und Schichten innerhalb der Subsysteme. Entsprechend des Signalflusses im Modell sind dies die Subsysteme Input-Firewall, Fahrzeug- und Umgebungsmodell, Ansteuerung von Lenksystemprüfstand und den externen Komponenten (Netzgerät, universelle Hydraulikeinheit, Lenksystem), Safety und der Output-Firewall.

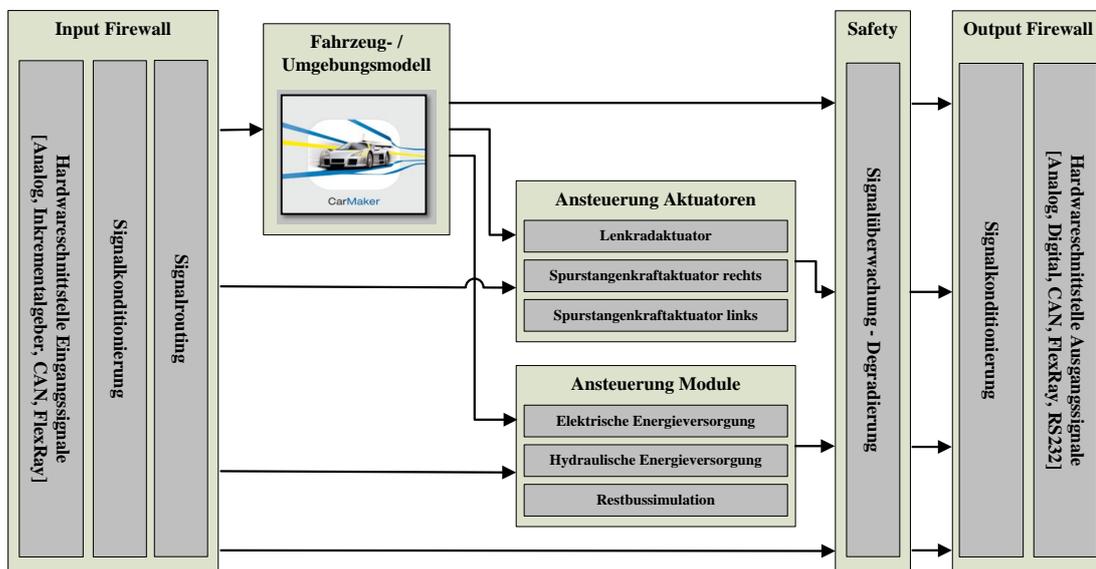


Abbildung 3.12: Modellbasierte Lenksystemprüfstandssteuerung

In den Subsystemen In- und Output-Firewall befindet sich der Zugriff auf die verschiedenen Schnittstellenkarten der Echtzeitumgebung, entsprechend getrennt für eingehende und ausgehende Signale. Da sich die Wertebereiche und Einheiten der elektrischen Signale der Schnittstellenkarten nicht zwingend mit denen der Subsysteme decken, werden diese in der Signalkonditionierungsschicht skaliert und Offset bereinigt. Zusätzlich findet zur besseren Übersicht in der Input-Firewall ein Signalarouting für die Verwender (Subsysteme) innerhalb des Modells statt. Hierdurch wird bei einem komplexen Modell die Übersicht gewährleistet und es werden nur die benötigten Signale an die Subsysteme weitergeleitet. Im Subsystem Ansteuerung Module ist der Parameterzugriff auf die Restbussimulation und Bordnetzsteuerung für elektrische Lenksysteme (EPS) und die universelle Hydraulikeinheit für hydraulische Lenksysteme (HPS) partitioniert. Der Zugriff erfolgt manuell über die Benutzeroberfläche oder automatisiert über Skripte oder das Fahrzeug- und Umgebungsmodell. Der Parameterzugriff für die Ansteuerung der Aktuatoren erfolgt in gleicher Art und Weise.

Über die Benutzeroberfläche kann zwischen manueller und automatisierter Vorgabe durch das Fahrzeugmodell ausgewählt werden. Nach den Subsystemen für die Ansteuerungen ist das Subsystem Safety eingegliedert bevor die Signale an die Output-Firewall weitergeleitet werden. Dieses Subsystem überwacht die Signale an die Aktuatoren und die externen Komponenten. Für jeden Test können individuelle Grenzen für Aktuator- oder Lenksystemparameter eingestellt werden. Beispiele hierfür sind die Lenksystemtemperatur, die Zahnstangenposition oder die verfügbare Lenkunterstützung. Beim Überschreiten dieser Grenzen aktiviert sich ein Testindividuelles Degradierungskonzept oder der Lenksystemprüfstand wird deaktiviert und in einen sicheren Zustand überführt. Diese Sicherheitslogik bewährt sich vor allem bei Betriebslastennachfahrversuchen. Der Aufbau des Modells zur Steuerung des Lenksystemprüfstands und des Lenksystems erfolgt in MATLAB/Simulink. Mit der Toolbox Real-Time-Workshop wird aus dem Modell C-Code generiert, welcher auf der Prozessorkarte der Echtzeitumgebung lauffähig ist.

Für den Zugriff auf kompilierte Simulink Modell auf der Echtzeitumgebung findet die Software ControlDesk auf dem Hauptrechner Verwendung. Mit dieser Software wird die Benutzeroberfläche und -schnittstelle für Vorgabe- und Messsignale erstellt und individuell für verschiedene Anwendungen angepasst. Die Vorgaben für den Lenksystemprüfstand und das Lenksystem sind im Simulink Modell als Parameter hinterlegt und können manuell variiert werden. Für einen effizienten Testbetrieb kann die manuelle Vorgabe über Skripte automatisiert werden. Das Aufzeichnen und Speichern von Messdaten während eines Versuchs erfolgt ebenfalls automatisiert und ist in den testspezifischen Skripten integriert. Die Abtastrate der Messsignale kann je nach Datenmenge bis zu 1 kHz betragen, was der Zykluszeit der Echtzeitumgebung entspricht. Bei großen Datenmengen muss die Abtastrate entsprechend reduziert werden.

### 3.2.7 Betriebsarten und Einstellungen

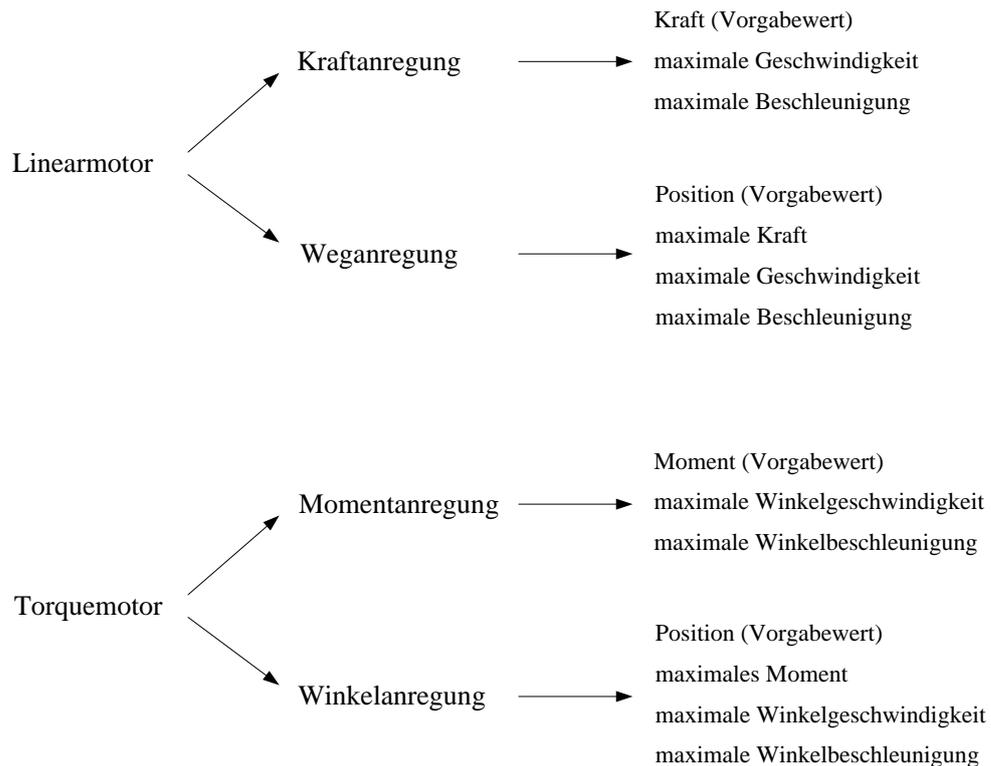
Für die Aktuatoren bestehen je nach Testanforderungen individuelle Einstellmöglichkeiten für eine optimale Umsetzung der Vorgabesignale. Über die Benutzeroberfläche oder eine Testautomatisierung (Abschnitt 3.5) werden die Betriebsmodi (Anregungsarten), die Reglerparametrierung und die Leistungsgrenzen der Aktuatoren eingestellt. Für den Betrieb des Lenksystemprüfstands stehen folgende Anregungsarten zur Verfügung, welche bereits in Abschnitt 3.2.1 für den Linearmotor (Spurstangenkraftaktor) und in 3.2.2 für den Torquemotor (Lenkradaktor) durch dynamische Messungen dargestellt wurden.

- Kraftregelung der Linearmotoren
- Wegregelung der Linearmotoren
- Momentenregelung des Torquemotors
- Winkelregelung des Torquemotors

Im jedem Betriebsmodus können für den jeweiligen Regler verschiedene Parametersätze ausgewählt werden. Die Parametersätze sind für eine statische oder dynamische Regelgüte optimiert. Weiterhin wurden für den Lenksystemprüfstandbetrieb mit einem Fahrzeugmodell spezielle Parametersätze für die einzelnen Aktuatoren abgestimmt. Für die dynamische Anregung mit einem Sinussignal steht für die Aktuatoren jeweils ein weiterer Regelmodus zur Verfügung, welcher einen hochfrequenten Sinusgenerator bereitstellt. Die Parameter Frequenz und Amplitude des Sinusgenerators können variiert werden. Anwendung findet dieser Regelmodus bei der Untersuchung des Übertragungsverhaltens von Lenksystemen. Die folgenden Möglichkeiten bietet der Lenksystemprüfstand:

- Linearmotor
  - Sinusgenerator mit Kraftanregung
  - Sinusgenerator mit Weganregung
- Torquemotor
  - Sinusgenerator mit Winkelanregung
  - Sinusgenerator mit Momentanregung

Für jeden Lenksystemtest werden individuell die Leistungsgrenzen der Aktuatoren eingestellt und teilweise während eines Test automatisiert angepasst. Für die Aktuatoren ergeben sich folgende Einstellmöglichkeiten aus Abbildung 3.13. Es handelt sich hierbei um Grenzen, welche direkt in der Lenksystemprüfstandssteuerung gesetzt werden. Weitere testspezifischen Einstellmöglichkeiten von Betriebsgrenzen sind im Subsystem Safety des Modells zur Ansteuerung des Lenksystemprüfstands möglich (Abb. 3.12).



**Abbildung 3.13:** Einstellbare Parameter der Leistungsgrenzen

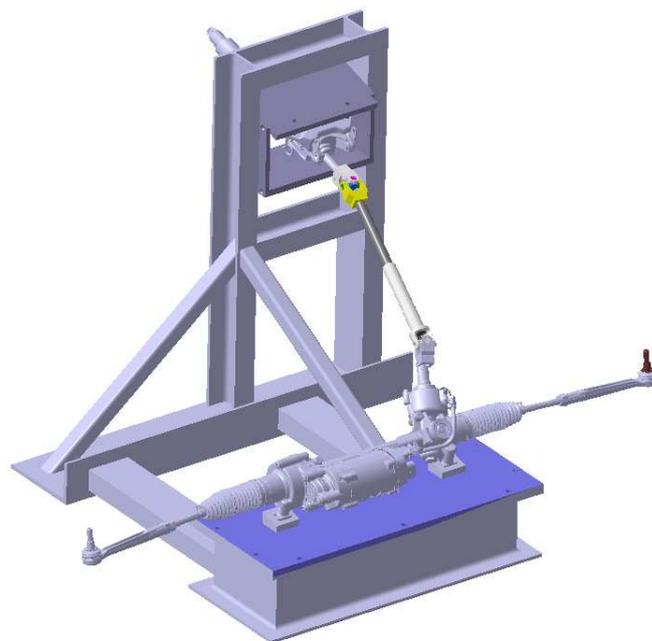
### 3.3 Integration von Lenksystemen

Zur Darstellung einer Testreihe zur Charakterisierung von Lenksystemen an einem Lenksystemprüfstand bedarf es zunächst der Integration der Lenksysteme in die Lenksystemprüfstandumgebung. Der Lenksystemprüfstand soll für den Betrieb von hydraulischen und elektromechanischen Lenksystemen ertüchtigt werden. Um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu generieren, muss das Lenksystem in annähernd gleicher Weise betrieben werden wie im realen Fahrzeug. Entsprechend präzise muss der mechanische Aufbau des Lenksystems am Lenksystemprüfstand nach den Referenzpunkten (A-B-C-D Punkte des Lenksystems) aus dem Fahrzeug erfolgen. Weiterhin muss die Energieversorgung äquivalent zum Fahrzeug aufgebaut werden. Bei hydraulischen Lenksystemen (HPS) wird entweder die originale Hydraulikversorgung aus dem Fahrzeug verwendet oder es wird eine entsprechende Ersatzversorgung aufgebaut und mit dem Originalsystem validiert. Bei elektromechanischen Lenksystemen wird das Bordnetz und zusätzlich die Bus-Kommunikationsschnittstelle simuliert. Die folgenden Unterabschnitte gliedern sich in die drei Hauptthemen mechanischer Aufbau und Integration von hydraulischen und elektromechanischen Lenksystemen.

#### 3.3.1 Mechanischer Aufbau

Der mechanische Integration eines Lenksystems an einem Lenksystemprüfstand stellt besondere Herausforderungen an den Aufbau. Eine unpräzise Positionierung der Lenksystemkomponenten zueinander bewirkt eine Ungleichförmigkeit in der Gesamtlenkübersetzung. Ursache hierfür ist der sich einstellende Winkelfehler der Kreuzgelenke der Lenkzwischenwelle im Vergleich zur konstruktiven Auslegung. Weiterhin ist es kaum möglich das Lenksystem nach einem Umbau reproduzierbar in der gleichen Position zu montieren im Vergleich zu einer vorherigen Testreihe. Bei hochdynamischen und hohen Spurstangenkräften dürfen keine negativen Einflüsse durch eine unzureichende Befestigung am Lenksystemprüfstand entstehen. Aus diesen Anforderungen heraus wurde ein Halterkonzept entwickelt, welches eine hohe Steifigkeit aufweist und eine fixe Positionierung der Lenksystemkomponenten (Abb. 1.1) relativ zueinander ermöglicht. Darüber hinaus wird mit dem Halterkonzept eine geringe Rüstzeit erreicht. In Abschnitt 3.1 wurden die Systemgrenzen des Lenksystems beschrieben. Die Schnittstelle zwischen Lenksystem und Lenksystemprüfstand bilden die Verschraubungspunkte mit dem Vorderachsträger (Subframe). Das Lenksystem ist in dieser Konfiguration fest dem Halter verbunden. Mit der Ausdehnung der Systemgrenze auf den Vorderachsträger können Einflüsse zwischen Lenksystem und Vorderachsträger untersucht werden. Jedoch gestaltet sich die Konstruktion einer Fahrzeug ähnlichen Adaptierung hinsichtlich der Anbindungssteifigkeiten sehr komplex und aufwendig in Fertigung und Aufbau.

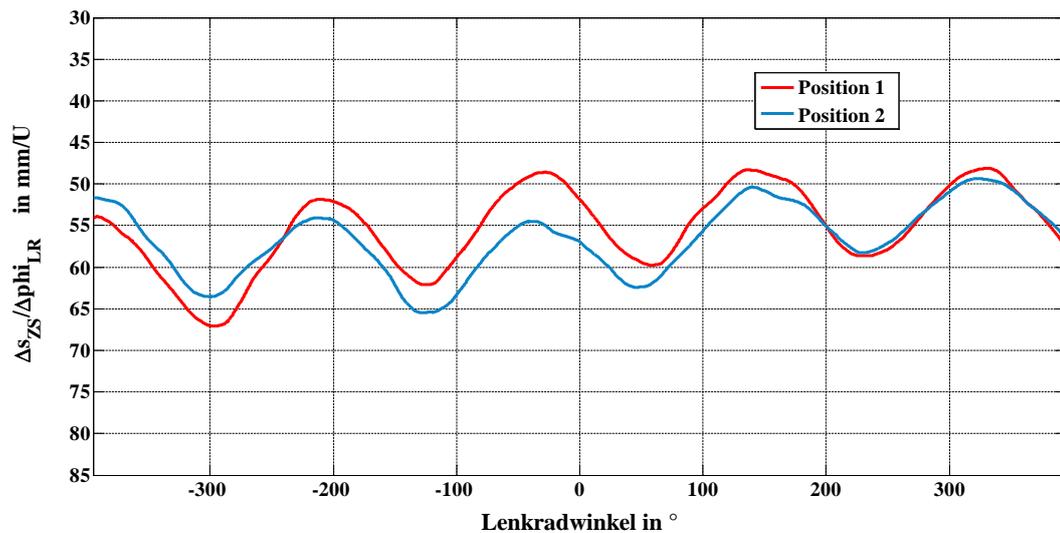
In den Testreihen zur Charakterisierung von Lenksystemen sind diese Einflüsse nicht erwünscht, da gezielt die Lenksystemeigenschaften untersucht werden. Abbildung 3.14 zeigt das Halterkonzept mit der Montage des Lenksystems in Fahrzeugeinbaulage, d.h. die Lenksystemkomponenten haben relativ zueinander die gleiche Positionierung wie im realen Fahrzeugeinbau. Das Lenkgetriebe ist auf einem IPE-Träger Rahmen an den originalen Anbindungspunkten verschraubt. Die Höhe des Rahmens resultiert aus den Anbindungspunkten zu den Läufern der Linearmotoren. Die Anbindung erfolgt axial in Zahnstangenrichtung und ohne einen statischen Spurstangenwinkel. Die Aktuatoren bieten die Möglichkeit in x- und z-Richtung jeweils einen maximalen Beugewinkel von  $20^\circ$  einzustellen. Hierzu sind Läufer seitig Kugelgelenke angebracht. Bei diesem Halterkonzept wird diese Option nicht berücksichtigt, da die Aktuator seitige Schnittstelle zwischen Lenksystem und Lenksystemprüfstand die Zahnstange darstellt. Zum Ausgleich von Toleranzen in axialer Richtung sind die Spurstangengelenke als Verbindungselement an der Schnittstelle zwischen Lenksystem und Lenksystemprüfstand montiert. Die über das Gehäuse des Lenkgetriebes übertragenen Kräfte werden optimal über den Rahmen auf der Prüfstandplatte abgestützt. Ein U-Profil Turm im hinteren Bereich stellt die Aufnahme für die Lenksäule dar und bietet die Möglichkeit für eine finale Feinjustierung um beispielsweise Toleranzen aus der Fertigung des Halters auszugleichen. Die Feinjustierung wird mit einem hochpräzisen Lasermessgerät durchgeführt. Die Konstruktionsdaten des Lenksystems liefern hierzu die benötigten Referenzpunkte.



**Abbildung 3.14:** Halterkonzept für Lenksysteme

Durch die Verstellmöglichkeiten der Lenksäule in x- und z-Richtung können sich konstruktionsbedingte Kardanfehler durch die Kreuzgelenke der Lenkzwischenwelle ergeben. Bei modernen Lenksäulen ist dieses Verhalten weniger ausgeprägt, da sich hier nur ein Einfluss aus der Höhenverstellung ergibt. Die Ermittlung der Lenkübersetzung und die Auswirkungen von verschiedenen Lenksäulenpositionen ist in Unterabschnitt 4.2.5 dokumentiert. Um diesen Einfluss möglichst gering zu halten, wird bei allen Testreihen am Lenksystemprüfstand die Konstruktionslage als Standardposition festgelegt. Dies bedeutet, dass die Lenksäule sowohl in x-Richtung als auch in z-Richtung in der Mittelstellung fixiert ist. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Lenkübersetzung in 4.2.5 haben gezeigt, dass in dieser Position die ideale Lenkübersetzung erreicht wird. Auf der Ordinate in Abbildung 3.15 ist die Änderung des Zahnstangenweges bezogen auf die Änderung des Lenkradwinkels in der Einheit mm/U aufgetragen.

In Abbildung 3.15 ist der negative Einfluss einer ungenauen Positionierung der Lenksäule zum Lenkgetriebe dargestellt. In diesem Beispiel hat das Lenksystem bereits in der Grundausslegung eine Ungleichförmigkeit durch den Kardanfehler der Kreuzgelenke in der Gesamtlenkübersetzung des Lenksystems.



**Abbildung 3.15:** Einfluss der Relativpositionierung auf die Lenkübersetzung

Die Ergebnisse belegen, dass die mechanische Befestigung des Lenksystems am Lenksystemprüfstand sehr präzise erfolgen muss. Die Toleranz bei der Einstellung der Referenzpunkte sollte maximal im Bereich von 1mm liegen, um eine Fahrzeug nahe Positionierung zu erhalten. Dies entspricht in etwa der Toleranzkette, die sich bei der Montage im Fahrzeug ergeben kann.

### Anbindung Lenkrad

Die Lenksäule bzw. das Lenkrad stellt die Schnittstelle zum Lenkradaktuator dar. Bei den Testreihen zur Ermittlung der Systemreibung von Lenksystemen kann der Lenkradaktuator direkt über eine Metallbalgkupplung mit der Lenksäule verbunden werden. Die Metallbalgkupplung ist drehsteif und kann axiale Toleranzen ausgleichen. Für einen Großteil der Testreihen zur Charakterisierung von Lenksystemen müssen die Einflüsse des Lenkrades, welche durch die Trägheitsmomente von Lenkrad und Airbag verursacht werden, zwingend berücksichtigt werden. Die Adaptierung von Lenkrad und Lenkradaktuator hinsichtlich den Eigenschaften einer Anbindung einer Metallbalgkupplung bei Verwendung des originalen Airbags gestaltet sich schwierig, da keine steifen Befestigungsmöglichkeiten am Lenkrad vorhanden sind. Ein Lösungsansatz bietet die Verwendung eines inerten Airbags. Dieser ist nicht funktionsfähig und enthält keine pyrotechnischen Materialien im Gasgenerator. Durch Anbringung einer Bohrung im inerten Airbag in axialer Richtung zur Lenksäule kann eine Verbindungswelle zwischen Lenksäule und Lenkradaktuator eingesetzt werden. Die Verbindungswelle befestigt gleichzeitig das Lenkrad auf der Lenksäule. Da sich das durch die Bohrung zu entnehmende Material direkt in der Drehachse befindet, ergibt sich keine signifikante Änderung des Trägheitsmoments des Airbags. Vielmehr ergibt sich eine leichte Erhöhung des Trägheitsmoments durch die Verbindungswelle. Da die Beschaffung inerten Airbags begrenzt ist, bietet die Berechnung und Konstruktion Airbagersatzmasse einen alternativen Lösungsansatz. Bei bekannten Werten der Trägheitsmomente von Lenkrad und Airbag kann eine exakte Airbagersatzmasse, bestehend aus einer Verbindungswelle und einem Ausgleichsring, berechnet werden. Zudem können die Einflüsse der Trägheitsmomente von Teilkomponenten des Lenkradaktuators (Kupplung, Drehmomentsensor), welche nicht in der Aktuatorregelung kompensiert werden, in der Berechnung berücksichtigt werden. Bei den Testreihen in dieser Arbeit wurde dieser Lösungsansatz angewandt. Nachteilig bei diesem Lösungsansatz ist, dass etwaige Tilgermassen innerhalb des Airbags, welche zur Reduzierung von Lenkradschwingungen eingesetzt werden können, nicht berücksichtigt sind.

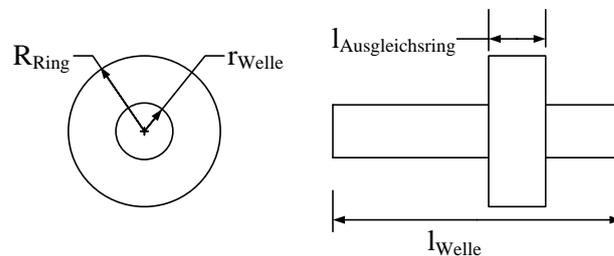


Abbildung 3.16: Prinzipskizze Airbagausgleichsmasse

### 3.3.2 Hydraulisches Lenksystem

Der Aufbau und die Funktionsweise eines hydraulischen Lenksystems wurden in Unterabschnitt 1.2.1 beschrieben. Ein hydraulisches Lenksystem wird in einem Fahrzeug über eine mit dem Verbrennungsmotor verbundene Flügelzellenpumpe mit Energie versorgt. Für den Betrieb des Lenksystems am Lenksystemprüfstand kann das System in gleicher Weise betrieben werden oder mit einer Ersatzversorgung, welche die entsprechender Charakteristik des Fahrzeugsystems nachbildet. Da in dieser Arbeit für die Testreihen zur Charakterisierung von Lenksystemen ein hydraulisches Lenksystem als Vergleichslenksystem zu elektromechanischen Lenksystemen herangezogen wird, wird eine valide Energieversorgung für aussagekräftige Testreihen benötigt. Hierfür wird zunächst die Energieversorgung mit den originalen Fahrzeugkomponenten wie Flügelzellenpumpe Rohrleitungen, Schläuche und der Ausgleichsbehälter am Lenksystemprüfstand aufgebaut. Lediglich der Verbrennungsmotorantrieb muss durch einen Elektromotor ersetzt werden. Mit der geeigneten Auswahl einer entsprechenden Übersetzung zwischen Elektromotor und Flügelzellenpumpe kann diese mit Fahrzeug identischer Drehzahl betrieben werden. Die Pumpendrehzahl wird manuell, über ein Profil oder ein Fahrzeugmodell vorgegeben. Nachteile bringt dieses Konzept hinsichtlich der drehzahlbedingten Akustik von Riementrieb und Pumpe. Weiterhin entstehen erhebliche Aufwände in Konstruktion und Montage durch die Verwendung der Fahrzeugkomponenten. Bei Fahrzeugen mit Mittel- oder Heckmotor führt dies zu langen Hydraulikleitungen, die auf der Grundplatte des Lenksystemprüfstands verlegt werden müssen. Das Konzept wird daher nur zur Validierung eines Ersatzsystem aufgebaut. Das Ersatzsystem besteht aus einer universellen Hydraulikeinheit mit Antriebsmotor, Pumpe, manuellem Mengenregler sowie einem 20 l Öltank und kann flexibel für verschiedene hydraulische Lenksysteme verwendet werden. Dies reduziert den Integrationsaufwand bei Testreihen mit hydraulischen Lenksystemen. Bei beiden Systemen ist eine Messtechnikeinheit integriert, die aus einer Temperaturmessung, Volumenstrommessung und Druckmessung besteht. Die technischen Daten beider Systeme sind in Tabelle 3.7 gegenübergestellt. Im Folgenden werden die hydraulischen Energiesysteme und deren Integration in die Lenksystemprüfstandumgebung dokumentiert. Abschließend findet eine Validierung der beiden Systeme mit realen Fahrzyklen aus Fahrzeugmessungen statt.

	<b>Fahrzeugsystem</b>	<b>Ersatzsystem</b>
<b>Pumpenart</b>	Flügelzellenpumpe	Innenzahnradpumpe
<b>maximaler Volumenstrom</b>	8 l/min	10 l/min
<b>maximaler Systemdruck</b>	100 bar	90 bar
<b>Temperaturbereich</b>	-40 °C bis 120 °C	
<b>Leistung Antriebsmotor</b>	2,2 kW	3,0 kW

**Tabelle 3.7:** Technische Daten der hydraulischen Energiesysteme

### Systemaufbau der hydraulischen Energieversorgung

Um den Aufwand und die Kosten des Systemaufbaus zu begrenzen werden beide Systeme mit einer einheitlichen Ansteuerung, bestehend aus Frequenzumrichter und Signalverarbeitung der Messtechnik, betrieben. Mittels eines Trennadapters kann zwischen beiden Systemen gewechselt werden. Die Ansteuerung über das Echtzeitsystem ist identisch, da der Frequenzumrichter beide Systeme über eine Drehzahlvorgabe steuert. Als Antrieb für die Fahrzeughydraulikpumpe wird ein Elektromotor verwendet. Für einen Fahrzeug äquivalenten Betrieb wird über einen Riementrieb die simulierte Drehzahl des Verbrennungsmotors an das Drehzahlband des Elektromotors entsprechend angepasst. Abbildung 3.17 zeigt den Systemaufbau der hydraulischen Energieversorgung.

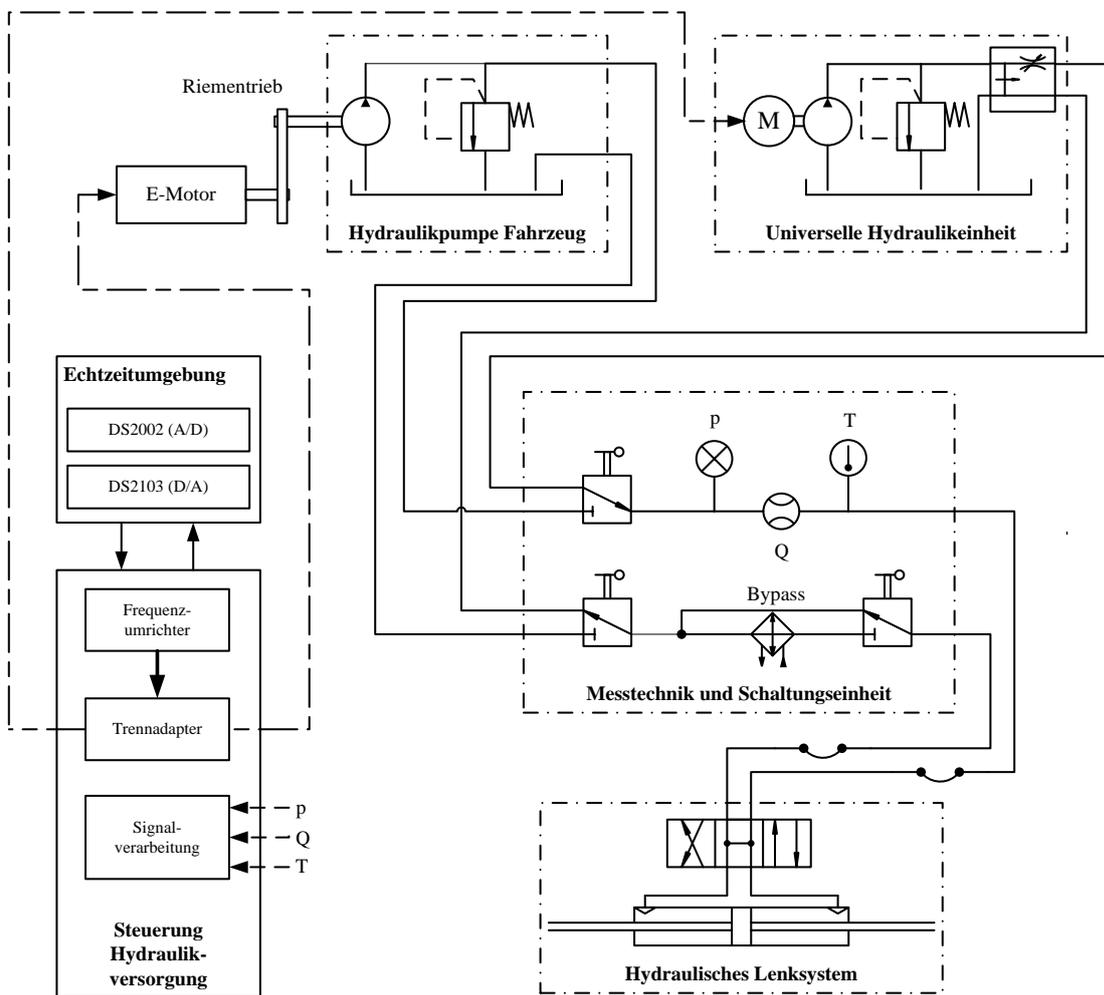


Abbildung 3.17: Systemaufbau der hydraulischen Energieversorgung

Das Übersetzungsverhältnis des Riementriebs zwischen Hydraulikpumpe und Elektromotor beträgt 1:1.995. Die Übersetzung zwischen Verbrennungsmotor und Hydraulikpumpe im Fahrzeug wird in der Drehzahlsteuerung des Frequenzumrichters berücksichtigt. Zusätzlich wurde eine Messtechnik und Schaltungseinheit in den Hydraulikkreislauf integriert. Über manuell bedienbare Ventile werden die Hydraulikleitungen beider Hydrauliksystemen mit dem Lenksystem verbunden. Es kann jeweils nur eine Konfiguration ausgewählt werden. Um die Hydraulikflüssigkeit auf einem konstanten Temperaturniveau zu halten, ist im Rücklauf des Hydrauliksystems ein Wärmetauscher eingebaut. Durch den Verbau im Rücklauf werden keine Strömungsverluste im Vorlauf erzeugt, welche die Validierung mit den Fahrzeugmessungen beeinflussen könnten. Zusätzlich kann der Wärmetauscher über einen Bypass umgangen werden, um den Aufwärmvorgang zu beschleunigen. Die Ansteuerung des gesamten Systems erfolgt zentral über die Echtzeitumgebung. Diese ist mit der Steuerungseinheit der Hydraulikversorgung verbunden. Über die A/D-Karte werden die Messsignale der Sensoreinheit als analoge Signale eingelesen. Die D/A-Karte generiert die Drehzahlvorgabe für den Frequenzumrichter als analoges Signal.

### Messtechnik der hydraulischen Energieversorgung

Die Messtechnikeinheit, welche in den Hydraulikkreislauf integriert ist, besteht aus einer Sensoreinheit. In dieser Einheit befinden sich eine Messturbine für den Volumenstrom, ein Drucksensor und ein Temperatursensor. Die technischen Daten der Sensoren sind in Tabelle 3.8 aufgeführt.

Messgröße	Sensortyp	Messbereich		Einheit
Druck	piezoresistiv	0	200	bar
Volumenstrom	Messturbine	0	10	l/min
Fluidtemperatur	SMD	0	200	°C

**Tabelle 3.8:** Messbereiche der Sensoren der hydraulischen Energieversorgung

Die Messdaten dienen zur Überwachung der hydraulischen Energieversorgung und zur Auswertung der Testreihen. Weiterhin werden die beiden am Lenksystemprüfstand eingesetzten Hydrauliksysteme anhand den Messwerten mit Fahrzeugmessungen validiert. Zur Regelung des Volumenstroms nach einer Parameter- oder Kennfeldvorgabe auf der Echtzeitumgebung werden die Daten der Messturbine verwendet.

### Vermessung des Pumpenkennfeldes

Um die Charakteristik des Fahrzeughydrauliksystems durch die universelle Hydraulikeinheit zu simulieren, wird die Charakteristik der Flügelzellenpumpe des Fahrzeugsystems vermessen. Die Flügelzellenpumpe des Fahrzeugsystems stellt über das gesamte Drehzahlband des Verbrennungsmotors einen Volumenstrom zur Verfügung, der sich abhängig vom Systemdruck des Hydrauliksystems in einem schmalen Band bewegt. Der Volumenstrom des universellen Hydrauliksystems wird abhängig von den Eingangsgrößen Systemdruck und Drehzahl des Verbrennungsmotors kennfeldabhängig eingeregelt. Zur Kennfeldvermessung wird der Volumenstrom bei einer Druck- und Drehzahlvariation gemessen. Die Drehzahl wird dabei in folgenden Schrittweiten variiert:  $n$  (Verbrennungsmotor) = 0, 500, 750, 875, 1000, 2000, 3500, 4500, 6000, 8000 U/min. Bei jedem Drehzahlschnitt wird der Systemdruck ( $p$  = 3, 5, 10, 20, 30, und 50, 100 bar) durch ein aufgebrachtes Lenkmoment vom Lenksystemprüfstand konstant eingeregelt. Die Temperatur des Hydrauliköles wird auf einem Temperaturniveau von 50 °C (+/-4 °C) gehalten. Mit den gewonnenen Messpunkten kann der charakteristische Verlauf des Volumenstromes des Fahrzeugsystems im Lenksystemprüfstandbetrieb in Form eines von Motordrehzahl und Druck abhängigen Kennfeldes abgebildet werden. Dieses Kennfeld wird in die Echtzeitumgebung eingebunden und dient zur Vorgabe für die Volumenstromregelung des Universalsystems.

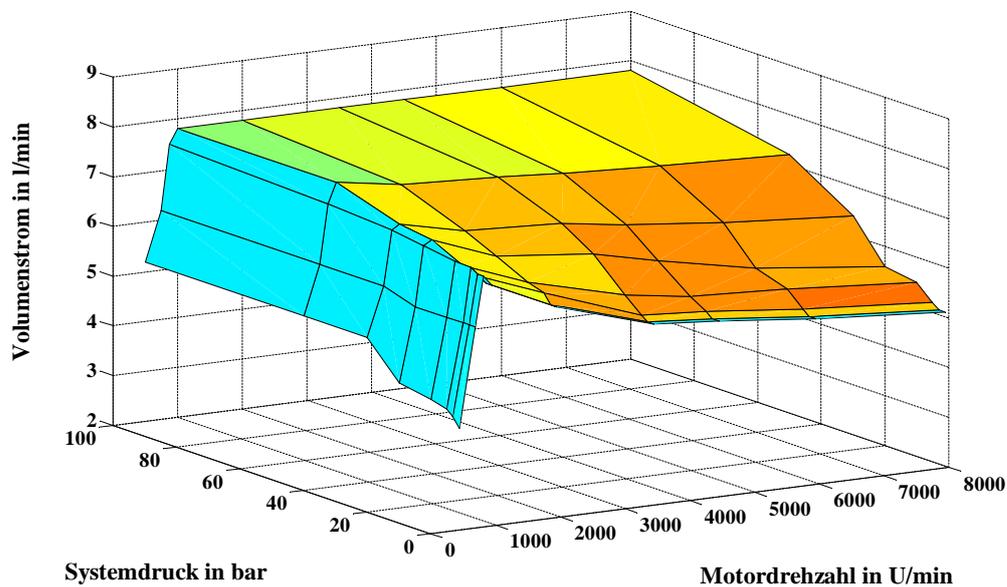


Abbildung 3.18: Kennfeld der Hydraulikpumpe am Lenksystemprüfstand

### Ansteuerung über die Echtzeitumgebung

Die Ansteuerung beider Hydrauliksysteme erfolgt modellbasiert über die Echtzeitumgebung. Als Eingangsgröße für das Fahrzeughydrauliksystem wird die Motordrehzahl des Verbrennungsmotors als Parameter vorgegeben und kann mit einem statischen oder dynamischen Wert parametrisiert werden. Der dynamische Wert kann aus einer realen Fahrzeugmessung oder aus dem Fahrzeugmodell entnommen werden. Anschließend erfolgt die Skalierung mit der Übersetzung Verbrennungsmotor-Hydraulikpumpe und Elektromotor-Hydraulikpumpe (Abb. 3.19). Abschließend wird das Signal über eine Drehzahl-Spannung Kennlinie für die Ausgabe über die Digital/Analog Karte der Echtzeitumgebung umgerechnet. Die Ansteuerung des universelle Hydrauliksystem erfolgt über einen Regler für den Volumenstrom (Abb. 3.20), welcher als Ausgangsgröße eine Drehzahl für den Antrieb der Zahnradpumpe berechnet. Die Signalweiterverarbeitung erfolgt analog zum Fahrzeugsystem.

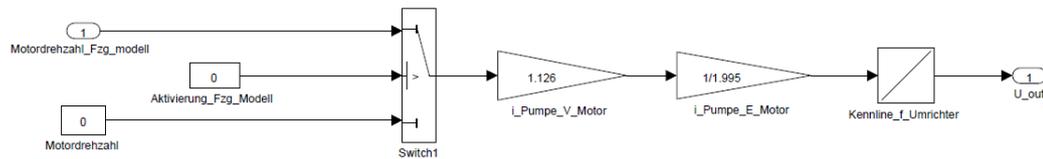


Abbildung 3.19: Ansteuerung der Hydrauliksysteme

### Regelungskonzept des universellen Hydrauliksystems

Das universelle Hydrauliksystem wird auf einen konstanten oder einen kennfeldgesteuerten Volumenstrom geregelt. Die Eingangsgrößen für das Kennfeld sind der Systemdruck und die Drehzahl des Verbrennungsmotors. Zur Regelung des Volumenstroms wird ein PID-Regler auf der Echtzeitumgebung implementiert. Führungsgröße ist der Vorgabewert des Volumenstrom, entweder als fester Parameter oder als Wert aus dem ermittelten Kennfeld der Hydraulikpumpe (Abb. 3.18). Als Messgröße wird der aktuelle Volumenstrom verwendet. Der Regler generiert eine Solldrehzahl, die als analog Signal an den Frequenzumrichter gesendet wird. Die Parameter des Reglers (P-, D-, I-Anteil) wurden iterativ in Testreihen mit verschiedenen Fahrmanövern aus dem realen Fahrversuch abgestimmt. Bestätigt wurden diese Ergebnisse nochmals in der Validierung der hydraulischen Systeme.

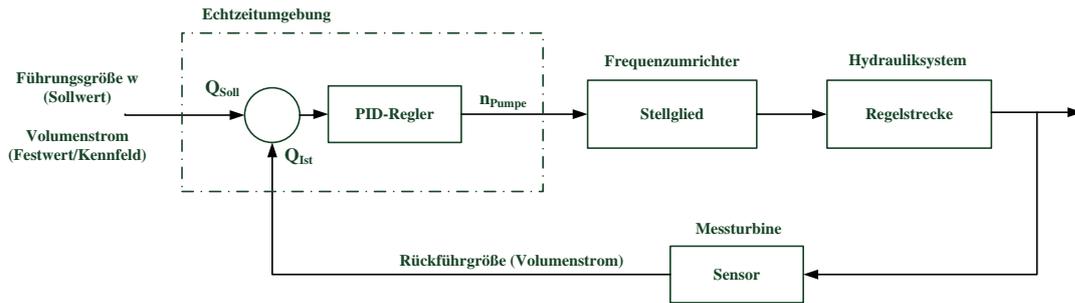


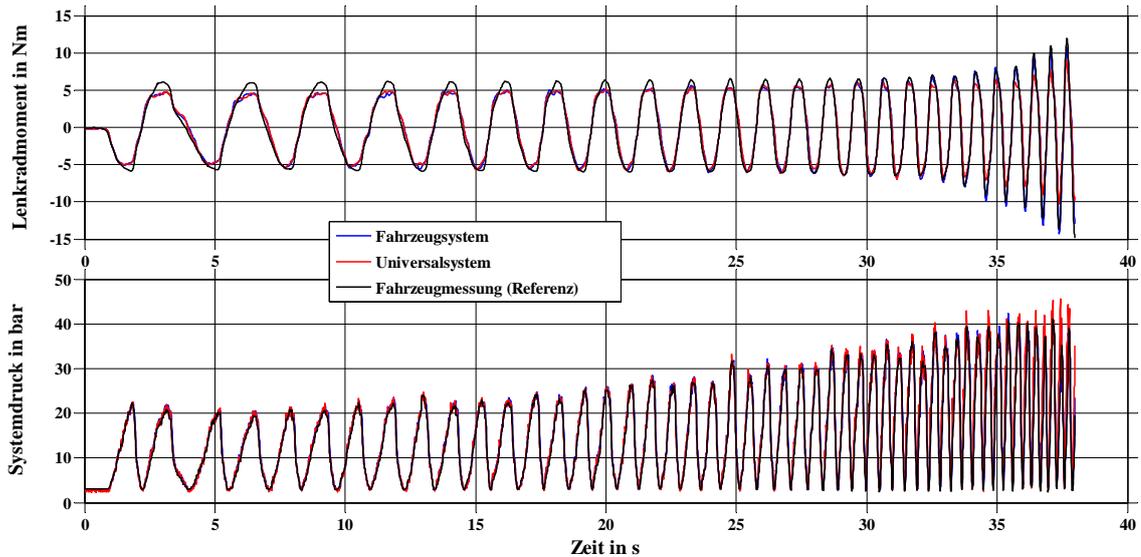
Abbildung 3.20: Regelungskonzept des universellen Hydrauliksystems

#### Validierung der Hydrauliksysteme durch Fahrzeugmessungen

Zur Validierung der beiden hydraulischen Energieversorgungen werden Vergleichsmessungen von Fahrmanövern aus dem realen Fahrversuch verwendet. Bei den Fahrmanövern wurden die Spurstangenkräfte, Lenkradwinkel, Lenkradmoment, Motordrehzahl sowie der Systemdruck vor dem Lenksystem und die Fluidtemperatur aufgezeichnet. Der Messaufbau entspricht somit dem Systemaufbau am Lenksystemprüfstand. Zur Validierung der beiden Systeme werden die Spurstangenkräfte und der Lenkwinkel synchron auf das Lenksystem aufgeprägt. Als resultierende Größe stellt sich das Lenkradmoment ein. Als zusätzliche Vergleichsgröße kann der Systemdruck herangezogen werden. Sind die Lenkradmomente annähernd gleich, lässt sich auf ein valides System schließen, dass zur Simulation der hydraulischen Energieversorgung verwendet werden kann. Gleichung 3.1 beschreibt dieses Kräftegleichgewicht an der Zahnstange. Bei gleichem Lenkradmoment  $T_{LR}$  muss zwingend die hydraulische Unterstützungskraft  $F_{hydr}$  gleich sein.

$$F_{ZS} = F_{mech} + F_{hydr} = \frac{T_{LR}}{r_R} + \Delta p_C \cdot A_C \quad (3.1)$$

Zur Validierung wurden mehrere Fahrmanöver im Rahmen von Betriebslastennachfahrversuchen abgebildet. Exemplarisch ist in dieser Arbeit aus der Testreihe repräsentativ ein SinusSweep dargestellt (Abb. 3.21). Die Abbildung zeigt das resultierende Lenkradmoment und den Systemdruck in der Vorlaufleitung des Lenksystems. Lenkradmoment und Systemdruck zeigen eine gute Übereinstimmung bei niedriger und mittlerer Dynamik des SinusSweep.



**Abbildung 3.21:** Validierung der Hydrauliksysteme durch eine Fahrzeugmessung (SinusSweep)

Damit können mit beiden Hydrauliksystemen die Testreihen zur Charakterisierung von hydraulischen Lenksystemen durchgeführt werden. Die Ergebnisse bestätigten sich in den restlichen Validierungsmessungen. Erst im Bereich von hohen Lenkradwinkelgeschwindigkeiten und hohen Lenkradmomenten werden die Leistungsgrenzen der beiden Hydrauliksysteme erreicht. Beim Fahrzeugsystem ist die Leistungsgrenze des Elektromotors des Pumpenantriebs erreicht, während beim Universalsystem die Leistungsgrenze der Zahnradpumpe erreicht wird.

### 3.3.3 Elektromechanisches Lenksystem

Moderne elektromechanische Lenksysteme werden über das elektrische Bordnetz mit Energie versorgt. Aktuelle Fahrzeuginformationen werden über die Kommunikationsschnittstelle mit den anderen Fahrzeugsteuergeräten ausgetauscht. Diese beiden Schnittstellen müssen entsprechend dem realen Fahrzeug bedient werden. An einem Lenksystemprüfstand erfolgt die elektrische Energieversorgung eines elektromechanischen Lenksystems mit einem Netzgerät, welches nach den Leistungsanforderungen des Lenksystems ausgewählt werden muss. Eine weitere Möglichkeit bietet der Aufbau mit Generator, Batterie und Ersatzlasten für Untersuchungen der Interaktionen zwischen Bordnetz und Lenksystem. Für die Untersuchungen der Charakteristik von Lenksystemen ist eine Versorgung mit einem leistungsfähigen Netzgerät ausreichend. Darüber hinaus bieten moderne Netzgeräte für den Laborbetrieb die Möglichkeit Bordnetzsimulationen durchzuführen und Starterkennlinien zu simulieren.

### Systemaufbau der elektrischen Energieversorgung

Der Systemaufbau unterteilt sich in die elektrische Energieversorgung selbst und in die Kommunikationsschnittstelle zu dem fahrzeugspezifischen Bussystem. Abbildung 3.22 zeigt, dass der Systemaufbau, bestehend aus den Hardwarekomponenten Lenksystem, Fahrzeugkommunikation und Energieversorgung, im Vergleich zur hydraulischen Energieversorgung deutlich einfacher gestaltet ist. Das Netzgerät stellt die benötigte Energie zur Verfügung und über die in der Echtzeitumgebung integrierten Simulationskarten für CAN oder Flex-Ray Bussysteme kann die Kommunikationsschnittstelle bedient werden. Zur einfachen Adaptierung verschiedener Lenksysteme werden die elektrischen Verbindungen über die Breakoutbox des Lenksystemprüfstandes geführt. Über ein vereinheitlichtes Verbindersystem werden die Lenksysteme mit dem Lenksystemprüfstand verbunden. Im Gegensatz zum Hardwareaufbau steckt eine hohe Systemkomplexität im Softwareaufbau der Ansteuerung des Lenksystems. Es zeigen sich Parallelen zum Fahrzeugeinbau. In der Simulationsumgebung müssen die erforderlichen Botschaften und Signale nach exakter Vorgabe nachgebildet werden. Dazu gehört auch die Absicherungen und das zyklische Versenden der Daten mit den angeforderten Inhalten. Dies geschieht gesamtheitlich innerhalb einer dynamischen Restbussimulation.

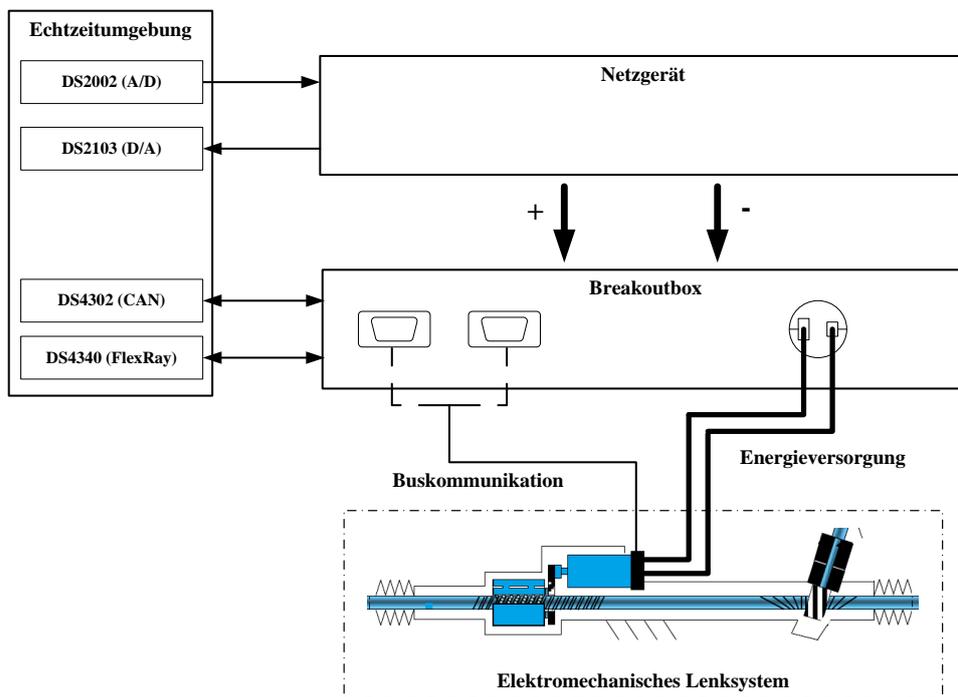


Abbildung 3.22: Systemaufbau der elektrischen Energieversorgung

### Messtechnik der elektrischen Energieversorgung

Die Messung von Spannung und Strom erfolgt intern im Netzgerät, wobei sich die Messstelle der Spannung in der Breakoutbox des Lenksystemprüfstands befindet. Damit werden die Spannungsverluste in der Versorgungsleitung mitgemessen und die Spannung kann entsprechend korrigiert werden. Zusätzlich zur Netzgerät internen Strommessung wurde in das Bordnetz am Lenksystemprüfstand eine weitere Strommessung integriert (Breakoutbox). Diese hochdynamische Messstelle erfasst kurzzeitige Stromspitzen sowie auch negative Ströme. Dadurch können Rückspeisungen durch einen generatorischen Betrieb des Elektromotors des Lenksystems erfasst werden.

Messgröße	Sensortyp	Messbereich		Einheit
Strom	Strommesszange	-200	200	A
Strom	Labornetzgerät (intern)	0	200	A
Spannung	Labornetzgerät (intern)	0	80	V

**Tabelle 3.9:** Messbereiche der Sensoren der elektrischen Energieversorgung

### Bordnetzsimulation

Das am Lenksystemprüfstand eingesetzte Netzgerät der Firma Elektro-Automatik hat eine Systemleistung von 8 kW. Der Spannungsbereich kann von 0-80 V variiert und ein maximaler Spitzenstrom von 200 A ausgegeben werden. Damit überdeckt das Netzgerät die Leistungsanforderungen von modernen elektromechanischen Lenksystemen. Die Bordnetzspannung im Fahrzeug liegt zwischen 12,5 V und 14 V. Die maximale Stromaufnahme von Lenksystemen in der Leistungsklasse bis 15 kN Zahnstangenkraft kann in der Spitze kurzzeitig bis zu 100 A im Parkierbereich betragen. Das Netzgerät wird über die analogen Spannungsausgänge der Echtzeitumgebung ferngesteuert. Die Werte für die Bordnetzspannung, den maximalen Strom und die maximale Leistung können über die Fernsteuerung vorgeben und variiert werden. Dies kann manuell über die Benutzeroberfläche oder dynamisch innerhalb einer Testautomatisierung erfolgen. Diese Einstellmöglichkeiten sind vor allem bei Testreihen für die Interaktion zwischen Bordnetz und Lenksystem von großem Vorteil. Es können im zulässigen Spannungsbereich des Lenksystems verschiedene Spannungsniveaus stabil eingestellt werden und das Verhalten des Lenksystems unter diesen Randbedingungen getestet werden. Dazu zählen Testreihen zur Überprüfung des Degradierungskonzepts, welche im Fahrzeug nur mit erheblichen Aufwänden darstellbar sind. Die Reproduzierbarkeit der Testbedingungen stellt einen weiteren Vorteil des Lenksystemprüfstands im Vergleich zum Fahrzeug dar. Weiterhin sind Störgrößeneinflüsse (z.B. Spannungseinbrüche während Lenkmanövern) darstellbar ohne den Fahrer oder die Umwelt zu gefährden.

### Restbussimulation

In einer Restbussimulation werden nicht real vorhandene Steuergeräte in einem Netzwerkverbund simuliert. Dabei können alle Steuergeräte simuliert werden oder nur diese, welche relevante Nachrichten für die real vorhandene Komponente versenden. Im Automotivebereich findet die Restbussimulation vor allem im unabhängigen Test von mechatronischen Fahrzeugkomponenten Anwendung. Durch die steigende Komplexität sind mechatronische Komponenten ohne Informationen über den aktuellen Fahrzustand, welche über das Netzwerk, bestehend aus mehreren Bussystemen, versendet werden, nicht mehr betriebsfähig. Durch den steigenden Einsatz von Fahrerassistenzsystemen dient das Lenksystem als Aktuator zur Querführung des Fahrzeuges. Der Bedarf an Informationsaustausch zwischen Lenksystem und den Steuergeräten der Fahrerassistenzfunktionen steigt hierdurch exponentiell an. Eine Hinterachslenkung berechnet den einzustellenden Lenkwinkel nur aus Fahrdynamikdaten, da keine direkte Kopplung (mechanisch oder hydraulisch) zwischen Fahrer und Hinterachslenkung besteht. In Abbildung 3.23 ist eine Architektur auf Hardwareebene (Steuergeräte) für den Betrieb eines Lenksystems an einem Lenksystemprüfstand dargestellt. Je nach Fahrzeugklasse und Ausstattungsvariante kann die Anzahl der zu simulierenden Steuergeräte variieren.

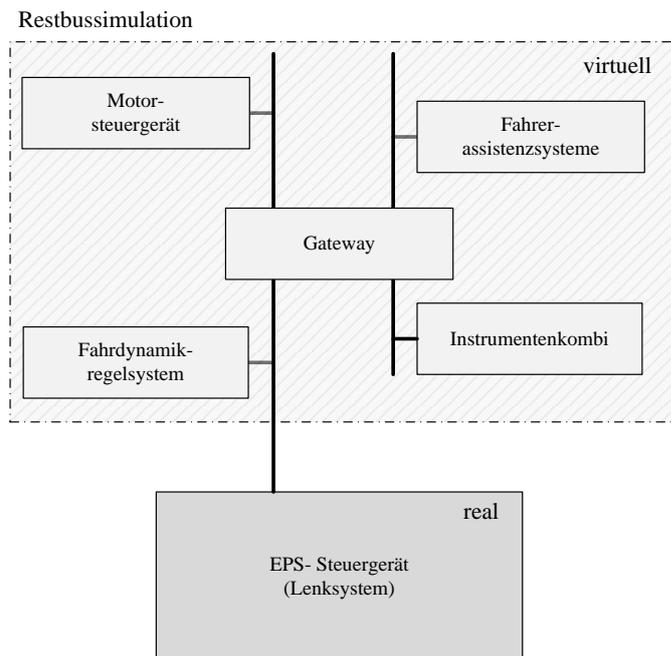


Abbildung 3.23: Steuergerätearchitektur

Für einen Betrieb von elektromechanischen Lenksystemen an einem Lenksystemprüfstand ist eine dynamische Restbussimulation erforderlich. Die Nachrichten können mit statischen Werten oder mittels eines Fahrzeugmodells oder Messdaten mit dynamischen Werten befüllt werden. In letzterem Fall spricht man von einer dynamischen Restbussimulation. In kleinen Leistungsklassen von Lenksystemen oder bei Fahrzeugen ohne Fahrerassistenz- und Fahrdynamikfunktionen mit Querführung sind die in Tabelle 3.10 aufgelisteten Signale zu simulieren. Zusätzlich zu den Signalen können Hersteller spezifisch weitere Informationen (Fahrdynamikdaten) an das Lenksystem versendet werden. Zur Absicherung der Nachrichten versendet jede Nachricht einen Botschaftszähler und eine Checksumme, welche vom Empfänger überprüft wird. Ohne die Berechnung dieser Werte würde die Nachricht als ungültig empfangen werden und die Funktionen des Lenksystems wären inaktiv. Alle für das Lenksystem relevanten Botschaften werden im Echtzeitsystem des Lenksystemprüfstands nachgebildet. Der Busstandard für die in dieser Arbeit verwendeten elektromechanischen Lenksysteme ist CAN. Zum Betrieb der Lenksysteme wurde eine Restbussimulation mit insgesamt 30 Botschaften aufgebaut.

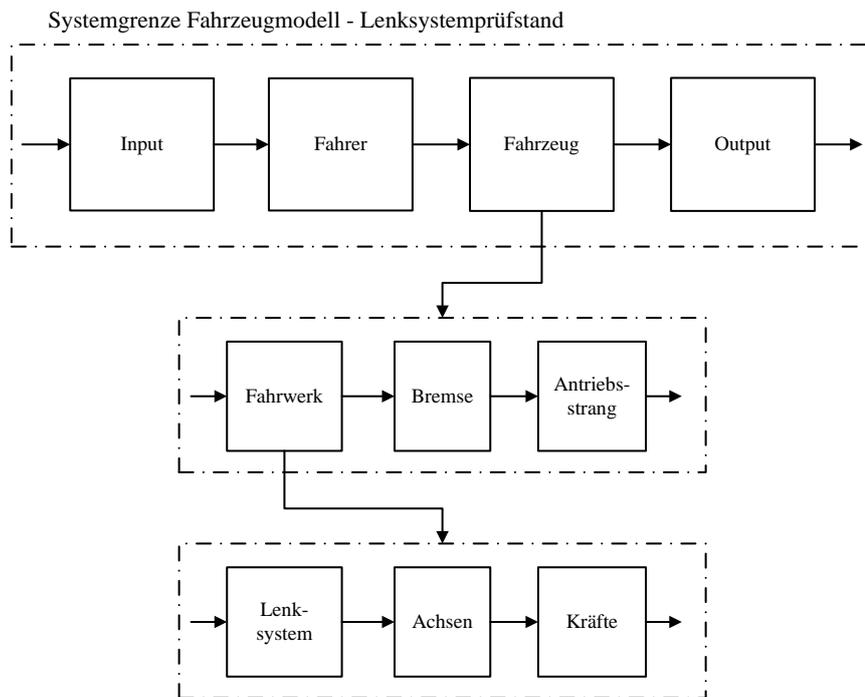
Steuergerät	Botschaft	Einheit
Motorsteuergerät	Motordrehzahl	U/min
Fahrdynamikregelsystem	Fahrzeuggeschwindigkeit	km/h
Instrumentenkombi	Signal Zündung an	-

**Tabelle 3.10:** Beispiel-Nachrichtenkatalog für ein elektromechanisches Lenksystem

### 3.4 Hardware-in-the-Loop Betrieb

Mit der Integration eines Fahrzeug- und Umgebungsmodells in die Echtzeitumgebung wird die Hardware-in-the-Loop Fähigkeit des Lenksystemprüfstandes hergestellt. Damit können Tests auf Gesamtfahrzeugebene ohne den Einsatz eines realen Fahrzeugs dargestellt werden. Um einen hohen Automatisierungsgrad und Flexibilität bei der Auswahl der Fahrzeugmodelle zu erhalten wird am Lenksystemprüfstand eine parametrierbarer Softwareumgebung eingesetzt. Hierdurch können eine große Anzahl an Fahrmanöver definiert und parametrisiert werden und die entsprechenden Fahrzeugmodelle ausgewählt und angepasst werden. Zudem bietet diese Lösung die Möglichkeit mit zukünftigen Entwicklungspartner Fahrzeugmodellparametern für eine in der Industrie eingesetzte Anwendung auszutauschen. Für den Einsatz am Lenksystemprüfstand wurde die Software CarMaker (IPG Automotive) ausgewählt. Die Software wird als Bibliotheksmodul in die vorhandene modellbasierte Lenksystemprüfstandsteuerung (Unterabschnitt 3.2.6) integriert und mit den benötigten Schnittstellen verbunden. Das Fahrzeugmodell tauscht in bidirektionaler Richtung Informationen mit dem Lenksystemprüfstand und dem Lenksystem aus.

Das Fahrzeug- und Umgebungsmodell CarMaker teilt sich in mehrere Unterebenen auf. Die oberste Ebene besteht aus den Blöcken Input, Fahrermodell, Fahrzeugmodell und Output. In den Blöcken Input und Output findet die Signalverarbeitung der Ein- und Ausgangssignale statt. Das Fahrermodell generiert den Lenkradwinkel bzw. das Lenkradmoment, entweder aus der Manörovorgabe der Benutzerschnittstelle (Open-Loop) oder aus der Berechnung der zu folgenden Trajektorie im Closed-Loop Modus. Im Block Fahrzeugmodell findet die eigentliche Berechnung der Fahrzeugmodellgrößen statt. Die Berechnung der benötigten Spurstangenkräfte erfolgt in der 2. Unterebene des Fahrzeugmodells. Auf dieser Ebene ist auch das Lenkungsmodell implementiert, das bei der Anwendung an einem Lenksystemprüfstand deaktiviert ist. Die Schnittstellen des Modellblocks werden durch die Messdaten des Lenksystemprüfstand (Tab. 3.11) selbst bedient. Die Ausgangsgrößen der zweiten Unterebene sind die auftretenden Kräfte an den Räder und Achsen. Hier erfolgt der Abgriff der Spurstangenkräfte. Abbildung 3.24 zeigt den schematischen Aufbau des gesamten Fahrzeugmodells und die Funktionsblöcke der Unterebenen.



**Abbildung 3.24:** Aufbau des Fahrzeugmodells (IPG CarMaker)

### 3.4.1 Integration des Fahrzeug- und Umgebungsmodell

Die Integration in die modellbasierte Lenksystemprüfstandsteuerung ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Die Schnittstellen des Fahrzeugmodells zum Lenksystemprüfstand innerhalb der modellbasierten Prüfstandsteuerung sind in Tabelle 3.11 aufgelistet.

Eingänge Fahrzeugmodell	Ausgänge Fahrzeugmodell
Zahnstangenposition	Lenkradmoment oder Lenkradwinkel
Zahnstangengeschwindigkeit	Spurstangenkraft links
Zahnstangenbeschleunigung	Spurstangenkraft rechts

**Tabelle 3.11:** Schnittstellen Fahrzeugmodell - Lenksystemprüfstand

Die Prüfstandsensorik liefert die Eingänge für das Fahrzeugmodell zur Berechnung der Spurstangenkräfte innerhalb des Fahrzeugmodells. Über die Busschnittstelle der Echtzeitumgebung werden zwischen Fahrzeugmodell und Lenksystem die fahrzeugspezifischen Daten, welche das Lenksystem zum Betrieb benötigt (vgl. Tab. 3.10), ausgetauscht. Zur einheitlichen Datenerfassung über die Benutzeroberfläche des Fahrzeugmodells können nach Bedarf noch weitere Prüfstand- und Lenksystemdaten an das Fahrzeugmodell übergeben werden. Alle ausgewählten Messdaten werden mit einer einheitlichen Zeitbasis aufgezeichnet.

Zur Vermeidung von Lenkradwinkel- und Kraftsprüngen beim Starten und Stoppen der Testreihen synchronisiert ein spezielles Softwaremodul Lenksystemprüfstand und Fahrzeugmodell. Das Softwaremodul stellt automatisiert bei verschiedenen Initialisierungswerten oder einem Versuchsabbruch das Lenksystem in die Nullstellung zurück. Dies vermeidet unerwünschte Verspannung im Lenksystem und Kraft-/ Lenkwinkelsprünge beim Starten der Testreihen und schützt das Bauteil vor einer Überlast.

### 3.4.2 Validierung des Fahrzeug- und Umgebungsmodell

Die Schnittstellengrößen zwischen Lenksystem und Lenksystemprüfstand werden im Gegensatz zu einem Betriebslastennachfahrversuche im Fahrzeugmodell berechnet. Als Führungsgröße am Lenkrad kann entweder ein Lenkradwinkel oder ein Lenkradmoment vorgegeben werden. Die Vorgabe erfolgt über ein Testskript oder als Testvariation über eine Testautomatisierung des Fahrzeug- und Umgebungsmodells. Je nach Testanforderung wird die Führungsgröße entsprechend über den Torquemotor aufgeprägt. Der Nachweis der entsprechenden Dynamik wurde in Unterabschnitt 3.2 erbracht. Für den realitätsnahen Betrieb ist somit die Generierung und Aufprägung der Spurstangenkräfte von entscheidender Bedeutung. Daher werden für die Validierung des Fahrzeugmodells Messungen am Lenksystemprüfstand mit Daten aus dem realen Fahrversuch verglichen.

Hierzu wurden im Fahrzeug repräsentative standardisierte Fahrmanöver aus dem Lenksystemversuch durchgeführt (Abschnitt 4.4). Zur Anpassung der Ergebnisse wurden Modellparameter der Achsen und der Reifen [13] variiert, bis eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse erzielt wurde. Mit dem gleichen Verfahren wurden die weiteren Testreihen in Abschnitt 4.4 validiert.

#### **3.4.3 Anwendungsbereich der Hardware-in-the-Loop Simulation**

Der Test von Lenksystemen auf Gesamtfahrzeugebene im Rahmen einer Hardware-in-the-Loop Simulation bietet Vorteile hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der darstellbaren Fahrmanöver, der Darstellung von bestimmten Betriebszuständen oder auch bei den Durchführungskosten der Testreihen selbst. Der Hardware-in-the-Loop Simulation an einem Lenksystemprüfstand sind aber Grenzen gesetzt. Trotz einer umfangreichen Validierung der verwendeten Modelle können nur Teilbereiche der Realität hinreichend genau abgebildet werden. Zudem kann der Detaillierungsgrad der verwendeten Modelle nicht beliebig erhöht werden, auch wenn die Rechenleistung von Echtzeitsystemen enorme Steigerungen erfahren hat und zukünftig erfahren wird. Besonders bei komplexen Modellen der Radaufhängung durch den Einsatz von Mehrkörpermodellen kann schnell die Grenze der maximalen Rechenleistung erreicht sein, da die Modellanteile der Ansteuerung von Prüfstand und Lenksystem (Restbussimulation) auf derselben Plattform gerechnet werden (Übersicht Abb. 3.2.6). Für Testreihen im Fahrdynamikbereich kann auf eine aufwendige Modellierung des Antriebsstrangs verzichtet werden. Zur Darstellung sind einfache Modellansätze ausreichend. Im Zuge der Hybridisierung der Antriebsstränge und dem Einsatz von Rekuperationssystemen verschwinden die Systemgrenzen zunehmend und die Einflüsse aus den beiden Teilbereichen untereinander steigen. Für die Testreihen am Lenksystemprüfstand ist der Detaillierungsgrad der verwendeten Modelle ausreichend. Die Validierung ist auf Standardlenksystemtests (Abschnitt 4.4) ausgelegt, welche mit Fahrmanöver aus dem Fahrversuch abgeglichen wurden. Der Detaillierungsgrad wurde auf diesen Fahrbereich abgestimmt.

Herausforderungen hinsichtlich der Modellgüte ergeben sich in der Simulation von Parkiertests, welche durch die verfügbaren Reifenmodelle eingeschränkt ist [32]. Die Simulation von Bohrmomenten der jeweiligen Reifentypen in den Radaufstandspunkten verlangt eine Vielzahl von Parametern und einen komplexen Modellaufbau, der nur für einen bestimmten Fahrzustand gültig ist. In Summe ergäbe sich eine komplexe und zeitintensive Validierung. Selbst eine Validierung mit einer hohen Güte der simulierten Schnittstellengrößen ist eine 100 %ige Darstellung der berechneten Größen kaum möglich bzw. sehr kostenintensiv. Daher wird stets eine Abweichung in einem zuvor definierten tolerierbaren Bereich existieren. Der Lenksystemprüfstand deckt mehrere Prüfbereiche ab, wodurch die tolerierbare Abweichung in manchen Prüfbereichen größer ausfallen kann. Weiterhin erge-

ben sich Grenzen durch die Interaktion zwischen Lenksystemprüfstand und Lenksystem. Die Datengeschwindigkeit der Signalübertragung und die Umsetzung der übertragenen Daten an den Aktuatoren führt zu Zeitverzügen, die gegebenenfalls im realen Systemaufbau in der auftretenden Größe nicht vorhanden sind.

In dieser Arbeit wurden daher die maximalen Grenzen in Abschnitt 2.3 definiert. Die Darstellung der Schnittstellengrößen erfolgt durch die Aktuatoren. Beim Aufprägen der Führungsgröße am Lenkrad durch den Torquemotor ist der Unterschied zwischen Mensch und Maschine vorhanden. Die Führung des Fahrzeuges durch den Menschen ist eine Kombination aus Winkel- und Momentenvorgabe. Im niedrigen Geschwindigkeitsbereich erfolgt die Fahrzeugführung über Winkelvorgabe, während im höheren Geschwindigkeitsbereich ein Lenkradmoment durch den Fahrer vorgegeben wird (Experteneinschätzung). Am Prüfstand kann nur ein Regelmodus eingestellt werden. Je nach Testkonfiguration muss im Einzelfall entschieden werden, welcher Regelmodus zur realitätsnahen Testdurchführung geeignet ist. Bei den Standardlenksystemtests wird der Regelmodus entsprechend den Testreihen im Fahrzeug eingestellt, da für die Darstellung im Fahrzeug oftmals ein Lenkroboter für eine hohe Reproduzierbarkeit verwendet wird und es sich um Open-Loop Testreihen handelt (Unterabschnitt 1.3.2).

Bei Closed-Loop Testreihen (Unterabschnitt 1.3.3) hat der Fahrer einen erheblichen Einfluss. Ein entsprechendes Fahrermodell in der Simulationsumgebung übernimmt die Fahrzeugführung und gewährleistet die Reproduzierbarkeit. Je nach Güte und Adaptierbarkeit des Fahrermodells kann eine objektive Beurteilung der Fahrmanöver erfolgen. Die Aufprägung der Spurstangenkräfte erfolgt am Lenksystemprüfstand in axialer Richtung zur Zahnstange. Im Fahrzeug erzeugen Spurstangenkräfte zusätzlich zur Verdrehung des Lenkgetrieberitzels auch eine Querbewegung zwischen Zahnstange und Zahnstangenführung im Lenkgetriebegehäuse, was eine Veränderung der Reibung im Lenkgetriebe bewirkt (Abschnitt 3.1). Durch den Einsatz von zwei Linearmotoren können diese Effekte etwas reduziert werden, da die Krafteinleitung analog zum Fahrzeug an beiden Seiten der Zahnstange erfolgt. Für eine vollständige Kompensation der Effekte müssten zusätzlich die Spurstangenwinkel abgebildet werden, was technisch sehr aufwendige Konstruktionen und Zusatzaktuatoren erfordert. Nutzen und Aufwand sollten sorgfältig abgewägt werden. Abschließend sollten die in diesem Unterabschnitt beschriebenen Grenzen bei der Darstellung und Bewertung von HiL- Fahrmanövern auf einem Lenksystemprüfstand stets berücksichtigt werden.

### 3.5 Testautomatisierung

Durch die Vielzahl von Testreihen und Parametervariationen innerhalb der Testreihen steigt der Arbeitsaufwand enorm. Um die Testanforderungen und -varianten zu beherrschen wird in allen Bereichen in der Fahrzeugentwicklung eine Testautomatisierung eingesetzt. Eine Testautomatisierung reduziert den Arbeitsaufwand und gewährleistet eine effiziente Testdurchführung mit Variationen der Testparameter und Randbedingungen. Zudem sichert diese Herangehensweise einen reproduzierbaren und abgesicherten Testprozess. Eine Testautomatisierung kann in die Teilbereiche Testdurchführung, Testauswertung und Testdokumentation unterteilt werden. Schwerpunkt in dieser Arbeit ist eine Testautomatisierung mit dem Ziel einen effizienten und reproduzierbaren Testdurchlauf zu gewährleisten. Dabei unterscheiden sich die Werkzeuge innerhalb der Anwenderprogramme (ControlDesk bzw. CarMaker) in den verschiedenen Testreihen in ihrer Abstraktionsstufe. Bei reinen Komponententests ohne Fahrzeugmodell kommt eine skriptbasierte Automatisierung (Python) zum Einsatz. Die Skripte werden für jeden Test einzeln programmiert und innerhalb des Codes die Testparameter angepasst. Bei den Hardware-in-the-Loop Testreihen wird ein Fahrmanöver basiertes Testwerkzeug verwendet, welches in die grafische Benutzerschnittstelle des Fahrzeugmodells integriert ist. Über ein spezielles Auswahl Fenster wird das Fahrmanöver aus der Perspektive des Testfahrers vorgegeben. Das hohe Abstraktionslevel erlaubt eine Fahrmanövervorgabe ohne spezielle Programmierkenntnisse und eine exakte Nachbildung der zu simulierenden Fahrsituation. Innerhalb des Fahrmanövers können die zuvor definierten Parameter in einem Testmanager variiert werden. So können Fahrzeugtests, welche in einem realen Fahrversuch mehrere Tage dauern, auf ein Minimum der Zeit reduziert werden.

## 4 Charakterisierung von Lenksystemen am Lenksystemprüfstand

Eine Charakterisierung hat das Ziel die wichtigsten Eigenschaften eines Systems oder einer Komponente zu beschreiben. Weiterhin ist eine Charakterisierung ein hilfreiches Mittel, um die spezifischen Eigenschaften gesamthaft zu erfassen und detailliert zu dokumentieren. Hierdurch können die komplexen technischen Zusammenhänge besser verstanden werden. Hierzu werden in diesem Kapitel die einzelnen Testreihen für eine umfangreiche Charakterisierung von Lenksystemen hinsichtlich der Anforderungen, der Testdurchführung, der Messgrößen und der Auswertung beschrieben. Es wird aufgezeigt, welche spezifischen Charakteristiken von Lenksystemen in Form von Messwerten, Diagrammen oder objektiven Kennwerten in den jeweiligen Testreihen ermittelt werden können. Die Testreihen basieren auf Standardtests aus dem Fahrversuch der Fahrdynamik- und Lenksystementwicklung. Auf dieser Basis sind die Testreihen weiterentwickelt und für die Durchführung an einem Lenksystemprüfstand qualifiziert worden.

Dieses Kapitel beschreibt die Testreihen, aufgeteilt in die einzelne Abschnitte Systemtests, Tests zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens von Lenksystemen, Hardware-in-the-Loop Tests und Betriebslastennachfahrversuche (BLNV). Die Tests zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens von Lenksystemen zählen zu den Systemtests werden jedoch auf Grund der zentralen Bedeutung in dieser Arbeit in einem eigenen Abschnitt behandelt. Der Abschnitt Betriebslastennachfahrversuche (BLNV) bildet den Abschluss dieses Kapitels. Der Nachweis der einzelnen Testreihen zur Charakterisierung erfolgt mit Hilfe des Lenksystemprüfstand anhand eines modernen elektromechanischen Lenksystems (EPS-2). Ein Vergleich mit anderen Lenksystemen findet in Kapitel 5 statt. Ziel der Lenksystemcharakterisierung an einem Lenksystemprüfstand ist es, bereits in der Frühphase der Entwicklung unabhängig von Fahrzeugprototypen Systemeigenschaften, Simulationsparameter und Ergebnisse für ein stimmiges Lenkgefühl zu ermitteln.

Diese Arbeit beschränkt sich bei der Auswahl der Testreihen speziell auf die in Abbildung 4.1 dargestellten Tests, welche für eine umfangreiche Charakterisierung notwendig sind. In der Entwicklung von elektromechanischen Lenksystemen werden bis zur Serienreife eine Vielzahl von weiteren Testreihen durchgeführt. Neben den mechanischen Tests werden Testreihen nach dem V-Modell für den Softwareentwicklungsprozess durchgeführt [8]. Wei-

tere Testreihen umfassen die Themengebiete NVH und EMV. Der Großteil der Testreihen zählt zu den klassischen Laborversuchen (Abb. 2.4). An einem Lenksystemprüfstand können weitere Tests zur funktionalen Sicherheit durchgeführt werden, welche das Verhalten bei Fehlfunktionen im Gesamtfahrzeugkontext oder Leistungsschwankungen im Bordnetz (Degradierung) prüfen. Bei allen Testreihen ist zwischen Anwendungsversuch und Ersatzversuch zu unterscheiden [11]. Systemtests zählen zur Gruppe der Ersatzversuche, während Fahrmanöver und Betriebslastennachfahrversuche den Anwendungsversuchen zuzuordnen sind (Nachbildung realer Fahrmanöver).

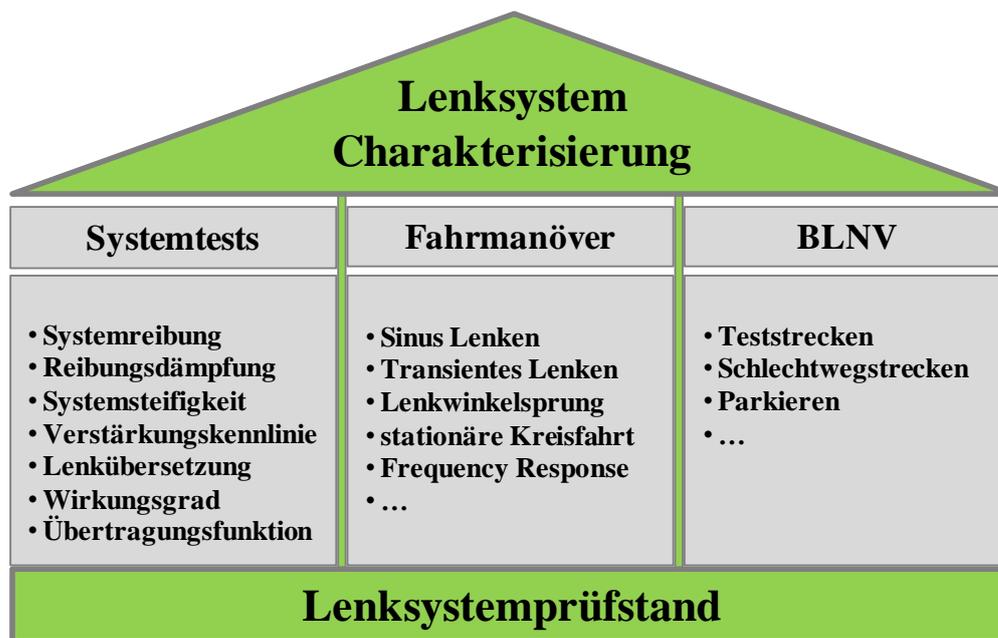


Abbildung 4.1: Drei Säulen der Lenksystemcharakterisierung

Die Charakterisierung eines Lenksystems an einem Lenksystemprüfstand besteht aus drei Säulen, welche die einzelnen Themengebiete Systemtests, Fahrmanövern und Betriebslastennachfahrversuchen beschreiben. Systemtests charakterisieren das Lenksystem auf Komponentenebene. Das Lenksystem oder Komponenten davon werden isoliert untersucht, um die spezifischen Eigenschaften zu ermitteln. Die gewonnenen Daten dienen zur Verifikation der Leistungs- bzw. Grundauslegung des Lenksystems oder zum Parametrieren von Lenkungsmodellen. Weiterhin können mit synthetischen Eingangssignalen Systemeigenschaften wie das Übertragungsverhalten ermittelt werden. Eine gezielte Untersuchung auf einem Lenksystemprüfstand erlaubt zudem das Vergleichen von verschiedenen Lenksystemen, Konzepten, Softwareständen und -parametrierungen unter denselben Randbedingungen.

Fahrmanöver charakterisieren das Lenksystem auf Gesamtfahrzeugebene. Im Verbund mit einem Fahrzeugmodell können die Eigenschaften eines Lenksystems im Fahrzeug ermittelt werden. Hierzu eignen sich die Standardfahrmanöver aus dem Fahrversuch. Die Vorteile auf einem Lenksystemprüfstand sind die einfache Variation der Testparameter und ein hoher Grad an Reproduzierbarkeit ohne Einflüsse von Fahrer und Umwelt. Die dritte Säule bildet der Betriebslastennachfahrversuch. Die Aktuatoren werden mit Messdaten (Schnittstellengrößen Lenksystem - Lenksystemprüfstand) aus dem realen Fahrversuch angesteuert. Mit diesem Test kann die Lebensdauer von Bauteilen geprüft oder Fahrfreigaben nach bestandener Dauerprüfung erteilt werden.

## 4.1 Prüfkonfiguration

Der Lenksystemprüfstand bietet mit den diversen Konfigurationsmöglichkeiten die Testplattform für die Testreihen zur Charakterisierung (Abb. 4.2). Entsprechend den Anforderungen des jeweiligen Tests wird der Lenksystemprüfstand konfiguriert. Die Testparameter für die Testreihen der Charakterisierung werden über die zentrale Echtzeitumgebung vorgegeben. Sowohl die Aktuatoren als auch das Lenksystem und Fahrzeugmodell können manuell oder automatisiert konfiguriert werden. Die Ankopplung der Aktuatoren an das Lenksystem erfolgt mechanisch.

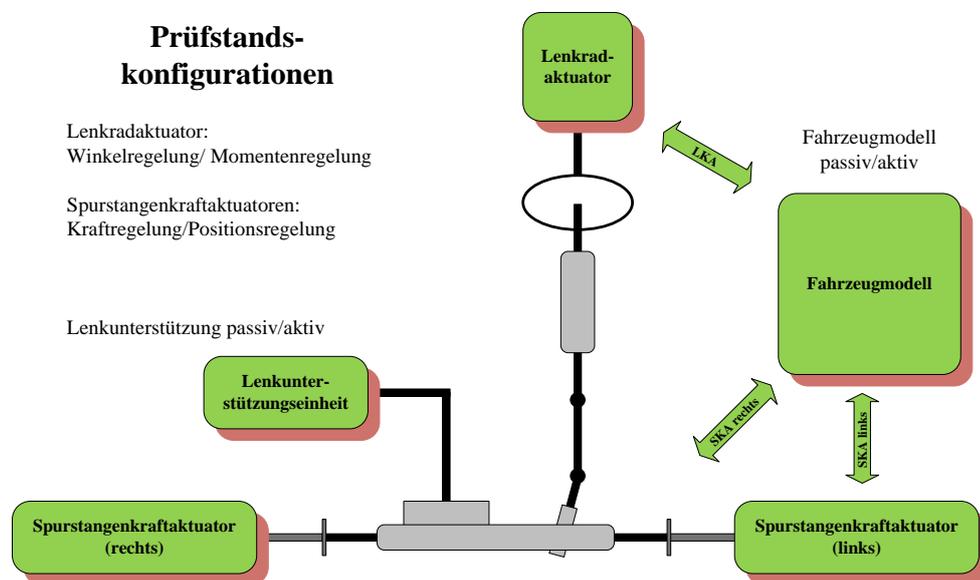
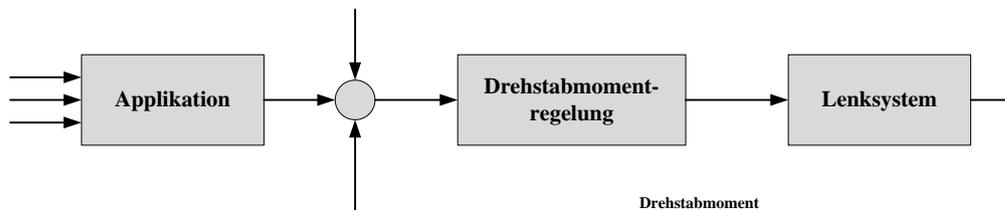


Abbildung 4.2: Prüfstandkonfigurationen

Abbildung 4.2 beschreibt die Konfigurationsmöglichkeiten des Lenksystemprüfstands. Grün hinterlegt sind jeweils die für den Test aktiven Komponenten von Lenksystemprüfstand und Lenksystem. Im passiven Modus sind die Komponenten (wie z.B. der Lenkradaktuator) rot eingefärbt. Weitere Angaben sind die Regelmodi der aktiven Aktuatoren und die Kopplung mit dem Fahrzeugmodell im Hardware-in-the-Loop Modus für die Charakterisierung mit Fahrmanövern. Die grünen Pfeile zwischen dem Fahrzeugmodell und dem Lenksystemprüfstand deuten die aktiven Signalpfade zwischen dem Fahrzeugmodell und den Aktuatoren an (LKA = Lenkradaktuator; SKA = Spurstangenkraftaktuator).

### Verwendetes Lenksystem in den Testreihen zur Charakterisierung

Der Nachweis der Charakterisierung erfolgt mit einem elektromechanischen Lenksystem mit einer neuen Reglergeneration. Die Unterstützungseinheit ist achsparallel angeordnet (Tab. 1.2). Ein elektromechanisches Lenksystem eignet sich in besonderer Weise für eine Charakterisierung, da Einflüsse aus der Mechanik und den E/E- Komponenten prägend für das Lenksystem sind. Bedingt durch die rotierenden Bauteile im Lenkgetriebe (Getriebe und Elektromotor) treten im Vergleich zu konventionellen hydraulischen Lenkgetrieben erhöhte Trägheiten und Reibung auf [57]. Diese mechanischen Effekte haben einen wesentlichen Einfluss auf das Charakterisierungsergebnis. Weitere Einflüsse auf das Charakterisierungsergebnis ergeben sich aus dem Regelungskonzept des Lenksystems, welches maßgeblich das Lenkgefühl mitbestimmt. Der Einfluss zeigt sich besonders im Übertragungsverhalten von Störgrößen. Eine Untersuchung des Übertragungsverhaltens ist in Abschnitt 4.3 dokumentiert.



**Abbildung 4.3:** Closed-Loop Regelung des elektromechanischen Lenksystems

In Unterabschnitt 1.2.2 wurden bereits die Grundlagen einer Open-Loop Regelung beschrieben. Das hier verwendete Lenksystem hat ein neuartiges Regelungskonzept mit einer Closed-Loop Regelung (Abb. 4.3). Dabei wird das Drehstabmoment auf einen Sollwert eingeregelt und stellt die Schnittstelle zwischen Regelung und Applikation dar. Applikation und Regelung werden bei diesem Regelungskonzept getrennt.

Die Vorteile sind, dass die Lenkfunktionen (Applikation bzw. Sollwertberechnung) weitgehend unabhängig von der Regelung arbeiten und die Lenkfunktionen direkt das Drehstabilitätsmoment vorgeben [28]. Da das Drehstabilitätsmoment die vom Fahrer wahrgenommene Größe ist, kann das Lenkgefühl direkt beeinflusst werden. In dieser Arbeit wird dieses Lenksystem als EPS-2 bezeichnet. In Kapitel 5 wird ein Vergleich zwischen einer Open-Loop (EPS-1) und Closed-Loop Regelung (EPS-2) durchgeführt, um den Einfluss des Regelungskonzeptes auf das Übertragungsverhalten nachzuweisen. Als Referenzsystem (Benchmark) für das Übertragungsverhalten wird ein konventionelles hydraulisches Lenksystem (HPS) herangezogen. Bei allen Lenksystemen (HPS, EPS-1, EPS-2) wurden in den Testreihen die Faltenbälge an den Spurstangen entfernt. Aus der Bewegung der Faltenbälge entsteht eine zusätzliche Reibkraft, welche in den Testreihen zur Charakterisierung nicht berücksichtigt wurde.

## 4.2 Charakterisierung durch Systemtests

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Testreihen charakterisieren ein Lenksystem hinsichtlich der Systemeigenschaften. Es werden die Grundlagen, die Prüfstandkonfiguration und die Testauswertung für die einzelnen Testreihen beschrieben. Die Ergebnisse dienen im Entwicklungsprozess der objektiven Bewertung der Grundausslegung eines Lenksystems oder der Parametrierung von Deutungsmodellen für den virtuellen Entwicklungsprozess (Kapitel 2, Abb. 2.3). Nach Abbildung 4.1 bilden die Systemtests die erste Säule der Lenksystemcharakterisierung, welche die folgenden Testreihen beinhaltet:

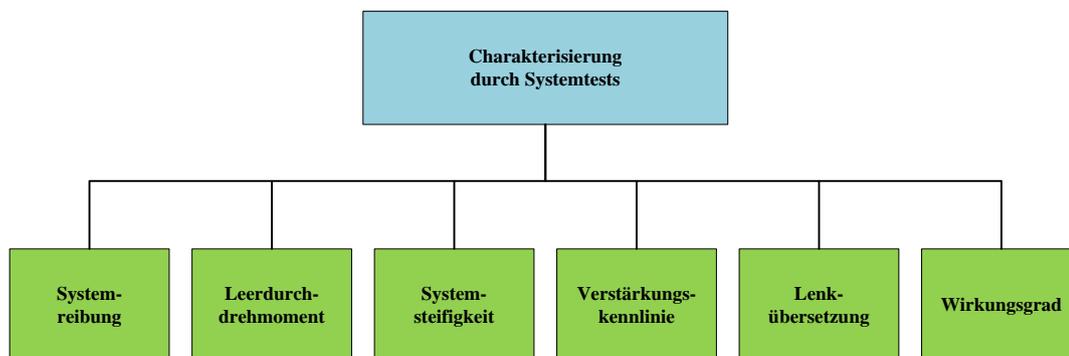


Abbildung 4.4: Testreihen Systemtests

### 4.2.1 Systemreibung

Die Systemreibung des Lenksystems beeinflusst direkt das Lenkgefühl und ist eine wichtige Einflussgröße für das Lenkgefühl. Ein Lenksystem hat eine Basissystemreibung, welche sich aus dem mechanischen Aufbau ergibt. Die Reibung resultiert aus der Bewegung der Zahnstange und des Lenkritzels innerhalb des Lenkgetriebes an Lagerstellen und Zahneingriffen. Bei hydraulischen Lenkgetrieben entstehen weitere Reibungseffekte an den Kolbendichtungen. Elektromechanische Lenkgetriebe weisen eine erhöhte Systemreibung durch Übersetzungsgetriebe, Riementrieb und Elektromotor auf. In der Lenksäule treten ebenfalls Reibungseffekte in den Lagerstellen auf, welche aber im Vergleich zum Lenkgetriebe sehr gering sind ( $< 0.3 \text{ Nm}$ ). Bei der Entwicklung wird die Systemreibung des Lenksystems entsprechend ausgelegt. Reibung erzeugt positive und negative Eigenschaften in einem Lenksystem. Eine erhöhte Reibung erschwert die genaue Dosierung der Lenkbewegung und beeinflusst das Rückmeldeverhalten der Lenkung. Zudem wird der Rücklauf der Lenkung mit steigendem Reibungsniveau verschlechtert [57].

Positive Effekte erzeugt die Systemreibung hinsichtlich dem Hystereseverhalten des Lenkradmoment über den Lenkradwinkel. Bei einer konstanten Kurvenfahrt kann hierdurch ein Lenkwinkel präzise eingestellt werden (Kap. 4.4.1). Durch eine erhöhte Systemreibung werden Störgrößen wie Radunwuchten oder Fahrbahnstöße reduziert (Kap. 4.3) [57]. Bei elektromechanischen Lenksystemen kann durch den mechanischen Aufbau die Reibung nur bedingt reduziert werden. Durch die elektronischen Eingriffsmöglichkeiten in das Lenkverhalten besteht die Option Softwaremodule zu integrieren, um die Systemreibung durch ein Zusatzmoment der Unterstützungseinheit zu kompensieren. Vorteilhaft ist bei diesem Verfahren, dass im Fahrzeug durch Online-Kalibrierung der entsprechenden Parameter eine Applikationsmöglichkeit der Systemreibung möglich ist. Eine Änderung von mechanischen Bauteilen ist aufwendig und kostenintensiv.

Da die Belastung in den Lagerstellen und Zahneingriffen nicht konstant ist, resultiert aus dem Einfluss von Lenkradmoment und Kräften an der Zahnstange eine veränderte Systemreibung. Eine Testreihe zeigt auf, wie hoch der Einfluss einer äußeren Last auf die Systemreibung ist. Weitere Effekte der Systemreibung zeigen sich bei einer hochfrequenten Fahrbahnanregung. In Fahrversuchen zeigte sich, dass eine hochfrequente Anregung des Lenksystems die Reibung reduziert und das Lenkgefühl deutlich verändert. Um dieses Verhalten auf die Systemreibung zu identifizieren wird in Kap. 4.4.1 der Weave-Test mit einer simulierten Fahrbahnanregung durchgeführt. Die Temperatur beeinflusst die Systemreibung ebenfalls. Für eine Messung des Temperatureinflusses an einem Lenksystemprüfstand wird eine Klimakammer benötigt. Der Aufwand und die Kosten eines solchen Systems sind für eine geringe Anzahl an Versuchsreihen nicht gerechtfertigt, weshalb in dieser Arbeit der Einfluss nicht weiter untersucht wird.

## Prüfstandkonfiguration

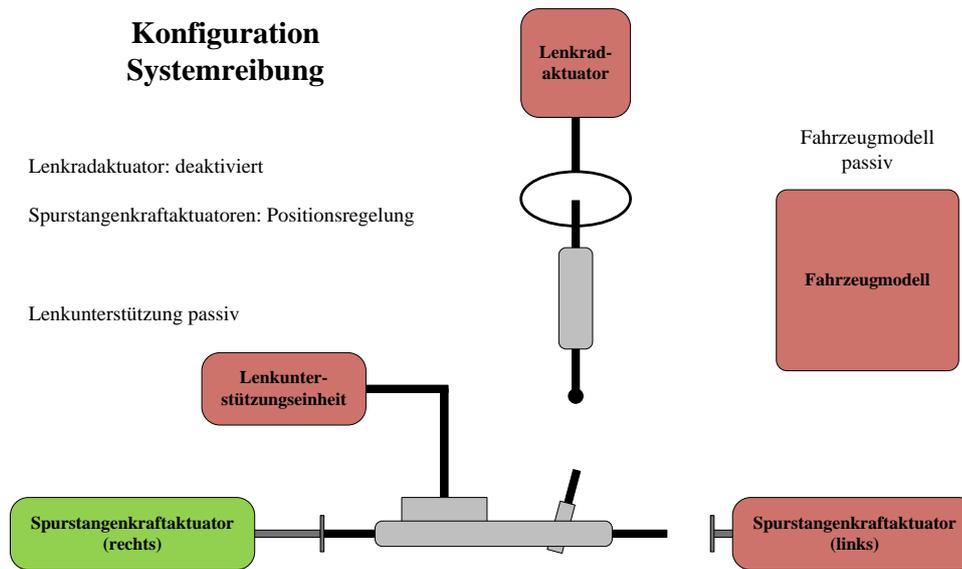


Abbildung 4.5: Prüfstandkonfiguration Systemreibung

## Eingangs- und Messgrößen

Eingangsgrößen	Wertebereich		Messgrößen	Messbereich
Zahnstangenweg	+/- 60 mm		Zahnstangenkraft	+/- 1000 N
Zahnstangen- geschwindigkeit	10 - 200 mm/s Schrittweite: 5 mm/s		Zahnstangenweg	+/- 60 mm

Tabelle 4.1: Eingangs- und Messgrößen Testreihe Systemreibung

Zur Messung der Systemreibung wird die Zahnstange durch den rechten Spurstangenkraftaktuators mit einer konstanten Zahnstangengeschwindigkeit +/- 60 mm in beide Richtungen bewegt. Zur Ermittlung des Einflusses der Zahnstangengeschwindigkeit wird die Zahnstange in einzelnen Tests zusätzlich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten verschoben, wobei die Verschiebekraft aufgezeichnet wird. Das Lenksystem ist auf dem Lenksystemprüfstand befestigt. Das Ritzel ist frei und die Lenkunterstützung des Lenksystems ist deaktiviert.

## Testreihen und Auswertung

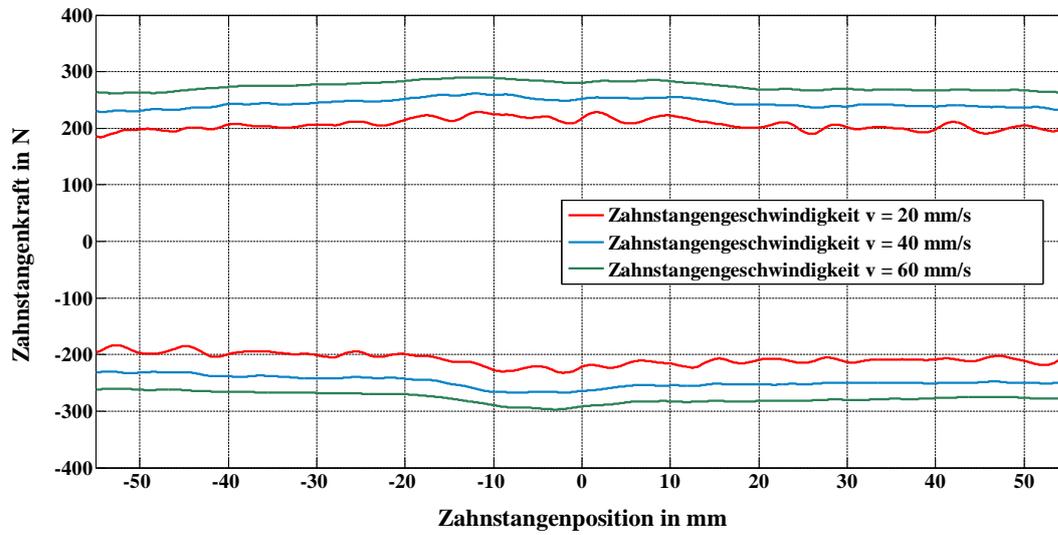


Abbildung 4.6: Systemreibung bei Variation der Zahnstangengeschwindigkeit

Das Messgrößendiagramm (Abb. 4.6) zeigt die Systemreibung (Zahnstangenkraft in N) über dem Zahnstangenweg (Zahnstangenposition in mm) für die Messungen mit den Zahnstangengeschwindigkeiten von 20, 40, 60 mm/s. Die Ergebnisse zeigen die Grundsystemreibung und den Einfluss der Zahnstangengeschwindigkeit. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Zahnstangengeschwindigkeit die Systemreibung ansteigt.

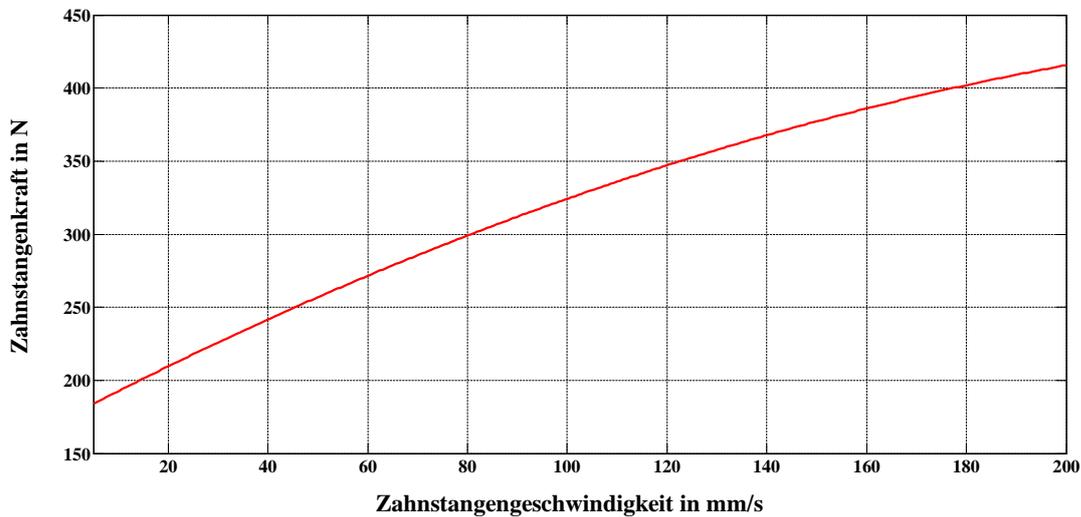


Abbildung 4.7: Einfluss der Zahnstangengeschwindigkeit auf die Zahnstangenkraft

Um diesen Einfluss über dem gesamten Geschwindigkeitsbereich der Testreihe (10-200 mm/s) darzustellen, wurde für jeden Test der betragsmäßige Mittelwert über den gesamten Verschiebeweg berechnet. In Abbildung 4.7 sind diese Mittelwerte in einem Diagramm aufgetragen und durch Interpolation zu einer Kurve verbunden.

### Systemreibung unter Lasteinfluss

Weitere Einflussgrößen auf die Systemreibung ergeben sich aus den von außen wirkenden Kräften und Momenten. Die folgende Testreihe zeigt den Einfluss einer äußeren Last dargestellt durch ein konstantes Lenkradmoment, welches entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung der Zahnstange aufgeprägt wird. Das Lenkradmoment wird durch den Lenkradaktuator erzeugt. Hierzu wird der Lenkradaktuator über das Lenkrad und die Lenkzwischenwelle mit dem Lenkgetriebe verbunden (Abb. 4.8).

### Prüfstandkonfiguration

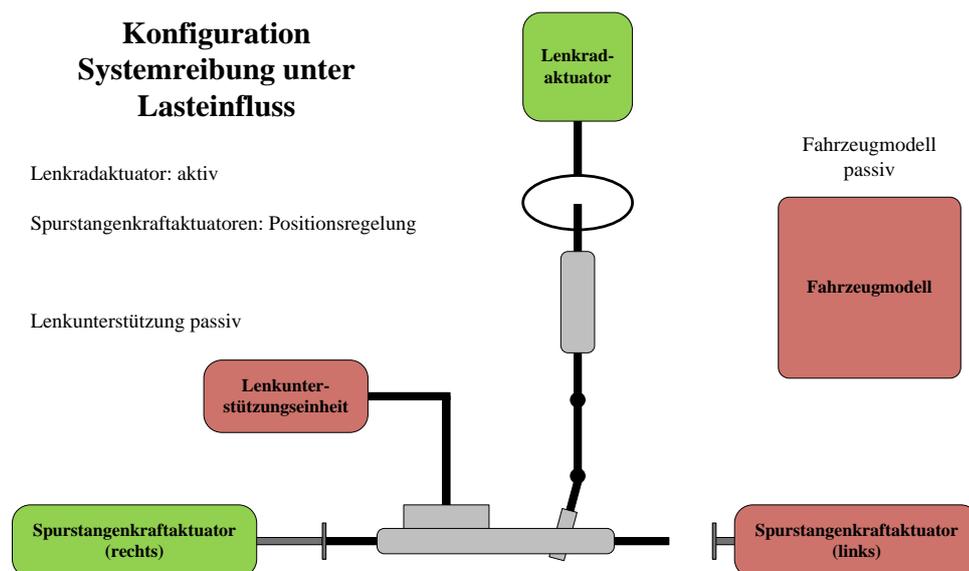


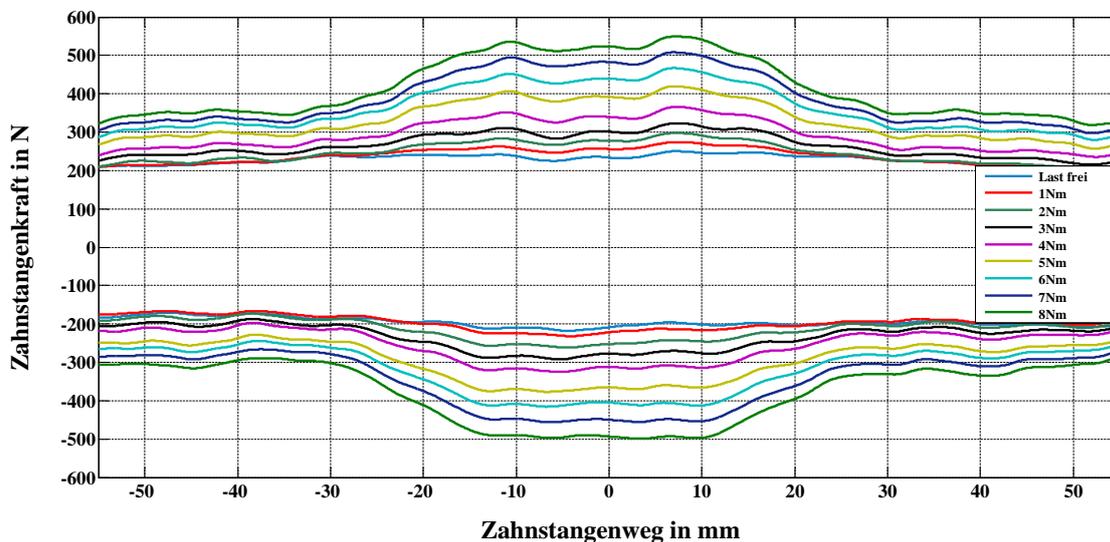
Abbildung 4.8: Prüfstandkonfiguration Systemreibung unter Lasteinfluss

## Eingangs- und Messgrößen

Eingangsgrößen	Wertebereich		Messgrößen	Messbereich
Zahnstangenweg	+/- 60 mm		Zahnstangenkraft	+/- 1000 N
Zahnstangengeschwindigkeit	5 - 200 mm/s Schrittweite: 5 mm/s		Zahnstangenweg	+/- 60 mm
Lenkradmoment	0 - 8 Nm Schrittweite: 1 Nm		Lenkradwinkel	+/- 500 °

Tabelle 4.2: Eingangs- und Messgrößen Testreihe Systemreibung unter Lasteinfluss

Analog zur Messung der Systemreibung wird die Zahnstange durch den rechten Spurstangenkraftaktuator mit einer konstanten Zahnstangengeschwindigkeit verschoben und in weiteren Tests variiert (Tab. 4.2). Zusätzlich zu dieser Variation wird zur Ermittlung des Einflusses der Last ein Zusatzmoment über den Lenkradaktuator aufgeprägt und gemäß den Angaben in Tabelle 4.2 variiert. Somit ergeben sich 40x9 Testdurchläufe, welche in den folgenden Diagrammen dargestellt sind. Die Systemreibung in dieser Testreihe setzt sich aus den Anteilen der Grundsystemreibung, der aufgeprägten Last und der zusätzlichen Reibung resultierend aus der aufgeprägten Last zusammen. In Abbildung 4.9 sind die Ergebnisse für eine Variation des Lenkradmoments von 0-8 Nm und einer Zahnstangengeschwindigkeit von 40 mm/s dargestellt.

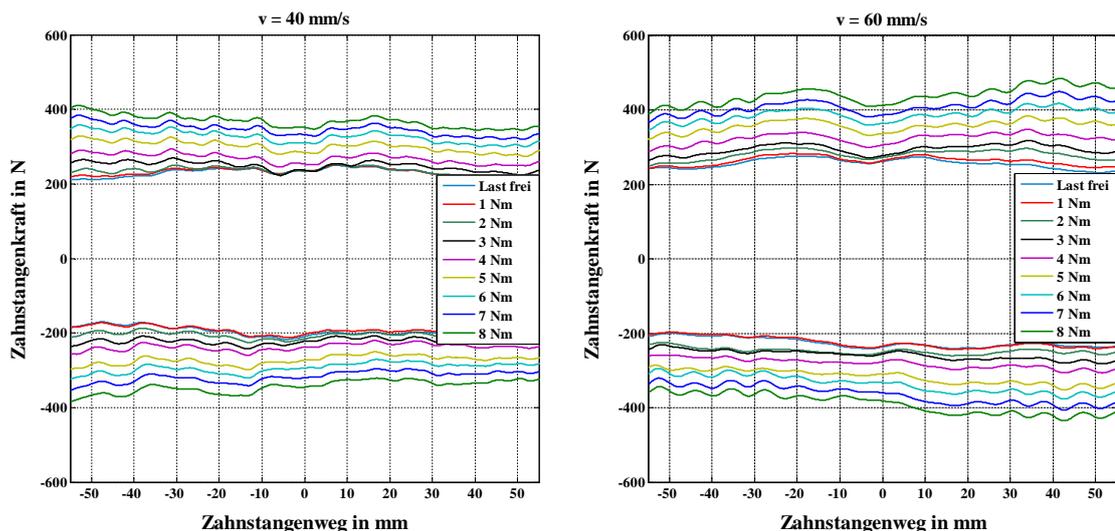
Abbildung 4.9: Einfluss der Last auf die Zahnstangenkraft ( $v = 40 \text{ mm/s}$ )

Mit steigender Last durch das über den Lenkstrang aufgebrachte Lenkradmoment steigt auch die Systemreibung an. Deutlich zu sehen ist der Einfluss der variablen Lenkübersetzung der Zahnstange. Das in dieser Charakterisierung verwendete Lenksystem hat eine Zahnstange mit variabler Lenkübersetzung, d.h. im Mittenbereich ist die Lenkübersetzung indirekter im Vergleich zu den Randbereichen. In Unterabschnitt 4.2.5 ist diese mechanische Eigenschaft des Lenksystems graphisch dargestellt (Abb. 4.26). Die gemessene Zahnstangenkraft  $F_Z$  (Gl. 4.1) setzt sich somit aus den Anteilen der Grundsystemreibung  $F_G$  (vgl. Abb. 4.6), des Kraftanteils  $F_{LM}$  aus dem aufgeprägten Lenkradmoment und eines zusätzlichen Reibungsanteils  $F_L$  resultierend aus dem aufgeprägten Lenkradmoment (Last).

$$F_Z = F_G + F_{LM} + F_L \quad (4.1)$$

$$F_{LM} = \frac{T_L}{r_{Rv}} \quad (4.2)$$

Zur Darstellung des zusätzlichen Reibungsanteils  $F_L$  resultierend aus dem aufgeprägten Lenkradmoment wurde nach Gleichung (4.3) in Abbildung 4.10 rechnerisch der Einfluss der Lenkübersetzung (Gl. 4.2) korrigiert, d.h. der Kraftanteil  $F_{LM}$  resultierend aus dem aufgeprägten Lenkradmoment wurde in der Nachbereitung der Messdaten subtrahiert. Als Ergebnis sind in Abbildung 4.10 nur die Zahnstangenkraftanteile der Grundsystemreibung  $F_G$  und der Reibung  $F_L$  resultierend aus der äußeren Last zu sehen. Zum Vergleich und zur einfachen Darstellung des Einflusses der Zahnstangengeschwindigkeit unter Last zeigt Abbildung 4.10 zusätzlich eine Messung mit einer Zahnstangengeschwindigkeit von 60 mm/s.

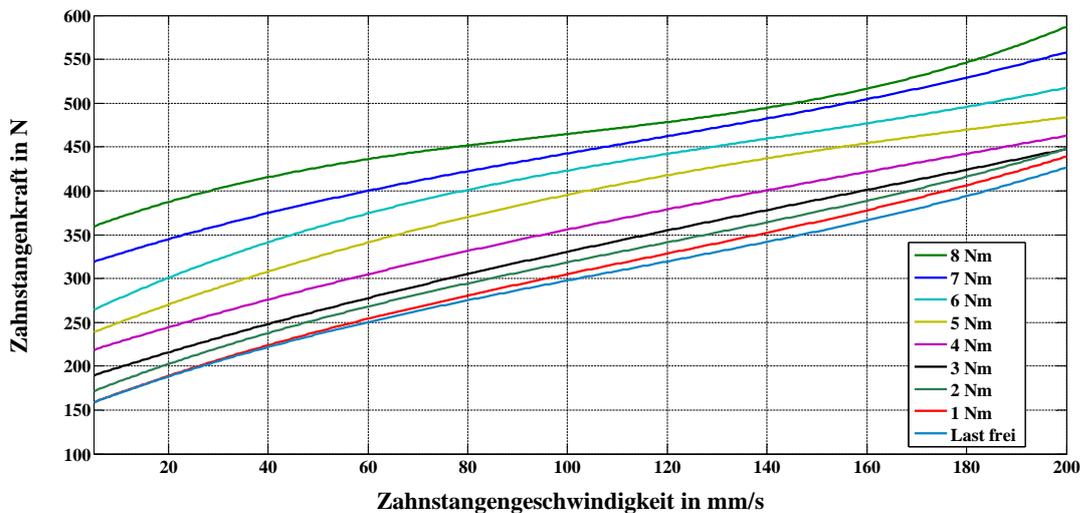


**Abbildung 4.10:** Einfluss der Last auf die Zahnstangenkraft (ohne Kraftanteil  $F_{LM}$  aus dem aufgeprägten Lenkradmoment)

$$F_Z = F_G + F_L \quad (4.3)$$

Die Ergebnisse der Testreihen ohne Last bestätigen sich hier, d.h. mit steigender Zahnstangengeschwindigkeit steigt die Systemreibung auch unter Last an. Im Vergleich zu den Messungen ohne Last zeigen die Messungen mit steigender Last über dem Zahnstangenweg kein konstantes Kraftniveau. Dieses Phänomen resultiert rein aus der Nachbereitung der Messergebnisse. Für die Berechnung des Kraftanteils  $F_{LM}$  aus dem aufgeprägten Lenkradmoment wird die Lenkübersetzung des gesamten Lenkstrangs aus der jeweiligen Messung ohne Last berechnet. Unter Last verändert sich geringfügig die Lenkübersetzungskennlinie durch die Verdrehung des Drehstabs. Dies führt zu Abweichungen des Kraftanteils  $F_{LM}$  aus dem Lenkradmoment über dem Zahnstangenweg.

In Abbildung 4.11 sind die Ergebnisse über den gesamten Zahnstangengeschwindigkeits- (5-200 mm/s) und Lastbereich (0-8 Nm) dargestellt. Analog zur Testreihe ohne Last wurde für jeden Test der betragsmäßige Mittelwert der Systemreibung bestimmt. Die Systemreibung steigt mit der Last und der Zahnstangengeschwindigkeit.



**Abbildung 4.11:** Einfluss der Last und Zahnstangengeschwindigkeit auf die Zahnstangenkraft (ohne Kraftanteil  $F_{LM}$  aus dem aufgeprägten Lenkradmoment)

Abschließend ergeben sich folgende Bewertungen aus den Testreihen zur Systemreibung. Die Systemreibung steigt mit der Zahnstangengeschwindigkeit. Weitere Einflussgrößen ergeben sich aus der Last, dargestellt in den Testreihen durch ein Lenkradmoment entgegen der Bewegungsrichtung der Zahnstange. Der Temperatureinfluss wurde nicht untersucht, da eine entsprechende Prüfstandeinrichtung zur Konditionierung des Lenksystems benötigt wird.

Bei der Ermittlung der Systemreibung ist das System passiv. Ein Test mit aktivem System ist nicht möglich, da die Zahnstange in diesem Versuch durch den Spurstangenkraftaktor bewegt wird. Dadurch wird auch der Drehstab des Drehmomentsensors verdreht, wodurch eine Unterstützungskraft entgegen der Bewegungsrichtung der Zahnstange durch die Unterstützungseinheit generiert wird. Ein Verschieben der Zahnstange ist nur unter erhöhtem Kraftaufwand möglich, wodurch die Messergebnisse verfälscht werden. In Gleichung (4.4) sind die Abhängigkeiten der Systemreibung  $F_{SR}$  zusammengefasst.

$$F_{SR} = f(Tmp, v_{ZS}, F_L) \quad (4.4)$$

### 4.2.2 Leerdurchdrehmoment

Das Leerdurchdrehmoment charakterisiert die Systemreibung des Lenksystems durch Aufprägen eines Lenkradwinkels als Eingangsgröße. Je nach Definition der Systemgrenze und Aufbau auf dem Lenksystemprüfstand dient als Eingangsgröße der Lenkradwinkel oder der Ritzelwinkel. In der Konfiguration dieser Arbeit wird der Lenkradwinkel verwendet, da das gesamte Lenksystem am Lenksystemprüfstand aufgebaut ist (Abb. 4.12). Im Vergleich zu einer Messung mit der Eingangsgröße Ritzelwinkel ergeben sich geringe Unterschiede bedingt durch den gemessenen Lenkradwinkel und der zusätzlichen Reibung der Lagerstellen der Lenksäule. Die durch die Lagerstellen verursachte Reibung wurde in Messungen am Lenksystemprüfstand mit 0.3 Nm ermittelt. Durch einen Fahrzeug konformen Aufbau des Lenksystems am Lenksystemprüfstand (Abb. 3.14) ergeben sich keine negativen Effekte in der Lenkübersetzungskennlinie oder die Effekte sind bekannt und können berücksichtigt werden. Zur Ermittlung dieser Effekte (Einfluss der Kardangelenke) dient die Testreihe zur Lenkübersetzung (Abschnitt 4.2.5). Das Maß für die Systemreibung ist das resultierende Lenkradmoment. Bei einer Messung mit dem Ritzelwinkel als Eingangsgröße wird das Drehstabmoment des Lenksystems für die Auswertung herangezogen. Da in dieser Testreihe die Anregung des Lenksystems über den Pfad Lenkrad-Lenksäule-Lenkzwischenwelle erfolgt, wird das System passiv und aktiv betrieben. Bei einem aktiven System werden die Einflüsse der Softwareapplikation in Messreihen sichtbar (Lenkunterstützung, Reibungskompensation).

## Prüfstandkonfiguration

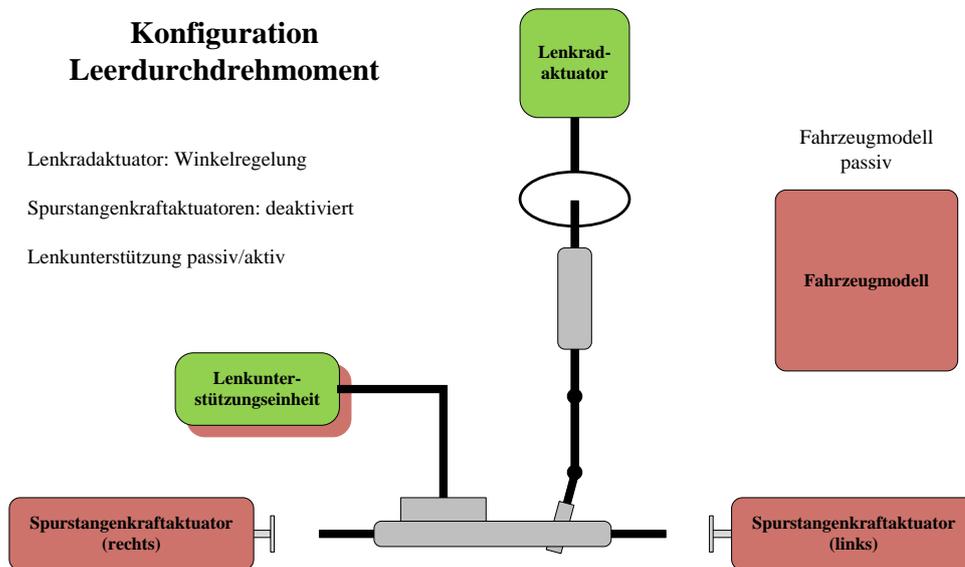


Abbildung 4.12: Prüfstandkonfiguration Leerdurchdrehmoment

Zur Testdurchführung wird das Lenksystem mit dem Lenkradaktuator verbunden. Die Spurstangen bzw. die Zahnstange ist frei und die Spurstangenkraftaktuatoren sind deaktiviert. Über den Lenkradaktuator wird im Modus Winkelregelung der Lenkradwinkel vorgegeben und das Lenksystem  $\pm 400^\circ$  und mit konstanter Lenkradwinkelgeschwindigkeit bewegt. Das Lenkradmoment wird aufgezeichnet. In der Testreihe werden Tests mit verschiedenen Lenkradwinkelgeschwindigkeiten gemäß Tabelle 4.3 durchgeführt. Alle Tests werden nach Testanforderung mit passiver und aktiver Unterstützungseinheit durchgeführt.

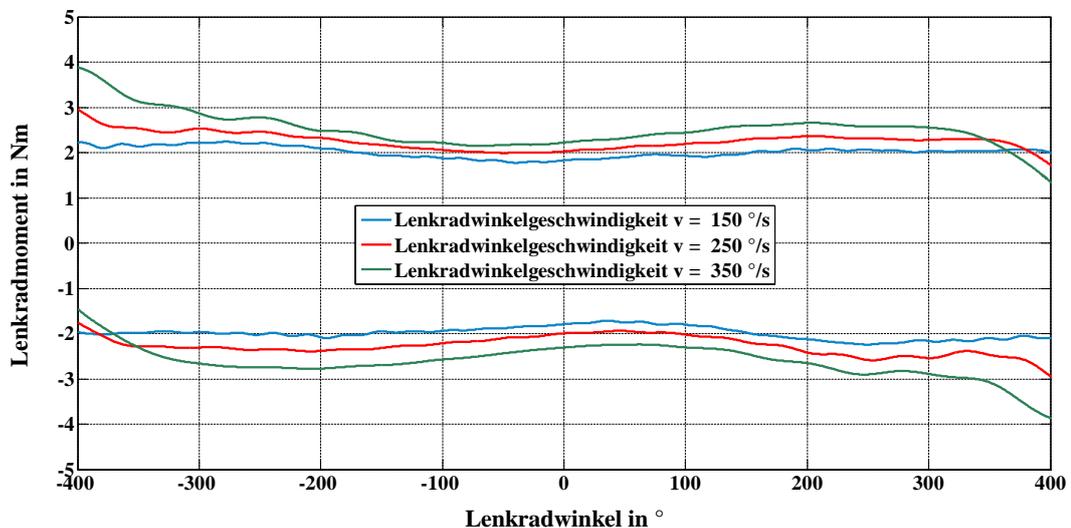
## Eingangs- und Messgrößen

Eingangsgrößen	Wertebereich	Messgrößen	Messbereich
Lenkradwinkel	$\pm 500^\circ$	Lenkradmoment	$\pm 10 \text{ Nm}$
Lenkradwinkelgeschwindigkeit	50 - 1000 $^\circ/\text{s}$ Schrittweite: 5 $^\circ/\text{s}$	Lenkradwinkel	$\pm 500^\circ$

Tabelle 4.3: Eingangs- und Messgrößen Testreihe Leerdurchdrehmoment

## Testreihen und Auswertung

Der Lenkradaktuator prägt innerhalb eines Testdurchlaufs mit einer konstanten Lenkradwinkelgeschwindigkeit einen Lenkradwinkel von  $\pm 400^\circ$  auf. Die Lenkradwinkelgeschwindigkeit wird nach den Anforderungen in Tabelle 4.3 in den weiteren Testdurchläufen schrittweise erhöht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.13 dargestellt. Die Lenkunterstützung ist in dieser Testreihen deaktiviert, so dass nur die mechanischen Eigenschaften des Lenksystems hinsichtlich der Reibung sich in den Ergebnissen darstellen. Analog zu den Ergebnissen der Systemreibung in Unterabschnitt 4.2.1 ist der Einfluss der Geschwindigkeit (Lenkradwinkel- bzw. Zahnstangengeschwindigkeit) sichtbar. Mit steigender Lenkradwinkelgeschwindigkeit steigt das Leerdurchdrehmoment an, dargestellt durch Messungen mit einer Lenkradwinkelgeschwindigkeit von 150, 250, 350  $^\circ/\text{s}$  (Abb. 4.13). Die Testreihe wurde zusätzlich mit einer aktiven Lenkunterstützung durchgeführt, um den Einfluss der im Steuergerät applizierten Lenkunterstützung zu ermitteln. Die Ergebnisse in Abbildung 4.14 zeigen, dass mit aktiver Lenkunterstützung das Leerdurchdrehmoment über 50 % reduziert und der Geschwindigkeitseinfluss kompensiert wurde. Die gewonnenen Ergebnisse sind exemplarisch für ein elektromechanisches Lenksystem und sind abhängig von der jeweiligen Applikation der einzelnen Softwaremodule (Verstärkungskennlinie, Reibungskompensation). Diese Erkenntnisse und Abhängigkeiten müssen bei einem Vergleich von Lenksystemen mit aktiver Lenkunterstützung stets berücksichtigt werden.

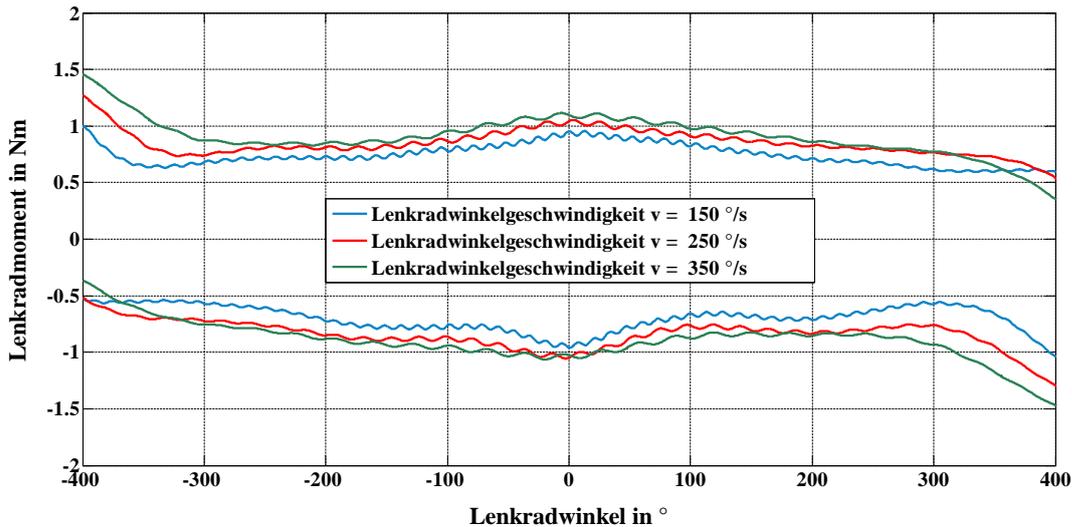


**Abbildung 4.13:** Leerdurchdrehmoment bei Variation der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (ohne Lenkunterstützung)

Das gemessene Leerdurchdrehmoment  $T_{LDM}$  setzt sich aus den Reibungsanteilen im Lenkgetriebe  $T_{LG}$  und in der Lenksäule  $T_{LS}$  zusammen (Gl. 4.5). Die Reibung in der Lenksäule ist im Vergleich zur Reibung im Lenkgetriebe deutlich kleiner (ca. 0.3 Nm).

$$T_{LDM} = T_{LG} + T_{LS} \quad (4.5)$$

Sowohl in Abbildung 4.13 als auch in Abbildung 4.14 ist in den Endpositionen der Messung ein erhöhtes Leerdurchdrehmoment sichtbar. Dies resultiert aus den dynamischen Effekten des Lenkradaktuators beim Beschleunigen auf die definierte Lenkradwinkelgeschwindigkeit bzw. beim Verzögern in den Stillstand.



**Abbildung 4.14:** Leerdurchdrehmoment bei Variation der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (mit Lenkunterstützung)

Bei den Messungen mit aktiver Lenkunterstützung reduziert sich das Leerdurchdrehmoment  $T_{LDM}$  entsprechend um den Anteil  $T_{UE}$  der Lenkunterstützung (Gl. 4.6).

$$T_{LDM} = T_{LG} + T_{LS} - T_{UE} \quad (4.6)$$

Verdeutlicht wird der Einfluss der applizierten Lenkunterstützung über den gesamten Lenkradwinkelgeschwindigkeitsbereich (50-1000 °/s) im Vergleich zu den Testreihen mit deaktivierter Lenkunterstützung. Hier steigt das Leerdurchdrehmoment  $T_{LDM}$  an (blau), während mit aktiver Lenkunterstützung das Leerdurchdrehmoment  $T_{LDM}$  über den gesamten Bereich nahezu konstant bleibt (rot). Für den Fahrer ist ein Anstieg der Reibung und damit des Lenkradmoments bei höheren Lenkradwinkelgeschwindigkeiten nicht spürbar. Ein steigendes Lenkradmoment bei höheren Lenkradwinkelgeschwindigkeiten beeinflusst das Lenkgefühl negativ.

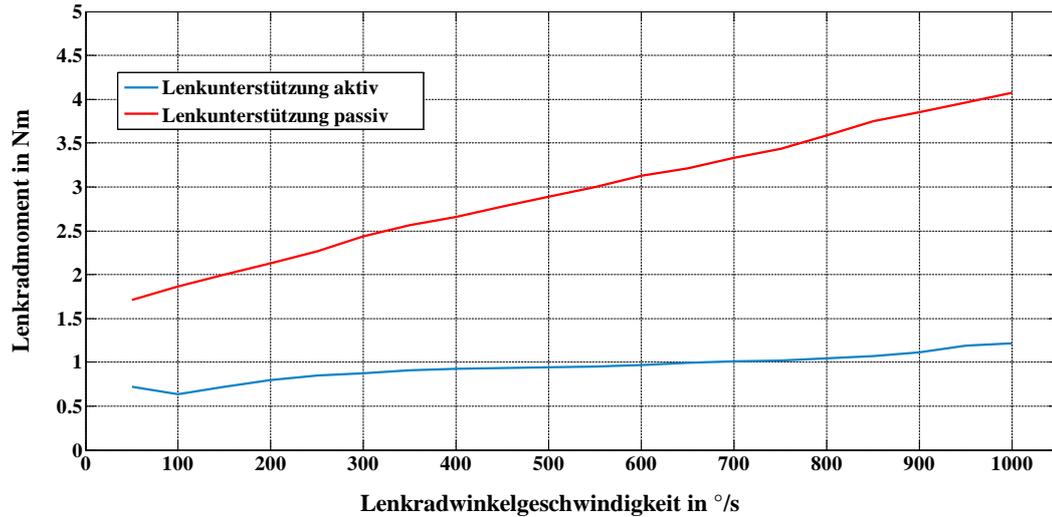


Abbildung 4.15: Einfluss der Lenkradwinkelgeschwindigkeit auf das Lenkradmoment (Vergleich Lenkunterstützung aktiv passiv)

### Leerdurchdrehmoment unter Lasteinfluss

Um die Einflüsse der Last auf das Leerdurchdrehmoment  $T_{LDM}$  zu untersuchen, wird eine konstante Kraft  $F_Z$  entgegen der Bewegungsrichtung des Lenksystems auf die Zahnstange aufgeprägt. Der Lenkradaktuator prägt den Lenkradwinkel mit einer konstanten Lenkradwinkelgeschwindigkeit auf. Der Spurstangenkraftaktuator erzeugt die konstante Kraft  $F_Z$  entgegen der Bewegungsrichtung der Zahnstange und ist über die Zahnstange und Lenkzwischenwelle mit der Lenksäule verbunden (vgl. mechanischer Aufbau Abb. 4.8). Die Versuchsreihe wird mit einer Variation der Zahnstangenkraft (Ersatzlast) von 0, 500, 1000, 1500, 2000 N durchgeführt (Tab. 4.4).

### Eingangs- und Messgrößen

Eingangsgrößen	Wertebereich	Messgrößen	Messbereich
Lenkradwinkel	+/- 400 °	Lenkradmoment	+/- 15 Nm
Lenkradwinkelgeschwindigkeit	50 - 900 °/s Schrittweite: 50 °/s	Lenkradwinkel	+/- 400 °
Zahnstangenkraft	0 - 2000 N Schrittweite: 500 N	Zahnstangenkraft	+/- 2000 N

Tabelle 4.4: Eingangs- und Messgrößen Testreihe Leerdurchdrehmoment unter Lasteinfluss

### Prüfstandkonfiguration

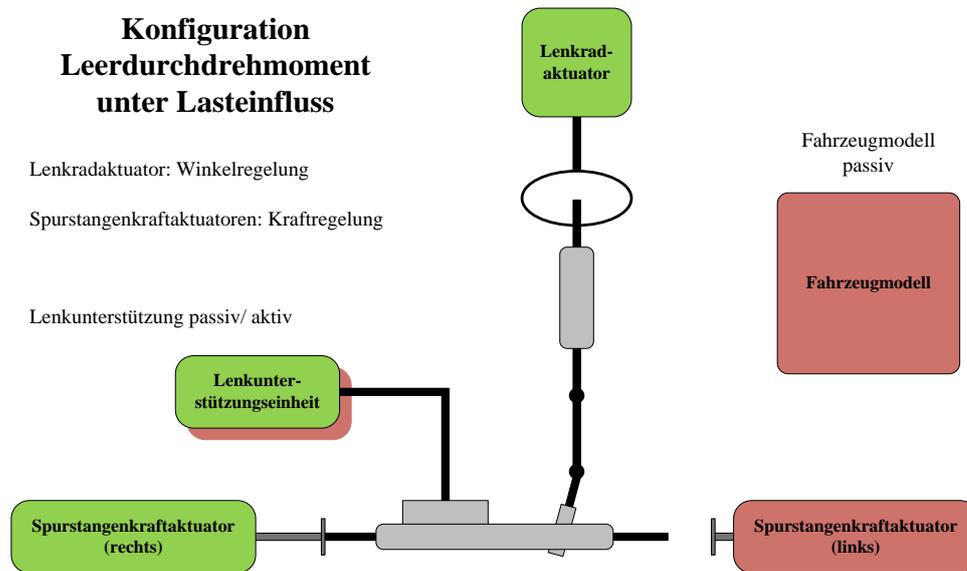


Abbildung 4.16: Prüfstandkonfiguration Leerdurchdrehmoment unter Lasteinfluss

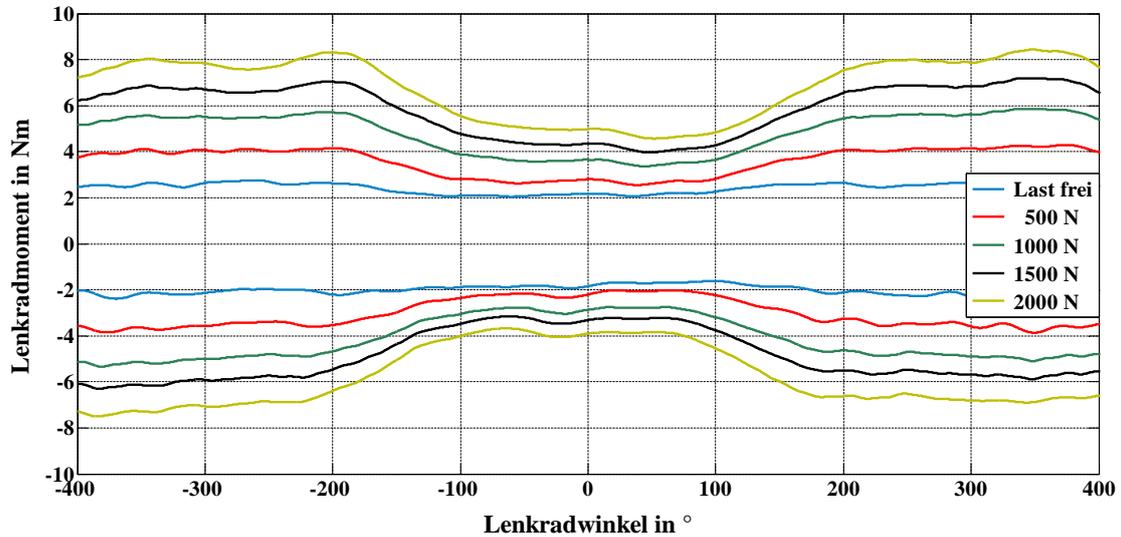
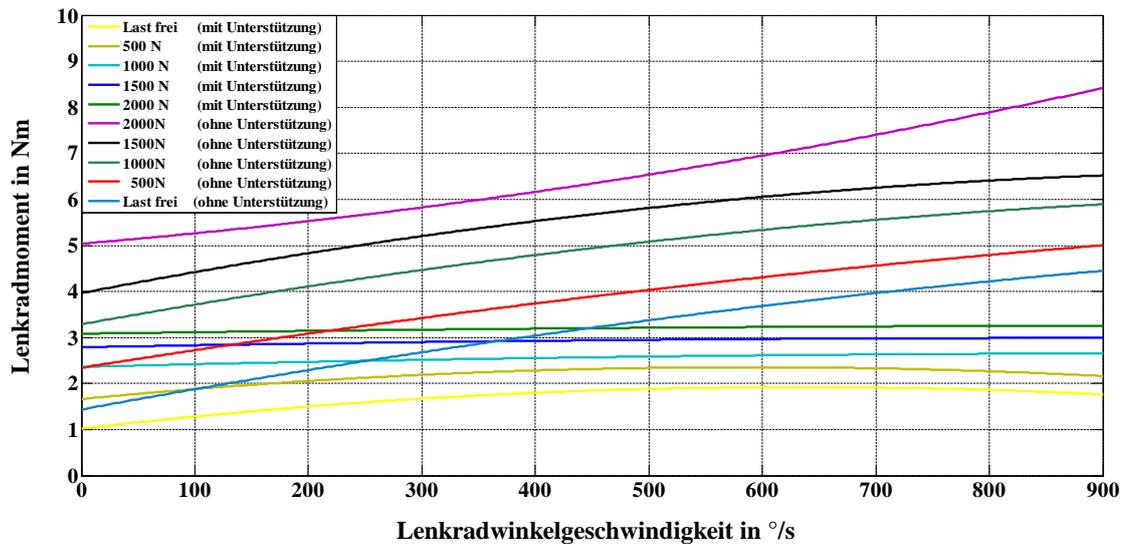


Abbildung 4.17: Einfluss der Last auf das Leerdurchdrehmoment ( $v_{LR} = 150 \text{ }^\circ/\text{s}$ )

$$T_{LDM} = T_G - T_Z + T_L \quad (4.7)$$

$$T_Z = F_Z * r_{Rv} \quad (4.8)$$

In Abbildung 4.17 ist nach Gleichung (4.7) der Anteil im Lenkradmoment  $T_Z$  resultierend aus der aufgeprägten Zahnstangenkraft  $F_Z$  subtrahiert. Das Leerdurchdrehmoment  $T_{LDM}$  setzt aus den Anteilen des Basisleerdurchdrehmoments  $T_G$  und des zusätzlichen Leerdurchdrehmoments  $T_L$ , resultierend aus der Zahnstangenlast  $F_Z$ , zusammen. Da nach der Subtraktion der Einfluss der variablen Lenkübersetzung sichtbar ist, wird der zusätzliche Anteil der Reibung aus der aufgeprägten Last von der translatorischen Bewegung der Zahnstange erzeugt. Ursache hierfür ist eine erhöhte Reibung in den Lagerstellen (Führung der Zahnstange und Druckstück).



**Abbildung 4.18:** Einfluss der Last und der Lenkradwinkelgeschwindigkeit auf das Leerdurchdrehmoment (mit und ohne aktiver Lenkunterstützung)

In Abbildung 4.18 ist der Einfluss der Lenkradwinkelgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}_{LR}$ , (5-200 °/s) über den Lastbereich der Zahnstangenkraft  $F_Z$  (0-2000 N) auf das Leerdurchdrehmoment  $T_{LDM}$  dargestellt. Das Diagramm beinhaltet die Testreihen jeweils mit und ohne aktive Lenkunterstützung. Für jede Testreihe mit konstanter Lenkradwinkelgeschwindigkeit wurde der betragsmäßige Mittelwert des Leerdurchdrehmoments bestimmt. Mit steigender Zahnstangenkraft  $F_Z$  steigt das Leerdurchdrehmoment  $T_{LDM}$  mit deaktivierter Lenkunterstützung an. Bei den Testreihen mit aktiver Lenkunterstützung ist dieses Verhalten nur noch bedingt ausgeprägt. Durch eine zusätzliche Zahnstangenlast steigt das Leerdurchdrehmoment geringfügig an und ist über den gesamten Lenkradwinkelgeschwindigkeitsbereich nahezu konstant. Die mechanischen Einflüsse auf das Reibungsverhalten des Lenksystems werden über die Applikation der Lenkungsfunktionen (Verstärkungskennlinie, Reibungskompensation) kompensiert.

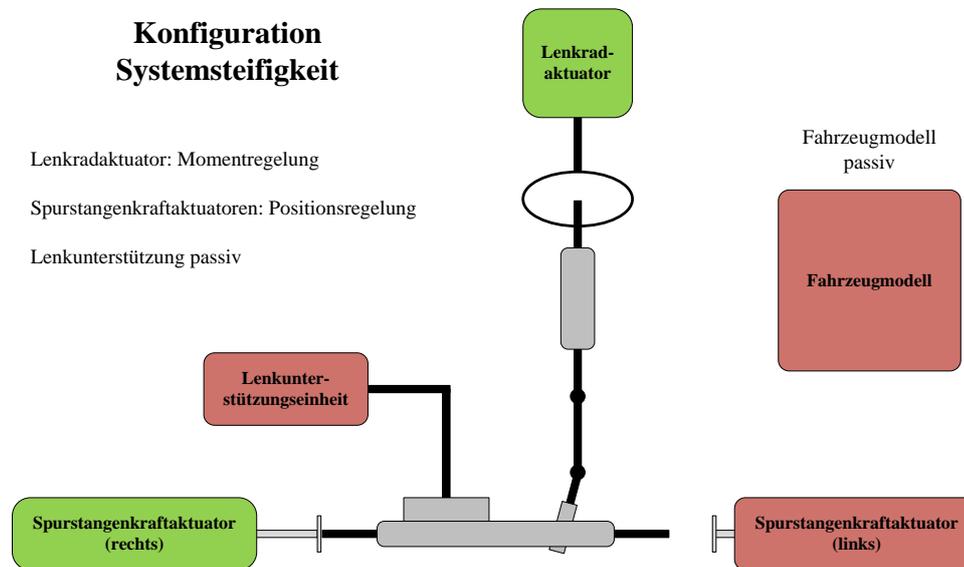
Für das Leerdurchdrehmoment  $T_{LDM}$  ergeben sich analog zur Systemreibung die folgenden Einflussgrößen (Gl. 4.9). Das Leerdurchdrehmoment  $T_{LDM}$  steigt mit der Lenkradwinkelgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}_{LR}$ . Eine weitere Einflussgröße ergibt sich aus der Zahnstangenlast  $F_Z$ , wodurch das Leerdurchdrehmoment  $T_{LDM}$  ansteigt. Durch die aktive Lenkunterstützung (resultierendes Zusatzmoment  $T_{UE}$ ) kann dieses Verhalten in beiden Fällen kompensiert werden. Der Einfluss der Temperatur  $T_{mp}$  wurde auf Grund der fehlenden Prüfstandeinrichtung nicht näher untersucht. Da in den Testreihen das gesamte Lenksystem untersucht wurde, beinhalten die Ergebnisse die Reibung der Lenksäule in den Lagerstellen. Im Fahrzeug ergibt sich ein weiterer Reibungsanteil durch die Faltenbälge an den Spurstangen und der Lenkmanschette. Die Lenkmanschette führt die Lenkzwischenwelle in der Trennwand zwischen Innen- und Motorraum. Die Faltenbälge wurden in den Testreihen entfernt und nicht berücksichtigt.

$$T_{LDM} = f(T_{mp}, \dot{\varphi}_{LR}, T_L, T_{UE}) \quad (4.9)$$

### 4.2.3 Systemsteifigkeit

Für ein gutes Führungs- und Rückmeldeverhalten ist eine steifes Lenksystem von Vorteil. Bei der Auslegung eines Lenksystems wird ein Kompromiss zwischen Sportlichkeit und Komfort getroffen. Ein Lenksystem mit einer hohen Steifigkeit überträgt Störimpulse stärker auf das Lenkrad [57]. Die Steifigkeit des Lenksystems setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen. Den dominierende Anteil auf die Charakteristik der Steifigkeit hat der Drehstab zur Sensierung des anliegenden Drehstabmoments. Es ist eines der Bauteile mit der geringsten Steifigkeit im Gesamtsystem Lenkung. Weitere Einflussgrößen auf die Steifigkeit haben die Lenkzwischenwelle und das Druckstückspiel. Die Ermittlung der Gesamtsteifigkeit des Lenksystems kann sowohl durch Verdrehung der Lenksäule als auch durch Verschiebung der Zahnstange erfolgen. Da die Bauteile mit dem größten Einfluss auf Torsion belastet werden, wird die Charakteristik hinsichtlich Systemsteifigkeit in der Lenksystementwicklung durch Aufprägen eines definierten Lenkradmoments und Verklemmung der Zahnstange ermittelt. In dieser Arbeit wurde zusätzlich eine Testreihe durchgeführt, in welcher die Zahnstange verschoben und das Lenkrad verklemmt wurde.

## Prüfstandkonfiguration



**Abbildung 4.19:** Prüfstandkonfiguration zur Ermittlung der Systemsteifigkeit durch Verdrehung der Lenksäule

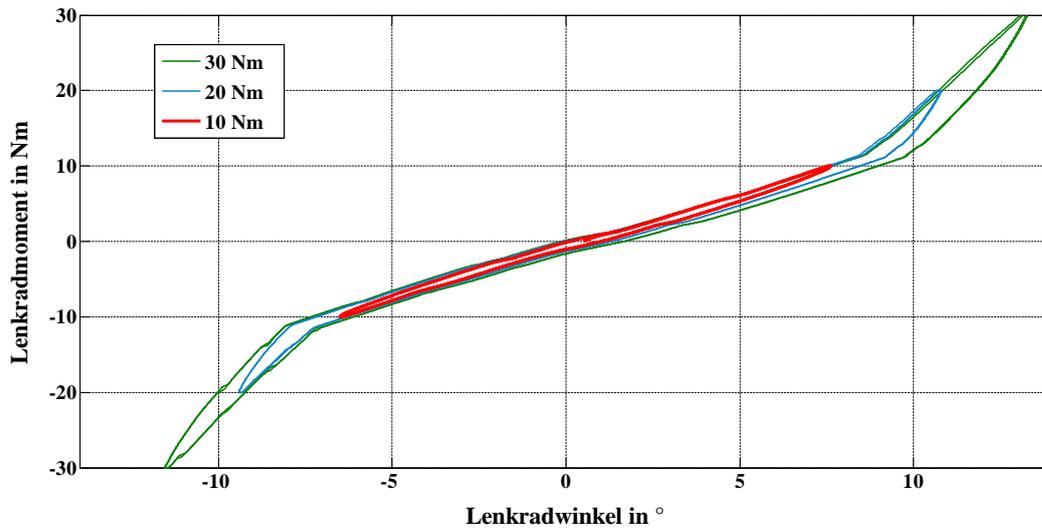
Das Lenksystem ist mit dem Lenkradaktuator und dem rechten Spurstangenkraftaktuator verbunden. Der Spurstangenkraftaktuator wird im Modus Positionsregelung betrieben. Durch Vorgabe einer statischen Position wird die Zahnstange gefesselt. Die Regelgüte des Spurstangenkraftaktuatoren im statischen Bereich liegt bei ca. 0.01 mm, so dass der Einfluss des Aktuators vernachlässigt werden kann. Über den Lenkradaktuator wird im Modus Momentregelung das Lenkradmoment in Form einer Rampe aufgeprägt. Der resultierende Lenkradwinkel und das aufgeprägte Lenkradmoment werden aufgezeichnet. Gemäß den Vorgaben in Tabelle 4.5 werden verschiedene Lenkradmomentrampen aufgeprägt. Durch die Variation des maximalen Lenkradmoments kann schrittweise der mechanische Anschlag (Messbereichsendwert) des Drehstabs ermittelt werden.

### Eingangs- und Messgrößen

Eingangsgrößen	Wertebereich		Messgrößen	Messbereich
Lenkradmoment	+/- 10 - 30 Nm SW: 10 Nm		Lenkradmoment	+/- 30 Nm
			Lenkradwinkel	+/- 50 °

**Tabelle 4.5:** Eingangs- und Messgrößen Testreihe Systemsteifigkeit

## Testreihen und Auswertung



**Abbildung 4.20:** Auswertung der Systemsteifigkeit bei Anregung mit verschiedenen Lenkradmomentenrampen und blockierter Zahnstange

In den Ergebnissen (Abb. 4.20) der Testreihen ist der Einfluss des Drehstabs zu erkennen. Ab einem aufgeprägten Lenkradmoment von 12 Nm ist keine Verdrehung des Drehstabs mehr möglich. Die Verdrehung wird durch einen mechanischen Endanschlag begrenzt. Der Endanschlag weist eine sehr hohe Steifigkeit auf, so dass ab 12 Nm die Steifigkeit der Lenkzwischenwelle (LZW) und das Druckstückspiel (DSS) die Charakteristik prägen ( $C_{LS}$ ). Zudem zeigt sich bei den Testreihen mit verschiedenen Lenkradmomentenrampen um die Nulllage keine horizontale Ausprägung der Hysterese, so dass kein Spiel im Lenksystem vorhanden ist. Spiel um die Nulllage führt zu einem indifferenten Fahrgefühl [57]. In Gleichung (4.10) ist die Gesamtdrehsteifigkeit  $C_{GD}$  des Lenksystems und die anteiligen Steifigkeiten des Drehstabs  $C_{DS}$  sowie der Reststeifigkeit (LZW, DSS)  $C_{LS}$  aufgeführt.

$$\frac{1}{C_{GD}} = \frac{1}{C_{DS}} + \frac{1}{C_{LS}} \quad (4.10)$$

Die Ermittlung der Anteile zur Systemsteifigkeit dienen zur Ermittlung der realen Steifigkeit des Drehstabs  $C_{DS}$ . Die Versuchsreihen am Prüfstand haben gezeigt, dass die Drehstabsteifigkeiten  $C_{DS}$  einer Streuung unterliegen. Ein exakt ermittelte Drehstabsteifigkeit erhöht die Güte bei einer Modellierung des Lenksystems. Bei Testreihen mit mehreren Lenksystemen des gleichen Typs kann die Streuung der Gesamt- bzw. Bauteilsteifigkeiten ermittelt werden.

### Anregung über die Zahnstange bei aktiver Unterstützung

Die Ermittlung der Systemsteifigkeit über die Zahnstange wird mit aktivem Lenksystem durchgeführt. Nach der Prüfstandkonfiguration in Abbildung 4.21 ist das Lenkrad torsionssteif befestigt. Über die Zahnstange wird eine Krafterampe gemäß den Angaben in Tabelle 4.6 aufgeprägt. Über das Ritzel im Lenkgetriebe wird die Verschiebung in eine Verdrehung umgesetzt. Durch das blockierte Lenkrad findet eine Verdrehung des Drehstabs statt, wodurch eine Unterstützungskraft auf die Zahnstange aufgeprägt wird. Diese Kraft wirkt entgegen der aufgeprägten äußeren Kraft des Zahnstangenkraftaktuators. Somit entsteht eine zusätzliche Steifigkeit, verursacht durch den Kraftanteil der Unterstützungskraft.

### Prüfstandkonfiguration

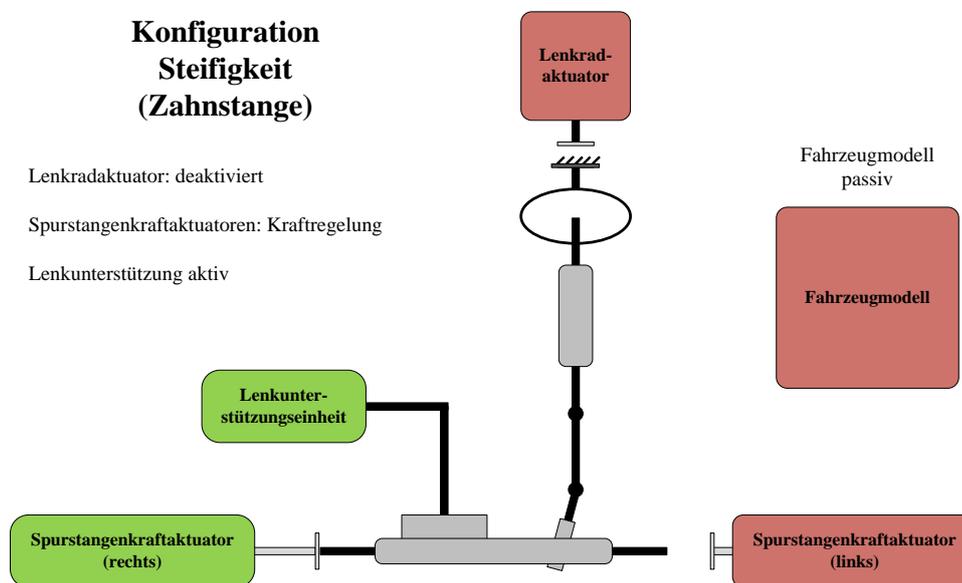
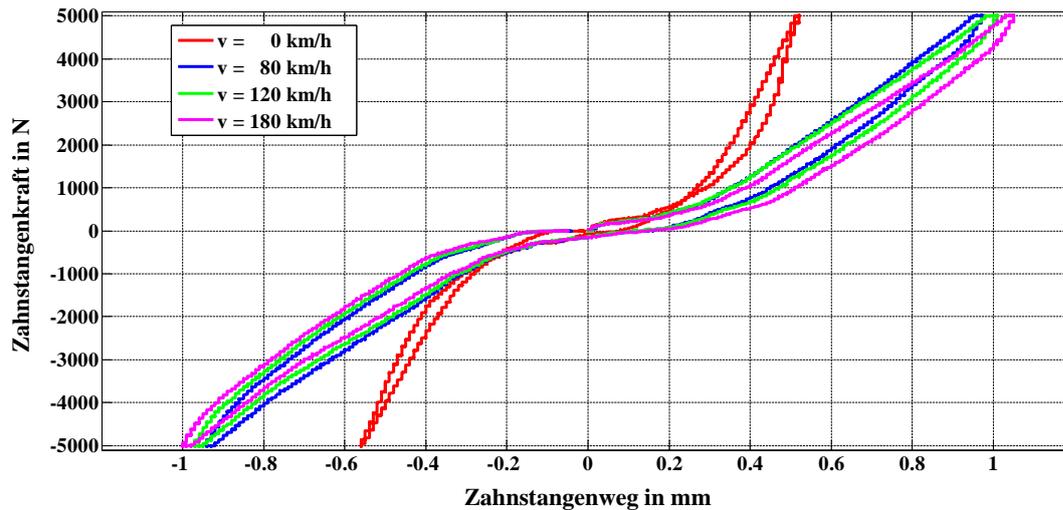


Abbildung 4.21: Prüfstandkonfiguration zur Ermittlung der Systemsteifigkeit durch statische Anregung der Zahnstange

### Eingangs- und Messgrößen

Eingangsgrößen	Wertebereich	Messgrößen	Messbereich
Zahnstangenkraft	+/- 5 kN	Zahnstangenkraft	+/- 5 kN
		Zahnstangenweg	+/- 2 mm

Tabelle 4.6: Eingangs- und Messgrößen Testreihe Systemsteifigkeit



**Abbildung 4.22:** Auswertung der Systemsteifigkeit bei Anregung mit einer Zahnstangenkrafttrampe und Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit

Der Einfluss der Unterstützungskraft ist in Diagramm 4.22 sichtbar. Durch Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit (simulative Vorgabe über die Restbussimulation) reduziert sich die Unterstützungskraft bei höheren Geschwindigkeiten. Analog wird die Systemsteifigkeit geringer. Im Parkierbereich ( $v = 0$  km/h) erreicht die Systemsteifigkeit ihr Maximum. Da die Lenkunterstützung aktiv ist, wird der mechanische Endanschlag in den Messungen nicht erreicht. Die Gesamtsteifigkeit  $C_{GZ}$  des Lenksystems bei Aufprägung einer Zahnstangenkrafttrampe ist abhängig von der Lenkunterstützung  $F_{UE}$ , der Drehstabsteifigkeit  $C_{DS}$  und der Reststeifigkeit  $C_{LS}$  des Lenksystems.

$$C_{GZ} = f(C_{DS}, C_{LS}, F_{UE},) \quad (4.11)$$

Mit dieser Testreihe kann die quasi-statische Lenksystemsteifigkeit bewertet werden und ergänzend zu den Testreihen zur Charakterisierung des Übertragungsverhaltens von Lenksystemen in Kapitel 4.3 herangezogen werden.

#### 4.2.4 Verstärkungskennlinie

Die Verstärkungskennlinie ist die Hauptapplikationsgröße eines Lenksystems. Über die Verstärkungskennlinie wird die Lenkunterstützung in Abhängigkeit des anliegenden Drehstabmoments dargestellt. Es stellt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen anliegender Zahnstangenkraft, Drehstabmoment und Unterstützungskraft ein. Für jede Zahnstangenkraft  $F_Z$  ergibt sich eine Summe aus dem Drehstabmoment  $T_{DS}$  und der Unterstützungskraft  $F_{UE}$  (Gl. 4.12 für ein Lenksystem mit achsparallelem Antrieb). Diese Funktionalität wird entsprechend appliziert, um das gewünschte Lenkgefühl dem Fahrer zu vermitteln. Je nach Bauart des Lenksystems unterscheidet sich die Ausgangsgröße der Kennlinie. Bei konventionellen hydraulischen Lenkgetrieben wird die Verstärkungskennlinie (Ventilkurve) über die Abstimmung des Drehschiebeventils dargestellt. Das Drehschiebeventil stellt den hydraulischen Druck (Ausgangsgröße) abhängig vom Drehstabmoment ein und steuert den Druck in die entsprechenden Zylinderkammer [57]. Die Angaben in der Verstärkungskennlinie eines hydraulischen Lenksystems beziehen sich auf den Differenzdruck der beiden Zylinderkammern und dem anliegenden Drehstabmoment.

Bei elektromechanischen Lenksystemen erfolgt die Abstimmung der Verstärkungskennlinie softwarebasiert. In einem Applikationsmodul sind Kennlinien für verschiedene Fahrzeuggeschwindigkeiten hinterlegt. Bei einem konventionellen Regelungskonzept wird abhängig vom sensierten Drehstabmoment ein Wert für den Strom (Ausgangsgröße) zur Ansteuerung des Elektromotors der Unterstützungseinheit ausgegeben. Bei der Applikation von Lenksystemen mit einem Closed-Loop Regelungskonzept wird abhängig von der Zahnstangenkraft ein Sollhandmoment vorgegeben. Bei beiden Ansätzen resultiert eine Gesamtzahnstangenkraft aus Unterstützungskraft und Fahrerhandmoment (Lenkradmoment).

$$F_Z = T_{UE} \cdot i_{KGT} \cdot i_{RT} + T_{DS} \cdot i_R \quad (4.12)$$

Zur Ermittlung der Verstärkungskennlinien in verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeitsbereichen wird die Prüfstandkonfiguration analog zur Ermittlung der Systemsteifigkeit verwendet. Zusätzlich wird die Unterstützungseinheit aktiviert. Durch die Ansteuerung des Lenksystems über die Restbussimulation wird die Fahrzeuggeschwindigkeit vorgegeben. Die Zahnstange wird durch den Zahnstangenkraftaktuator in Position gehalten und über den Lenkradaktuator wird die Lenkradmomentrampe aufgebracht. In mehreren Testdurchläufen wird die Fahrzeuggeschwindigkeit variiert (Tab. 4.7).

## Prüfstandkonfiguration

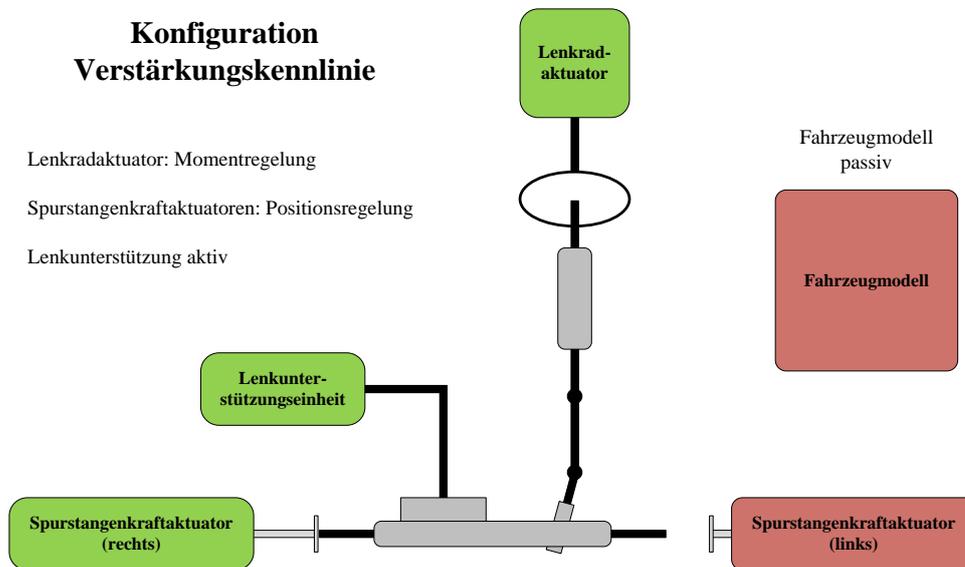


Abbildung 4.23: Prüfstandkonfiguration Verstärkungskennlinie

## Eingangs- und Messgrößen

Eingangsgrößen	Wertebereich		Messgrößen	Messbereich
Lenkradmoment	+/- 10 Nm		Lenkradmoment	+/- 10 N m
Zahnstangenweg	-		Lenkradwinkel	+/- 20 °
			Zahnstangenkraft	+/- 18 kN

Tabelle 4.7: Eingangs- und Messgrößen Testreihe Verstärkungskennlinie

In Tabelle 4.7 sind die Eingangs- und Messgrößen zur Ermittlung der Verstärkungskennlinie aufgeführt. Da der Spurstangenkraftaktuators im Modus Positionsregelung betrieben wird, ist kein definierter Wertebereich angegeben. Die beim Messungsstart aktuelle Position wird als Istwert übernommen und der Aktuator wird mit diesem Wert in der Position geregelt. Die Regelgüte des Spurstangenkraftaktuators liegt im Bereich von +/- 0.02 mm.

## Testreihen und Auswertung

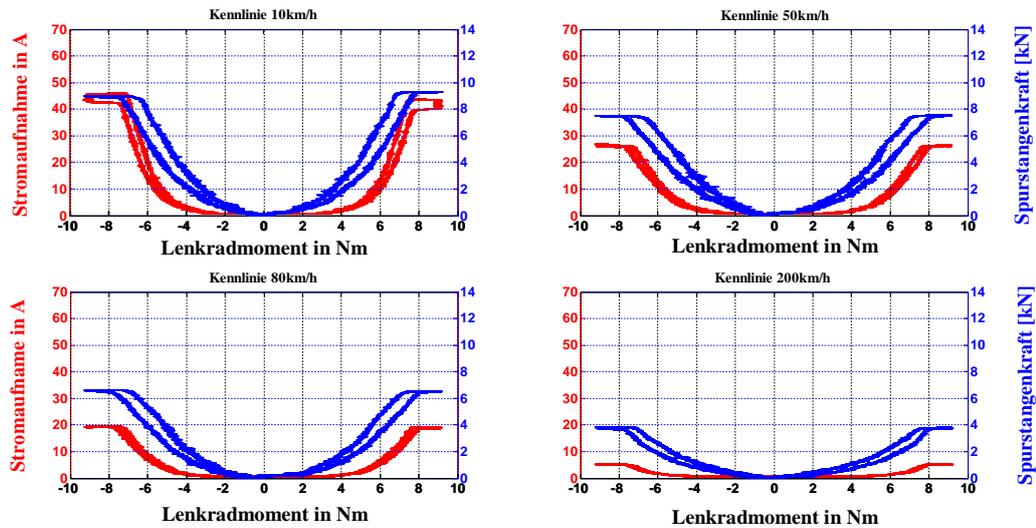


Abbildung 4.24: Verstärkungskennlinie bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten

Das Diagramm zeigt die Verstärkungskennlinien für die angegebenen Geschwindigkeiten. Auf den beiden Ordinatenachsen wird die resultierende Zahnstangenkraft und analog die Stromaufnahme der Unterstützungseinheit angegeben. In die Unterdiagrammen sind die unterschiedlichen charakteristischen Abstimmungen in den Geschwindigkeitsbereiche deutlich zu erkennen. Bei Lenkradmomenten bis 2 Nm ist in bei allen Kennlinien die Unterstützung mäßig. Hohe Unterstützungskräfte bei kleinen Lenkradmomenten führen zu einem losen Mittengefühl. Erst bei höheren Lenkradmomenten werden die Unterschiede deutlich. Im stillstandsnahen Bereich ( $<10$  km/h) wird durch die Unterstützungseinheit bei hohen Lenkradmomenten eine hohe Unterstützungskraft generiert. Beim Parkieren treten die größten Lenkkräfte auf und der Fahrer muss entsprechend unterstützt werden. Im Gegensatz hierzu sind bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten und sehr niedriger Querbeschleunigung die Lenkkräfte gering und das Fahrzeug kann durch eine geringe Unterstützungsleistung sicher geführt werden. Entsprechend ist die Verstärkungskennlinie appliziert. Die Unterstützungskraft  $F_Z$  ist abhängig vom anliegenden Drehstabmoment  $T_{DS}$  und Strom  $I_{UE}$  der Unterstützungseinheit (Gl. 4.13).

$$F_{UE} = f(I_{UE}, T_{DS}) \quad (4.13)$$

Die Testreihe besitzt Gültigkeit für das quasi-statische Aufprägen einer Lenkradmomentrampe auf einer Prüfeinrichtung mit blockierter Zahnstange. In dieser Konfiguration sind keine weiteren Lenkzusatzfunktionen (Aktive Dämpfung, Reibungs- oder Trägheitskompensation) aktiv. Lenkmomentanforderungen von Fahrdynamik- oder Fahrerassistenzfunktionen werden nicht berücksichtigt.

### 4.2.5 Lenkübersetzung

Die auf dem Lenksystemprüfstand gemessene Lenkübersetzung beschreibt den Übersetzungsverlauf zwischen Lenkrad und Zahnstange. Beim Aufbau auf dem Lenksystemprüfstand wird ein Lenksystem bestehend aus Lenkgetriebe, Lenkzwischenwelle, Lenksäule und Lenkrad vermessen. Die Systemgrenzen und der Aufbau entsprechen der Darstellung in Unterabschnitt 3.3.1 in Abbildung 3.1. Durch die Verstellmöglichkeiten der Lenksäule in x- und z-Richtung können sich konstruktionsbedingte Kardanfehler durch die Kreuzgelenke der Lenkzwischenwelle ergeben. Bei modernen Lenksäulenkonstruktionen ist dieses Verhalten weniger ausgeprägt, da sich hier nur ein Einfluss aus der Höhenverstellung ergibt. Die Ermittlung der Lenkübersetzung und die Auswirkungen von verschiedenen Lenksäulenpositionen ist in Unterabschnitt 4.2.5 dokumentiert.

#### Prüfstandkonfiguration

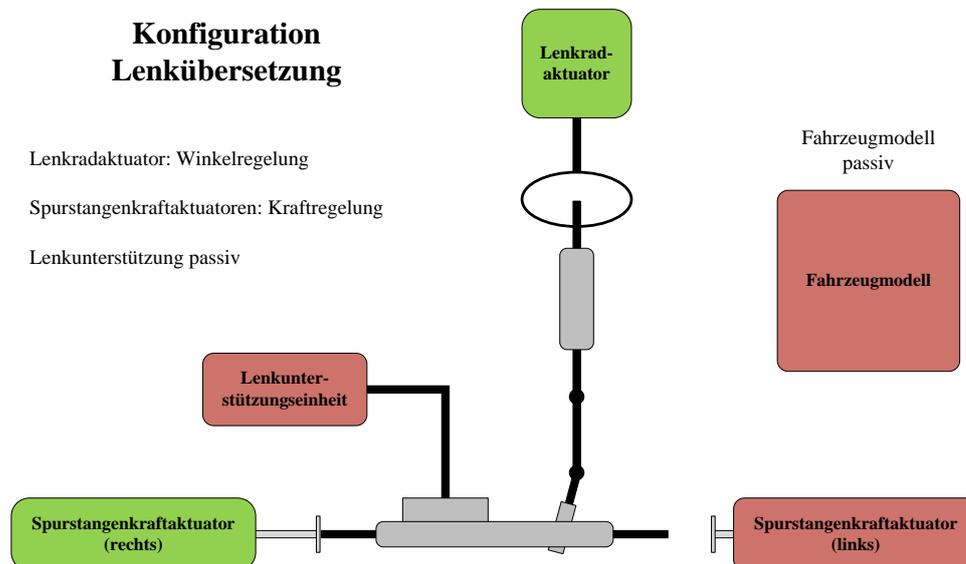


Abbildung 4.25: Prüfstandkonfiguration Lenkübersetzung

Zur Messung der Lenkübersetzung ist die Lenkunterstützung deaktiviert. Über den Lenkradaktuator wird der Lenkradwinkel aufgeprägt. Die Zahnstange ist mit dem rechten Spurstangenkraftaktuator verbunden, um die interne Wegmessung für die Erfassung der Zahnstangenposition zu nutzen. Die Kraftregelung wird auf den Wert  $F_Z = 0$  eingestellt, um den Lenkübersetzungsverlauf frei von äußeren Lasten messen zu können. Dies bedeutet, dass im Ergebnis der Testreihe die Elastizitäten der einzelnen Bauteile im Lenkstrang nicht enthalten sind.

Der Lenkübersetzungsverlauf beschreibt die kinematische Übersetzung zwischen Lenkrad und Zahnstange. Anhand des aufgeprägten Lenkradwinkels und der Zahnstangenposition wird gemäß Gleichung 4.14 die Lenkübersetzung berechnet.

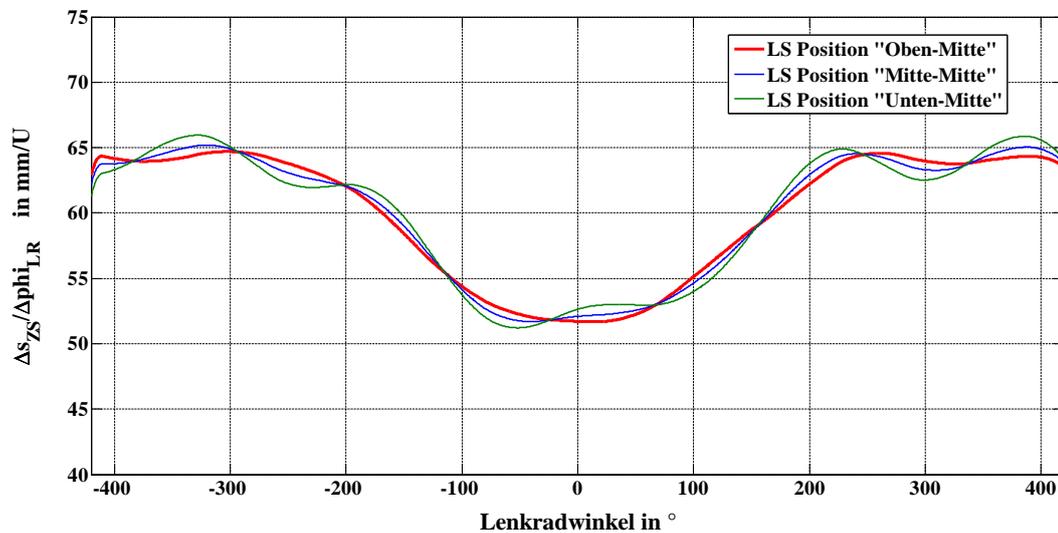
### Eingangs- und Messgrößen

Eingangsgrößen	Wertebereich	Messgrößen	Messbereich
Lenkradwinkel	+/- 450 °	Zahnstangenweg	+/- 70 mm
		Lenkradwinkel	+/- 450 °

**Tabelle 4.8:** Eingangs- und Messgrößen Testreihe Lenkübersetzung

Das verwendete Lenksysteme hat eine Lenksäule mit Höhen- und Längsverstellung (x- und z-Verstellung). Durch das Verstellen der Lenksäule können sich die Kardanwinkel der Lenkzwischenwelle ändern. Dieser Einfluss spiegelt sich im Lenkübersetzungsverlauf als eine Ungleichförmigkeit wieder. Die Längsverstellung der verwendeten Lenksäule hat Im Gegensatz zur Höhenverstellung keinen Einfluss auf die Kardanwinkel. Daher wurde in der Testreihe nur die Höhe der Lenksäule variiert.

### Testreihen und Auswertung



**Abbildung 4.26:** Einfluss der Lenksäulenverstellung in x- und z-Richtung auf die Lenkübersetzung

$$i_L = \frac{\Delta s_{zS}}{\Delta \varphi_{LR}} \cdot 360^\circ \quad (4.14)$$

Zur Berechnung und Darstellung des Lenkübersetzungsverlaufs  $i_L$  wird die Änderung des Zahnstangenweges bezogen auf die Änderung des Lenkradwinkels in der Einheit mm/U angegeben (Gl. 4.14) [57]. In den Lenkübersetzungsverläufen ist zu sehen, dass sich durch die Höhenverstellung eine Ungleichförmigkeit einstellt. Das Lenksystem hat eine variable Lenkübersetzung. Um die Mittellage ist die Lenkübersetzung kleiner als bei größeren Lenkradwinkeln, d.h. das Lenksystem ist indirekter. Somit reduziert sich der Lenkaufwand bei großen Lenkradwinkel (Parkieren). In den Ergebnissen ist der ideale Lenkübersetzungsverlauf, d.h. ohne eine Ungleichförmigkeit, in der Position "Oben-Mitte". In den anderen Positionen der Höhenverstellung ergibt sich eine geringe Ungleichförmigkeit, verursacht durch den Kardanfehler der Kreuzgelenke der Lenkzwischenwelle. In der Literatur [57] sind der Einfluss der Kardangelenke auf die Lenkübersetzung und die entsprechenden Formel zur Berechnung hinreichend beschrieben. Durch den Einfluss eines Kardanfehler entstehen Schwankungen im Lenkradmoment, welche das Lenkgefühl spürbar beeinflussen können. Daher sind bei der Auslegung eines Lenksystems, im speziellen bei der Positionierung des Lenksystems und der Auslegung der Lenkzwischenwelle, Kardanfehler zu vermeiden. Eine weitere Maßnahme ist eine Kompensation der Lenkradmomentschwankungen durch ein entsprechendes Softwaremodul.

### 4.2.6 Wirkungsgrad (Lenkleistung)

Zur Validierung des Lenksystems hinsichtlich der in einem Lastenheft geforderten Leistungsanforderungen wird die Lenkleistung und der Wirkungsgrad des Lenksystems ermittelt. Die Lenkleistung  $P_{ZS}$  berechnet sich aus der Zahnstangengeschwindigkeit  $v_{ZS}$  und der resultierenden Zahnstangenkraft  $F_{ZS}$  (Gl. 4.16) und ist die Ausgangsleistung  $P_A$  zur Berechnung des Wirkungsgrades. Die Eingangsleistung  $P_E$  (Gl. 4.15) berechnet sich aus der Leistung der Unterstützungseinheit  $P_{UE}$  und der Leistung  $P_H$  resultierend aus dem Lenkradmoment  $T_{LM}$  (Handmoment) und der Lenkradwinkelgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}_{LR}$ . Der Wirkungsgrad  $\mu_{EPS}$  berechnet sich nach Gleichung (4.17). Die resultierende Zahnstangengeschwindigkeit  $v_{ZS}$  wird je nach Definition der Schnittstelle am Lenksystem am Lenktrieberitzel oder am Lenkrad aufgeprägt.

Für die Generierung einer konstante Zahnstangengeschwindigkeit sind eine etwaige variable Lenkübersetzung oder konstruktionsbedingte Kardanfehler durch die Kreuzgelenke der Lenkzwischenwelle zu berücksichtigen. Am Lenksystemprüfstand wird hierzu die Eingangsgröße über den am Lenkrad befestigten Lenkradaktuator aufgeprägt. Um die zuvor beschriebenen Einflüsse zu berücksichtigen wird in einem Vortest zunächst die resultierende Lenkradwinkelgeschwindigkeit durch Aufprägen einer konstanten Zahnstangengeschwindigkeit durch den Spurstangenkraftaktuator ermittelt und schrittweise erhöht. Der gewonnene Datensatz mit den resultierenden Lenkradwinkelgeschwindigkeit wird für die Ermittlung des Wirkungsgrads als Eingangsgröße verwendet.

Der Lenkradaktuator generiert mit den diesen Eingangsdaten unabhängig von mechanischen Einflüssen die entsprechende konstante Zahnstangengeschwindigkeit. Der Spurstangenkraftaktuator generiert entsprechend den Anforderungen des Lenksystems eine konstante Zahnstangenkraft. Im Testablauf wird bei einer konstanten Zahnstangenkraft die Lenkradwinkelgeschwindigkeit mit der definierten Schrittweite nach jedem Durchschieben der Zahnstange erhöht. Nach dem Durchlaufen der Testreihe mit der Steigerung der Zahnstangengeschwindigkeit wird beim nächsten Durchlauf die Zahnstangenkraft gesteigert. Je nach Schrittweite von Zahnstangengeschwindigkeit und Zahnstangenkraft ergibt sich ein feinmaschiges Leistungskennfeld mit den dazugehörigen Leistungshyperbeln.

$$P_E = P_{UE} + P_H = U_{Bat} \cdot I_{UE} + T_{LM} \cdot \dot{\varphi}_{LR} \quad (4.15)$$

$$P_A = P_{ZS} = F_{ZS} \cdot v_{ZS} \quad (4.16)$$

$$\mu_{EPS} = \frac{P_{ZS}}{P_E} \cdot 100\% \quad (4.17)$$

### Prüfstandkonfiguration

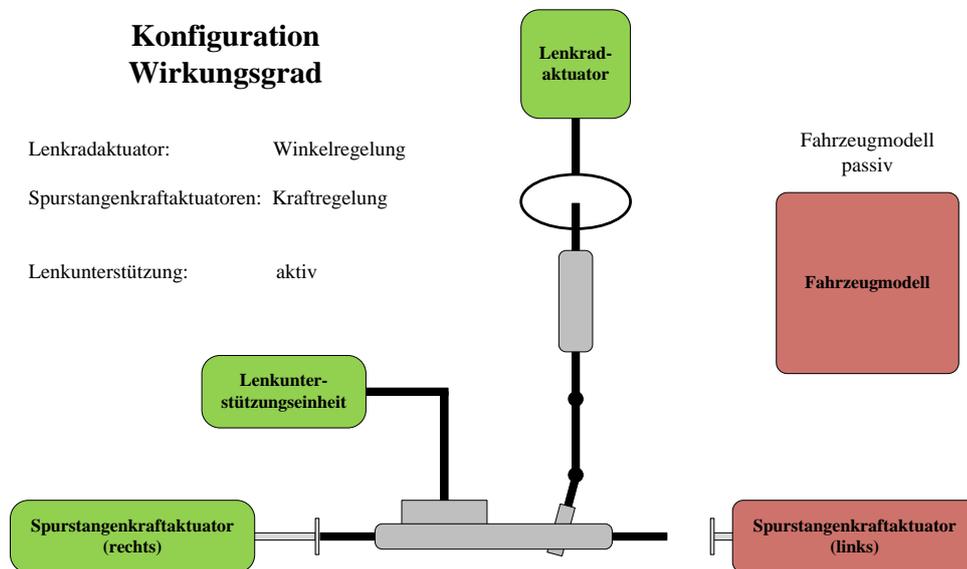


Abbildung 4.27: Prüfstandkonfiguration Wirkungsgrad

Zur Ermittlung der Lenkleistung und des Wirkungsgrads wird das Lenksystem mit dem rechten Spurstangenkraftaktuator und dem Lenkradaktuator verbunden. Die Lenkunterstützungseinheit ist aktiv und wird vom internen Netzgerät des Lenksystemprüfstands mit Energie versorgt. Je nach Testanforderung wird das Spannungsniveau und die maximale Stromaufnahme eingestellt. Somit können neben den mechanischen Größen (Zahnstangenkraft und Zahnstangengeschwindigkeit) auch die elektrischen Größen (Spannung und maximale Stromaufnahme) variiert werden.

### Eingangs- und Messgrößen

Eingangsgrößen	Wertebereich		Messgrößen	Messbereich
Zahnstangen- -geschwindigkeit	5 - 250 mm/s Schrittweite: 10 mm/s		Stromaufnahme	0 - 200 A
Zahnstangenkraft	500 - 8500 N Schrittweite: 500 N		Lenkradmoment	0 - 10 Nm
Spannung	14 V			

**Tabelle 4.9:** Eingangs- und Messgrößen Testreihe Wirkungsgrad

Die Berechnung der Lenkleistung und des Wirkungsgrads erfolgt nach den Gleichungen 4.15 - 4.17. Dabei sind die Eingabegrößen nach Tabelle 4.9 Vorgabegrößen durch den Lenksystemprüfstand. Die Stromaufnahme und des Lenkradmoment (Handmoment) sind aus den Eingabegrößen resultierende Messgrößen und bestimmen den Wirkungsgrad bzw. die Lenkleistung. Das Lenkradmoment ist auf 10 Nm begrenzt, da dies auch dem maximalen Fahrerhandmoment im realen Betrieb entspricht. Zudem zeigt die Testreihe zur Systemsteifigkeit (Unterabschnitt 4.2.3, Abb. 4.20), dass über 10 Nm der Drehstab im den mechanischen Endanschlag anliegt und damit der Endbereich des Drehmomentsensors erreicht ist.

### Temperaturkompensation der Wirkungsgradberechnung

Zur Berücksichtigung von Temperatureinflüssen wird eine Korrekturkurve ermittelt. Hierzu wird eine Testreihe bei einer konstanten Zahnstangenkraft und Lenkradwinkelgeschwindigkeit mehrere Male wiederholt. Hierdurch steigt die Temperatur des Lenkgetriebes stetig an. Da der Lenksystemprüfstand eine hohe Reproduzierbarkeit gewährleistet, resultiert der sinkenden Wirkungsgrad rein aus der steigenden Temperatur. Aus den gewonnenen Daten wird eine Korrekturkurve für den zulässigen Temperaturbereich des Lenkgetriebes ermittelt (bis ca. 110 °C).

### Testreihen und Auswertung

In Abbildung 4.28 sind die Ergebnisse der Wirkungsgradmessung in einem Leistungsdiagramm dargestellt. Die Leistungshyperbeln zeigen den Leistungsbereich des Lenksystems. Der Wirkungsgrad ist über eine Skala farblich im Diagramm hinterlegt. Entscheidend für die Lenksystemleistung und die Bestätigung der Grundauslegung ist die Leistungsgrenzkurve. Bei niedrigen Zahnstangengeschwindigkeit werden hohe Zahnstangenkräfte erreicht (Parkieren), während bei hohen Zahnstangengeschwindigkeiten die maximale Zahnstangenkraft reduziert ist. Für die Energieversorgung und die Bordnetzlast ist der Wirkungsgrad von zentraler Bedeutung. Lenksysteme mit einer hohen Effizienz senken zusätzlich den Energieverbrauch eines Fahrzeugs. Das getestete Lenksystem hat bei mittleren Zahnstangengeschwindigkeiten und -kräften den besten Wirkungsgrad.

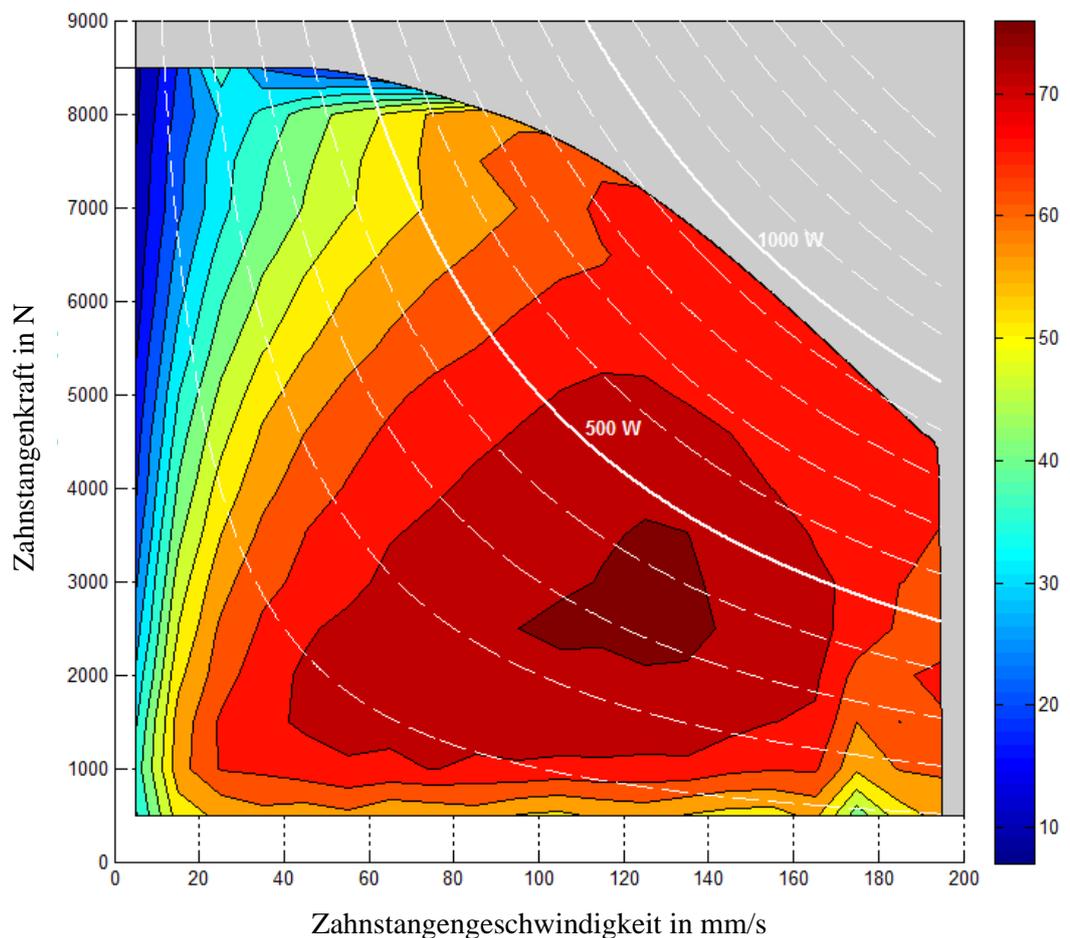


Abbildung 4.28: Wirkungsgradkennfeld mit Leistungshyperbeln

### 4.3 Charakterisierung des Übertragungsverhaltens

Die Übertragungsfunktion  $G(s)$  eines technischen Systems beschreibt die Abhängigkeit des Ausgangssignals  $Y(s)$  von dessen Eingangssignal  $U(s)$  (Gl. 4.18). Das Übertragungsverhalten eines Systems dient zur Charakterisierung von technischen Systemen. In der Regelungstechnik unterscheidet man hierbei zwischen dem Führungsverhalten und dem Störungsverhalten. Das Führungsverhalten ist definiert als die Auswirkung einer Führungsgrößenänderung auf die Regelgröße. Das Störungsverhalten ist definiert als eine Auswirkung einer Änderung der Versorgungs- oder Lastgröße auf die Regelgröße [49]. In der Lenksystementwicklung wird die Übertragungsfunktion als Mittel zur Objektivierung des Führungs- und Rückmeldeverhaltens herangezogen. Das Übertragungsverhalten von Lenksystemen unterteilt sich in die zwei Bereiche Führungsverhalten und Rückmeldeverhalten. Das Führungsverhalten beschreibt die Eigenschaft eines Fahrzeugs Lenkbefehle durch den Fahrer unmittelbar und für jede Geschwindigkeit beherrschbar umzusetzen. Das Rückmeldeverhalten definiert die Fähigkeit der Informationsübermittlung des Lenksystems durch eine Änderung des Lenkradmoments. Diese Änderung wird verursacht durch Radlast-, Seitenkraft- oder Längskraftschwankungen [26, 57].

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (4.18)$$

In der Literatur sind bereits Veröffentlichungen vorhanden, welche das Übertragungsverhalten von Lenksystemen untersuchten. Die Untersuchungen zum Übertragungsverhalten wurden im Fahrzeug durchgeführt oder anhand Simulationen bewertet. Prüfeinrichtungen wurden bisher nur als Hilfsmittel zur Bewertung von spezifischen Bauteileigenschaften von Lenksystemen verwendet. So untersuchte [51] das Übertragungsverhalten eines hydraulischen Lenksystems und analysierte hierbei die Einflussgrößen der verschiedenen Bauteile. Eine ganzheitliche Bewertung von elektromechanischen Lenksystemen hinsichtlich der verschiedenen Charaktereigenschaften und ein Vergleich von verschiedenen Lenksystemkonzepten sind in der Fachliteratur bisher kaum untersucht worden. Um diese Lücke zu schließen wird in den folgenden Unterabschnitten das Führungs- und Rückmeldeverhalten von Lenksystemen anhand von Testreihen untersucht und bewertet. Für die Untersuchungen auf dem Lenksystemprüfstand wird dieser in verschiedenen Konfigurationen betrieben.

### 4.3.1 Analyse des Führungsverhaltens

Zur Bewertung des Führungsverhaltens eines Lenksystems wird in der Lenksystementwicklung der Frequency-Response Test nach ISO 8726 [38] herangezogen. Es wird die Übertragungsfunktion der Fahrzeugreaktion (Gierrate, Querbeschleunigung) auf den Lenkradwinkel ermittelt und in Amplituden- und Phasengang Diagramm dargestellt. Schwerpunkt bei der Auswertung stellen die Stärke der Fahrzeugreaktion und das zeitliche Verhalten durch die Lenkradwinkeleingabe dar [57]. Die Lenkradwinkeleingabe ist ein Sinussignal mit kontinuierlich steigender Frequenz. Da es sich bei diesem Versuch um einen Open-Loop Test (1.3.2) aus dem Fahrversuch handelt, ist dementsprechend die Aktuatorik und Messtechnik des Lenksystemprüfstand hinsichtlich eines Versuchs auf Gesamtfahrzeugebene konfiguriert (Abb. 4.29). Das Fahrzeugmodell berechnet die aus dem Fahrmanöver und der Lenkradwinkeleingabe resultierende Zahnstangenkraft. Die Spurstangenkraftaktuatoren prägen die Zahnstangenkraft auf. Die Lenkradwinkelvorgabe wird durch den Lenkradaktor umgesetzt. Alternativ zur Verwendung eines Fahrzeugmodells zur Berechnung der resultierenden Zahnstangenkraft kann ein Elastomerelement montiert an einem starren Bock verwendet werden. Das Element ist zwischen Zahnstange, einem Kraftmesselement und dem starren Bock befestigt. Anstatt der Fahrzeugreaktionsgrößen (Gierrate, Querbeschleunigung) wird die Zahnstangenkraft als Ausgangsgröße der Übertragungsfunktion herangezogen.

#### Prüfstandkonfiguration

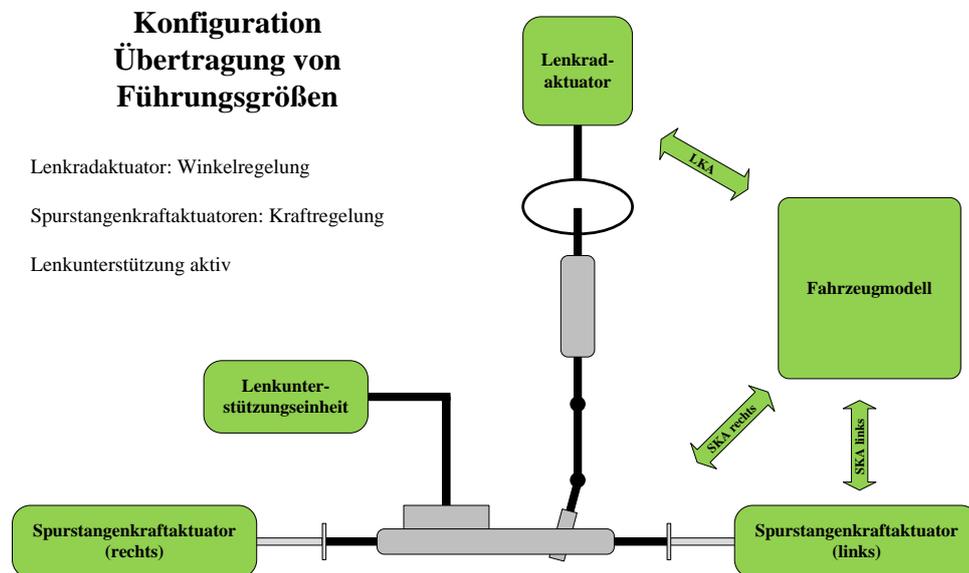


Abbildung 4.29: Prüfstandkonfiguration Übertragung von Führungsgrößen

Die in Tabelle 4.10 aufgelisteten Testparameter stellen einen Orientierungsrahmen für den Frequency-Response Test dar. Die Testparameter können für den jeweiligen Versuchsanforderung angepasst werden. Der Lenkradwinkel kann für das Mittengefühl direkt ausgewählt oder in Abhängigkeit einer definierten Querbeschleunigung bestimmt werden. Dabei wird in einem Vortest durch transientes Anlenken ein Querbeschleunigungsbereich durchlaufen und der Lenkradwinkel parallel aufgezeichnet. Eine Testreihe kann bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit kontinuierlich einen definierten Frequenzbereich durchlaufen (Frequenz-Sweep) oder es wird in einzelnen Untertests jeweils ein Frequenzbereich diskret angefahren. In dieser Arbeit fand letztere Testvariante Anwendung, da sich zu jeder diskret aufgeprägten Frequenz ein eingeschwungener Zustand einstellt. Die Schrittweite wurde mit 0.2 Hz gewählt. Es wurden 10 Sinusschwingungen durchlaufen.

Parameter:	Fahrzeug- geschwindigkeit	Amplitude Lenkradwinkel	Frequenz- bereich	Amplitude a_quer
Werte- bereich:	50 - 160 km/h	2.5 ° - 10 °	0.2 Hz - 2.8 Hz	2 m/s <sup>2</sup> - 4 m/s <sup>2</sup>

**Tabelle 4.10:** Testparameter Frequency-Response Test (Frequenzgang)

Das Führungsübertragungsverhalten wird für die Messgrößen Querbeschleunigung und Gierrate bezogen auf den Lenkradwinkel bestimmt (ISO 8726 [38]). Die Testreihe hat eine große Abhängigkeit vom verwendeten Fahrzeugmodell. Daher ist die Auswertung der Übertragungsfunktion eher für den Vergleich von Lenksystemen oder verschiedenen Teilkomponenten (Hardware oder Software) geeignet, um die Unterschiede unter gleichen Randbedingungen darzustellen. Die Auswertung in diesem Unterabschnitt zeigt die Ergebnisse mit einem Lenksystem, so dass hier der Frequenzgang des Fahrzeugmodells für die Gierrate und die Querbeschleunigung abgebildet ist. Hierbei sind die Einflüsse von Lenkradwinkel und Fahrzeuggeschwindigkeit sichtbar. In der Fachliteratur [50] sind die mathematischen Herleitungen beschrieben. Zur Auswertung und Darstellung einer lenksystemspezifischen Reaktionsgröße wurde zusätzlich das Lenkradmoment bezogen auf den Lenkradwinkel betrachtet.

In Tabelle 4.11 sind die typischen Werte für die Verstärkung der Querbeschleunigung und Gierrate bezogen auf den Lenkradwinkel bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h angegeben. Die Werte sind für einen fahrdynamischen Bereich bis 1.5 Hz Lenkradwinkel-frequenz für einen Phasenwinkelkorridor von 0 - 45 ° aufgelistet [38].

Fahrzeug- klasse:	Sportwagen	Limousine klein	Limousine groß
Verstärkung a <sub>quer</sub>	0.08 - 0.11 m/s <sup>2</sup> /°	0.07 - 0.09 m/s <sup>2</sup> /°	0.045 - 0.075 m/s <sup>2</sup> /°
Verstärkung Gierrate	0.22 - 0.25 °/s/°	0.17 - 0.2 °/s/°	0.15 - 0.18 °/s/°

Tabelle 4.11: Zusammenstellung typischer Werte für den Frequenzgang der Fahrzeugreaktionsgrößen bezogen auf den Lenkradwinkel in einem Phasenwinkelkorridor von 0-45 ° (v = 80 km/h) [38]

### Testreihen und Auswertung

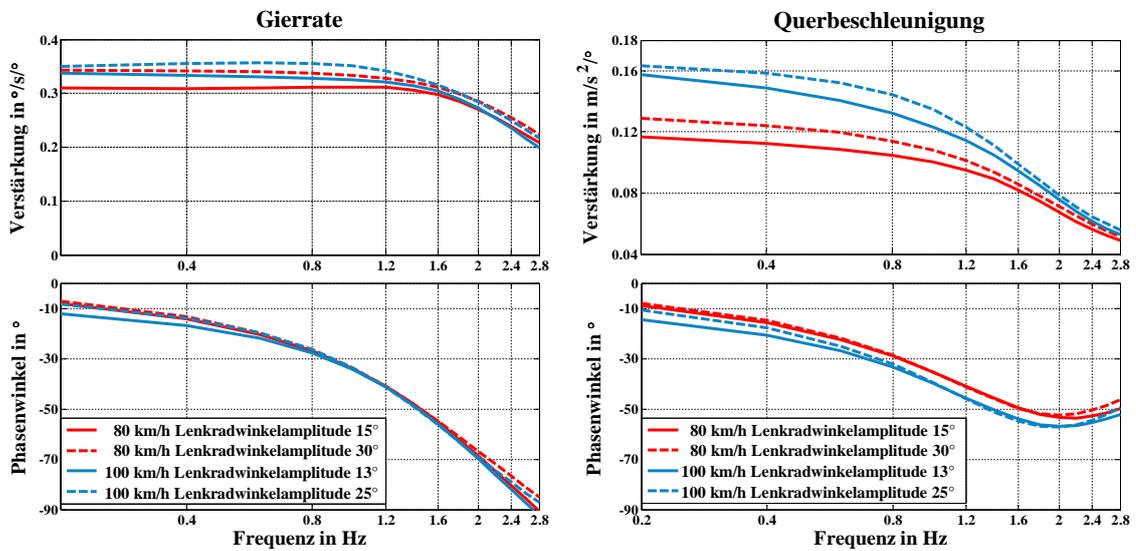
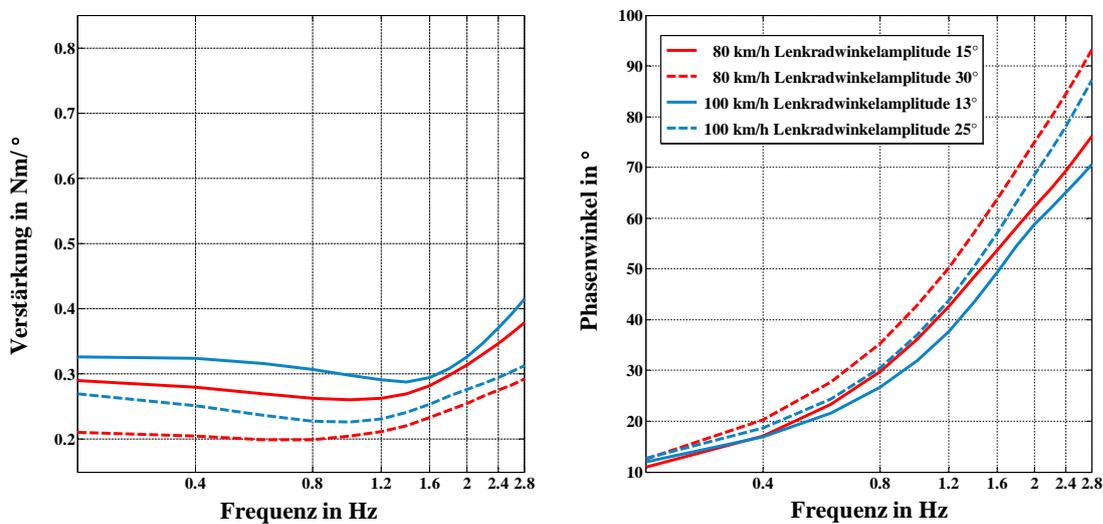


Abbildung 4.30: Auswertung des Führungsübertragungsverhalten Gierrate - Lenkradwinkel und Querbeschleunigung - Lenkradwinkel

In Abbildung 4.30 sind der Amplituden- und Phasengang für die Fahrzeugreaktionsgrößen Gierrate und Querbeschleunigung dargestellt. In den Testreihen wurde der Lenkradwinkel und die Fahrzeuggeschwindigkeit variiert. Die eingestellten Lenkradwinkelamplituden leiten sich jeweils aus einer Fahrzeugquerbeschleunigung von  $2 \text{ m/s}^2$  bzw.  $4 \text{ m/s}^2$  ab. Die Lenkradwinkelamplituden wurden in einem Vortest bestimmt. Da es sich wie zu Beginn des Unterabschnittes beschrieben um eine Test auf Gesamtfahrzeugebene handelt, sind zunächst bei einem Test von einem Lenksystem die spezifischen Einflüsse dessen nicht genau identifizierbar. Direkt abgeleitet werden kann das Verhalten des Gesamtübertragungspfades bestehend aus realem Lenksystem und Fahrzeugmodell (Achsen, Reifen). Die Wertebereiche für die Fahrzeugreaktionsgrößen liegen über den in Tabelle 4.11 aufgelisteten Werten für einen Sportwagen. Das verwendete Lenksystem stammt aus einem aktuellen Sportwagen mit einer deutlich gesteigerten Fahrdynamikperformance, weshalb die Werte oberhalb der Angaben in Tabelle 4.11 liegen.

Die Verstärkungen steigen mit der Fahrzeuggeschwindigkeit an. Eine Analyse von Lenksystemeinflüssen kann durch eine Variation von Parametern der Applikationssoftware durchgeführt und direkt anhand der Änderungen der Fahrzeugreaktion bewertet werden. Hierzu wird ein Zugriff auf die Applikationsparameter des Lenksystems benötigt. Die Zusammenhänge zwischen Lenksystem und Fahrzeugreaktion wurden anhand eines hydraulischen Lenksystems in [55] eingehend untersucht. Zur Bewertung einer lenksystemspezifischen Reaktionsgröße ohne eine Variation von Parametern der Applikationssoftware erfolgt die Auswertung des Lenkradmoments (Ausgangsgröße) bezogen auf den Lenkradwinkel (Eingangsgröße). Bei dieser Auswertung können indirekt Rückschlüsse auf die Lenkunterstützung über die Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit gezogen werden. Die Lenkunterstützung beinhaltet hierbei alle Module einer Applikationssoftware.



**Abbildung 4.31:** Auswertung des Führungsübertragungsverhalten Lenkradmoment - Lenkradwinkel

Die Auswertung in Abbildung 4.31 zeigt den Einfluss der Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Lenkradwinkelamplitude auf die Lenkradmomentverstärkung. Durch die Erhöhung der Fahrzeuggeschwindigkeit steigt auch die Lenkradmomentverstärkung an. Das Verhalten bei der Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit liegt u.a. an der Applikation der Verstärkungskennlinie. Die applizierte Lenkunterstützung (Unterabschnitt 4.2.4) ist bei höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten niedriger und der Fahrer muss ein höheres Lenkradmoment aus der Mitte heraus aufprägen. Umgekehrt verhält es sich mit der Variation der Lenkradwinkelamplitude bzw. der resultierenden Querschleunigung. Bei einer kleineren Lenkradwinkelamplitude steigt die Lenkradmomentenverstärkung an. Ursache hierfür ist, dass beim Anlenken aus der Mitte heraus zunächst ein erhöhtes Lenkradmoment benötigt wird um die Reibung zu überwinden.

Zudem wird zu Beginn des Anlenkens der Drehstab tordiert. Dieses Verhalten bestätigen auch die folgenden Messungen im OnCenter Bereich. Zur Abstimmung dieses Verhaltens haben moderne Lenksysteme spezielle Applikationsmodule für das Mittengefühl.

### Testreihen und Auswertung im OnCenter Bereich (Mittengefühl)

Neben den Testreihen bezogen auf eine resultierende Querbewegung von  $2 \text{ m/s}^2$  und  $4 \text{ m/s}^2$  sind Testreihen um die Nulllage (OnCenter) eines Lenksystems für das Lenkgefühl von besonderem Interesse. Dem Fahrer muss ein präzises Anlenken des Fahrzeugs gewährleistet werden, ohne dabei eine zu große Fahrzeugreaktion zu generieren. Umgekehrt darf dem Fahrer keine gefühllose Mitte vermittelt werden, welche das Geradeausfahren des Fahrzeugs erschwert. Die Lenkradwinkelamplituden liegen bei  $2.5^\circ$  und  $5^\circ$  und repräsentieren den OnCenter Bereich. Als Fahrzeuggeschwindigkeiten wurden  $100 \text{ km/h}$  und  $150 \text{ km/h}$  ausgewählt. Die beiden Diagramme für die Gierrate und die Querbewegung sind für den OnCenter Bereich in Abbildung 4.32 dargestellt. Das Verhalten der Fahrzeugreaktionsgrößen im OnCenter Bereich unterscheidet sich zu den Ergebnissen in Abbildung 4.30 bei größeren Lenkradwinkelamplituden. Die Verstärkung von Gierrate und Querbewegung ist geringer bei kleinen Lenkradwinkelamplituden. Der Geschwindigkeitseinfluss zeigt bei höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten eine größere Verstärkung im Vergleich von  $100 \text{ km/h}$  und  $150 \text{ km/h}$ . Während die Verstärkung der Gierrate in Abbildung 4.30 ab einer Frequenz von  $1.2 \text{ Hz}$  kontinuierlich abnimmt, ist im OnCenter Bereich in Abbildung 4.32 ein Anstieg der Verstärkung zwischen  $1.2 \text{ Hz}$  und  $1.6 \text{ Hz}$  zu sehen. Das Phasenverhalten ist bei beiden Testreihen ähnlich (Vergleich Abb.4.30 und Abb. 4.32).

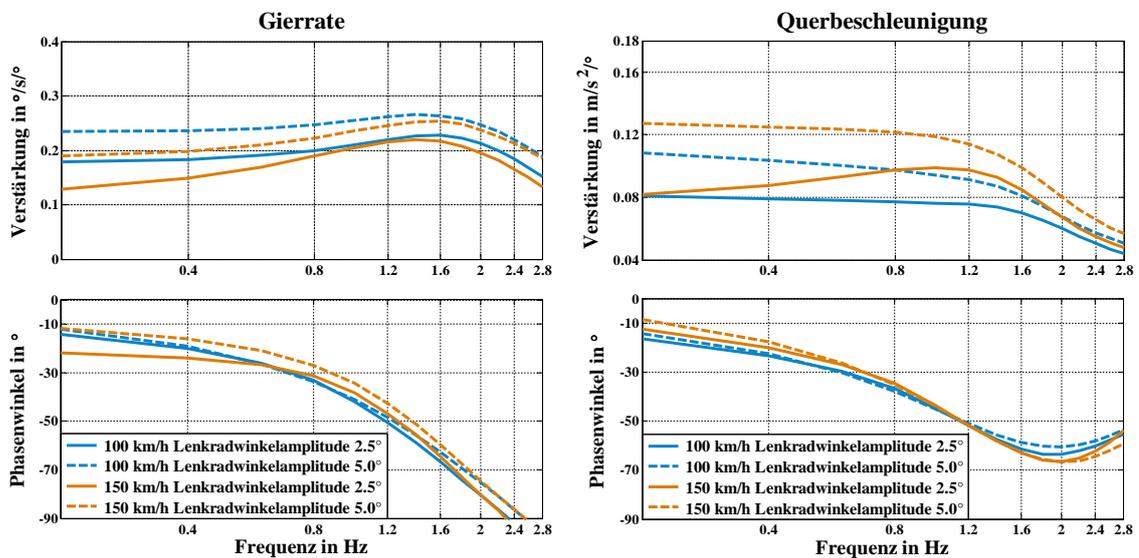
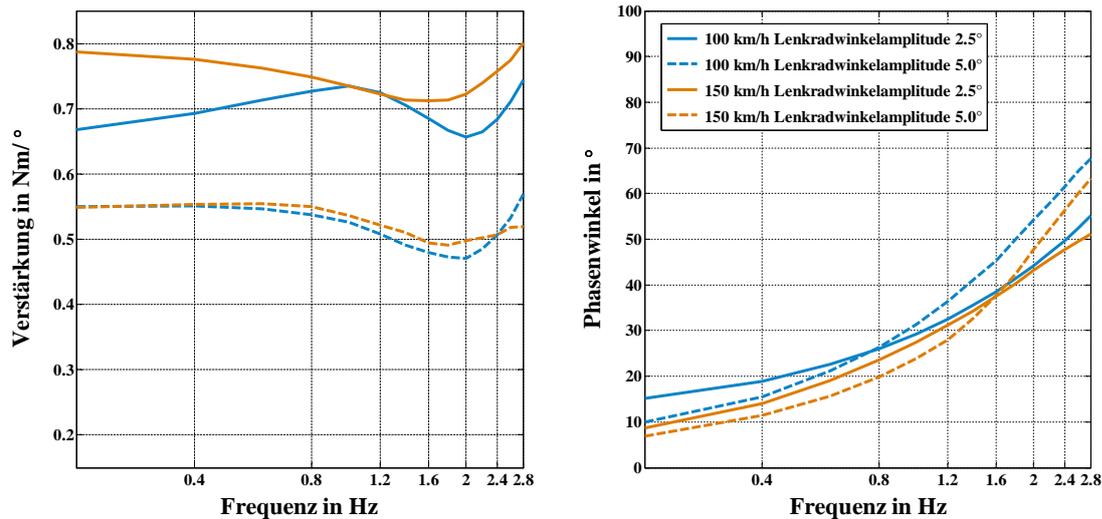


Abbildung 4.32: Auswertung des Führungsübertragungsverhalten Gierrate - Lenkradwinkel und Querbewegung - Lenkradwinkel im OnCenter Bereich (Mittengefühl)

Die Lenkradmomentverstärkung ist bei kleinen Lenkradwinkelamplituden um die Mittel- lage um den Faktor zwei größer im Vergleich zu den vorherigen Testreihen (Abb. 4.31). Für das Anlenken aus der Mitte heraus wird zunächst wie bereits beschrieben ein erhöhtes Lenkradmoment benötigt. Diese Verhalten wird bei sehr kleinen Lenkradwinkelamplituden in Abbildung 4.33 besonders deutlich. Der Transition Test in Unterabschnitt 4.4.2 bestätigt diese Charakteristik des Lenksystems beim Anlenken durch einen steilen Lenkradmoment- gradienten.



**Abbildung 4.33:** Auswertung des Führungsübertragungsverhalten Lenkradmoment - Lenkradwinkel im OnCenter Bereich (Mittengefühl)

Zusammenfassend hat die Auswertung der Lenkradmomentenverstärkung die größte Aussagekraft hinsichtlich lenksystemspezifischer Eigenschaften in den vorgestellten Testreihen des Frequency-Response Tests. Die Auswertungen der Fahrzeugreaktionsgrößen bezogen auf den Lenkradwinkel können wichtige Erkenntnisse im Zusammenspiel zwischen Lenksystem und Fahrzeug liefern. Hier bietet sich eine Variation von Lenksystemparametern an.

#### 4.3.2 Analyse des Rückmeldeverhaltens

Die durch das Lenksystem übertragenen Informationen unterteilen sich für den Fahrer in Nutz- und Störinformationen. Im Bereich bis 15 Hz werden die Nutzinformationen übertragen, darüber hinaus die Störinformationen [26, 57, 21, 51]. Informationen über den Reibwert der Fahrbahn und Fahrbahnebenheiten klassifizieren die Nutzinformationen, vor allem hinsichtlich der Fahrsicherheit [68]. Radunwuchten, impulsartige Anregungen oder Lenkraddrehschwingungen zählen zu den unerwünschten Informationen, welche idealerweise vom Lenksystem nicht übertragen werden sollten [26]. Abbildung 4.34 zeigt diese Erkenntnisse in einer Grafik zusammengefasst.

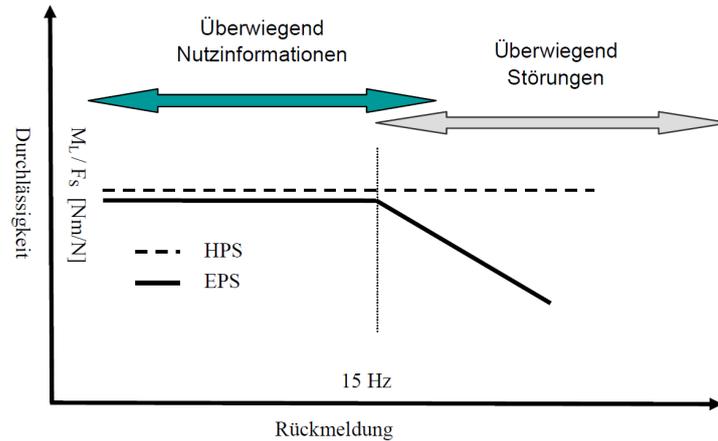


Abbildung 4.34: Rückmeldeverhalten von Lenksystemen [24]

Es konnten keine bekannten Veröffentlichungen recherchiert werden, die eine gesamtheitliche Betrachtung des Übertragungsverhaltens von elektromechanischen und hydraulischen Lenksystemen beschreiben. Eine Recherche fasst die bisherigen Erkenntnisse aus den bekannten Veröffentlichungen zusammen. Schwerpunkt der Untersuchungen sind die Ermittlung des Einflusses und die Optimierung des Übertragungsverhaltens von Lenksystemen. Hieraus werden die Anregungsarten, Amplituden- und Frequenzbereiche abgeleitet und erweitert.

Zur Objektivierung der Lenkungsrückmeldung untersuchte [27] das Störübertragungsverhalten eines elektromechanischen Lenksystems. In der Veröffentlichung wurde simulativ der Einfluss von verschiedenen Regler und mechanischen Parametern auf das Übertragungsverhalten ermittelt. Gesamtziel der Untersuchungen war eine Zielstörübertragungsfunktion für Lenksysteme festzulegen. Die Ergebnisse zeigen, dass ab einer Frequenz von 4 Hz der Amplitudengang des elektromechanischen Lenksystems abfällt, während der Amplitudengang des hydraulischen Lenksystems konstant bleibt. Das Lenksystem muss jedoch hinsichtlich der Störübertragungsfunktion so konzipiert sein, dass alle Nutzinformationen und keine Störinformationen übertragen werden. Als Nutzinformationen sind beispielsweise eine Aquaplaningsituation, Reibwertänderungen, Spurrillen oder die Rückmeldung der Seitenkraftreserve definiert. Störinformationen werden beschrieben durch Lenkraddreh-schwingungen beim Bremsen oder durch Unwucht der Räder, Stöße bei einer Hindernisüberfahrt oder hochfrequente Lenkradschwingungen aller Art. Ein weiterer Aspekt stellt das zeitliche Verhalten von Lenkradmoment und Querschleunigung dar. Für einen positiven Fahreindruck sollten die Laufzeitunterschiede nahe Null liegen, d.h. ein Bereich zwischen 50 - 150 ms ist noch tolerierbar. Der Fahrer nimmt diese in diesem Bereich als zeitgleich wahr. Bis 50 ms empfindet der Fahrer die Reaktion als zu heftig, über 150 ms als zeitverzögert.

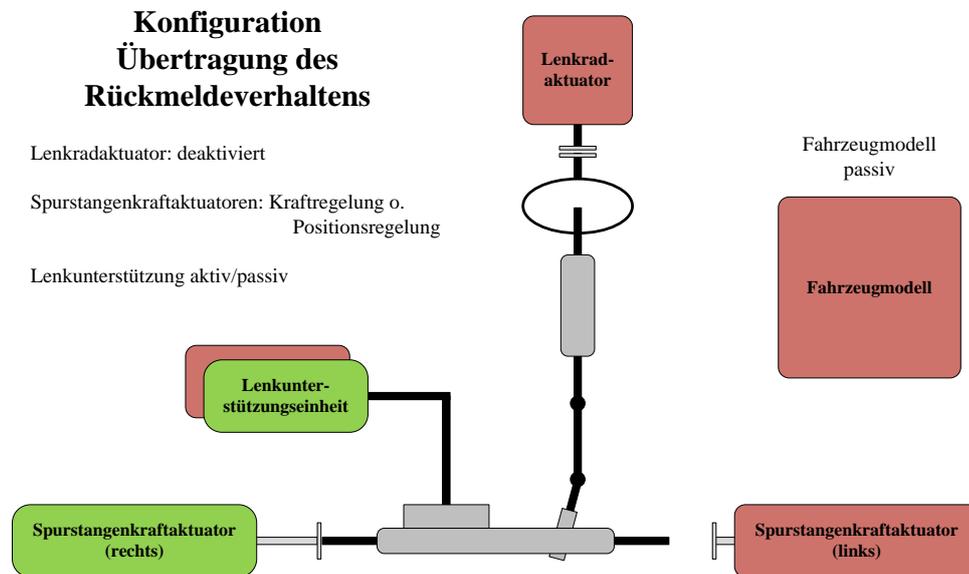
Für die genaue Definition der Störübertragungsfunktion wurde die Eckfrequenz ermittelt, bis zu welcher das Lenksystem als rückmeldefreudig charakterisiert wird, d.h. das Lenksystem muss alle Nutzinformatoren übertragen und alle Störinformatoren herausfiltern. Dazu wurde das Störübertragungsverhalten durch einen Butterworth Filter 2. Ordnung nachgebildet. Die Bestimmung der Eckfrequenzen, welche das Filter benötigt um die o.g. Zeitgrenzen einzuhalten, wurde die 100 % Anstiegszeit der Sprungantwort für die Zeitgrenzen ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass bis zu einer Eckfrequenz von ca. 3.5 Hz durch den Zeitverzug nicht alle Nutzinformatoren übertragen werden. Mit steigender Eckfrequenz sinken die Zeitverzögerungen und die Nutzinformatoren werden übertragen. Zusätzlich nimmt die Stößigkeit der Lenkung mit steigender Eckfrequenz zu, was dazu führen kann, dass die Lenkung bei einer zu hohen Eckfrequenz (30 Hz) als zu stößig empfunden wird.

Um Störungen, verursacht durch die Fahrbahnbeschaffenheit, zu reduzieren, entwickelten [68] einen Regelungskonzept für elektromechanische Lenksysteme. Der Regleransatz beruht auf der Annahme, dass Schwingungen aus dem Rückstellmoment bis 5 Hz erzeugt werden, während Störungen von der Fahrbahnoberfläche erst ab 13 Hz vorhanden sind. Um diese Störinformatoren zu filtern, wurde eine Dämpfungsregelung in einem konventionellen Regler integriert. Als zusätzliche Sensorgröße wird jedoch die Rotorlagegeschwindigkeit des Unterstützungsmotors benötigt. Dazu wurde ein Beobachter entwickelt, welcher die Rotorlagegeschwindigkeit des Motors hinreichend genau schätzt. Eingangsgrößen sind das Lenkmoment aus dem Drehmomentsensor sowie der Motorstrom, welche zunächst Hochpass gefiltert werden. Durch Multiplikation mit einem Verstärkungsfaktor wird ein Differenzstromwert berechnet. Damit können Schwingungen oberhalb von 13 Hz gedämpft werden, ohne die Nutzinformatoren im Bereich von bis 0 bis 5 Hz zu verfälschen.

In der Arbeit von [51] wurden Zahnstangenlenkungen mit hydraulischer Unterstützung hinsichtlich der Lenkungsunruhe untersucht, um entsprechende Simulationsmodelle für die Kleinsignalanregung zu generieren. Zunächst wurden die einzelnen Komponenten untersucht, modelliert und anschließend zu einem Gesamtmodell zusammengefügt und validiert. Zur Anregung der Zahnstange verwendet [51] ein achstypisches Anregungssignal.

Eine theoretische Betrachtung des Übertragungsverhaltens von hydraulischen und elektromechanischen ist in der Fachliteratur bereits eingehend beschrieben [57]. Basierend auf diesen Grundlagen entwickelte [48] einen Regelungsansatz zur Verbesserung des Rückmeldeverhaltens von elektromechanischen Lenksystemen. Kern des Ansatzes ist die Zahnstangenkraft als Regelungsgröße und damit des Lenkgefühls.

## Prüfstandkonfiguration



**Abbildung 4.35:** Prüfstandkonfiguration Übertragung des Rückmeldeverhalten

In der Konfiguration zur Ermittlung des Rückmeldeverhaltens wird das Lenksystem mit dem rechten Spurstangenkraftaktuator verbunden. Dieser dient zur Aufprägung der Stör- anregung an der Zahnstange. Da es sich um einen Ersatzversuch handelt, wird über die Prüfstandsteuerung ein synthetisches Signal in Form eines Sinus aufgeprägt. Mit einem Sinussignal als Ersatz für eine achstypische Anregung ist die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Lenksystemen gegeben, da man unabhängig von den Achskonzepten ist. Die Testparameter sind in Tabelle 4.13 angegeben. Über den Aktuator kann sowohl eine Kraft- also auch eine Wegamplitude vorgeben werden. In der jeweiligen Konfiguration ist das Lenkrad frei oder fest verklemmt. Die Lenkunterstützung kann passiv oder aktiv betrieben werden.

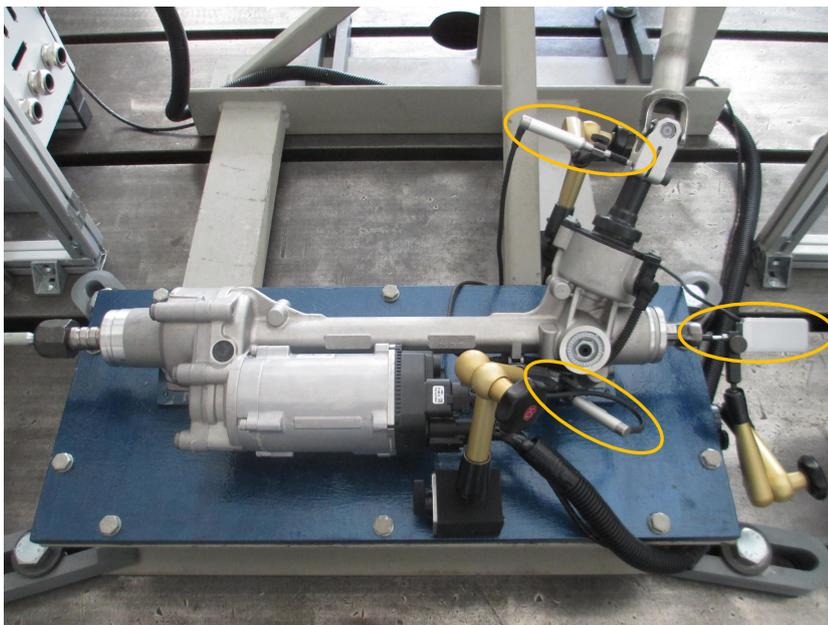
### Testverfahren zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens

Für die Testreihe wird der Linearmotor rechts mit dem Lenksystem, bestehend aus Lenk- getriebe, Lenkzwischenwelle, Lenksäule und Lenkrad, verbunden. Das Lenkrad wird je nach Testkonfiguration fest verspannt oder schwingt frei. Der Linearmotor kann in Position oder Kraft geregelt werden. Zur Variation der Unterstützungskraft bei elektromechanischen Lenksystemen wird die Fahrzeuggeschwindigkeit über die dynamische Restbussimulation verändert.

### 4.3. Charakterisierung des Übertragungsverhaltens

---

Zur Erfassung der relevanten Messgrößen werden die Standardsensoren des Lenksystemprüfstands aus Tabelle 3.5 verwendet. Zusätzlich werden hochauflösende Wegsensoren (Tabelle 3.6) an weiteren Messstellen am Lenksystem platziert. Dies erlaubt eine gezielte Erfassung von Bewegungen einzelner Bauteile des Lenksystems. Damit kann der Einfluss und das Übertragungsverhalten dieser Bauteile im Übertragungspfad ermittelt werden. Abbildung 4.36 zeigt den Versuchsaufbau am Lenksystemprüfstand. Bei Betrachtung des Pfades vom Lenkrad zur Zahnstange sind Wegsensoren am Lenkgetriebeeingang (Drehstab), am Ritzelausgang und an der Zahnstange angebracht. Wie auf der Abbildung zu sehen, sind die Wegsensoren zur optimalen Ausrichtung an der Messstelle an Stativen befestigt. Da abhängig vom Lenksystem teilweise die Zugänglichkeit zur Messstelle eingeschränkt ist, bietet die Einstellbarkeit des Stativs eine flexible Positionierung der Wegsensoren. Da aus der Anregung der Zahnstange lediglich kleine Auslenkungen resultieren, kann die Linearbewegung der Sensoren am Ritzel an eine Drehbewegung approximiert werden.



**Abbildung 4.36:** Versuchsaufbau zur Ermittlung des Rückmeldeverhaltens (hervorgehoben sind drei der verwendeten hochauflösenden Wegaufnehmer)

In Abbildung 4.37 ist in Bezug auf Tabelle 4.12 der Messaufbau zur Untersuchung des Rückmeldeverhaltens schematisch dargestellt. Es werden die bereits im Lenksystemprüfstand integrierten Sensoren (rot) sowie zusätzliche externe Sensoren (blau) zur Erfassung der benötigten Messgrößen verwendet.

### Messaufbau zur Ermittlung des Rückmeldeverhaltens

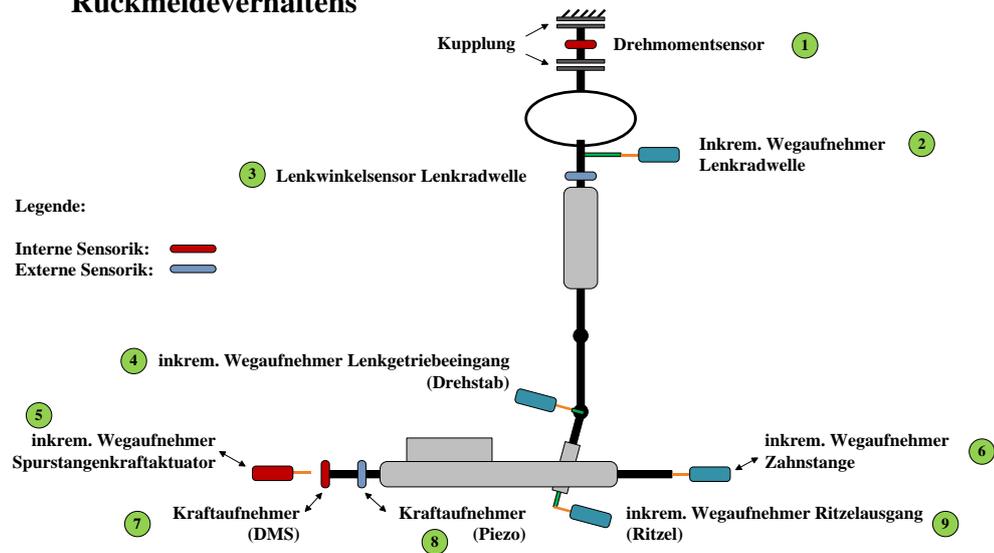


Abbildung 4.37: Schematischer Messaufbau zur Ermittlung des Rückmeldeverhaltens

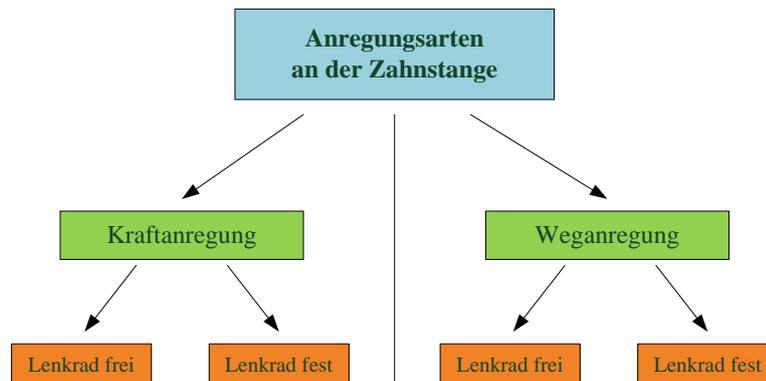
Nr.	Sensor	Messgröße	Sensortyp	Messposition
1	Lenkradmoment	Moment	DMS	Lenksäule
2	Lenkradwinkel	Weg	Inkrementalgeber	Lenksäule + Hebelarm
3	Lenkradwinkel	Winkel	anisotrop magnetoresistiv	Lenksäule
4	Winkel (Lenkgetriebeeingang)	Weg	Inkrementalgeber	Ritzelwelle + Hebelarm
5	Zahnstangenweg	Weg	Inkrementalgeber	Linearmotor
6	Zahnstangenweg	Weg	Inkrementalgeber	Zahnstange
7	Zahnstangenkraft	Kraft	DMS	Linearmotor
8	Zahnstangenkraft	Kraft	Piezo	Spurstange
9	Ritzelwinkel (Ausgang)	Weg	Inkrementalgeber	Ritzelwelle + Hebelarm

Tabelle 4.12: Messgrößen zur Ermittlung des Rückmeldeverhaltens

Einige Messgrößen werden durch zwei Sensoren repräsentiert. Die redundante Sensorik dient zur Plausibilisierung wie der Linearisierung der Wegaufnehmer und zur Messbereichserweiterung, falls der Messbereich der hochauflösenden Wegsensoren nicht ausreichend ist. Die verwendeten Wegaufnehmer haben eine sehr hohe Genauigkeit ( $1 \mu\text{m}$ ) und arbeiten nach dem photoelektrische Abtastprinzip. Es handelt sich hierbei um ein inkrementelles Messprinzip. Durch das Zählen der einzelnen Inkremente wird die Positionsinformation generiert. Der Nullpunkt wird an einer beliebigen Stelle im Sensormessbereich gesetzt.

### Testkonfiguration

Durch die Regelungsmöglichkeiten der Aktuatoren des Lenksystemprüfstands lassen sich mehrere Testkonfigurationen zur Untersuchung des Rückmeldeverhaltens darstellen (Abb. 4.38). Jeweils für Kraft- und Weganregung kann das Lenkrad fest positioniert werden oder es schwingt frei. Diese Arbeit betrachtet die Untersuchung des Rückmeldeverhaltens aus dem Blickwinkel der Testmöglichkeiten auf einem Lenksystemprüfstand, d.h. alle möglichen Testvarianten wurden durchgeführt. In Abbildung 4.38 wurden die möglichen Anregungsarten und resultierenden Konfigurationen dargestellt. Die nachfolgenden Testreihen können je nach Problemstellung oder Untersuchung von Lenksystemphänomenen passend gemäß den Anregungsarten und Konfigurationen ausgewählt werden. Ein Fazit hinsichtlich möglicher Anwendungsbereiche wird am Ende des Unterabschnitts gezogen. Eine weitere Auswahl der wichtigsten Testreihen zur Ermittlung des Störübertragungsverhaltens ist in Unterabschnitt 5.3.2 im Vergleich von Lenksystemen zu finden.



**Abbildung 4.38:** Anregungsarten zur Untersuchung des Rückmeldeverhaltens

In Tabelle 4.13 sind zu den jeweiligen Anregungsarten die zu variierenden Testparameter und die Wertebereiche der Testreihen hinterlegt, welche in diesem Unterabschnitt ausgewertet wurden. Darüber hinaus wurden im Rahmen dieser Arbeit weitere Testreihen mit einem deutlich ausgedehnten Wertebereich der Testparameter durchgeführt.

Testparameter:	Fahrzeuggeschwindigkeit	Kraftamplitude (Kraftanregung)	Wegamplitude (Weganregung)	Frequenzbereich
Wertebereich:	30, 80, 120, 200 km/h	100 N - 500 N	0.05 mm - 0.40 mm	0.5 Hz - 30 Hz

**Tabelle 4.13:** Testparameter zur Untersuchung des Rückmeldeverhaltens

In den Veröffentlichungen, welche in der Recherche zu Beginn des Unterabschnittes vorgestellt wurden, wurden die relevanten Frequenzbereiche für eine Untersuchung des Übertragungsverhaltens im Bereich von 0 - 30 Hz definiert. Die folgenden Auswertungen analysieren zunächst den Übertragungspfad zwischen Eingang und Ausgang des Lenksystems, d.h. zwischen Zahnstange und Lenkrad. Es ist jeweils der Amplitudengang dargestellt. Auf eine Darstellung des Phasengangs wurde zunächst verzichtet, da sich der Phasengang durch den Amplitudeneinfluss in diesen Testreihen kaum ändert und der Hauptfokus zur Darstellung der Übertragung der Informationen auf dem Amplitudengang liegt. Von großem Interesse ist der Phasengang bei der Betrachtung von mehreren Messstellen am Lenkstrang. Daher wird bei der Auswertung der Testreihen mit Zusatzsensorik (Abb. 4.47) die klassische Darstellung eines Übertragungspfades mit Amplituden- und Phasengang angewandt.

#### Auswertung der Testreihen mit Kraftanregung und Lenkrad fest

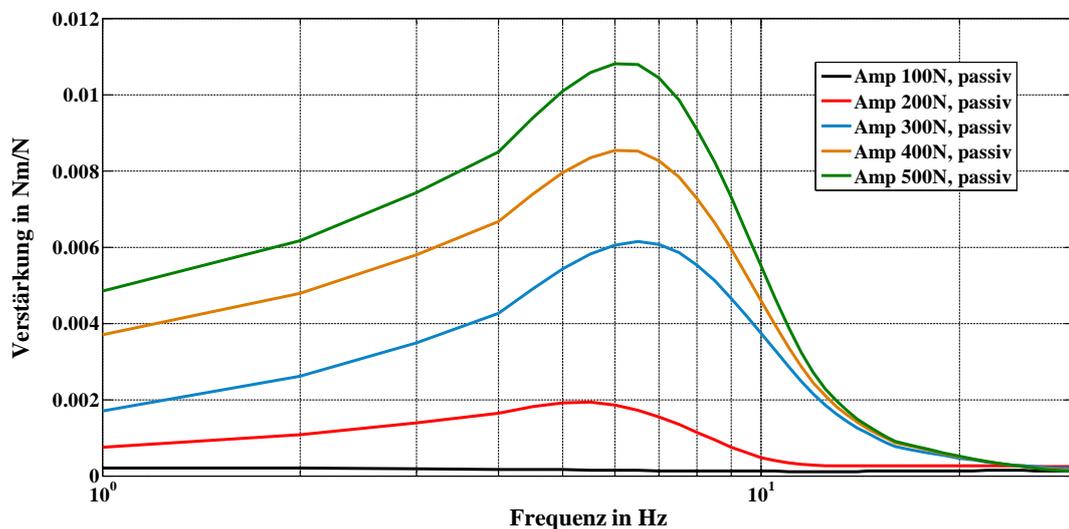


Abbildung 4.39: Lenksystem passiv: Übertragungspfad Zahnstangenkraft - Lenkradmoment

Abbildung 4.39 zeigt die das Übertragungsverhalten eines passiven elektromechanischen Lenksystems. Die Anregung erfolgte mit einem Kraftsinus mit Amplituden von 100-500 N. Deutlich zu erkennen ist der Amplitudeneinfluss der sinusförmigen Anregung. Bedingt durch die Systemreibung ist eine Rückmeldung in Form eines Lenkradmoments erst ab einer Kraftamplitude von 200 N sichtbar. Ab 300 N prägt sich das Übertragungsverhalten aus. Für weitere Messungen wird eine Kraftamplitude von 500 N festgelegt. In diesem Bereich ist das charakteristische Übertragungsverhalten bereits ausgeprägt messbar und die Bewegungen des Lenksystems in einem für die Sensorik darstellbaren Bereich. Der charakteristische Verlauf eines passiven elektromechanischen Lenksystems ist simulativ in [21] publiziert.

Die weiteren Testreihen erfolgen mit einem aktiven Lenksystem, d.h. das Lenksystem generiert in abhängig der externen Vorgabe der Fahrzeuggeschwindigkeit eine Unterstützungskraft. In Abbildung 4.40 sind Ergebnisse für eine Kraftamplitude von 500 N mit einer passiven und aktiven Unterstützungseinheit dargestellt. Die Charakteristik des Lenksystems ändert sich mit einer aktiven Unterstützungseinheit deutlich. Im Vergleich zum passiven Lenksystem ist die Verstärkung im Übertragungspfad reduziert. Dies bedeutet, dass weniger Informationen und Störungen in Form eines Lenkradmoments übertragen werden. Da dieses Verhalten in einem Frequenzbereich von 2-10 Hz auftritt, handelt es sich hierbei um die Reduzierung von Nutzinformationen (Abb. 4.34). Die Ergebnisse zeigen, dass ein aktives elektromechanisches Lenksystem eine geringere Rückmeldefreudigkeit im Vergleich zu einem passiven System hat. Der Einfluss der Applikation der Verstärkungskennlinie mit der Fahrzeuggeschwindigkeit hat einen weiteren Einfluss auf das Übertragungsverhalten, welcher aber geringer ausfällt, aber einen sichtbaren Einfluss hat. Bei einer höherer Lenkunterstützung ist die Rückmeldung im Bereich von 6-12 Hz erhöht, und in diesem Bereich über die Applikation beeinflussbar.

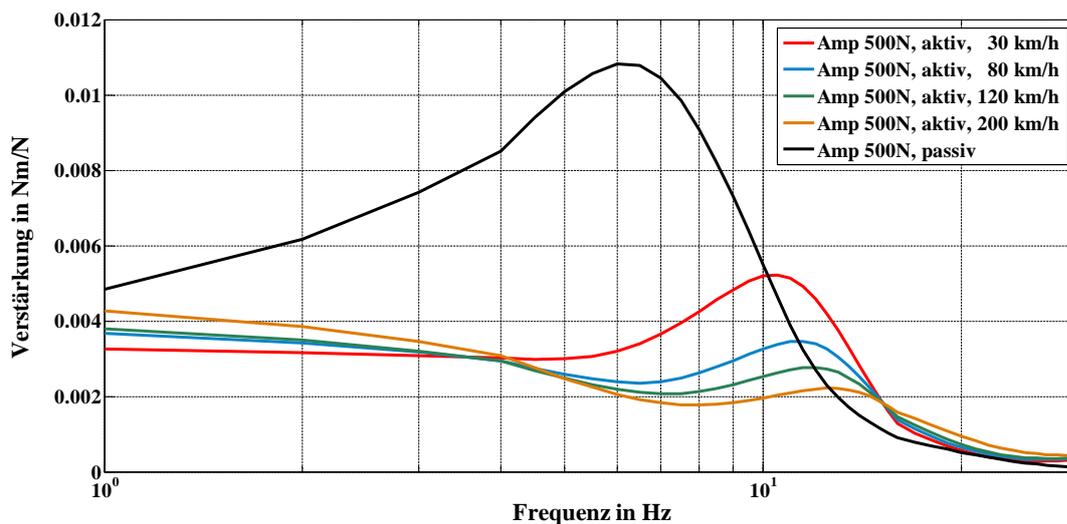


Abbildung 4.40: Vergleich Lenksystem aktiv u. passiv: Übertragungspfad Zahnstangenkraft - Lenkradmoment

### Auswertung der Testreihen mit Kraftanregung und Lenkrad frei

In Abbildung 4.41 und Abbildung 4.42 wurden die Testreihen mit einem nicht fixierten Lenkrad durchgeführt. Das Lenkrad kann somit frei schwingen. Es ist der Übertragungspfad von Zahnstangenkraft zu Lenkradwinkel (deg/N) dargestellt. Da das Lenkrad nicht fixiert war, wurde das Lenkradmoment nicht aufgezeichnet. Die Ausgangsgröße bei einem frei schwingenden Lenkrad ist der Lenkradwinkel.

Wie auch bei den Versuchen mit fixiertem Lenkrad ist der Einfluss der Systemreibung sichtbar, d.h. ab einer Kraftamplitude von 300 N ist eine Übertragung der Anregung auf den Lenkstrang (Lenksäule + Lenkrad) messbar. Im Frequenzband von 1-10 Hz wird die sinusförmige Anregung der Zahnstange als Drehbewegung auf den Lenkstrang übertragen. Mit steigender Frequenz wird das Rückmeldeverhalten deutlich gedämpft und ist ab 20 Hz kaum mehr messbar. In den Testreihen mit aktiver Lenkunterstützung wurde die Zahnstange mit einer Kraftamplitude von 500 N angeregt.

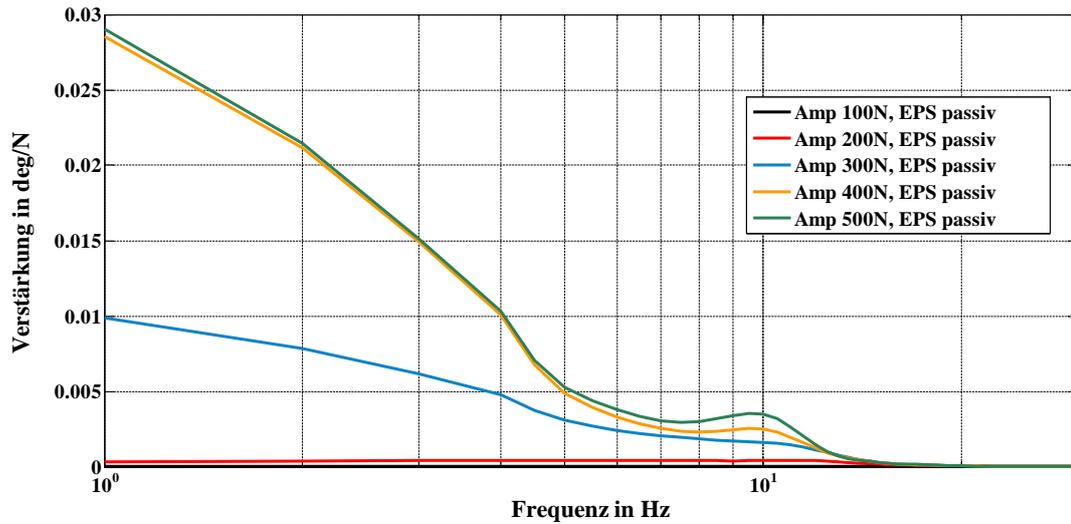


Abbildung 4.41: Lenksystem passiv: Übertragungspfad Zahnstangenkraft - Lenkradwinkel

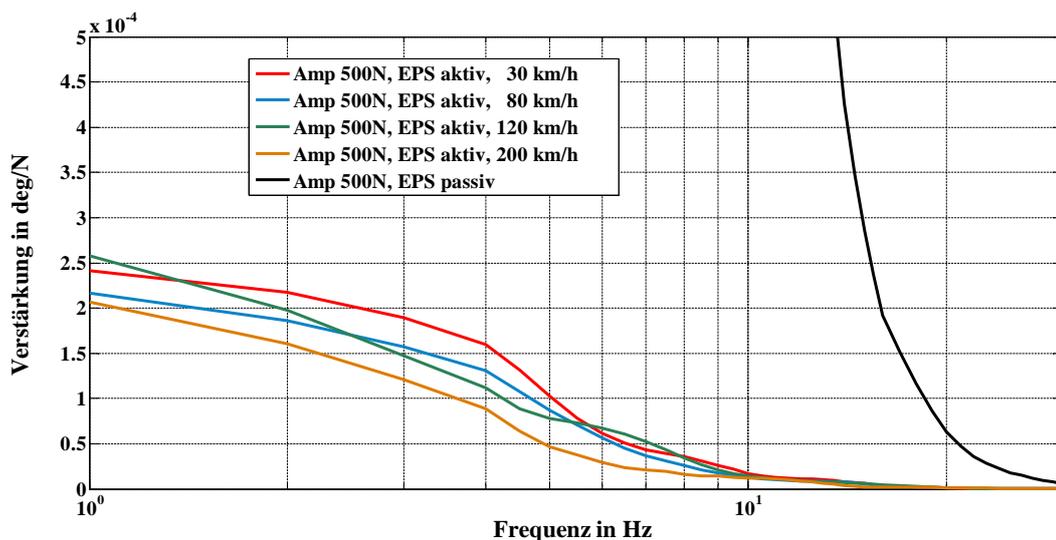


Abbildung 4.42: Vergleich Lenksystem aktiv u. passiv: Übertragungspfad Zahnstangenkraft - Lenkradwinkel

Bei aktiver Lenkunterstützung (Abb. 4.42) reduziert sich das Übertragungsverhalten im Vergleich zum passiven Lenksystem über den gesamten Frequenzbereich. Diese Verhalten ist analog zu den Versuchen mit fixiertem Lenkrad, jedoch fällt die Reduzierung der Verstärkung deutlich größer aus (Faktor 0.1). Die Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit ist in dieser Testkonfiguration kaum ausgeprägt. Zur Darstellung des Einflusses der Fahrzeuggeschwindigkeit ist die Skalierung entsprechend feiner aufgelöst und daher die Kurve für das passive Verhalten bei einer Kraftamplitude von 500 N erst ab 12 Hz dargestellt. Für die Fahrzeugführung durch den Fahrer hat diese Testreihe wenig Relevanz, da der Fahrer die Hände im normalen Fahrbetrieb am Lenkrad hat. Jedoch im Hinblick auf Untersuchungen zum Hands-Off Verhalten von Lenksystemen im Kontext von Assistenzsystemen kann diese Testreihe wichtige Erkenntnisse liefern.

#### Auswertung der Testreihen mit Weganregung und Lenkrad fest

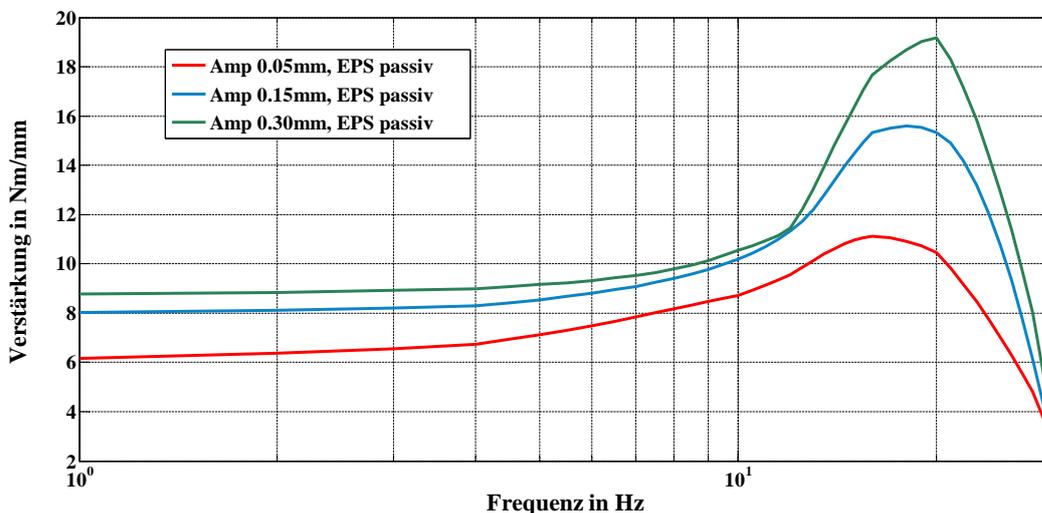


Abbildung 4.43: Lenksystem passiv: Übertragungspfad Zahnstangenweg - Lenkradmoment

In den Testreihen zur Untersuchung des Übertragungsverhaltens mit einer Weganregung der Zahnstange wurde zunächst das Verhalten mit einem fixierten Lenkrad untersucht. Die Verstärkung berechnet sich aus dem Zahnstangenweg und dem resultierenden Lenkradmoment. In Abbildung 4.43 sind die Ergebnisse für eine Wegamplitude von 0.05 mm, 0.15 mm, und 0.30 mm dargestellt. Bei deaktivierter Lenkunterstützung steigt entsprechend mit der Wegamplitude die Verstärkung. Mit einer definierten Weganregung und einem fixierten Lenkrad wird über die Übersetzung des Lenkgetrieberitzels eine Verdrehung des Drehstabs und der Lenksäule bewirkt. Als resultierende Größe wird das Lenkradmoment gemessen. Da es sich bei der Eingangsgröße um eine definierte Zahnstangenwegamplitude handelt, stellt sich eine Zahnstangenkraft als resultierende Größe ein, welche benötigt wird, um die Wegamplitude durch die Aktuator zu stellen.

Daher sind Effekte wie die Systemreibung bei diesen Testreihen nicht sichtbar. Bei niedrigen Frequenzen bis 10 Hz liegt die Verstärkung auf einem konstanten Niveau. In einem Frequenzband von 15-20 Hz steigt die Verstärkung an. Es lässt sich daraus schließen, dass die erhöhte Verstärkung aus der Schwingung des Drehstabs resultiert, da das Lenkrad fixiert ist und die Zahnstangen durch die Weganregung geführt wird. Das gleiche Verhalten zeigt sich bei den Testreihen mit aktiver Lenkunterstützung (Abb. 4.42). Die Verstärkung fällt etwas geringer aus, bleibt aber vom Verlauf ähnlich. Die Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit zeigt fast keine Änderung des Übertragungsverhaltens. Somit fällt die Lenkunterstützung bei diesen kleinen Amplituden sehr gering aus. Ursache ist die kleine Zahnstangenbewegung, wodurch der Drehstab kaum tordiert wird. Beide Testreihen (passiv und aktiv) können für eine Teilanalyse des Fahrzeugregelkreises herangezogen werden. Als Beispiel sei eine Untersuchung mit einem Lenkradwinkel  $\varphi_{LR} = 0$  genannt. Die nach [50] "fixed control" genannte Betrachtung untersucht den Fahrzeugregelkreis nur mit den Anteilen Eingang, Störung und Ausgang ohne die Einflüsse des Fahrers. Mit den Ergebnissen kann zusätzlich das Verhalten des Lenksystems berücksichtigt werden.

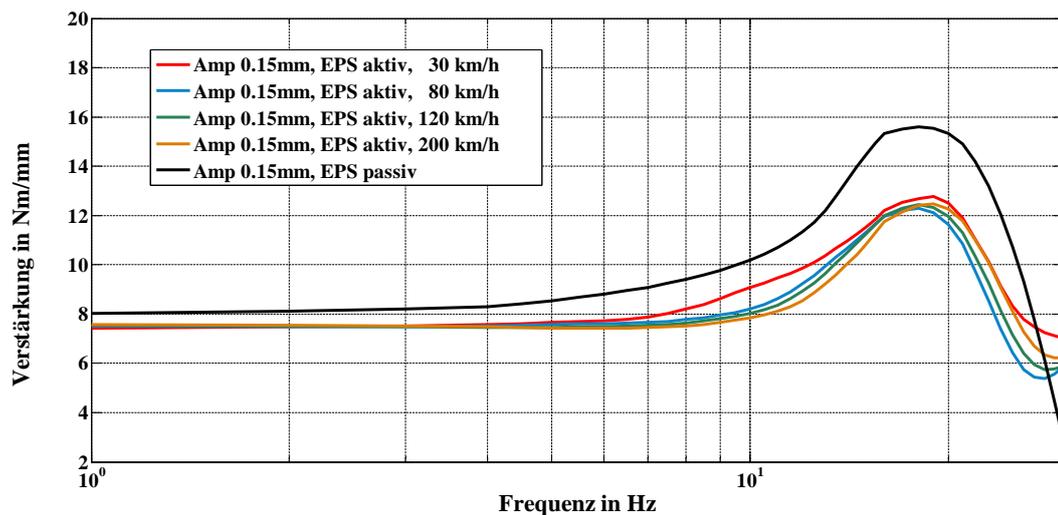


Abbildung 4.44: Vergleich Lenksystem aktiv u. passiv: Übertragungspfad Zahnstangenkraft - Lenkradmoment

#### Auswertung der Testreihen mit Weganregung und Lenkrad frei

Bei den Untersuchungen mit Weganregung und nicht fixiertem Lenkrad wird das Übertragungsverhalten zwischen Wegvorgabe durch den Aktuator und dem Lenkradwinkel bestimmt. Durch die definierte Zahnstangenbewegung kann das Lenkrad gegen den Drehstab frei schwingen. Die Zahnstangenauslenkung in Form eines Sinus mit definierter Amplitude ist über der Frequenz in einer Testreihe konstant. Zunächst sind die Testreihen in Abbildung 4.45 mit passiver Lenkunterstützung und verschiedenen Wegamplituden durchgeführt

worden. Der Einfluss der Wegamplitude ist sichtbar. Ab einer Wegamplitude von 0.15 mm ist der Amplitudeneinfluss kaum mehr ausgeprägt, d.h. die Unterschiede im Übertragungsverhalten zwischen den einzelnen Wegamplitude sind gering. In den weiteren Testreihen mit aktiver Lenkunterstützung wird eine Wegamplitude von 0.15 mm festgelegt. Das passive Lenksystem zeigt bei allen Wegamplituden eine ausgeprägte Verstärkung bei 8 Hz. Es handelt sich hierbei um eine Eigenfrequenz des Lenkstrangs verursacht durch die Massenträgheit des frei schwingenden Lenkrads gegen den Drehstab.

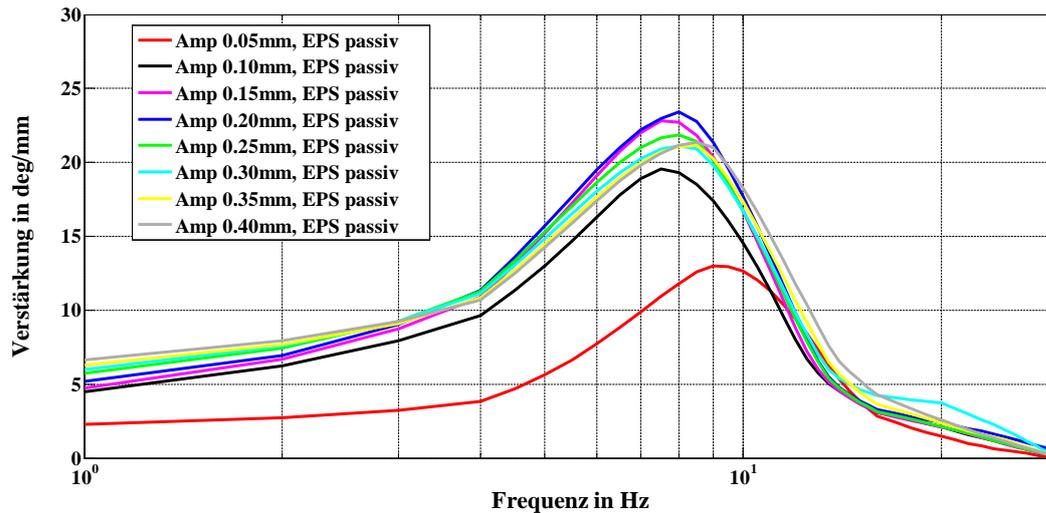
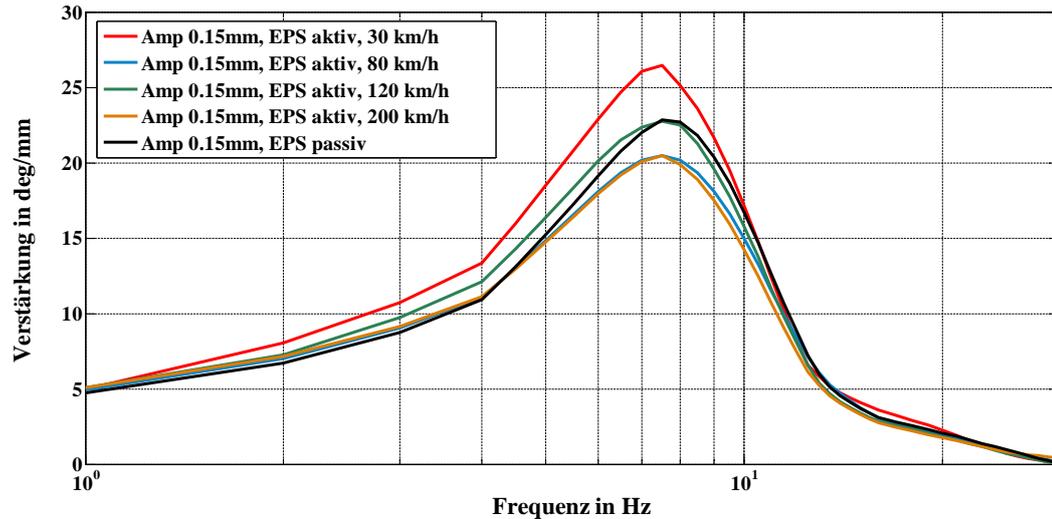


Abbildung 4.45: Lenksystem passiv: Übertragungspfad Zahnstangenweg - Lenkradwinkel

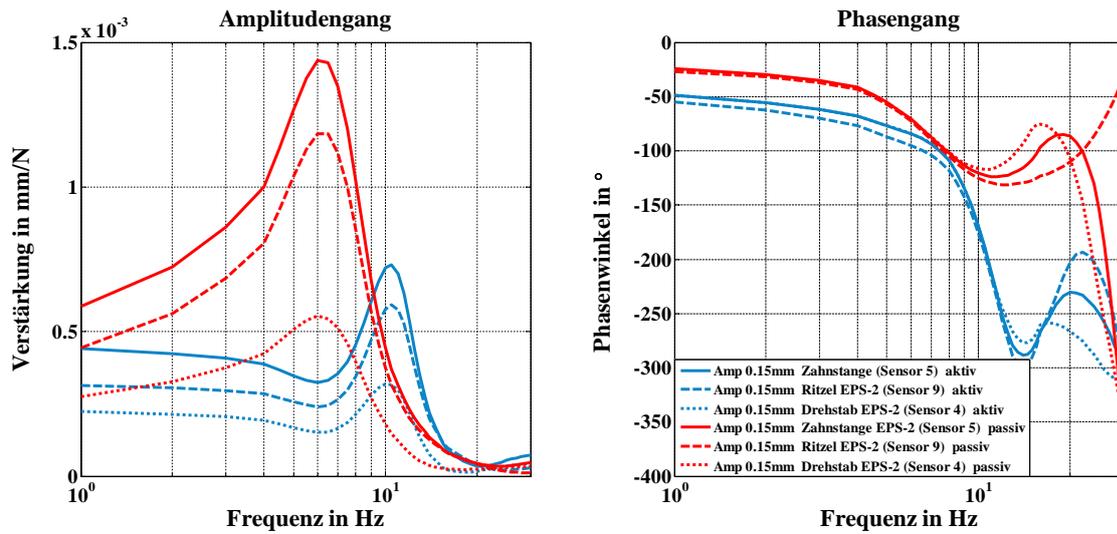
In Abbildung 4.46 sind die Testreihen mit aktiver Lenkunterstützung dargestellt. Auffällig ist der Einfluss der aktiven Lenkunterstützung. In den bisherigen Testreihen verringerte sich die Verstärkung bei aktiver Lenkunterstützung. In diesen Testreihen ist eine zusätzliche Verstärkung durch die Lenkunterstützung zu erkennen. Bei einer hohen Unterstützung (30 km/h) ist eine Verstärkung im Vergleich zur passiven Testreihe zu sehen. Bei niedrigeren Unterstützungskräften nähern sich die Testreihen dem passiven Verhalten an bzw. die Verstärkung wird geringfügig kleiner. Es lässt sich daraus schließen, dass durch das frei schwingende Lenkrad der Drehstab tordiert und eine entsprechende Unterstützungskraft eingestellt wird, welche die zusätzliche Verstärkung verursacht. Die Unterstützungskraft selbst setzt sich aus verschiedenen Anteilen zusammen (Abb. 1.5). Zur Analyse der Abhängigkeiten der einzelnen Softwarekomponenten in der Unterstützungskraft bedarf eines internen Zugriffs auf die einzelnen Softwarekomponenten. Dieser Zugriff war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich und wurde daher nicht näher betrachtet.



**Abbildung 4.46:** Vergleich Lenksystem aktiv u. passiv: Übertragungspfad Zahnstangenweg - Lenkradwinkel

### Auswertung der Testreihen mit Zusatzsensorik

In den bisherigen Testreihen zur Ermittlung des Rückmeldeverhaltens eines Lenksystems wurden die Verstärkung zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße betrachtet. Durch das neu entwickelte Testverfahren mit weiteren Sensoren im Übertragungspfad zwischen Zahnstange und Lenkrad können weitere Erkenntnisse zum Rückmeldeverhalten eines Lenksystems gewonnen werden. Im Folgenden (Abb. 4.47) werden zusätzliche Messstellen im Übertragungspfad ausgewertet und bewertet. Hierzu wird die Zahnstange mit einem Kraftsinus und einer Amplitude von 500 N angeregt. Das Lenksystem wird mit passiver und aktiver Lenkunterstützung betrieben. Die Messstellen, welche ausgewertet werden, erfassen die jeweilige Bewegung im Übertragungspfad. Zur besseren Darstellung wurden die Ergebnisse in Anlehnung an [51] in einer sogenannten normierten Darstellung ausgewertet. Die erfassten Drehbewegungen im Lenkstrang (Lenkrad - Lenksäule - Lenkritzel) werden über den Ritzelradius  $r_R$  in eine Zahnstangenbewegung umgerechnet (Einheit = Zahnstangenweg in mm). Somit ist eine direkte Vergleichbarkeit der einzelnen Ergebnisse in der Übertragungstrecke möglich. Zusätzlich zum Amplitudengang wird bei der normierten Auswertung der Phasengang dargestellt. Der Phasengang ist beim Vergleich der Messstellen von Interesse, da sich die einzelnen Bauteile in der Phase je nach Anregung und Unterstützungskraft unterscheiden können. Die Anregungsarten können wie in den vorangegangenen Testreihen entsprechend den Möglichkeiten des Lenksystemprüfstands ausgewählt werden (Abb. 4.38). Als Beispiel mit aussagekräftigen Ergebnisse wurde hier eine Testreihe mit Kraftanregung und fixiertem Lenkrad ausgewählt und durchgeführt.



**Abbildung 4.47:** Vergleich Lenksystem aktiv u. passiv: Übertragungspfad Zahnstangenkraft - Ritzeleingang - Ritzelausgang (Drehstab) - Lenkrad (fixiert)[64]

Das Lenksystem wurde mit passiver und aktiver Lenkunterstützung getestet. Die gestrichelten und gepunktete Linie zeigen jeweils die Messstelle an einem Bauteil des Lenksystems und dessen Einfluss. Die Nummerierungen der Sensoren beziehen sich auf die Beschreibung in Abbildung 4.37. Die in rot dargestellten Ergebnisse sind die des passiven Lenksystems, d.h. ist es nur der mechanische Einfluss im Übertragungsverhalten sichtbar. Die blauen Kurven repräsentieren das aktive Lenksystem. Das aktive System verschiebt den Maximalwert der Verstärkung und erhöht im Frequenzbereich zwischen 8-10 Hz deutlich das Rückmeldeverhalten. Sowohl beim passiven als auch beim aktiven Lenksystem zeigt sich der Einfluss des Drehstabs auf das Übertragungsverhalten, welcher die Rückmeldung signifikant reduziert. Es zeigt sich, dass mit diesem Testverfahren der Einfluss der einzelnen Bauteile eines Lenksystems nachgewiesen werden. Wichtige Erkenntnisse liefert das Testverfahren im Vergleich von Lenksystemen. Es kann das Übertragungsverhalten zu jeder Messstelle am Lenksystem erstellt und ausgewertet werden. Aufgrund der nicht vorhandenen Temperaturkammer am Lenksystemprüfstand wird in dieser Arbeit der Temperatureinfluss nicht näher betrachtet. In den hier vorgestellten Testreihen wurde die Temperatur des Prüflings überwacht und auf einem konstantem Temperaturniveau gehalten (20-22 °C).

### Zusammenfassung und Fazit

Zur Ermittlung des Rückmeldeverhaltens von Lenksystemen wurden vier Testkonfigurationen vorgestellt. Basierend auf dem in der Literatur [57] definierten Übertragungspfad für Störgrößen (Zahnstangenkraft  $\rightarrow$  Lenkradmoment) ist zur Ermittlung des Rückmeldeverhaltens die Testkonfiguration mit einer Kraftanregung an der Zahnstange und fixiertem Lenkrad zur Messung des Lenkradmoments am besten geeignet. Zur Ermittlung von Eigenfrequenzen im Lenkstrang kann die Testkonfiguration mit einer Weganregung der Zahnstange und einem frei schwingenden Lenkrad angewandt werden. Diese beiden Testreihen haben sich als zielführend hinsichtlich der gewonnenen Erkenntnisse erwiesen und werden im Vergleich von Lenksystemen Anwendung finden (Unterabschnitt 5.3.2). Die Testreihen können auch mit der Zusatzsensorik betrieben und in der normierten Darstellung ausgewertet werden. Die weiteren Testkonfigurationen haben trotz der geringeren Relevanz eine Berechtigung, zumal zunächst der Blickwinkel bestand, welche Testreihen zur Ermittlung des Rückmeldeverhaltens am Lenksystemprüfstand möglich sind. Als Beispiel kann für das Hands-Off Verhalten bei aktiven Fahrerassistenzsystemen die Testreihe mit einer Zahnstangenkraftanregung und nicht fixiertem Lenkrad verwendet werden.

Die Ergebnisse zeigen die Testreihen mit passiver und aktiver Lenkunterstützung. Die E/E-Komponenten sind als Blackbox vorhanden, d.h. diese konnten nicht verändert werden. Die verschiedenen Softwaremodule führen zu einem nichtlinearen Verhalten [57]. In den Ergebnissen konnte mit Ausnahme der geschwindigkeitsabhängigen Lenkunterstützung keine Aussage über die Einflüsse einzelner Softwarekomponenten und der Parametrisierung getroffen werden.

## 4.4 Charakterisierung durch Fahrmanöver

Auf Basis des in Abschnitt 3.4 beschrieben und am Lenksystemprüfstand umgesetzten Hardware-in-the-Loop (HiL) Betriebs können innerhalb der Grenzen der Aktuatoren beliebige Fahrmanöver auf Gesamtfahrzeugebene durchgeführt werden. Dieser Betriebsmodus war auf Prüfeinrichtungen bisher kaum umgesetzt und leistet in dieser Arbeit einen wichtigen Beitrag zur Darstellung von Fahrmanövern, welche bisher nur im Fahrzeug durchgeführt wurden. Somit ist ein vom Fahrzeug unabhängiges Testen und eine Charakterisierung des Lenksystems durch Fahrmanöver möglich. Hierbei kommen die bereits mehrfach erwähnten Vorteile, wie flexible Testgestaltung, Testparametervariation oder vielfältige Messstellen an Lenksystem und Lenksystemprüfstand, zum Tragen. In dieser Arbeit wurden zunächst die Standardlenkmanöver aus der Lenksystementwicklung [57] über die Entwicklungsumgebung des Fahrzeugmodells umgesetzt (siehe auch Unterabschnitt 3.4.3), um objektive Kenngrößen zur Charakterisierung zu ermitteln. Es handelt sich hierbei um Open-Loop Manöver (1.3.2). Closed-Loop Manöver (1.3.3), wie z.B. ein 18 m Slalom oder ein ISO-Spurwechsel, können am Lenksystemprüfstand dargestellt werden, sind aber nicht Bestandteil dieser Arbeit. Zusammenfassend stellt die Charakterisierung durch Fahrmanövern an einem Lenksystemprüfstand einen neuen Teilprozess in der Entwicklung von Lenksystemen dar, da diese Tests bisher im Fahrzeug erfolgten (siehe Abb. 2.3). Nun kann dieser Entwicklungsschritt bereits in der Frühphase der Komponentenentwicklung mit ersten Musterbauteilen erfolgen.

Weiterhin stellen die in diesem Abschnitt beschriebenen Fahrmanöver im HiL- Betrieb die Grundlage für weitere Fahrmanöver dar, welche relevant für die Entwicklung von Lenksystemen sind. Hierzu zählen Freigabetests für Softwarestände, die bisher nur im Fahrzeug durchgeführt werden. Durch eine Umsetzung auf einem Lenksystemprüfstand können mit der automatisierten Testdurchführung Zeit und Kosten eingespart und Softwarestände reproduzierbar, Fahrzeug unabhängig getestet werden. Automobilhersteller haben hierfür spezielle Fahrmanöverkataloge, die an die Anforderungen der Fahrzeugklassen angepasst sind. In Unterabschnitt 3.3.3 wurde die Integration von elektromechanischen Lenksystemen beschrieben. Durch die Energieversorgung des Lenksystems mit einem Labornetzgerät können im zulässigen Spannungsbereich des Lenksystems Spannungseinbrüche und Strombegrenzungen während eines Fahrmanövers definiert dargestellt werden, um das Verhalten mit verminderter Systemleistung beispielsweise bei einem Spurwechsel zu testen oder das Degradierungskonzept zu prüfen. Im Fahrzeug sind diese Testreihen nur mit erheblichen Aufwänden darstellbar. Nebeneffekt durch das Testen auf einem Lenksystemprüfstand ist, dass bei allen Testreihen auf Gesamtfahrzeugebene weder Fahrer noch Umwelt gefährdet werden.

Zur Umsetzung der Fahrmanöver wurde das Fahrzeugmodell entsprechend dem Ziel- bzw. Entwicklungsfahrzeug parametrieren. Die Parametrierung des Fahrzeugmodells ist hierbei auf eine hinreichend genaue Modellierung der Zahnstangenkraft ausgelegt. Über die Zahnstangenkraft und den aufgeprägten Lenkradwinkel stellt sich das resultierende Lenkradmoment ein. Entsprechend können auf dem Lenksystemprüfstand unter gleichen Randbedingungen verschiedene Lenksysteme getestet werden. Aus den Ergebnissen können direkt die unterschiedlichen Charakteristiken in den Fahrmanövern zwischen den Lenksystemen ermittelt werden. Über einen Manöverassistenten werden die Fahrmanöver mit den entsprechenden Variablen definiert. Diese Variablen können über einen Testmanager automatisiert verändert werden. Die Testreihen gestalten sich somit variantenreich und effizient, da ein Test einmalig definiert und lediglich die Testvariablen verändert werden. Der Lenksystemprüfstand im Hardware-in-the-Loop Betrieb sind alle Aktuatoren in Verwendung (Abb. 4.48). Die Aufprägung der Zahnstangenkraft erfolgt über beide Spurstangenkraftaktuatoren. Der Lenkradaktuator setzt die Lenkradwinkelvorgabe um (Tab. 4.14). Die Sollwertgenerierung für das Lenksystem (Fahrndynamikdaten, Bordnetz) erfolgt durch das Fahrzeugmodell und wird über die Restbussimulation an das Lenksystem übertragen.

### Prüfstandkonfiguration

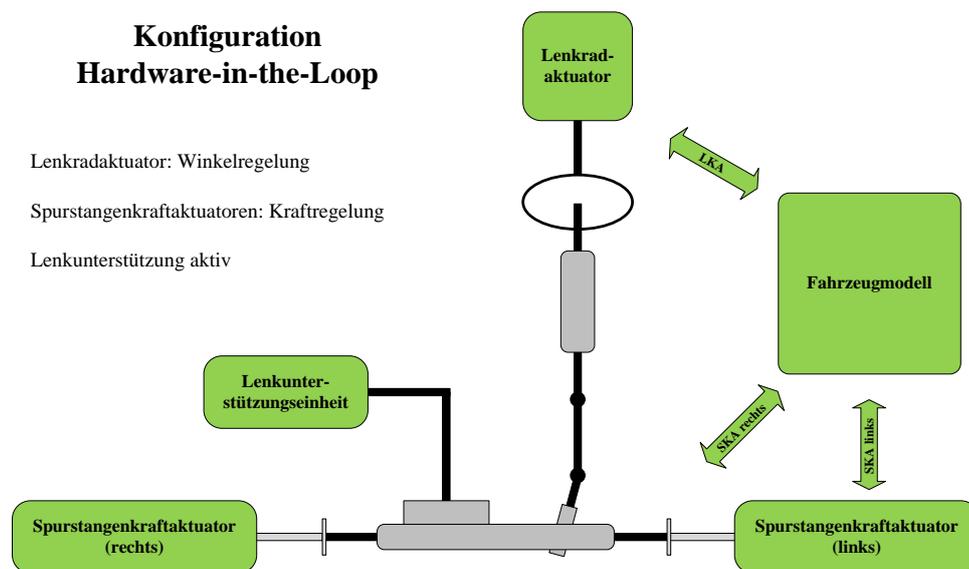


Abbildung 4.48: Versuchsaufbau Charakterisierung durch Fahrmanöver

## Fahrzeugmodell

Die Integration des Fahrzeugmodells wurde bereits in Unterabschnitt 3.4.1 eingehend beschrieben. Die wichtigsten Details sind an dieser Stelle nochmals zusammengefasst. Als Fahrzeugmodell wird die Software CarMaker von IPG Automotive verwendet, welche in die vorhandene modellbasierte Lenksystemprüfstandsteuerung integriert und mit den definierten Schnittstellen verbunden wird. Die Schnittstellengrößen sind in der Hardware-in-the-Loop Konfiguration der Lenkradwinkel und die Spurstangenkräfte links und rechts. Über eine integrierte Manöversteuerung in der Benutzeroberfläche des Fahrzeugmodells wird der Lenkradwinkelverlauf vorgegeben. Hieraus berechnet das Fahrzeugmodell die Spurstangenkräfte, wodurch sich ein resultierendes Lenkradmoment einstellt. Das Fahrzeugmodell muss für eine realitätsnahe Modellierung die Spurstangenkräfte in einer ausreichenden Güte berechnen. Hierzu muss das Fahrzeugmodell entsprechend parametrisiert werden. Der Parametrisierung der Achsen und Reifen fällt eine hohe Gewichtung zu. Zur Validierung der Schnittstellengrößen wurden im realen Fahrversuch repräsentative standardisierte Fahrmanöver (z.B. WeaveTest) aus dem Lenksystemversuch durchgeführt. Zur Verbesserung der Modellgüte wurden die Modellparameter der Achsen und der Reifen [13] variiert, bis eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse erzielt wurde. Mit dem gleichen Verfahren wurden die weiteren Testreihen in Abschnitt 4.4 validiert.

## Eingangs- und Messgrößen

Eingangsgrößen	Wertebereich		Messgrößen	Messbereich
Lenkradwinkel (Vorgabe)	+/- 500 °		Lenkradmoment	+/- 20 Nm
Zahnstangenkraft (Vorgabe)	+/- 15 kN		Zahnstangenweg	+/- 75 mm
Bordnetzspannung	9 - 14 V		Lenkradwinkel	+/- 500 °
Fahrzeug- geschwindigkeit	0 - 250 km/h		Zahnstangenkraft	+/- 15 kN
Fahrzeugzustand (Klemmenstatus)			Fahrdynamikdaten Fahrzeugmodell	Fahrzeuggeschwindigkeit, Gierrate, Querschleunigung, etc.
			Stromaufnahme	+/- 100 A

**Tabelle 4.14:** Eingangs- und Messgrößen Fahrmanöver

Die in Tabelle 4.14 aufgelisteten Messgrößen sind die wichtigsten Größen zur Beurteilung der Fahrmanöver. Es können zusätzliche Messgrößen von Lenksystemprüfstand, Lenksystem und Fahrzeugmodell aufgezeichnet werden.

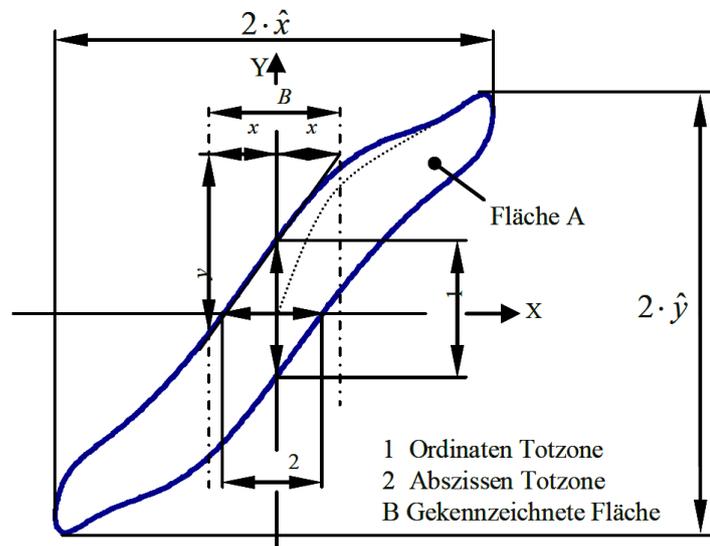
#### 4.4.1 Weave-Test (Sinuslenken)

Der Weave-Test nach ISO 13674-1 [33] eignet sich für die Charakterisierung des Lenkgefühls um die Mittenlage (“OnCenter Handling”) eines Lenksystems. Die Testdurchführung erfolgt bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit durch Vorgabe eines sinusförmigen Lenkradwinkels mit konstanter Amplitude und Frequenz. Die Größe der Lenkradwinkelamplitude kann auf einen definierten Lenkradwinkel oder auf einen aus einer definierten Querbewegung resultierenden Lenkradwinkel bezogen werden. Am Lenksystemprüfstand wird in letzterem Fall zunächst in einem Vortest der resultierende Lenkradwinkel bei einer definierten Querbewegung ermittelt. Die Vorgabe der Fahrzeuggeschwindigkeit erfolgt über die Restbussimulation. Die typischen Wertebereiche für die Testparameter eines Weave-Tests sind in Tabelle 4.15 aufgelistet [57].

Parameter:	Fahrzeuggeschwindigkeit	Amplitude Lenkradwinkel	Frequenz	Amplitude a <sub>quer</sub>
Wertebereich:	50 - 160 km/h	2.5 ° - 10 °	0.2 Hz - 0.5 Hz	2 m/s <sup>2</sup> - 4 m/s <sup>2</sup>

Tabelle 4.15: Testparameter Weave-Test

#### Bewertung und objektive Kenngrößen



$$\text{Gradient} = \frac{y}{2x}; \text{Verhältnis} = \frac{\hat{y}}{\hat{x}}; \text{Spez.Fläche} = \frac{A}{4 \cdot \hat{x} \cdot \hat{y}}$$

Abbildung 4.49: Definition der Objektivierungsparameter nach ISO-13674-1 Weave-Test [33, 57]

Die Charakterisierung des Lenkgefühls um die Mittenlage erfolgt durch objektive Kenngrößen. Eine Vielzahl dieser objektiven Kenngrößen (Parametern) zur Auswertung aus den Messdaten des Weave-Tests sind in der ISO 13674-1 [33] beschrieben. Die Ergebnisse der einzelnen Messkanäle können zur Auswertung entsprechend in einem kartesischen Koordinatensystem aufgetragen. Für den Weave-Test wurden in dieser Testreihe beispielhaft die in Abbildung 4.50 dargestellten Messkanäle gegenübergestellt. Die objektiven Kenngrößen sind für die Darstellung Lenkradmoment vs. Lenkradwinkel gemäß Tabelle 4.16 ausgewertet worden.

Parameter:	Lenksteifigkeit (rechts)	Lenksteifigkeit (links)	Lenkungsreibung	Lenkwinkel-hysteresis
Messgröße:	Gradient zwischen $\pm 20\%$ Lenkwinkelamplitude	Gradient zwischen $\pm 20\%$ Lenkwinkelamplitude	Totzone Ordinate (1)	Totzone Abszisse (2)

Tabelle 4.16: Objektivierungsparameter Weave-Test (Lenkradmoment vs. Lenkradwinkel)

### Testergebnisse

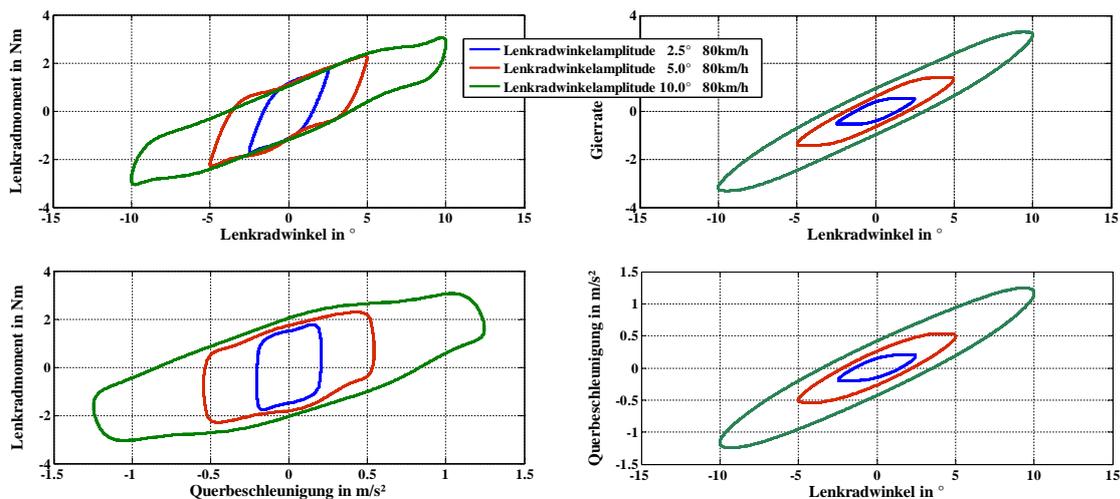


Abbildung 4.50: Auswertung Weave-Test  $v = 80 \text{ km/h}$

Abbildung 4.50 zeigt eine Auswahl von Diagrammen gemäß ISO 13674-1 [33]. Die Daten wurden in einer Testreihe, bestehend aus vier Einzeltests, bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h gewonnen. Bei den vier Einzeltests wurde die Lenkradwinkelamplitude variiert (2.5°, 5°, 10°) und mit einer Frequenz von 0.5 Hz aufgeprägt. ISO 13674-1 [33] beschreibt zusätzlich die Darstellung von Gierrate vs. Lenkradmoment.

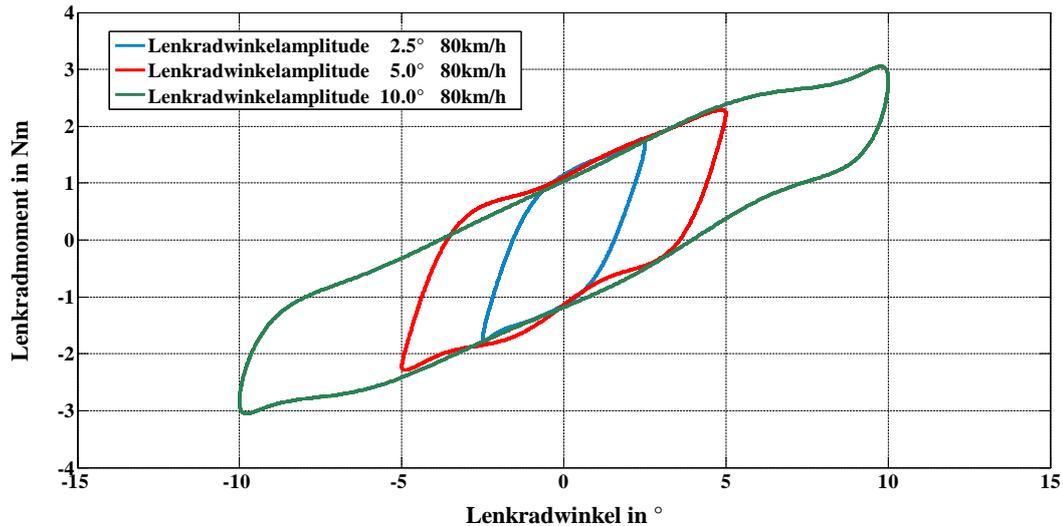


Abbildung 4.51: Auswertung Weave-Test  $v = 80 \text{ km/h}$

Die objektiven Kenngrößen (Parameter) für die Gegenüberstellung von Lenkradmoment und Lenkradwinkel (Abb. 4.51) wurden in Tabelle 4.17 ausgewertet und gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Charakteristik des Lenksystems bei gleicher Fahrzeuggeschwindigkeit und variiertem Lenkradwinkel konstant bleibt und das Lenken um die Mittelage bei kleinen Lenkradwinkeln ( $\leq 10^\circ$ ) ein ähnliches Verhalten aufweist. Lediglich die Lenkwinkelhysterese wird analog zum aufgebrauchten Lenkradwinkel größer.

Parameter:	Lenksteifigkeit (rechts)	Lenksteifigkeit (links)	Lenkungs- reibung	Lenkwinkel- hysterese
Amp=2.5°:	0.3579 Nm/°	0.3379 Nm/°	2.2880 Nm	3.1323 °
Amp=5.0°:	0.3388 Nm/°	0.3264 Nm/°	2.1597 Nm	7.2083 °
Amp=10°:	0.2721 Nm/°	0.2500 Nm/°	2.2251 Nm	7.7922 °

Tabelle 4.17: Objektive Kennwerte Weave-Test 80 km/h (Abb. 4.51)

Die Tests in Abbildung 4.50 und 4.51 wurden mit einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h durchgeführt. Zur Beurteilung des Einflusses der Fahrzeuggeschwindigkeit wurde diese in einer weiteren Testreihe bei einem konstanten Lenkradwinkel variiert. Die Ergebnisse und die unterschiedliche Einflüsse sind in Abbildung 4.52 dargestellt. Hierzu zählen die Abstimmung der Verstärkungskennlinie und die anliegende Zahnstangenkraft, welche maßgeblich das resultierende Lenkradmoment beeinflusst. Bei höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten wird die Lenkunterstützung zurückgenommen (Verstärkungskennlinie, Unterabschnitt 4.2.4), d.h. der Fahrer muss beim Lenken mehr Handmoment aufbringen. Es ist angemerkt, dass je nach Ausführung und Abstimmung von weiteren Softwaremodulen auch diese einen Einfluss auf die Charakteristik haben können.

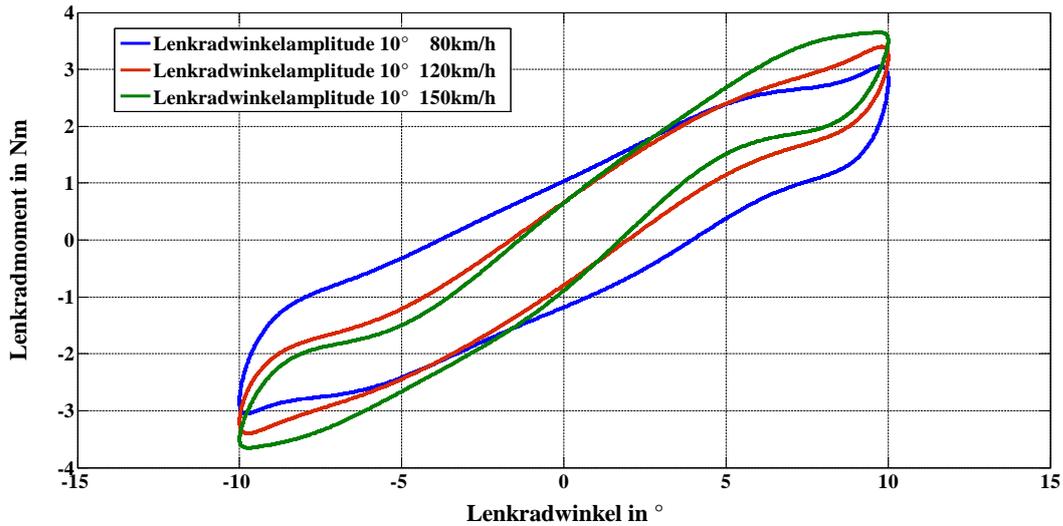


Abbildung 4.52: Auswertung Weave-Test Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit ( $v = 80, 120, 150 \text{ km/h}$ )

Durch die Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit bei gleichem Lenkradwinkel ändern sich die objektiven Kennwerte. Die Lenksteifigkeit (rechts/links) steigt an und die Lenkungsreibung um die Mittellage sowie die Lenkwinkelhysterese nehmen ab.

Parameter:	Lenksteifigkeit (rechts)	Lenksteifigkeit (links)	Lenkungsreibung	Lenkwinkelhysterese
80 km/h:	0.2721 Nm/°	0.2500 Nm/°	2.2251 Nm	7.7922 °
120 km/h:	0.3960 Nm/°	0.3859 Nm/°	1.5439 Nm	3.5883 °
160 km/h:	0.4514 Nm/°	0.4610 Nm/°	1.4405 Nm	3.1062 °

Tabelle 4.18: Objektive Kennwerte Weave-Test Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit ( $v = 80, 120, 150 \text{ km/h}$ ) (Abb. 4.52)

In diesem Unterabschnitt wird zunächst die Umsetzung des Weave-Tests am Lenksystemprüfstand am Beispiel eines elektromechanischen Lenksystems dargestellt. Zur Einordnung der objektiven Kenngrößen wird in Kapitel 5 der Test mit einem konventionellen hydraulischen Lenksystem und zwei elektromechanische Lenksysteme durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass es nun möglich ist die objektiven Kenngrößen des Weave-Tests für ein Lenksystem in der teil-virtuellen Welt zu ermitteln.

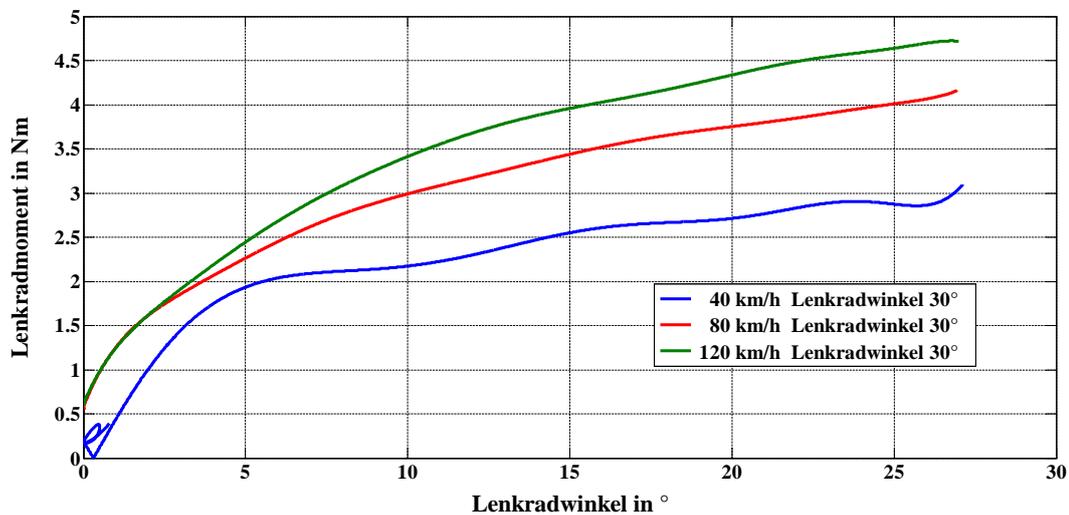
#### 4.4.2 Transition-Test (stationäres Anlenken)

Der Transition-Test nach ISO 13674-2 [34] beschreibt ein Open-Loop Fahrmanöver, bei welchem der Lenkradwinkel mit einem sehr kleinem Gradienten (quasi-stationär) und konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit gesteigert wird. Zur Auswertung werden die Reaktionsgrößen des Fahrzeugs (Gierrate und Querbeschleunigung) dem Lenkradmoment und dem Lenkradwinkel gegenüber gestellt. In Tabelle 4.19 sind verwendeten Testparameter beschrieben.

Parameter:	Fahrzeuggeschwindigkeit	Lenkradwinkel	Steigung Lenkradwinkel
Wertebereich:	40, 80, 120 km/h	30 °	5 °/s

**Tabelle 4.19:** Testparameter Transition-Test

Bei diesem Test hat das Fahrzeugmodell einen signifikanten Einfluss. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse bei der Auswertung bezogen auf Gierrate und Querbeschleunigung anteilig das Verhalten bzw. die Parametrierung des Fahrzeugmodells widerspiegeln. Es können jedoch Aussagen über das Gesamtfahrzeugverhalten des Lenksystems getroffen werden. Zusätzlich eignet sich die Testreihe zum Vergleich verschiedener Lenksysteme, da unter den gleichen Randbedingungen das unterschiedliche Verhalten der Lenksysteme direkt messbar ist. Der Einfluss des Fahrzeugmodells ist bei allen Testvariationen gleich.



**Abbildung 4.53:** Auswertung Transition-Test Lenkradmoment vs. Lenkradwinkel ( $v = 40, 80, 120$  km/h)

Für das Lenksystem selbst hat die Gegenüberstellung von Lenkradmoment und Lenkradwinkel eine hohe Aussagekraft. Anhand des Gradienten des Lenkradmomentverlaufs über dem Lenkradwinkel kann das quasi-stationäre Anlenkverhalten eines Lenksystems

beurteilt werden. In der Auswertung in Abbildung 4.53 sind die Verläufe bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten dargestellt. Beim Anlenken (Lenkradwinkel  $< 2.5^\circ$ ) ist der Lenkradmomentgradient deutlich größer im Vergleich zu größeren Lenkradwinkeln. Ursache hierfür ist die Lenkunterstützung um die Nulllage, die Verdrehung des Drehstabs sowie die Systemreibung, welche zunächst während des Anlenkvorgangs überwunden werden muss. Diese Lenksystemeigenschaft ist auch beim Frequency-Response Test ermittelt worden. Die Ergebnisse bestätigen sich beim Transition Test für den quasi-stationären Fall. Eine weitere Anwendung dieser Testreihe und Auswertung ist der Vergleich von verschiedenen Applikationsständen eines Lenksystems. Es können reproduzierbar diverse Abstimmungen unabhängig von Umwelteinflüssen verglichen und auf einen Zielwert appliziert werden.

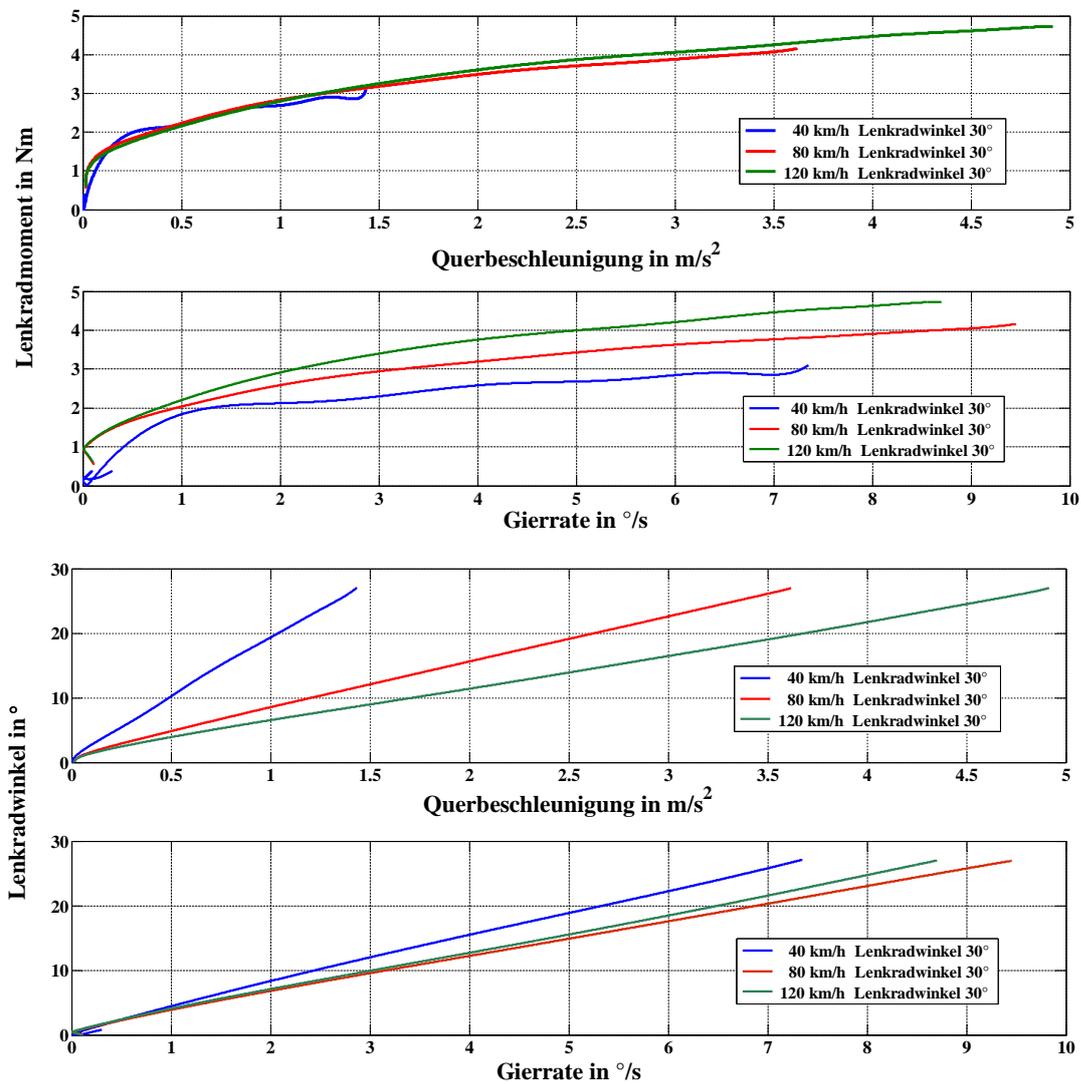


Abbildung 4.54: Auswertungen Transition-Test bezogen auf die Fahrzeugreaktion (Gierrate und Querbeschleunigung) ( $v = 40, 80, 120$  km/h)

Abbildung 4.54 zeigt die Auswertungen der Fahrzeugreaktion bezogen auf das Lenkradmoment und den Lenkradwinkel. Die Fahrzeugreaktionsgrößen bezogen auf den Lenkradwinkel haben bei den verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten im Bereich von  $0 - 5^\circ$  einen nicht-linearen Verlauf. Dieses Verhalten resultiert aus der Reibung und der Abstimmung der Softwaremodule des Lenksystems. Erst ab einem Lenkradwinkel  $> 5^\circ$  wird das Verhalten annähernd linear. Im Lenkradmoment ist dieses Verhalten ebenfalls sichtbar.

### 4.4.3 Lenkwinkelsprung

Zur Beurteilung des transienten Fahrzeugverhaltens wird der Lenkwinkelsprung nach ISO 7401 [37] herangezogen. Dabei wird das Fahrzeug bei einer Geradeausfahrt mit einem Lenkwinkelsprung angelenkt. Der Zielwert des Lenkwinkelsprungs entspricht meist diesem, bei welchem sich stationär eine definierte Querbeschleunigung einstellt. Dieser Lenkradwinkel kann in einem Vortest, beispielsweise eine stationäre Kreisfahrt (4.4.4), ermittelt werden. Aus der Sprungantwort können die Reaktionszeiten ermittelt werden. Analog zum Transition- Test ist der Lenkwinkelsprung vom Fahrzeugmodellverhalten geprägt. Zur Ermittlung des Einflusses des Lenksystems auf das Gesamtübertragungsverhalten kann diese Testreihe u.a. zur Anwendung in der in Unterabschnitt 1.5.4 vorgestellte XiL- Entwicklungsmethode kommen.

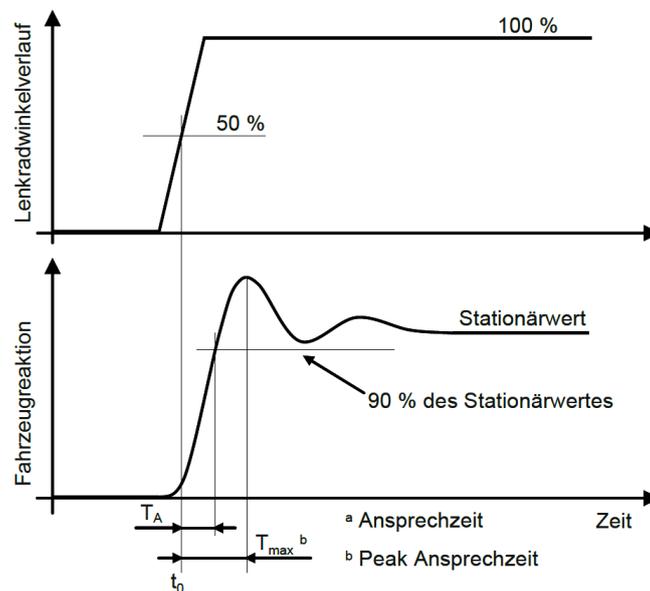


Abbildung 4.55: Auswertung Lenkwinkelsprung nach ISO 7401 [37, 57]

Als Fahrzeugreaktion kann der zeitliche Verlauf des Lenkradmoments, der Gierrate und der Querbeschleunigung herangezogen werden. Rückschlüsse auf das Lenksystem selbst können mit der Auswertung des zeitlichen Verlaufs des Lenkradmoments erfolgen.

#### 4.4. Charakterisierung durch Fahrmanöver

Parameter:	Fahrzeug- geschwindigkeit	Amplitude Lenkradwinkel	Querbeschleunigung
Werte- bereich:	80 km/h	Bestimmung aus Vortest (Stationäre Kreisfahrt)	4 m/s <sup>2</sup>

Tabelle 4.20: Testparameter Lenkwinkelsprung

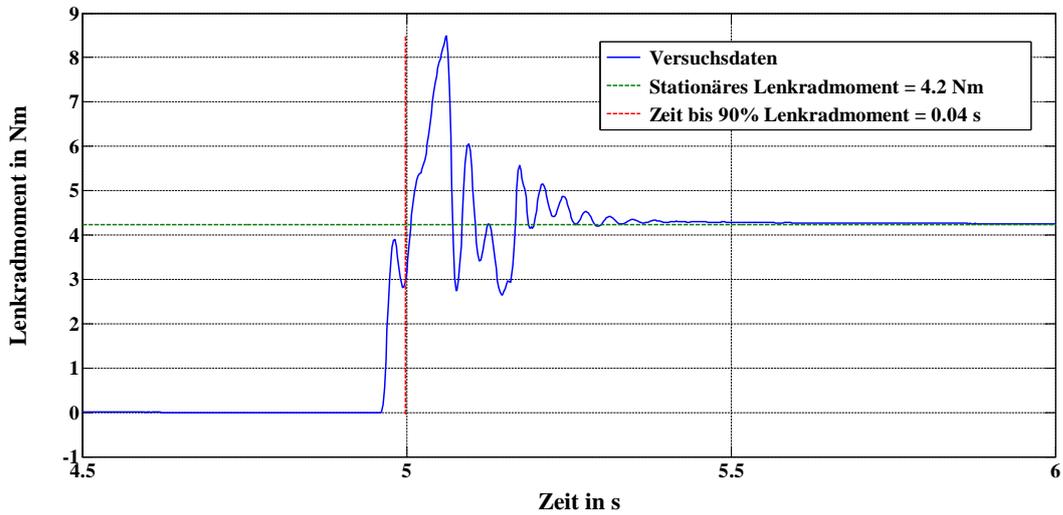


Abbildung 4.56: Auswertung des zeitlichen Verlaufs des Lenkradmoments ( $v = 80$  km/h)

Der zeitliche Verlauf des Lenkradmoments in Abbildung 4.56 zeigt den Lenkaufwand bei einem Lenkwinkelsprung. Die objektiven Kennwerte sind in der Legende vermerkt oder können aus Tabelle 4.21 entnommen werden.

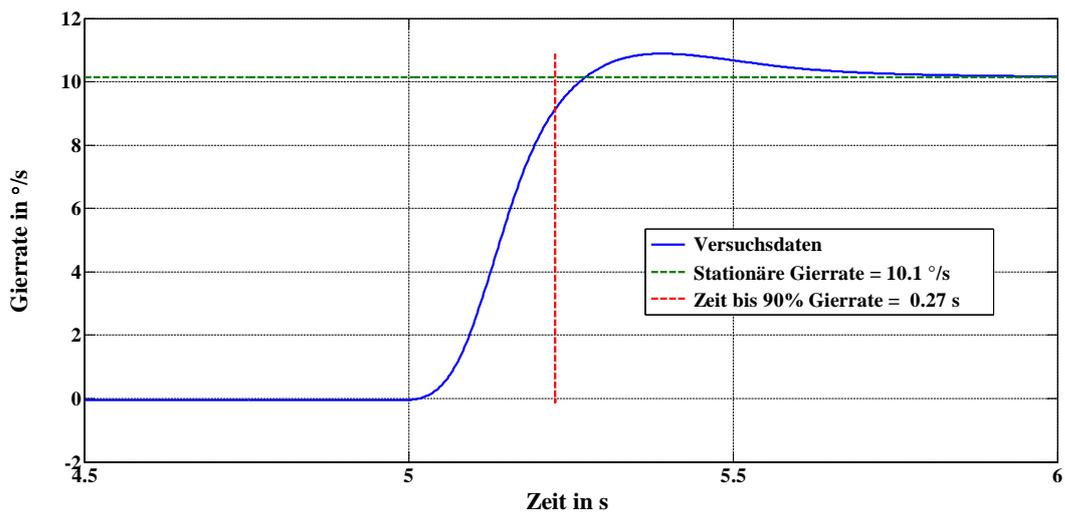


Abbildung 4.57: Auswertung des zeitlichen Verlaufs der Gierrate ( $v = 80$  km/h)

Der Aufbau der Fahrzeugreaktion kann anhand der Gierrate und der Querbearchleunigung beurteilt werden. Je nach Versuchsziel, beispielsweise zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens von Lenkradwinkel zu Gierrate und Querbearchleunigung auf Gesamtfahrzeugebene, kann dieser Test wichtige Erkenntnisse liefern. Vor allem in der bereits beschriebenen XiL-Methode kann das Gesamtübertragungsverhalten des Fahrzeugs mit einem real vorhandenen Lenksystem getestet werden.

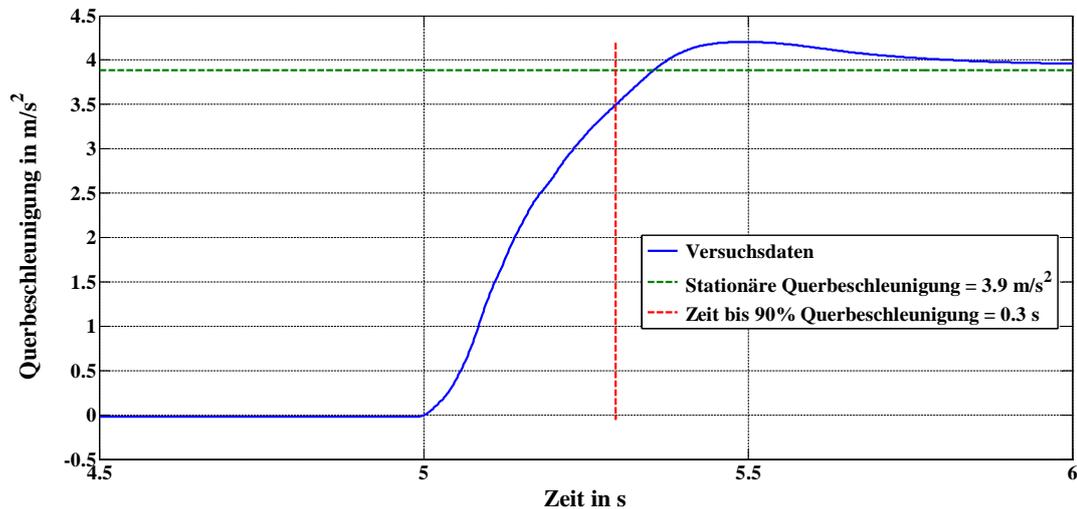


Abbildung 4.58: Auswertung des zeitlichen Verlaufs der Querbearchleunigung ( $v = 80 \text{ km/h}$ )

Parameter:	Lenkradmoment	Querbearchleunigung	Gierrate
Wert (stat.):	4.6 Nm	4.0 m/s <sup>2</sup>	10.5 °/s
Zeit:	0.04 s	0.3 s	0.27 s

Tabelle 4.21: Objektive Kennwerte Lenkwinkelsprung (Abb. 4.58)

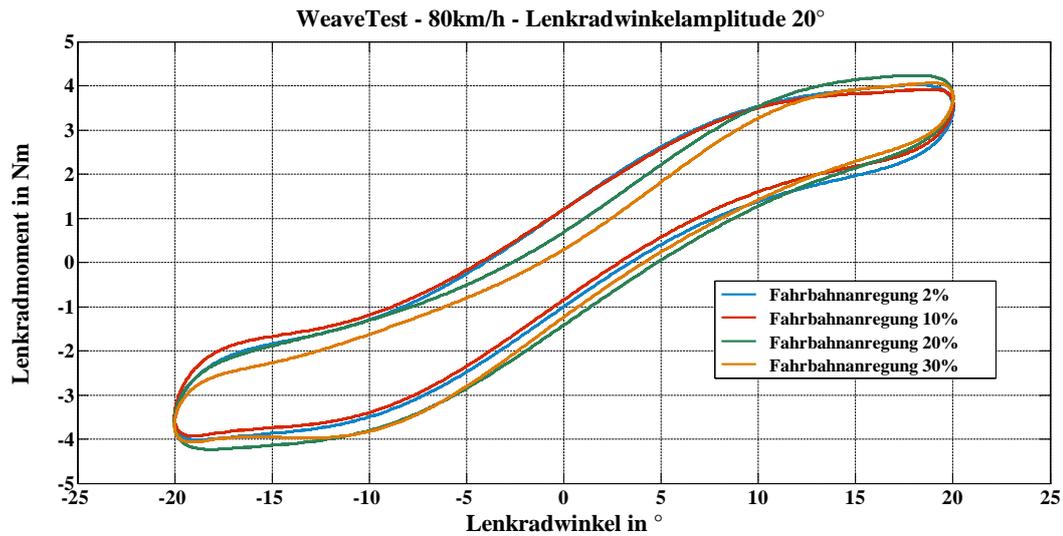
Die Skalierung der x- Achse ist im Bereich von 4.5 s - 6 s dargestellt. Die Testreihen wurden mit der Testautomatisierung umgesetzt und aufgezeichnet. Die x- Achse zeigt daher nur den Ausschnitt des Lenkwinkelsprungs während des Manövers. Die objektiven Kennwerte in den Diagrammen und in Tabelle 4.21 beziehen sich auf den Beginn des Lenkwinkelsprungs in der Messung, welcher bei 4.96 s liegt.

##### 4.4.4 Stationäre Kreisfahrt

Bei diesem Fahrmanöver wird nach ISO 4138 [36] das Eigenlenkverhalten eines Fahrzeuges bestimmt. Es wird der Zusammenhang zwischen Lenkradwinkel und Fahrzeugquerbeschleunigung dargestellt. Zusätzlich kann auch zur Beurteilung des Lenkgefühls der Zusammenhang zwischen Lenkradmoment und Fahrzeugquerbeschleunigung dargestellt werden. Das Fahrzeug fährt mit einem definierten und konstanten Lenkradwinkel eine Kreisbahn. Die Geschwindigkeit wird dabei diskret gesteigert, so dass sich eine zuvor definierte Querbeschleunigung einstellt. Meist beträgt die Schrittweite  $1 \text{ m/s}^2$  und wird bis in den fahrdynamischen Grenzbereich gesteigert. Aus den gewonnenen Fahrdynamikdaten (Lenkradwinkel, Lenkradmoment, Querbeschleunigung, Wank- und Schwimmwinkel) können die Messgrößen über der Querbeschleunigung aufgetragen und Kennlinien generiert werden. Wichtige Kenngrößen, welche aus den Fahrdynamikdaten gewonnen werden können, sind der Eigenlenkgradient und die charakteristische Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Dieses Fahrmanöver kann auf dem Lenksystemprüfstand durchgeführt werden, hat aber in der Lenksystementwicklung eine geringere Relevanz im Vergleich zu bisher vorgestellten Fahrmanövern. Der Vollständigkeit wird die stationäre Kreisfahrt an dieser Stelle im Hinblick auf Testreihen auf Gesamtfahrzeugebene mit realen Fahrzeugkomponenten erwähnt.

##### 4.4.5 Fahrmanöver mit Störanregung

Fahrmanöver zur Beurteilung des Lenkgefühls werden meist unter definierten Bedingungen auf Testgeländen durchgeführt. Es zeigt sich aber oftmals, dass sich auf öffentlichen Straßen bedingt durch Unebenheiten, Fahrbahnprofile oder Reibwert (-sprünge) spezielle Phänomene ausprägen. Diese reproduzierbar nachzustellen gestaltet sich sehr schwierig oder ist nur mit erheblichem Aufwand möglich. An dieser Stelle bietet der Lenksystemprüfstand in der Hardware-in-the-Loop Konfiguration flexible Möglichkeiten über das Fahrzeug-/ Umgebungsmodell Fahrbahnkonfigurationen in beliebiger Variation vorzugeben. So besteht die Möglichkeit Fahrbahnprofile zu definieren oder Reibwertsprünge vorzugeben, um bestimmte Phänomene aus dem realen Fahrbetrieb zu provozieren. Als Beispiel für ein Fahrmanöver mit Störanregung wird in dieser Arbeit ein Weave Test mit einer Fahrbahnanregung durchgeführt. Hierzu wurde ein spezielles Fahrbahnprofil mit Querswellen definiert. Die resultierende Anregung aus dem Fahrbahnprofil wird über das Fahrzeugmodell auf die Zahnstangenkraftvorgabe übertragen. Für eine detailliertere Untersuchung einer Störanregung wurde die Anregung aus dem Fahrbahnprofil aufgezeichnet und als externe zusätzliche Zahnstangenkraft modular in das Fahrzeugmodell integriert. Dies erlaubt verschiedene Skalierungsstufen der Fahrbahnanregung zur Untersuchung des Einflusses der Anregung. Die Skalierung der Anregung kann zwischen 0 - 100 % variiert werden.



**Abbildung 4.59:** Weave Test mit verschiedenen Skalierungsstufen der Fahrbahnanregung

Die Ergebnisse zeigen, dass sich mit steigender Fahrbahnanregung die Systemreibung des Lenksystems reduziert und damit das Lenkgefühl um die Mittellage negativ beeinflusst. Dies hat für den Fahrer zur Folge, dass sich das Lenkgefühl verändert und einen niedrigen Reibwert übermittelt, welcher nicht vorhanden ist. Ursachen hierfür ist, dass durch die Fahrbahnanregung kurzzeitig die Reifenseitenkraft abnimmt und somit die anliegenden Zahnstangenkraft. Weiterhin führt die hochfrequente Anregung dazu, dass sich die Reibverbindungen innerhalb des Lenksystems an Eingriffs- und Lagerstellen lösen und die mechanische Systemreibung sinkt. Mit geeigneten Maßnahmen kann bspw. über ein Softwaremodul dieses Verhalten kompensiert werden. Auf dem Lenksystemprüfstand werden reproduzierbar die Unterschiede nachgewiesen. Weitere Ergebnisse und Anwendungsmöglichkeiten der gewonnenen Parameter wurden in [?] publiziert.

Parameter:	Lenksteifigkeit (rechts)	Lenksteifigkeit (links)	Lenkungsreibung	Lenkwinkelhysterese
Anregung 2%:	0.2940 Nm/°	0.2951 Nm/°	2.1731 Nm	7.4507 °
Anregung 10%:	0.2800 Nm/°	0.2976 Nm/°	2.0496 Nm	7.2176 °
Anregung 20%:	0.2758 Nm/°	0.2950 Nm/°	2.1133 Nm	7.4410 °
Anregung 30%:	0.2646 Nm/°	0.3106 Nm/°	1.5409 Nm	5.3299 °

**Tabelle 4.22:** Objektivierungsparameter Weave- Test mit zusätzlicher Fahrbahnanregung (Abb. 4.59)

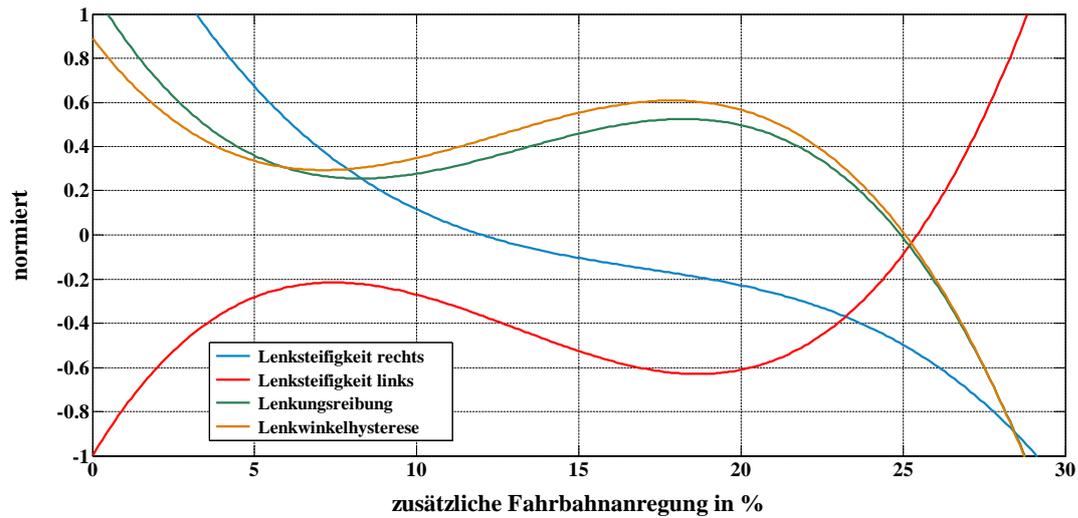


Abbildung 4.60: Objektive Kenngrößen mit verschiedenen Skalierungsstufen der Fahrbahnanregung

### Zusammenfassung

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Testreihen zur Charakterisierung eines Lenksystems durch Fahrmanöver sind aus der Lenksystementwicklung bekannt und wurden bisher im Fahrzeug durchgeführt. Der Versuchsaufbau verursacht hohe Kosten in Bezug auf die benötigte Hardware (Fahrzeug, Lenkroboter, etc.), das Versuchsgelände und den Testfahrern. Mit der Umsetzung der Fahrmanöver am Lenksystemprüfstand wurde der Nachweis erbracht die Testreihen im Rahmen einer Hardware-in-the-Loop Erprobung durchzuführen. Die Qualität der gewonnenen Ergebnisse hängt stets von der Modellgüte, der Generierung der Schnittstellengrößen (Lenkradwinkel, Zahnstangenkraft) und deren Umsetzung durch die Aktuatoren ab. Durch die Testautomatisierung und Auswertung der Messdaten kann die Variantenvielfalt der Fahrmanöver sicher beherrscht und im Entwicklungsprozess von Lenksystemen Fahrzeug unabhängig durchgeführt werden. Die Flexibilität bei der Fahrmanöverdefinition bietet die Möglichkeit spezielle Phänomene, welche beispielsweise von Fahrbahnunebenheiten verursacht werden, darzustellen. Diese und andere Fahrmanöver können auch bei allen Fahrzeuggeschwindigkeiten durchgeführt werden, da man am Lenksystemprüfstand keinen Beschränkungen der Testfläche unterliegt.

## 4.5 Betriebslastennachfahrversuche (BLNV)

Ein Betriebslastennachfahrversuch ist ein dynamische Betriebsfestigkeitsprüfung in der Automobilindustrie. In diesem Versuch wird ein Bauteil mit Messgrößen aus dem realen Fahrversuch an den Systemschnittstellen belastet. Im Falle eines Lenksystems werden die Schnittstellengrößen Zahnstangenkraft bzw. Spurstangenkraft und der Lenkradwinkel aufgezeichnet sowie weitere Messgrößen zur Validierung zwischen Fahrversuch und Prüfstand. Die Lenksystemprüfstandsteuerung sendet die Signale an die entsprechenden Aktuatoren, die die Last aus den aufgezeichneten Messgrößen auf die Schnittstelle aufprägen. Zur Validierung des Versuchs kann das im Fahrversuch aufgezeichnete Drehstabmoment mit dem resultierenden Drehstabmoment verglichen werden. Die Größe der aufzuprägenden Last richtet sich nach dem jeweiligen Fahrmanöver.

Lenksysteme in Serienfahrzeugen erfahren die höchste Belastung durch äußere Kräfte im normalen Betrieb während Parkiervorgängen. Da ein einzelner Testdurchlauf (Lenken von Endanschlag zu Endanschlag) nur von kurzer Dauer ist, wird dieser Zyklus in einer definierten Zeitspanne dauerhaft wiederholt. Die Zeitspanne richtet sich dabei nach den Testanforderungen, welche in einem Freigabeprozess für das Lenksystem festgehalten sind. Prüfstandsversuche sind dabei eine wichtige Säule im Freigabetestprozess unabhängig vom Gesamtfahrzeug. Neben Parkiertests können bei hochdynamischen Fahrten auf Teststrecken oder bei Sonderereignissen wie Missbrauch kurzzeitige Spitzenlasten an der Zahnstangen eine hohe Belastung für das Lenksystem darstellen. Die Eingangsgrößen können auch aus Simulationsergebnissen generiert werden, wenn zur Entwicklungsphase noch keine realen Messdaten aus dem Fahrversuch vorliegen. Bei der Aufzeichnung der Messgrößen im Fahrversuch können über die einzelnen Messverfahren und Übertragungstrecken Zeitverzögerungen und Signalrauschen entstehen. Daher ist für die weitere Verwendung der Messdaten eine Datenaufbereitung unerlässlich. Zunächst müssen die Zeitverzögerungen im Messaufbau ermittelt werden. In der Messdatenaufbereitung werden die Zeitverzögerungen entsprechend berücksichtigt. Weiterhin ist eine Filterung der Messdaten notwendig um das Messrauschen zu unterdrücken. Die im realen Signalverlauf nicht enthaltenen Frequenzanteile würden über die Aktuatoren eine verfälschte Belastung des Lenksystems erzeugen.

Ein Betriebslastennachfahrversuch stellt die höchsten Leistungsanforderungen an einen Lenksystemprüfstand. Daher erfolgt die Auslegung der oberen Leistungsgrenze nach den maximalen Spitzenlasten in einem Betriebslastennachfahrversuch, sofern diese Art von Test eine Anwendung auf der Prüfeinrichtung finden soll. Spitzenlast bedeutet in diesem Abschnitt neben dem nominalen Wert auch die Dauer und die Dynamik der aufzuprägenden Last. Diese Aktuatoreigenschaften sind bei der Auslegung zu berücksichtigen. Durch die Prüfstandkonzeption mit zwei Spurstangenkraftaktuatoren können deutlich höhere Lasten bei einer hohen Dynamik aufgeprägt werden.



# 5 Charakterisierung von Lenksystemen im Vergleich

Die in Kapitel 4 definierten Testreihen zur Charakterisierung von Lenksystemen und der in Kapitel 3 konzipierte Lenksystemprüfstand werden angewendet, um nachzuweisen, welche Potentiale die Kombination aus Lenksystemprüfstand und den Testreihen zur Charakterisierung bietet und welche Erkenntnisse abgeleitet werden können. Hierzu werden in den ausgewählten Testreihen am Lenksystemprüfstand ein konventionelles hydraulisches Lenksystem (HPS) und zwei elektromechanische Lenksysteme (EPS) mit achsparallelem Antrieb und unterschiedlichen Regelungskonzepten getestet. Die Lenksysteme finden in derselben Fahrzeugklasse Verwendung und haben ähnliche Leistungsdaten. Somit ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Die hier vorgestellten Ergebnisse repräsentieren die erkenntnisreichsten Testreihen zum Vergleich von Lenksystemen auf einem Lenksystemprüfstand und zeigen die neu geschaffenen Möglichkeiten auf verschiedene Lenksystemkonzepte unter denselben Randbedingungen zu testen und zu vergleichen. Weiterhin werden die Testreihen wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Unterschiede zwischen den einzelnen Lenksystemkonzepten liefern.

## 5.1 Untersuchte Lenksysteme

Die untersuchten Lenksysteme und deren Wirkprinzipien wurden in den vorherigen Kapiteln bereits in Grundzügen beschrieben (1.2.1, 1.2.2, 4.1). In diesem Abschnitt werden die Lenksysteme und deren Eigenschaften aus Gründen der Übersicht nochmals zusammengefasst. Die Lenksysteme sind Zahnstangenlenkungen mit Hilfskraftunterstützung und haben folgendes Wirkprinzip. Es stellt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen anliegender Zahnstangenkraft, Fahrerhandmoment und Unterstützungskraft ein. Für jede Zahnstangenkraft ergibt sich eine Summe aus Fahrerhandmoment (Drehstabmoment) und Unterstützungskraft (Gl.5.1). Diese Funktionalität wird entsprechend des Lenksystemtyps appliziert, um das gewünschte Lenkgefühl über den geforderten Fahrdynamikbereich zu erhalten. Je nach Fahrzeugklasse und fahrdynamischer Ausprägung unterscheiden sich die Anforderungen an das Lenkgefühl. Über den gesamten Fahrdynamikbereich muss ein Kompromiss in der Abstimmung gefunden werden.

$$F_{ZS} = T_{DS} \cdot i_R + F_{UE} \quad (5.1)$$

Bei konventionellen hydraulischen Lenksystemen ist eine Applikation des Lenksystems nur über die mechanische Abstimmung des Drehschiebeventils möglich. Die Applikationen von elektromechanischen Lenksystemen wird durch Applikationsparameter innerhalb der spezifischen Softwaremodulen durchgeführt. Die softwaretechnische Variation der Parameter ermöglicht eine schnelle Umsetzung von verschiedenen Parametereinstellungen und damit diverser Applikationsvarianten. In dieser Arbeit wird auf eine Variation der Parameter aufgrund der fehlenden Zugriffsmöglichkeiten verzichtet. Kern der Untersuchung ist die Charakterisierung und der Vergleich von verschiedenen Lenksystemen (HPS vs. EPS) und deren Regelungskonzepten, sofern eine E/E-Komponente am Lenksystem vorhanden ist. Alle verwendeten Lenksysteme sind industrialisierte Serienprodukte.

Bereits in Abschnitt 1.2 wurden die grundlegenden Unterschiede der Lenksystemkonzepte (HPS, EPS) beschrieben. Bedingt durch den Systemaufbau haben EPS-Systeme ein potentiell schlechteres Rückmeldeverhalten im Vergleich zu hydraulischen Lenksystemen (Abb.1.7) [26, 21]. Die hohe Trägheit der bewegten Massen je nach Bauform (Zahnstange, KGT, BLDC-Motor) minimiert die Störkräfte, führt zum anderen aber zu einer schlechten Fahrbahnrückmeldung [56]. Bei den ersten elektromechanischen Lenksystemen auf dem Markt und bei aktuellen Varianten wird dieses Verhalten in der Fachpresse sehr oft beanstandet. Die folgenden Untersuchungen werden dieses Verhalten in Form von Diagrammen in verschiedenen Testreihen nachweisen.

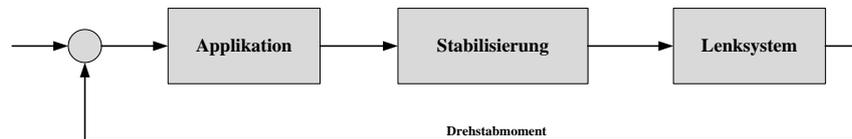
### **Hydraulisches Lenksystem (HPS)**

Bei konventionellen hydraulischen Lenkgetrieben wird die Verstärkungskennlinie (Ventilkurve) über die Abstimmung des Drehschiebeventils dargestellt. Das Drehschiebeventil stellt den hydraulischen Druck (Ausgangsgröße) abhängig vom Lenkradmoment ein und steuert den Druck in die entsprechenden Zylinderkammer [57]. Die Fördereinheit (Hydraulikpumpe) ist direkt am Verbrennungsmotor angeschlossen. Eine vertiefte Beschreibung von hydraulischen Lenksystemen ist in Unterabschnitt 1.2.1 zu finden.

### **EPS mit konventionellem Reglerkonzept (EPS-1)**

Das konventionelle Regelungskonzept von elektromechanischen Lenksystemen ist funktional eine Steuerung. In Abhängigkeit des anliegenden Drehstabmoments wird eine Unterstützungskraft aufgebracht. Das funktionale Prinzip ist analog zu einer hydraulischen Lenkung. Durch zusätzliche Softwaremodule werden Einflüsse durch die Reibung oder Trägheit kompensiert. Weitere Softwaremodule können spezifische unerwünschte Eigenschaften des Lenksystems kompensieren (vgl. Unterabschnitt 1.2.2). Das Ausgangssignal der einzelnen Softwaremodule ist jeweils ein Soll EPS-Motormoment (vgl. Abb.1.5). In Abbildung 5.1 sind die Softwaremodule im Block Applikation zusammen gefasst. In einer Summation wird

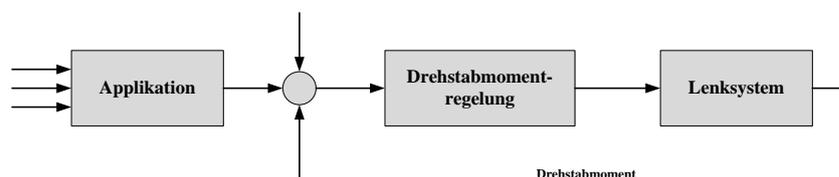
das Gesamtsoll- EPS-Motormoment gebildet. Hieraus resultiert ein entsprechendes Fahrerhandmoment (Drehstabmoment). Dieses kann nur indirekt über das EPS-Motormoment und die Stabilisierungskomponente eingestellt werden. Der Regelkreis ist ein P-Regler. Die resultierende Regeldifferenz des P-Reglers ist das Fahrerhandmoment. Die Stabilisierung kompensiert das instabile Verhalten des Regelkreises.



**Abbildung 5.1:** Blockschaltbild Regelkreis konventionelles Reglerkonzept (Konzept A)

### EPS mit Handmomentenregelung (EPS-2)

Um die Nachteile des konventionellen Ansatzes zu beheben, verfolgt dieses Regelungskonzept den Ansatz das Fahrerhandmoment zu regeln. Im Gegensatz zum konventionellen Ansatz wird nicht das EPS- Motormoment, also die Unterstützungskraft, sondern das gewünschte Fahrerhandmoment auf ein Solldrehstabmoment geregelt. Die Regelungsaufgabe teilt sich in zwei Anteile auf. Die Applikation des Fahrerhandmoments, also direkt das Lenkgefühl, und die Regelung des EPS-Motormoments zur Einstellung des gewünschten Fahrerhandmoments (vgl. Abschnitt 4.1).



**Abbildung 5.2:** Blockschaltbild Regelkreis Handmomentenregelung (Konzept B)

Da es nun möglich ist das Drehstabmoment direkt vorzugeben, kann dies in Abhängigkeit der anliegenden Zahnstangenkraft erfolgen. Die Ermittlung der anliegenden Zahnstangenkraft kann über Beobachterkonzepte oder Fahrdynamikdaten erfolgen. Ein Vorteil des Regelungskonzeptes ist, dass Reibungs- und Trägheitseffekte durch die Regelung selbst kompensiert werden. Zusätzliche Softwaremodule sind nicht mehr nötig [57, 28].

Die beiden EPS-Systeme sind von der Mechanik (Lenkübersetzung, Komponenten) identisch und unterscheiden sich nur im Regelungskonzept. Lediglich das maximale Moment der EPS-Motoren differiert um 0.2 Nm. Bei den Lenksystemen handelt es sich um Lenksysteme mit achsparalleler Anordnung der Unterstützungseinheit (Tab. 1.2).

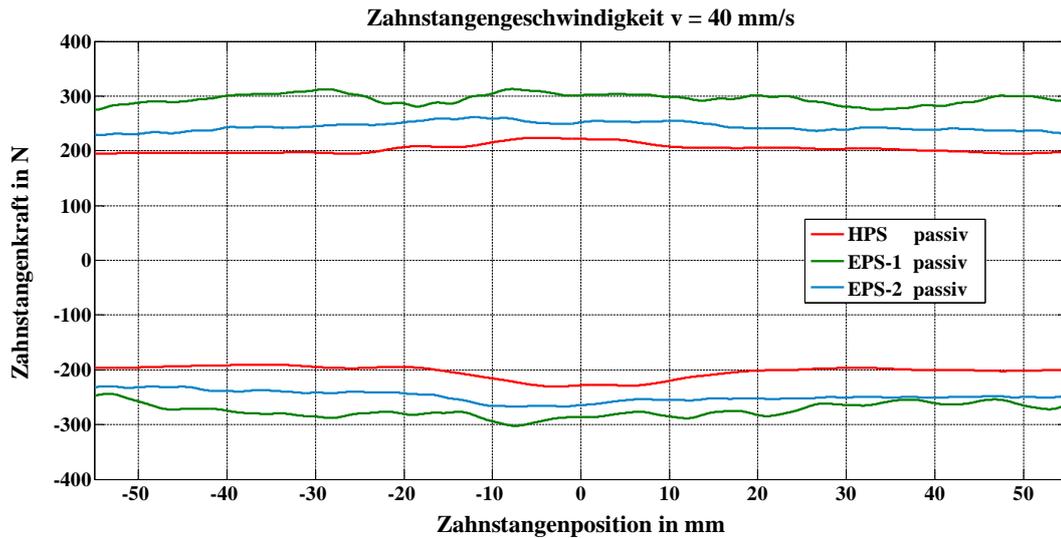
Neben den hier vorgestellten und verwendeten Regelungsansätzen von elektromechanischen Lenksystemen existieren in der Literatur noch weitere Konzepte [21, 48, 10]. Diese Arbeit beschränkt sich jedoch auf Regelungskonzepte, welche aktuell in Serienfahrzeugen implementiert und vergleichbar sind.

## 5.2 Charakterisierung durch Systemtests

In Abschnitt 4.2 wurden die Testreihen für die Charakterisierung von Lenksystemen hinsichtlich der Systemeigenschaften definiert. Aus diesen Testreihen werden folgend die Systemreibung und die Systemsteifigkeit für den Vergleich von Lenksystemen angewandt. Die beiden Testreihen beschreiben die mechanischen Eigenschaften der Lenksysteme und sind zunächst unabhängig von Applikationseinflüssen. Zudem liefern diese Testreihen wichtige Erkenntnisse, welche in die Bewertung der nachfolgenden Vergleiche einfließen. Im Hinblick auf das Übertragungsverhalten von Lenksystemen haben beide Testreihen einen maßgeblichen Einfluss. Da das Übertragungsverhalten der Kern dieses Kapitels ist, wurden die beiden Testreihen ausgewählt. Neben den ausgewählten Testreihen wurden für jedes der Lenksysteme alle vorgestellten Systemtest (Abb.4.4) durchgeführt. In diesem Kapitel sind aufgrund des Umfangs nur eine Auswahl der Ergebnisse vorgestellt.

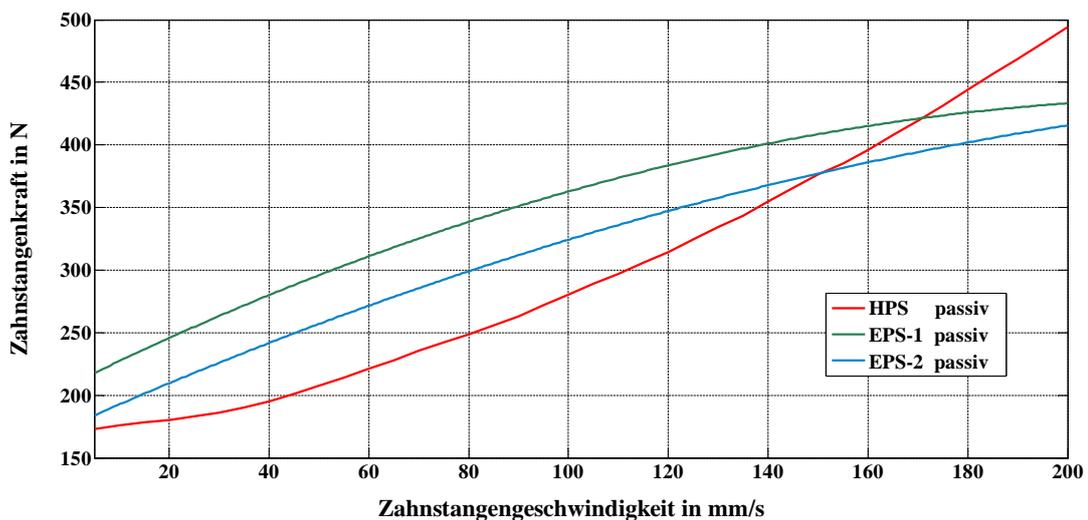
### 5.2.1 Systemreibung

Konzeptionell haben die drei verwendeten Lenksysteme eine unterschiedliche Systemreibung, bedingt durch die unterschiedlichen Bauarten und durch die verwendeten Komponenten. Bei einem konventionellen hydraulischen Lenksystem entsteht Reibung an den Lager- und Dichtungsstellen des Lenkgetriebes. Zwar entfallen bei einem elektromechanischen Lenksystem die Dichtungen, aber der Kugelgewindetrieb (KGT), der Riementrieb und die Unterstützungseinheit erzeugen einen zusätzlichen Reibungsanteil. Die Ergebnisse mit passiver Lenkunterstützung in Abbildung 5.3 bestätigen diese Systemeigenschaften. Das hydraulische Lenksystem (HPS) hat eine niedrigeren Systemreibung im Vergleich zu den beiden EPS- Lenksystemen. Die Lenksysteme wurden passiv betrieben, um rein die mechanischen Einflüsse zu messen. Die Systemreibung ist ein bestimmender Anteil für das Übertragungsverhalten von Lenksystemen. Eine erhöhte Systemreibung reduziert zwar die Rückmeldefreudigkeit eines Lenksystems, wirkt aber auch Störgrößen wie Radunwuchten und Fahrbahnunebenheiten entgegen [57].



**Abbildung 5.3:** Systemreibung der Lenksysteme mit passiver Lenkunterstützung (HPS, EPS-1 und EPS-2)

In Abbildung 5.4 ist das Verhalten der beiden Lenksystemkonzepte über der Zahnstangengeschwindigkeit zu sehen. Bedingt durch die geringere Reibung der HPS ist die Zahnstangenkraft (Systemreibung) im niedrigen Zahnstangengeschwindigkeitsbereich geringer im Vergleich zu den EPS-Systemen. Erst im höheren Zahnstangengeschwindigkeitsbereich steigt die Zahnstangenkraft deutlich an. Grund hierfür ist, dass die Hydraulikkanäle und -leitungen das Fördervolumen aus den Arbeitszylindern begrenzen. Dieser Effekt ist bei höheren Zahnstangengeschwindigkeiten sichtbar und wurde bereits in vorangegangenen Arbeiten untersucht und ist in der Literatur dokumentiert [51, 57].



**Abbildung 5.4:** Einfluss der Zahnstangengeschwindigkeit auf die Zahnstangenkraft

Die beiden EPS- Lenksysteme unterscheiden sich nur durch einen Offset über den Zahnstangengeschwindigkeitsbereich, zeigen aber das gleiche Verhalten. Anteilig kann der Anstieg der Systemreibung bei elektromechanischen Lenksystemen auch auf elektrische Effekte innerhalb der passiven E/E- Komponente zurückzuführen sein. Da die Lenksysteme hinsichtlich ihrer Eigenschaften als Gesamtsystem untersucht wurden, wurde dieser Aspekt im Detail nicht näher betrachtet. Der Reibungsanteil aus den Lagerstellen der Lenksäule kann bei den Testreihen zur Systemreibung bei den verwendeten Lenksystemen als gleich angenommen werden.

### 5.2.2 Systemsteifigkeit

Die Systemsteifigkeit eines Lenksystems ist eine weitere prägende Eigenschaft für das Übertragungsverhalten von Lenksystemen. Ein Lenksystem mit einer hohen Steifigkeit überträgt ungefiltert sowohl Störungen als auch Nutzinformationen bezogen auf das Rückmeldeverhalten. Im Hinblick auf das Führungsverhalten (Frequency-Response-Test) setzt eine steifes Lenksystem die Lenkeingabe des Fahrers präzise um. Im normalen Fahrbetrieb und bei Lenkradmomenten von  $\pm 10$  Nm hat der Drehstab des Drehmomentsensors den größten Einfluss auf die Steifigkeit des Lenksystems.

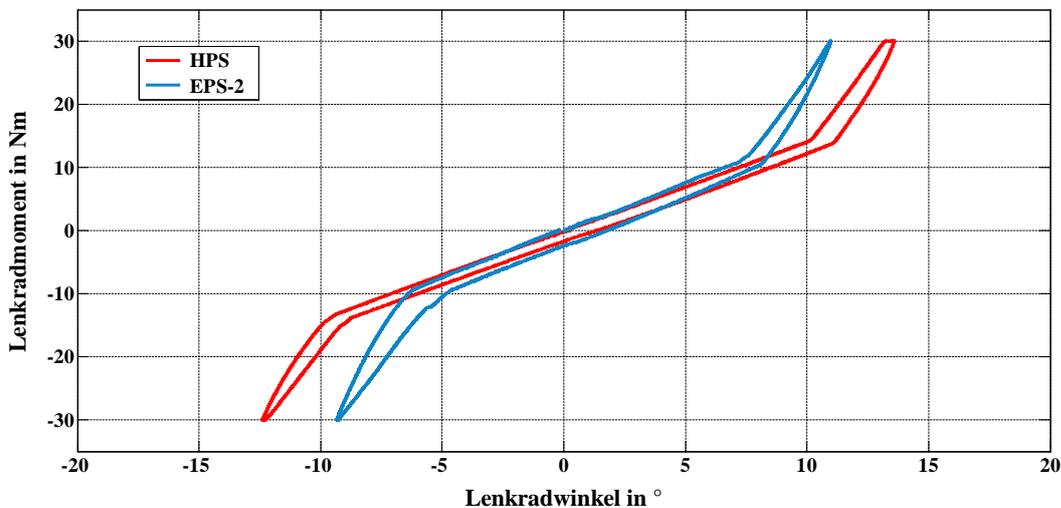


Abbildung 5.5: Systemsteifigkeit der Lenksysteme (HPS, EPS-2) im Vergleich

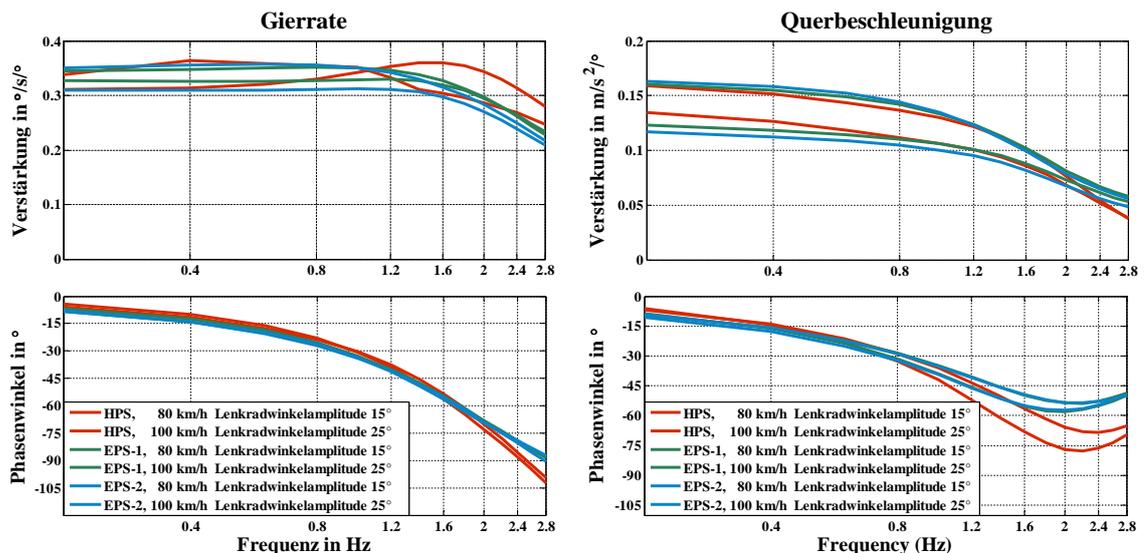
Die Ergebnisse in Abbildung 5.5 zeigen, dass beide Lenksysteme annähernd die gleiche Systemsteifigkeit haben. Ein Unterschied besteht im Endschlag des Drehstabs, zu sehen durch den Knick im Gradienten der Steifigkeit. Das Hystereseverhalten ist ähnlich. Da beide EPS- Systeme vom mechanischen Aufbau gleich sind (identische Drehstabsteifigkeit) wurden hier nur der Vergleich zwischen HPS und EPS-2 dargestellt.

### 5.3 Charakterisierung des Übertragungsverhalten

Die in Abschnitt 4.3 vorgestellten Testreihen zur Charakterisierung des Übertragungsverhaltens sind beispielhaft mit einem Lenksystem (EPS-2) durchgeführt worden. In diesem Abschnitt wird die Charakterisierung des Übertragungsverhaltens mit den drei vorgestellten Lenksystemen (HPS, EPS-1, EPS-2) durchgeführt. Es werden die Ergebnisse dargestellt und anhand dieser die Unterschiede im Übertragungsverhalten analysiert. Das Übertragungsverhalten teilt sich analog zu Abschnitt 4.3 in die Übertragung von Führungsgrößen und die Übertragung von Nutz- und Störgrößen (Rückmeldeverhalten).

#### 5.3.1 Analyse des Führungsverhaltens

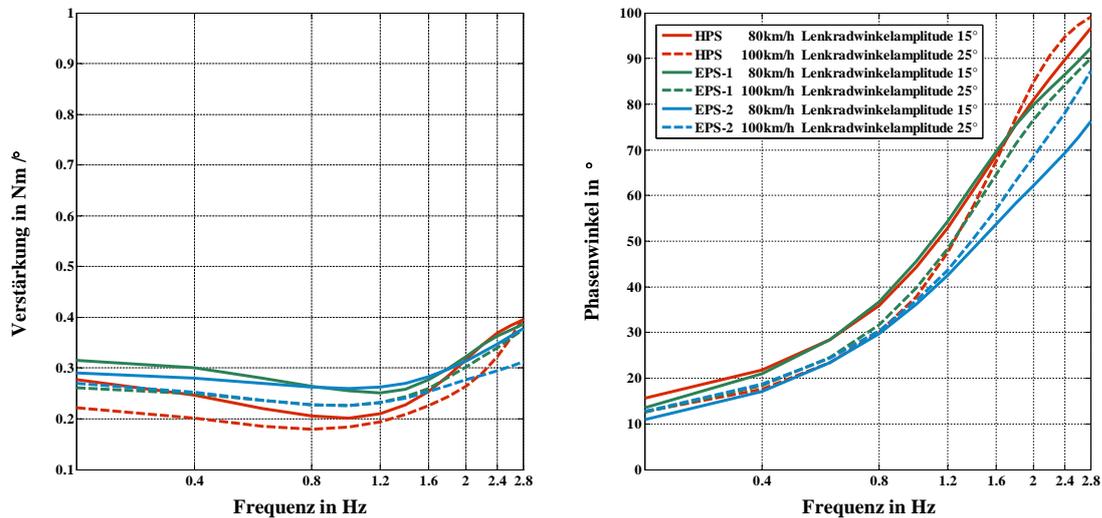
Das Führungsübertragungsverhalten wird anhand des Frequency-Response Tests bestimmt. Zunächst wird untersucht, welche Unterschiede im Übertragungsverhalten die Lenksysteme auf Gesamtfahrzeugebene haben. Hierzu werden die resultierenden Fahrzeugreaktionsgrößen Gierrate und Querbeschleunigung in einem Amplituden- und Phasengang Diagramm bewertet (Abb. 5.6).



**Abbildung 5.6:** Vergleich des Führungsverhaltens der Lenksysteme (HPS, EPS-1, EPS-2) anhand der Fahrzeugreaktionsgrößen Gierrate und Querbeschleunigung

Die in Abbildung 5.6 dargestellten Ergebnisse zeigen das Verhalten der Lenksysteme bei den angegebenen Lenkradwinkelamplitude, welche aus einer Querbeschleunigung von  $2 \text{ m/s}^2$  (80 km/h,  $15^\circ$ ) und  $4 \text{ m/s}^2$  (100 km/h,  $25^\circ$ ) resultieren. Bei denselben Randbedingungen fallen die Unterschiede zwischen den einzelnen Lenksystem gering aus, sind jedoch identifizierbar und eindeutig dem jeweiligen Lenksystem zuzuordnen. Je nach Anforderung an die Testreihen können aber auch diese Ergebnisse hilfreich bei der teil-virtuellen Entwicklung von Lenksystemen sein.

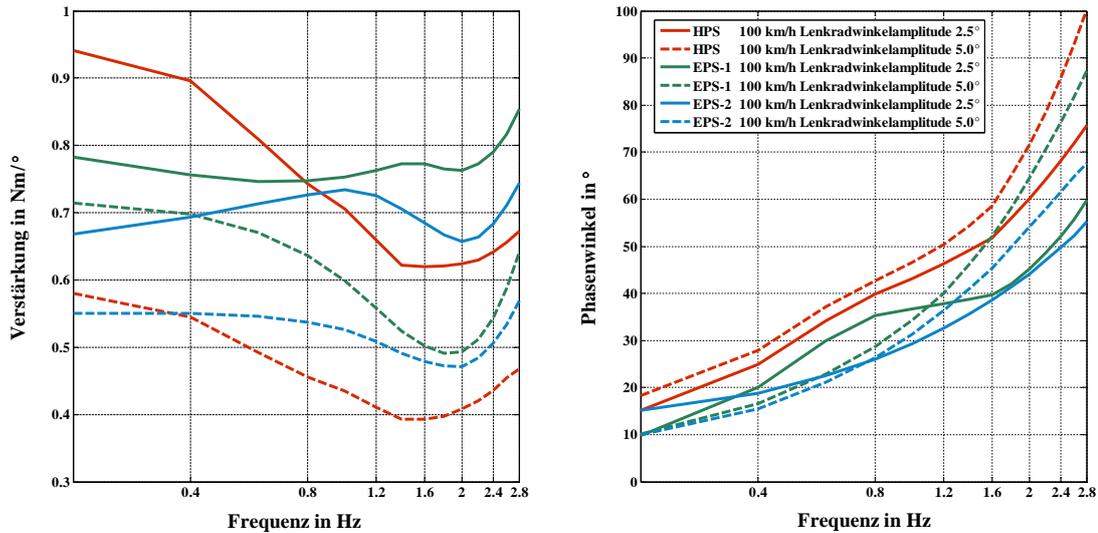
Für den direkten Vergleich der Lenksystemcharakteristik wird die Auswertung der Lenkradmomentverstärkung herangezogen. In Abbildung 5.7 ist die Auswertung mit den bereits zuvor beschriebenen Lenkradwinkelamplituden zu sehen. Hier sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Lenksystemen bei verschiedenen Lenkradwinkelamplituden deutlich sichtbar.



**Abbildung 5.7:** Vergleich des Führungsübertragungsverhalten der Lenksysteme (HPS, EPS-1, EPS-2) anhand der Lenkradmomentverstärkung

Zunächst bestätigen sich in den Messungen die Ergebnisse aus den Testreihen zur Systemreibung. Gerade beim Herauslenken aus der Mitte sind die Reibungseffekte prägend für die Charakteristik eines Lenksystems. Das niedrigere Reibniveau der HPS im Vergleich zu den beiden EPS- Lenksystemen (Abb. 5.3) spiegelt sich auch in den Ergebnissen des Frequency-Response-Test wieder. Erst ab einer Frequenz von 2 Hz steigt die Lenkradmomentverstärkung der HPS an. Es tritt bereits leicht der Effekt des Verhärtens der Lenkung ein. Unabhängig vom Lenksystem ist das Verhalten, dass die Lenkradmomentverstärkung bei größeren Lenkwinkelamplituden kleiner ist. Ursache hierfür ist der größere Anteil des Reibverhaltens beim Anlenken aus der Mitte in der Lenkradmomentverstärkung, was bei kleineren Lenkradwinkelamplituden in Summe zu einer größeren Lenkradmomentverstärkung führt. In den Testreihen zum OnCenter Verhalten ist diese Charakteristik umso stärker ausgeprägt und vertieft beschrieben. Weiterhin ist zu beachten, dass es sich bei den Lenksystemen um verschiedene Konzepte handelt. Bei einem konventionellen hydraulischen Lenksystem können die Beobachtungen auf die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften reduziert werden. Bei einem EPS- Lenksystem spielen neben den mechanischen Eigenschaften diverse Applikationsmodule der EPS- Software eine Rolle, die in dieser Arbeit aufgrund des fehlenden Zugriffs nicht näher analysiert werden können.

## Testreihen und Auswertung im OnCenter Bereich (Mittengefühl)



**Abbildung 5.8:** Vergleich des Führungsübertragungsverhalten der Lenksysteme (HPS, EPS-1, EPS-2) anhand der Lenkradmomentverstärkung im OnCenter Bereich (Mittengefühl)

Auch bei den Testreihen im OnCenter Bereich ist dieser Effekt zu erkennen, dass die Lenkradmomentverstärkung bei größeren Lenkradwinkelamplituden kleiner ist. Es zeigt sich jedoch ein Unterschied in der Charakteristik der Lenksysteme im OnCenter Bereich. Bei den EPS-Systemen ist ein ähnliches Verhalten festzustellen. Es ist u.a. in Abhängigkeit von der Applikation und des Regelungskonzepts beim EPS-1 Lenksystem ein erhöhtes Niveau der Lenkradmomentverstärkung feststellbar. Im Vergleich zu den Testreihen mit Lenkradwinkelamplituden größer  $15^\circ$  ist bei allen Lenksystemen eine deutlich größere Lenkradmomentverstärkung sichtbar. Dieses Verhalten lässt sich auf die Reibung im Lenksystem zurückführen. Beim Anlenken aus der Mitte heraus ist zunächst ein erhöhtes Lenkradmoment notwendig um die Systemreibung zu überwinden. Hier sind besonders bei niedrigen Frequenzen und Lenkradwinkelamplituden die Reibungseinflüsse sichtbar. Zunächst muss die Haftreibung durch ein erhöhtes Lenkradmoment überwunden werden um in den Bereich der Gleitreibung zu gelangen. Dieses Verhalten der Reibung (Stribeck Kurve) ist allgemein in der Literatur eingehend beschrieben [41, 59]. Zusätzlich muss der Drehstab tordiert werden. Diese Effekte sind bei einer HPS trotz niedrigerer Systemreibung stärker ausgeprägt, da keine Möglichkeit besteht die hydraulischen und mechanischen Reibeffekte zu beeinflussen. Beim EPS-2 Lenksystem existiert ein spezielles Softwaremodule zur Abstimmung des Anlenkens aus der Mitte, um dem Fahrer ein entsprechendes Lenkgefühl zu vermitteln. Hiermit können die Reibeffekte resultierend aus der Mechanik des Lenksystems über die Lenkunterstützung angepasst werden. Eine vollständige Kompensation ist nicht zielführend, da hierdurch das Lenkgefühl negativ beeinflusst wird (4.2.1).

### 5.3.2 Analyse des Rückmeldeverhaltens

In Unterabschnitt 4.3.2 wurde das Testverfahren zur Bestimmung des Rückmeldeverhaltens eingehend beschrieben. In diesem Unterabschnitt wird nun das Rückmeldeverhalten der drei Lenksysteme (HPS, EPS-1, EPS-2) untersucht und verglichen. Es wird der Nachweis erbracht, dass das Testverfahren auf dem Lenksystemprüfstand sich dafür eignet das Rückmeldeverhalten von verschiedenen Lenksystemkonzepten zu analysieren und unter gleichen Randbedingungen zu vergleichen. Weiterhin wird nachgewiesen, dass durch geeignete Regelungskonzepte das Rückmeldeverhalten einer EPS an das Rückmeldeverhalten einer HPS angenähert werden kann. Es werden folgend die erkenntnisreichsten Testreihen angewandt und analysiert. Die einzelnen Testreihen wurden jeweils mit passiver und aktiver Lenkunterstützung durchgeführt. Bei den passiven Testreihen wurde auf die Darstellung des elektromechanischen Lenksystems mit konventionellem Regelungskonzept (EPS-1) verzichtet, da sich die Lenksysteme EPS-1 und EPS-2 mechanisch kaum unterscheiden (Abschnitt 5.1). Eine Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit bei den elektromechanischen Lenksystemen zeigt bei aktiver Lenkunterstützung den Einfluss der Applikation der Verstärkungskennlinie und ggf. weiterer Softwaremodule, welche von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig sind.

#### Übertragungspfad Zahnstangenkraft - Lenkradmoment (Lenkrad fixiert)

Zunächst wird das Lenkrad am Lenksystemprüfstand fixiert und das aus der Anregung resultierende Lenkradmoment aufgezeichnet. Die Anregung der Zahnstange erfolgte mit einer Sinusschwingung, welche diskret im Frequenzbereich von 1-30 Hz und mit einer Kraftamplitude von 500 N aufgeprägt wurde.

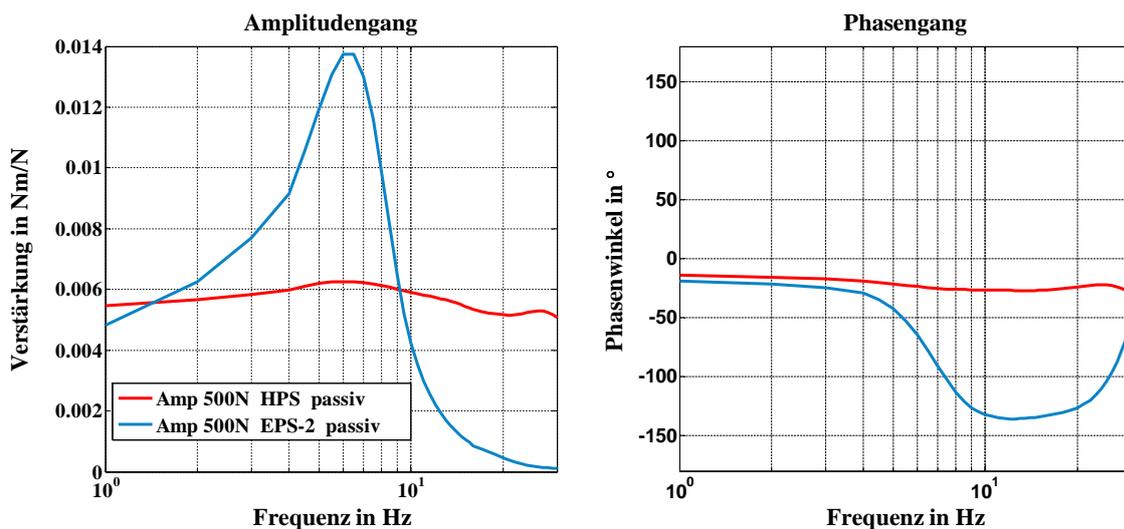
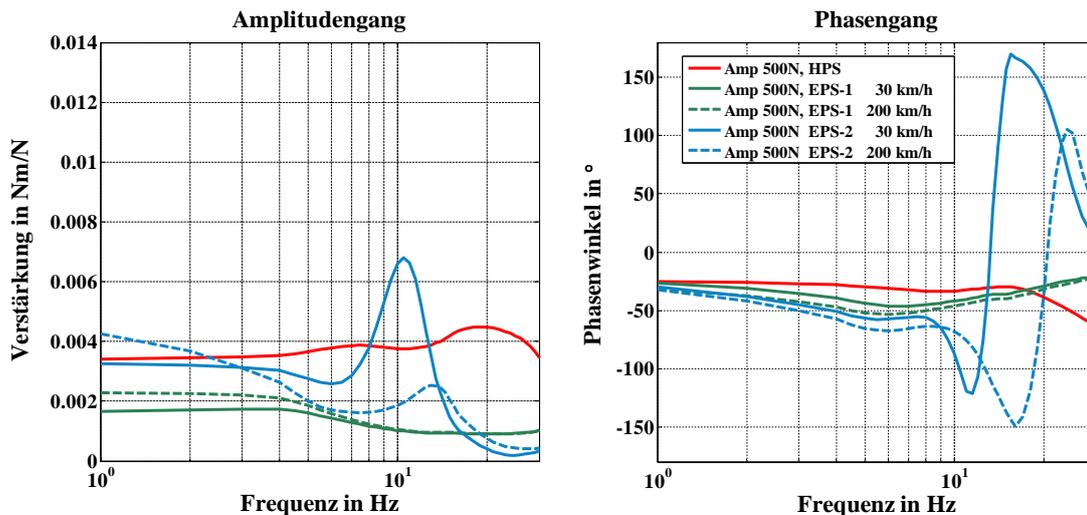


Abbildung 5.9: Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-2) passiv: Übertragungspfad Zahnstangenkraft - Lenkradmoment (Lenkrad fixiert) [64]

Abbildung 5.9 zeigt das Rückmeldeverhalten mit passiver Lenkunterstützung. Die Verstärkung des hydraulischen Lenksystems zeigt einen nahezu konstanten Verlauf über den gesamten Frequenzbereich. Dies bedeutet, dass das hydraulische Lenksystems eine sehr gute und gleichmäßige Rückmeldung über den getesteten Frequenzbereich hat. Das elektromechanische Lenksystem weist zunächst eine höhere und stetig steigende Rückmeldung im unteren Frequenzbereich auf, jedoch reduziert sich die Rückmeldung ab 7 Hz deutlich. Dieses Eigenschaft von passiven elektromechanischen Lenksystemen bestätigen auch Simulationsergebnisse, welche in [21, 57] publiziert wurden.



**Abbildung 5.10:** Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-1, EPS-2) aktiv: Übertragungspfad Zahnstangenkraft - Lenkradmoment (Lenkrad fixiert) [64]

Die Ergebnisse mit aktiven Lenksystemen (Abb. 5.10) zeigen ebenso deutlich die Unterschiede zwischen den Lenksystemkonzepten HPS, EPS-1, EPS-2. In der Versuchsreihe wurden beide EPS- Lenksysteme über die Restbussimulation mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 30 km/h und 200 km/h angesteuert. Beide elektromechanische Lenksysteme haben eine geringere Rückmeldung im Vergleich zum hydraulischen Lenksystem. Die EPS- Lenksysteme unterscheiden sich aber im Regelungskonzept. Die EPS mit konventioneller Regelung (EPS-1) hat über den gesamten Frequenzbereich eine geringere Rückmeldung. Dieses Verhalten ist ab einer Frequenz von 5 Hz noch deutlicher ausgeprägt. Wie in 4.3.2 beschrieben werden die Nutzinformationen für den Fahrer in einem Frequenzbereich bis zu 15 Hz übertragen. Die EPS mit Handmomentenregelung (EPS-2) zeigt bis 5 Hz ein ähnliches Übertragungsverhalten wie das hydraulische Lenksystem, hat aber je nach Applikation bis 15 Hz eine geringere Rückmeldung. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass je nach Applikation der EPS-2 das Übertragungsverhalten an eine HPS angenähert werden kann. In Unterabschnitt 4.3.2 wurden bereits die Ergebnisse der EPS-2 über den gesamten Fahrzeuggeschwindigkeitsbereich ausgewertet (Abb. 4.40).

Im höherfrequenten Bereich unterdrückt das Lenksystem Störinformationen, was den Lenkcomfort steigert. In Summe ergibt sich für die EPS mit Handmomentenregelung (EPS-2) ein stimmiges Lenkgefühl, da die Nutzinformationen analog zu einem hydraulischen Lenksystem übertragen und die Störinformationen ab einer Frequenz von 15 Hz unterdrückt werden. Die Ergebnisse belegen, dass durch die Auswahl des Regelungskonzepts das Rückmeldeverhalten an ein hydraulisches Lenksystem bis zu einer Frequenz von 15 Hz angenähert werden kann [64].

### Übertragungspfad Zahnstangenweg - Lenkradwinkel (Lenkrad frei)

Die Testreihen im Übertragungspfad Zahnstangenweg zu Lenkradwinkel analysieren das Verhalten der Lenksysteme in Bezug auf ein frei schwingendes Lenkrad und die Gesamtnachgiebigkeit des Lenkstrangs. Die Testreihen wurden mit einer Wegamplitude von 0.15 mm durchgeführt. In Abbildung 5.11 sind die Testreihen mit passiver Lenkunterstützung dargestellt. Beide passiven Lenksysteme zeigen eine ausgeprägte Verstärkung und einen Phasenabfall auf  $-90^\circ$  bei 7.5 Hz. Es handelt sich hierbei um die Eigenfrequenz des frei schwingenden Lenkrads geprägt durch die Drehstabsteifigkeit. Die Frequenz der größten Verstärkung ist bei beiden Lenksystemen gleich, lediglich die Amplitude ist beim EPS-2 Lenksystem höher. Beide Systeme wurden mit demselben Lenkrad getestet, d.h. der Einfluss der Massenträgheit des Lenkrads ist bei beiden Lenksystemen gleich. Das Bauteil mit der größten Trägheit im Lenkstrang hat somit einen geringen Einfluss auf die Vergleichbarkeit. Es lässt sich daraus schließen, dass der Unterschied in der Amplitude aus den Steifigkeiten der übrigen Bauteile resultiert. Hierzu wird das neue Testverfahren mit erweiterter Sensorik neue Erkenntnisse liefern, welche Bauteile einen Einfluss auf das Schwingungsverhalten haben.

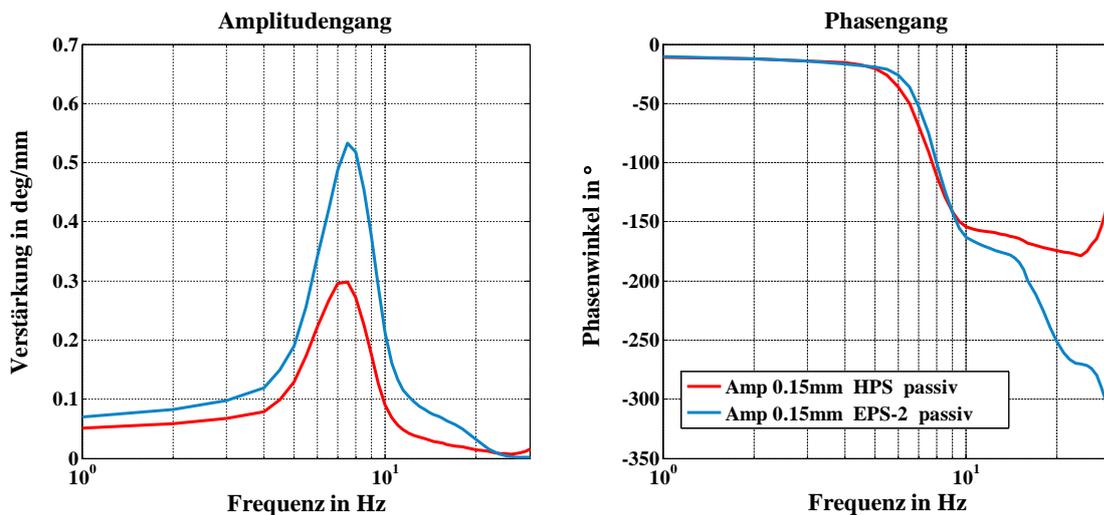
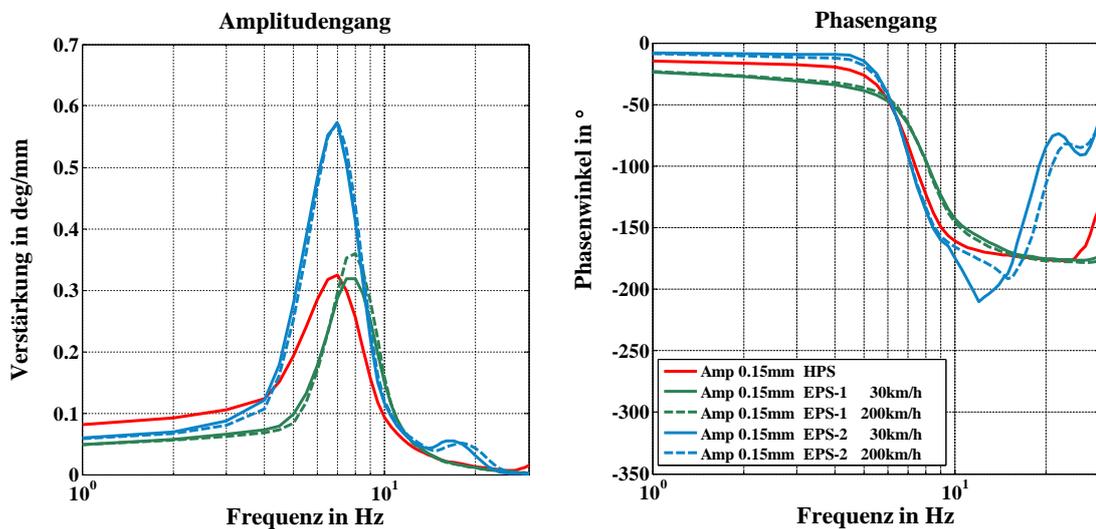


Abbildung 5.11: Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-2) passiv: Übertragungspfad Zahnstangenweg - Lenkradwinkel (Lenkrad frei)

Die Testreihen mit aktiver Unterstützung sind Abbildung 5.12 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Einfluss der aktiven Lenkunterstützung sehr gering ausfällt. Frequenz und Amplitude der größten Verstärkung bleiben nahezu gleich. Weiterhin zeigt sich, dass die Variation der Geschwindigkeit kaum die Charakteristik beeinflusst. Durch die Verdrehung des Drehstabs durch den frei schwingenden Lenkstrang sollten die Effekte der aktiven Lenkunterstützung sichtbar sein. Da die Zahnstange mit einer Weganregung beaufschlagt wird, bleibt die Zahnstangenbewegung stets gleich und somit durch Kopplung der Zahnstange mit dem Lenkgetrieberitzel auch die Bewegung des Lenkstrangs. Daraus lässt sich schließen, dass das Lenkgetriebe mit Lenkunterstützung (-seinheit) zunächst keinen Einfluss auf den frei schwingenden Lenkstrang hat und die Ergebnisse rein aus den mechanischen Eigenschaften des Lenkstrangs hat. Jedoch ist zu beachten, dass die EPS-1 im Vergleich zur EPS-2 Unterschiede aufweist. Dies wird im Amplitudengang als auch im Phasengang deutlich. Die Verstärkung liegt auf dem Niveau der HPS und bei 8 Hz.



**Abbildung 5.12:** Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-1, EPS-2) aktiv: Übertragungspfad Zahnstangenweg - Lenkrad (frei)

### Auswertung der Testreihen mit Zusatzsensoren

Mit dem in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Testverfahren mit weiteren Sensoren im Übertragungspfad zwischen Zahnstange und Lenkrad kann das Rückmeldeverhalten an einzelnen Bauteilen der Lenksysteme ermittelt werden. In den folgenden Testreihen (Abb. 5.13 - Abb. 5.16) werden die erweiterten Messstellen im Übertragungspfad ausgewertet und analysiert. Hierzu werden die vorherigen Testkonfigurationen in diesem Unterabschnitt (Kraftanregung - Lenkrad fixiert, Weganregung - Lenkrad frei) angewandt. Analog zu den Auswertungen in Abschnitt 4.3.2 sind die erfassten Wege der Sensoren zur Vergleichbarkeit über den Ritzelradius in einen Zahnstangenweg umgerechnet worden.

### Übertragungspfad Zahnstangenkraft - Ritzelausgang - Lenkgetriebeeingang (Drehstab) - Lenkrad (fixiert)

Die Lenksysteme (HPS, EPS-2) wurden zunächst mit passiver Lenkunterstützung getestet (Abb. 5.13). Die gestrichelte und gepunktete Linie zeigen jeweils die Messstelle an einem Bauteil des Lenksystems und dessen Einfluss. Da das Lenkrad fixiert ist, wird die Wegmessung nur am Drehstab, Lenkgetrieberitzel und der Zahnstange durchgeführt. Die Diagramme zeigen die aus den Testreihen mit Kraftanregung bekannten Kurvenverläufe. Die Ergebnisse des passiven EPS-2 Lenksystems wurden bereits in Unterabschnitt 4.3.2 dargestellt und analysiert.

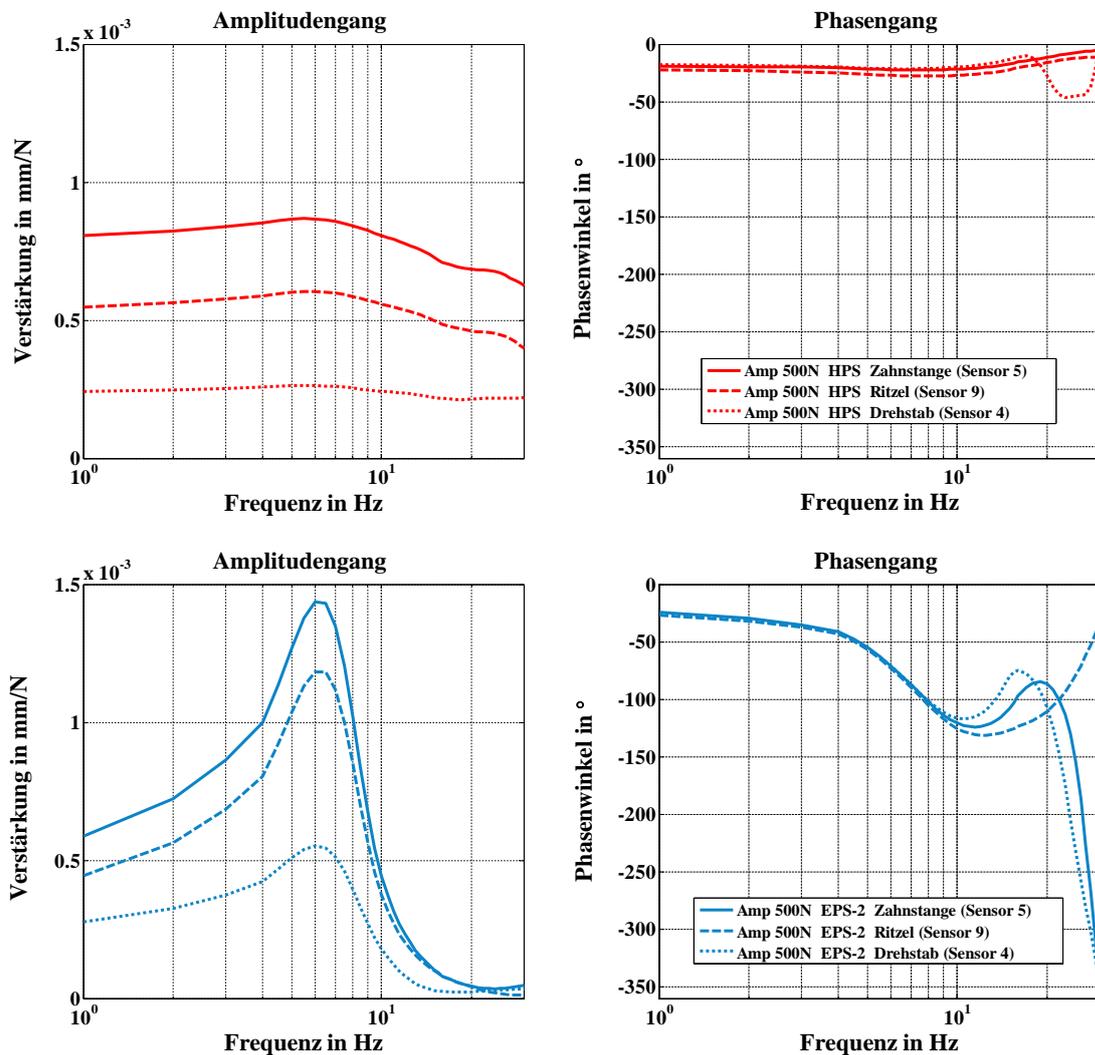


Abbildung 5.13: Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-2) passiv - normierte Auswertung: Übertragungspfad Zahnstangenkraft - Ritzelausgang - Lenkgetriebeeingang (Drehstab) - Lenkrad (fixiert)

Das hydraulische Lenksystem zeigt über den gesamten Frequenzbereich im Amplituden- und Phasengang, auch an den zusätzlichen Messstellen, ein konstantes Rückmeldeverhalten. Die blauen Kurven repräsentieren das elektromechanische Lenksystem (EPS-2), welches im Bereich von 8-10 Hz eine sehr gute Rückmeldung hat, die sich ab 12 Hz deutlich reduziert. Bei beiden Lenksystemen ist zu sehen, dass durch die Nachgiebigkeit des Ritzzeleingriffs und des Drehstabs die Rückmeldefreudigkeit der Lenksysteme abnimmt. Die Messungen bestätigen die Aussage in [57], dass ein Lenksystem mit einer hohen Steifigkeit Störungen als auch Nutzinformationen ungefiltert überträgt. Die Auswertung in Abbildung 5.5 zeigt, dass im statischen Fall beide Lenksysteme die gleiche Steifigkeit aufweisen. Durch die unterschiedliche Bauweise der Lenksysteme ist der Übertragungsverlauf jedoch über der Frequenz verschieden. In den Ergebnisse ist weiterhin sichtbar, dass die Verzahnung von Zahnstange und Ritzel kein starres kinematisches Übertragungsglied ist. Bei beiden Lenksystemen nimmt die Verstärkung des Eingangssignals ab. Über das Druckstück kann die Steifigkeit der Verzahnung von Zahnstange und Ritzel beeinflusst werden. Eine Reduzierung des Druckstückspiels hat eine erhöhte Reibung zur Folge. Im weiteren Verlauf des Übertragungspfades ist der Verlust der Verstärkung im Drehstab zu erkennen. Durch die geringe Steifigkeit im Vergleich zur Verzahnung von Zahnstange und Ritzel fällt der Verlust deutlich größer aus.

Bei den Testreihen mit aktiver Unterstützung wird im direkten Vergleich zusätzlich das Verhalten des EPS-1 Lenksystems mit einem konventionellen Regelungsansatz bewertet. Bei aktiver Lenkunterstützung reduziert sich das Rückmeldeverhalten bei allen verwendeten Lenksystemen. Beim hydraulischen Lenksystem (HPS) fällt auf, dass zwar die Verstärkung, welche aus der Bewegung durch die Zahnstangenkraft resultiert, reduziert ist, jedoch die Messstelle des Drehstabs (Sensor 4) die gleiche Verstärkung wie beim passiven System aufweist. Somit hat beim HPS- Lenksystem die Lenkunterstützung einen geringeren Einfluss auf das Rückmeldeverhalten. Bei beiden EPS- Lenksystemen reduziert sich die Rückmeldung deutlich. Das EPS-2 System kann aber aufgrund des Regelungskonzeptes die Verstärkung an das Systemverhalten eines konventionellen hydraulischen Lenksystems annähern. Bei 10 Hz ist das EPS-2 Lenksystem zudem deutlich rückmeldefreudiger. Das EPS-1 Lenksystem hat über den gesamten Frequenzbereich ein geringe Rückmeldung, welche sich ab 5 Hz weiter verringert. Ursache für die Unterschiede im Rückmeldeverhalten sind neben den Regelungskonzepten bei den EPS- Lenksystemen die geringeren Massen eines hydraulischen Lenksystems. Bei einem hydraulischen Lenksystem besteht der Massenanteil aus der Zahnstange und der hydraulische Ölsäule, während bei den EPS- Lenksystemen Zahnstange, Getriebe und Motor berücksichtigt werden müssen [48, 57]. Hierdurch entsteht ein mechanischer Tiefpassfilter, welcher die Rückmeldung stark beeinflusst und wichtige Nutzinformation herausfiltert. Abbildung 5.13 und 5.14 bestätigen bereits simulativ durchgeführte und veröffentlichte Untersuchung zum Rückmeldeverhalten von Lenksystemen [21, 48, 57].

### 5.3. Charakterisierung des Übertragungsverhalten

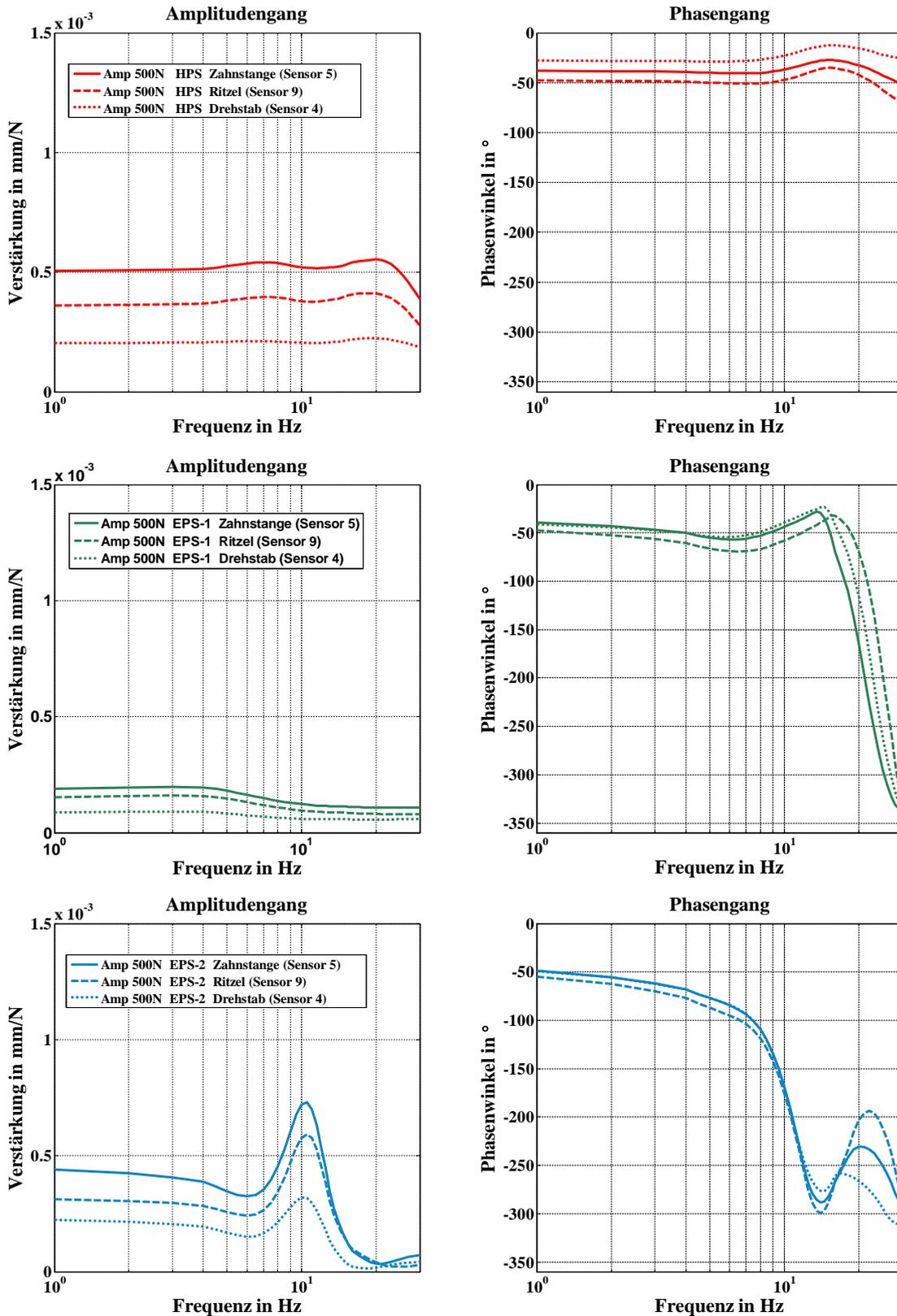


Abbildung 5.14: Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-1, EPS-2) aktiv - normierte Auswertung: Übertragungspfad Zahnstangenkraft - Ritzelausgang - Lenkgetriebeeingang (Drehstab) - Lenkrad (fixiert)

### Übertragungspfad Zahnstangenweg - Ritzelausgang - Lenkgetriebeeingang (Drehstab) - Lenkrad (frei)

Der zweite Übertragungspfad, welcher im Vergleich von Lenksystemen mit erweiterter Sensorik untersucht wird, ist der Zahnstangenweg als Eingangsgröße mit einem frei schwingenden Lenkrad. Zusätzlich können die Ritzelbewegung wie auch die Ausgangsbewegung des Drehstabs gemessen werden. Da die Eingangsgröße (Zahnstangenweg) und die Ausgangsgrößen in der Einheit mm angegeben werden, ist die Verstärkung in den folgenden Diagrammen dimensionslos. Die Wegamplitude beträgt in allen Messungen 0.15 mm. Die Auswertungen in den Diagrammen werden zeigen, welchen Einfluss die einzelnen Bauteile auf das Schwingungsverhalten des Lenkstrangs haben.

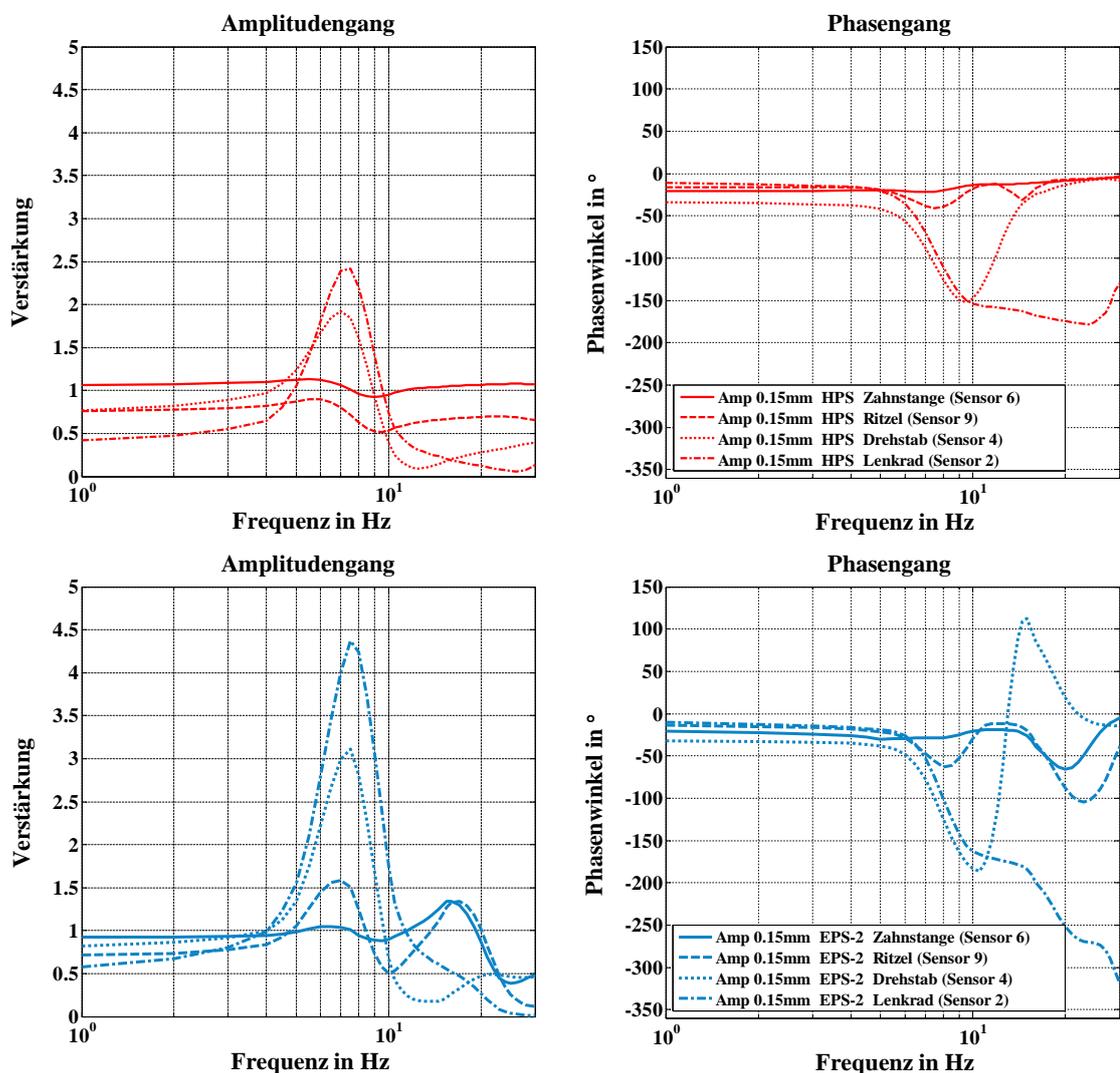


Abbildung 5.15: Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-2) passiv - normierte Auswertung: Übertragungspfad Zahnstangenweg - Ritzelausgang - Lenkgetriebeeingang (Drehstab) - Lenkrad (frei)

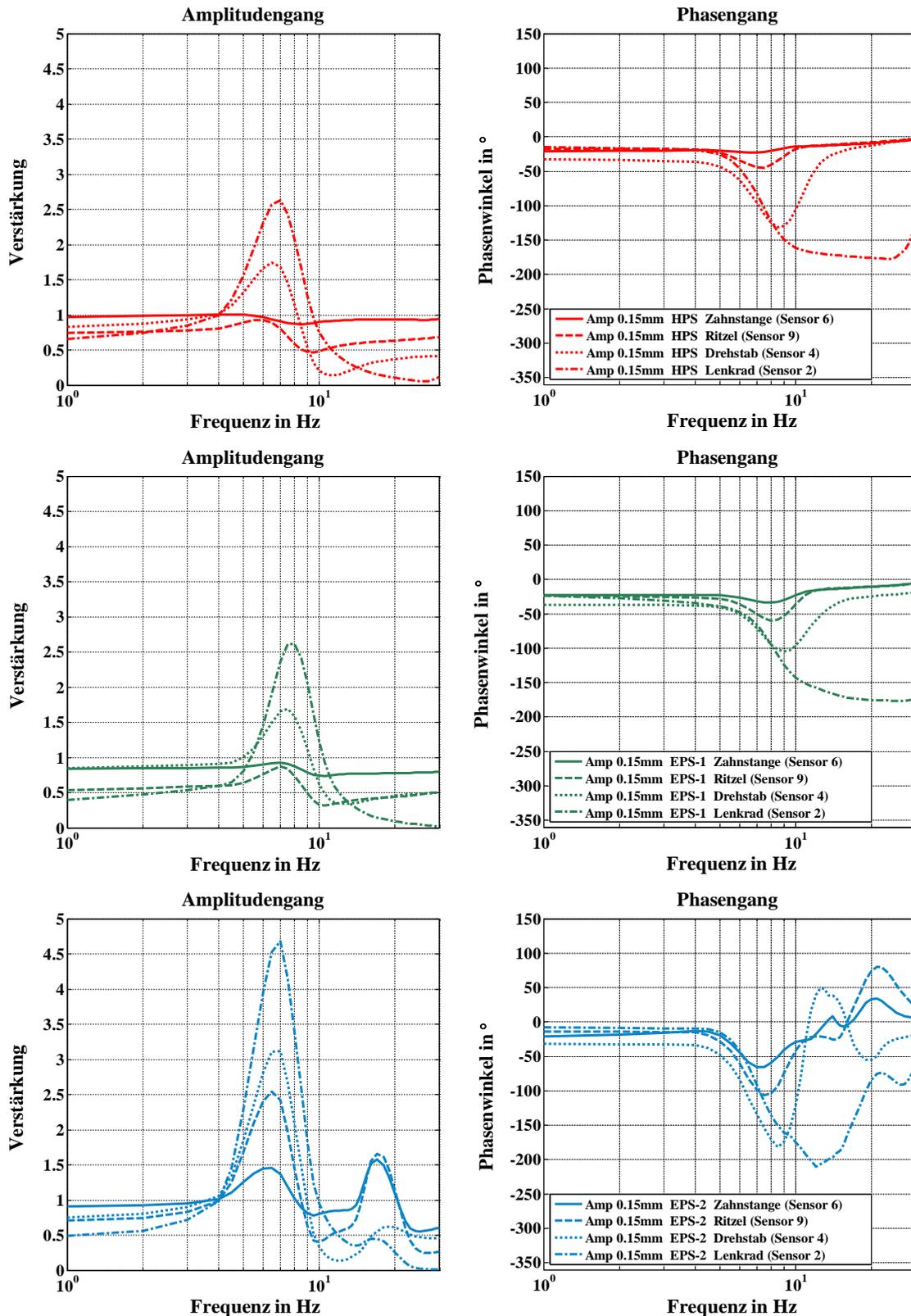


Abbildung 5.16: Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-1, EPS-2) aktiv - normierte Auswertung: Übertragungspfad Zahnstangenweg - Ritzel Ausgang - Lenkgetriebeeingang (Drehstab) - Lenkrad (frei)

In den bisherigen Messungen (Abb. 5.13 und 5.11) konnte das Verhalten des schwingenden Lenkstrangs nur anhand des resultierenden Lenkradwinkels beschrieben werden. Durch die zusätzlichen Messstellen kann gezielt der Einfluss von Lenkzwischenwelle, Drehstab und Ritzelverzahnung untersucht werden. Die Ergebnisse werden zunächst am Übertragungsverhalten des passiven HPS- Lenksystems analysiert (Abb. 5.15 oben). Das Übertragungsverhalten an der Zahnstange ist annähernd 1, da es sich hier bis auf die Anbindung der Sensorik um eine starre Verbindung handelt. Bei der Verzahnung zwischen Lenkgetrieberitzel und Zahnstange ist bereits eine Elastizität feststellbar, d.h. ist besteht keine starre kinematische Kopplung, da sich die Übertragung reduziert und ungleich 1 ist. Deutlich sichtbar bei den weiteren Kurven des HPS- Lenksystems ist der Einfluss der Elastizität des Drehstabs im Bereich der Eigenfrequenz des freien Systems bei ca. 7.5 Hz. Die Eigenfrequenz ist auch im Phasendiagramm durch den Phasenabfall auf  $-90^\circ$  von Drehstab- und Lenkradmessstelle bei 7.5 Hz zu erkennen. Da sich die Verstärkung der Bewegung am Lenkrad noch deutlicher zeigt, lässt dies auf die Nachgiebigkeit des Lenkzwischenwelle als weiteres elastisches Bauteil im Lenkstrang schließen.

Diese Ergebnisse für ein konventionelles hydraulisches Lenksystem wurden bereits in ähnlicher Weise in [51] publiziert und bestätigen die Richtigkeit des Versuchsaufbaus und der Ergebnisse der Verstärkung und des Phasengangs zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens mit freiem Lenkrad. Diese Erkenntnisse angewandt auf das passive EPS-2 Lenksystem zeigen, dass der Einfluss der Elastizitäten der Verzahnung, des Drehstabs und der Lenkzwischenwelle deutlich größer ausfällt im Vergleich zum HPS- Lenksystem. Die Eigenfrequenz liegt ebenfalls bei 7.5 Hz. Dies ist auch im Phasengang erkennbar. Bei ca. 16 Hz ist eine weitere kleine Verstärkung zu sehen, welche sich aber nur an der Zahnstange und am Lenkgetrieberitzel auswirkt. Die aktiven Lenksysteme zeigen ein ähnliches Verhalten wie mit passiver Lenkunterstützung. Das Maximum der Verstärkung im Bereich der Eigenfrequenz geringfügig größer. Das EPS-1 Lenksystem hat in dieser Testreihe ein Verhalten vergleichbar mit dem hydraulischen Lenksystem. Die Eigenfrequenz des Lenkstrangs aller Lenksysteme liegt im Bereich von 7-8 Hz.

## 5.4 Charakterisierung durch Fahrmanöver

Bei den folgenden Testreihen werden anhand von den in Abschnitt 4.4 beschriebenen standardisierten Fahrmanövern Lenksysteme und deren Charaktereigenschaften auf Gesamtfahrzeugebene verglichen. Im Gegensatz zu einer einzelnen Lenksystemcharakterisierung (Abschnitt 4.4) können in den Ergebnissen zum direkten Vergleich von Lenksystemen die unterschiedlichen Resultate bei gleichen Randbedingungen direkt den Lenksystemen und deren Systemeigenschaften zugeordnet werden. Die Einflüsse des Fahrzeugmodells sind weiterhin vorhanden, aber bei allen Testreihen gleichermaßen vorhanden. Es werden folgend die Testreihen Weave-Test, Transition-Test und Lenkwinkelsprung durchgeführt.

5.4.1 Weave-Test

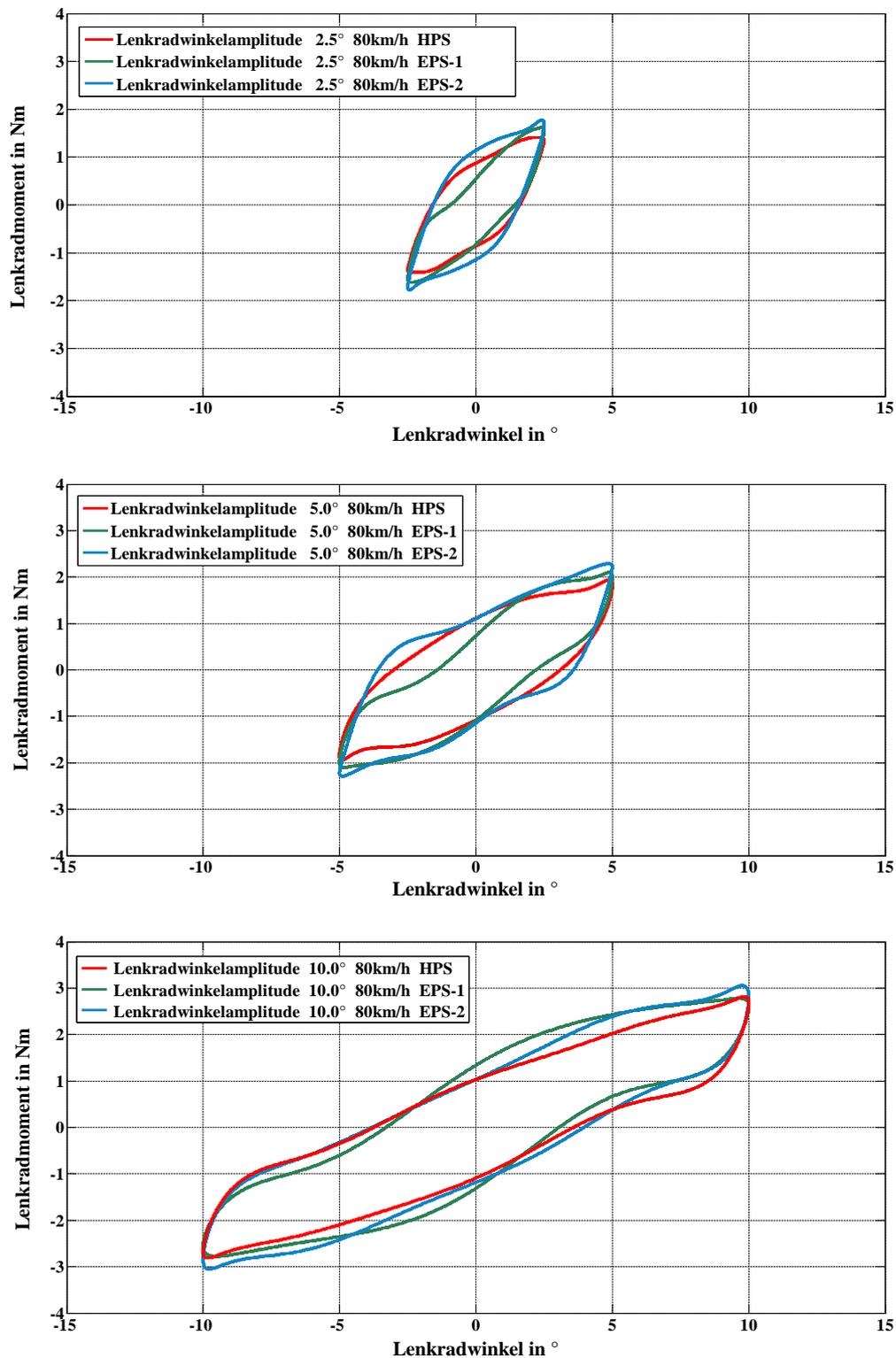


Abbildung 5.17: Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-1 und EPS-2): Weave-Test 80 km/h

In Abbildung 5.17 sind die Ergebnisse des Weave-Tests nach ISO 13674-1 [33] mit verschiedenen Lenkradwinkelamplituden (2.5 °, 5.0 °, 10.0 °) bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h und einer Frequenz von 0.5 Hz dargestellt. Die Testreihen mit den angegebenen Lenkradwinkelamplituden beschreiben das Verhalten der Lenksysteme auf Gesamtfahrzeugebene. Es zeigt sich, dass in diesen Testreihen das HPS- Lenksystem und das EPS-2 Lenksystem ein ähnliches Verhalten aufweisen. Die Lenkungsreibung ist im Vergleich beim EPS-1 Lenksystem bei kleinen Lenkradwinkeln (2.5 °, 5.0 °) reduziert, was sowohl in den Diagrammen als in den objektiven Kenngrößen zu sehen ist. Die objektiven Kenngrößen für die Testreihen in Abbildung 4.51 wurden in Tabelle 5.1 ausgewertet und gegenübergestellt. Eine detaillierte Definition der Kenngrößen ist in Unterabschnitt 4.49 (Abb. 4.49 und Tab. 4.16) zu finden.

Parameter:	Lenksteifigkeit (rechts)	Lenksteifigkeit (links)	Lenkungs- reibung	Lenkwinkel- hysterese
<b>Amp=2.5° HPS:</b>	0.2389 Nm/°	0.2370 Nm/°	1.8090 Nm	2.9952 °
<b>Amp=2.5° EPS-1:</b>	0.5526 Nm/°	0.5879 Nm/°	1.3951 Nm	2.5225 °
<b>Amp=2.5° EPS-2:</b>	0.3579 Nm/°	0.3379 Nm/°	2.2880 Nm	3.1323 °
<b>Amp=5.0° HPS:</b>	0.2184 Nm/°	0.1826 Nm/°	2.1591 Nm	6.4060 °
<b>Amp=5.0° EPS-1:</b>	0.4856 Nm/°	0.4900 Nm/°	1.8974 Nm	3.8199 °
<b>Amp=5.0° EPS-2:</b>	0.3388 Nm/°	0.3264 Nm/°	2.1597 Nm	7.2083 °
<b>Amp=10° HPS:</b>	0.2251 Nm/°	0.2576 Nm/°	2.1355 Nm	7.3134 °
<b>Amp=10° EPS-1:</b>	0.3663 Nm/°	0.3616 Nm/°	2.6172 Nm	6.1904 °
<b>Amp=10° EPS-2:</b>	0.2721 Nm/°	0.2500 Nm/°	2.2251 Nm	7.7922 °

**Tabelle 5.1:** Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-1, EPS-2): Objektive Kennwerte Weave-Test 80 km/h (Abb. 5.17)

Weiterhin hat das EPS-1 Lenksystem eine hohe Lenksteifigkeit, d.h. um die Mittellage weist das Lenksystem einen steilen Lenkradmomentanstieg auf. Bei den beiden anderen Lenksystemen (HPS, EPS-2) ist dieses Verhalten weniger stark ausgeprägt. Beim HPS-Lenksystem spielen hier die mechanischen und hydraulischen Systemeigenschaften eine dominante Rolle, während beim EPS-2 Lenksystem die mechanischen Eigenschaften über eine spezielle Applikation für das Mittengefühl beeinflusst werden können. Den Messungen zufolge ähnelt die Applikation dem Mittengefühl einer HPS.

### 5.4.2 Transition-Test

Der Transition-Test nach ISO 13674-2 [34] beschreibt ein quasi-stationäres Anlenken bei konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit und einem kleinem Lenkradwinkelgradienten (Unterabschnitt 5.4.2). Für den Vergleich von Lenksystemen können die Fahrzeugreaktionsgrößen (Gierrate und Querbeschleunigung) ausgewertet oder das Lenkradmoment dem Lenkradwinkel gegenüber gestellt werden. In den Testreihen zum Vergleich von Lenksystemen wurde ein maximaler Lenkradwinkel von  $30^\circ$  und eine Fahrzeuggeschwindigkeit (Ansteuerung der beiden EPS- Lenksysteme) von 80km/h festgelegt. In Abbildung 5.18 ist die Gegenüberstellung von Lenkradmoment und Lenkradwinkel zu sehen. Bei allen Lenksystemen ist beim Anlenken aus der Mitte heraus ein steiler Lenkradmomentgradient festzustellen, welcher sich ab einem Lenkradwinkel von  $5^\circ$  reduziert. Im Bereich von  $0^\circ - 5^\circ$  ergeben sich Unterschiede bei den getesteten Lenksystemen. Das EPS-2 Lenksystem weist dabei einen weniger stark ausgeprägten Lenkradmomentgradientenverlauf auf im Vergleich zu den beiden anderen Lenksystemen (HPS, EPS-1) auf. Bei der HPS spielen wie in den vorangegangenen Testreihen (bspw. Frequency-Response Test - OnCenter), welche das Verhalten beim Anlenken aus der Mitte heraus zeigen, Reibeffekte aus der Mechanik und Hydraulik ein prägende Rolle. Die EPS- Lenksysteme habe zwar eine höhere Grundreibung, jedoch kann über die spezifischen Softwaremodule in einem gewissen Rahmen das Verhalten beeinflusst werden. Bei Lenkradwinkel größer  $5^\circ$  nähern sich die Kurven bis zum definierten Endlenkradwinkel der Testreihe an. Der Transition-Test ist sehr gut geeignet um das transiente Anlenken aus der Mitte bis zu mittleren Lenkradwinkel von verschiedenen Lenkunterstützungsapplikationen oder Lenksystemkonzepten zu untersuchen.

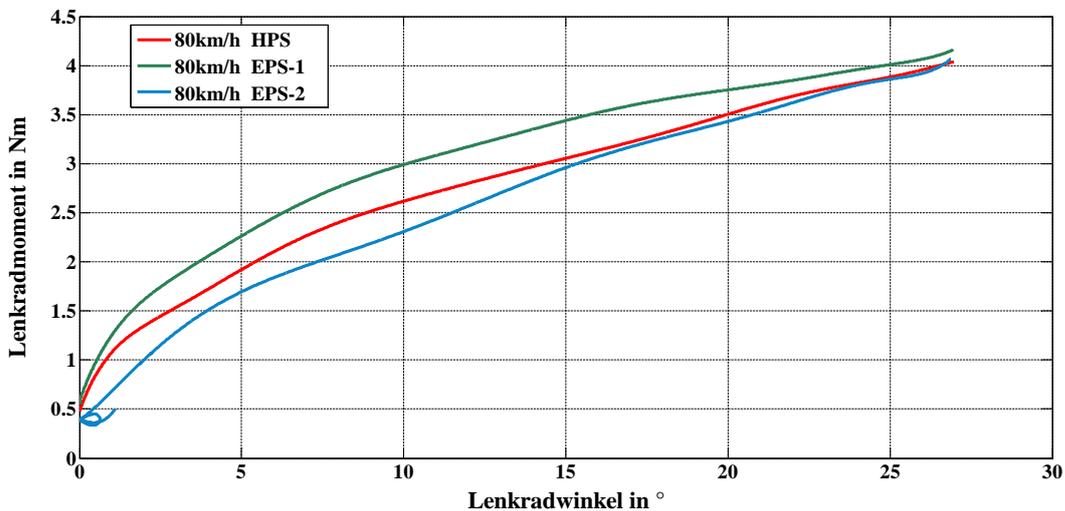


Abbildung 5.18: Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-1 und EPS-2): Transition-Test Lenkradmoment vs. Lenkradwinkel (Lenkradwinkel  $30^\circ$ )

Die Auswertung der Testreihen in Bezug zu den Fahrzeugreaktionsgrößen sind in Abbildung 5.19 dargestellt. Die Verläufe des Lenkradmoments der getesteten Lenksysteme über den beiden Fahrzeugreaktionsgrößen Gierrate und Querbeschleunigung zeigen entsprechend den Ergebnissen in Abbildung 5.18 im Anlenkverhalten unterschiedliche Ergebnisse. Analog zu den Ergebnissen in Abbildung 5.18 hat das EPS-1 Lenksystem einen deutlich steileren Lenkradmomentgradienten beim Anlenken. Das HPS Lenksystem liegt bezogen auf die Abstimmung zwischen den beiden EPS Lenksystemen.

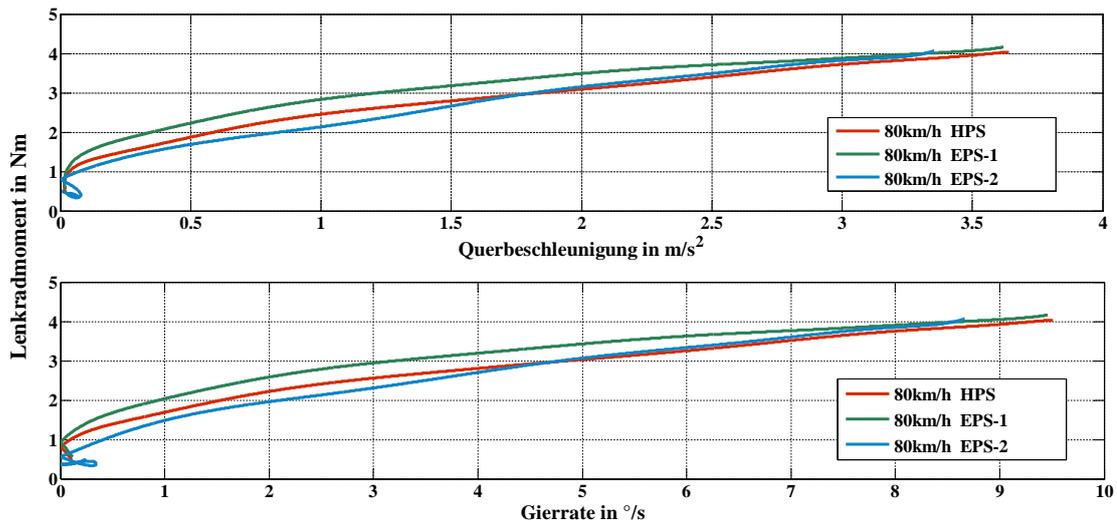


Abbildung 5.19: Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-1 und EPS-2): Transition-Test Lenkradmoment vs. Querbeschleunigung vs. Gierrate (Lenkradwinkel  $30^\circ$ )

### 5.4.3 Lenkwinkelsprung

Gemäß der Testbeschreibung in Unterabschnitt 4.4.3 wird zunächst in einem Vortest der Lenkradwinkel bei einer Querbeschleunigung von  $4 m/s^2$  ermittelt. Der ermittelte Lenkradwinkel ist der Zielwert für den Lenkwinkelsprung. Die Ergebnisse in Tabelle 5.2 belegen dies (Werte für Lenkradwinkel und Querbeschleunigung). Unterschiede bei den Zielwerten des Lenkwinkelsprungs ergeben sich aus der Lenkgetriebeübersetzung. In Abbildung 5.20 sind die Verläufe des Lenkradmoments über der Zeit aufgetragen. Weitere Unterschiede sind zwischen dem hydraulischen Lenksystem und den elektromechanischen Lenksystemen zu erkennen.

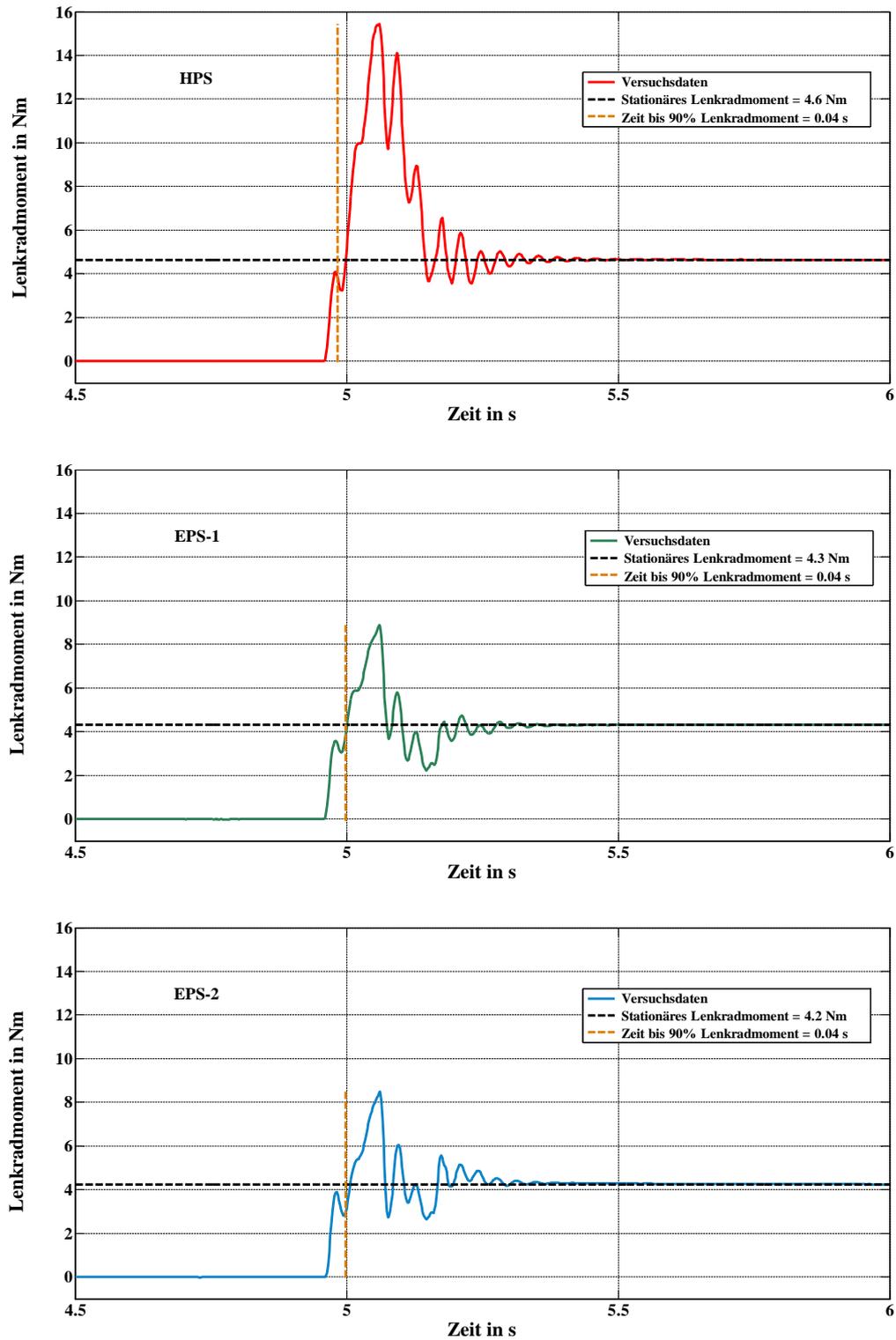


Abbildung 5.20: Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-1 und EPS-2): Lenkwinkelsprung

Parameter:	Lenkradmoment	Querbeschleunigung	Gierrate
<b>HPS Wert (stat.):</b>	4.6 Nm	4.0 m/s <sup>2</sup>	10.5 °/s
<b>HPS Zeit:</b>	0.04 s	0.34 s	0.24 s
<b>EPS-1 Wert (stat.):</b>	4.3 Nm	4.0 m/s <sup>2</sup>	10.4 °/s
<b>EPS-1 Zeit:</b>	0.04 s	0.34 s	0.24 s
<b>EPS-2 Wert (stat.):</b>	4.2 Nm	3.9 m/s <sup>2</sup>	10.1 °/s
<b>EPS-2 Zeit:</b>	0.04 s	0.34 s	0.24 s

**Tabelle 5.2:** Vergleich Lenksysteme (HPS, EPS-1, EPS-2): Objektive Kennwerte Lenkwinkelsprung (Abb. 5.20)

In Tabelle 5.2 sind die objektiven Kennwerte des Lenkwinkelsprungs hinterlegt. Analog zu den Messungen in Unterabschnitt 4.4.3 ist die Skalierung der x- Achse im Bereich von 4.5 s - 6 s dargestellt. Die x- Achse zeigt nur den Ausschnitt des Lenkwinkelsprungs. Die objektiven Kennwerte beziehen sich auf den Beginn des Lenkwinkelsprungs in der Messung, welcher bei 4.96 s liegt. Die Werte zeigen, dass sich die Ergebnisse der verschiedenen Lenksysteme kaum unterscheiden. Lediglich die Messgröße Lenkradmoment zeigt Unterschiede zwischen den einzelnen Lenksystemen. Diese sind zum einen im stationären Lenkradmoment (Tab. 5.2) als auch im Verlauf des Lenkradmoments zu sehen. Dieser Test kann bei der XiL- Entwicklungsmethode (Unterabschnitt 1.5.4) zur Beurteilung des Gesamtübertragungsverhalten verwendet werden.

### Zusammenfassung Vergleich von Lenksystemen anhand von Fahrmanövern

Die in Abschnitt 4.4 vorgestellten Fahrmanöver wurden in Abschnitt 5.4 für den Vergleich von Lenksystemen herangezogen. Bei diesen Testreihen hat das Fahrzeugmodell einen erheblichen Einfluss auf die Testresultate. Je nach den Anforderungen können die Testreihen Anwendung in der Entwicklung von Lenksystemen auf einem Lenksystemprüfstand finden. Mit den Ergebnissen mit Bezug zur Fahrzeugreaktion (Beschleunigung, Gierrate) lassen sich Erkenntnisse auf das Lenksystem im Gesamtfahrzeug gewinnen. Auswertungen mit Bezug zum resultierenden Lenkradmoment können die Unterschiede der Applikation oder zwischen Lenksystemen aufzeigen. Hierzu eignet sich der Weave-Test im Besonderen, wie beispielsweise die Darstellung des Hystereseverhaltens um die Mittellage oder Testreihen zum Mittengefühl.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Aufbau eines Lenksystemprüfstands für eine umfangreiche Charakterisierung von Lenksystemen. Der Aufbau und die Qualifizierung des Lenksystemprüfstands und die Testreihen für eine umfangreiche Charakterisierung von Lenksystemen bilden den Kern dieser Arbeit. Hierfür wurden zunächst die Anforderungen an einen Lenksystemprüfstand von den möglichen Testreihen zur Charakterisierung abgeleitet und definiert. Die globale Anforderung an die Leistungsfähigkeit des Lenksystemprüfstands ist die gesamte Bandbreite der Testmöglichkeiten abzudecken. Daher wurde ein neuartiges Prüfstandskonzept ausgewählt, welches sich durch zwei Linearmotoren zur Aufprägung der angeforderten Zahnstangenkraft auszeichnet. Bisher wurden Lenksystemprüfstände mit Hydraulikzylindern betrieben und nur einseitig zur Aufprägung der Zahnstangenkraft aufgebaut. Linearmotoren zeichnen sich durch eine hohe Dynamik aus und liefern die geforderte Regelgüte z.B. für Tests zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens. Die konzeptionelle Grundausslegung des Lenksystemprüfstands wurde anhand von Leistungs- und Dynamikmessungen bestätigt. Weiterhin wurde eine Infrastruktur geschaffen, welche den Betrieb von hydraulischen und elektromechanischen Lenksystemen ermöglicht.

Mit zwei Linearmotoren und einem Schrittmotor als Lenkradaktuator wurde ein Lenksystemprüfstand an der Hochschule München aufgebaut, welcher eine große Bandbreite an Testmöglichkeiten bietet und den Test von verschiedenen Lenksystemkonzepten ermöglicht. Es wurde ein wichtiges Entwicklungswerkzeug in der Lenksystementwicklung konzipiert und realisiert. Durch die Weiterentwicklung und Qualifizierung zu einem Hardware-in-the-Loop Lenksystemprüfstand in Verbindung mit einer Fahrzeugmodellumgebung können Testreihen auf Gesamtfahrzeugebene unabhängig von Fahrzeugprototypen durchgeführt werden. Umgekehrt besteht die Möglichkeit verschiedene Lenksystemkonzepte im gleichen digitalen Prototyp zu erproben, ohne dass aufwändige Umbauten in einem realen Fahrzeug durchgeführt werden müssen. Dies stellt einen neuen Abschnitt im Entwicklungsprozess von Lenksystem dar. Die Testvarianten zur Charakterisierung von Lenksystemen dienen der Ermittlung der Systemeigenschaften beispielsweise zur Bestätigung der Grundausslegung oder zur Parametrierung von Lenkungsmodellen. Das Testverfahren zur Bestimmung des Übertragungsverhaltens untersucht die Eigenschaften von verschiedenen Lenksystemkonzepten hinsichtlich des Führungs- und Rückmeldeverhaltens und den Einfluss der Regelungskonzepte.

---

Abschluss der Arbeit bildete der Vergleich von Lenksystemkonzepten an Hand von einer Auswahl aus den vorgestellten Testreihen zur Charakterisierung von Lenksystemen. Als Testschwerpunkt wurde das Übertragungsverhalten von verschiedenen Lenksystemkonzepten gewählt. Hierbei zeigte sich der Einfluss und die Abhängigkeit des Regelungskonzeptes eines elektromechanischen Lenksystems auf das Rückmeldeverhalten. Eine der wichtigsten gewonnenen Erkenntnisse des Vergleichs von Lenksystemen ist, dass mit einem entsprechenden Regelungskonzept das Rückmeldeverhalten von elektromechanischen Lenksystemen an ein konventionelles hydraulisches Lenksystem angenähert werden kann. Mit Hilfe des Lenksystemprüfstands und der Testvarianten können unterschiedliche Lenksysteme und Konzepte objektiv beurteilt werden. Weiterhin können Lenksysteme am Lenksystemprüfstand nach definierten Zielgrößen appliziert und optimiert werden. Insgesamt liefert diese Arbeit einen Beitrag die Komplexität des Entwicklungsprozesses zu beherrschen und Kosten in der Entwicklung einzusparen.

Die vorliegende Arbeit untersuchte unter einem wissenschaftlichen Ansatz eine umfassende Charakterisierung von Lenksystemen mit Hilfe eines Lenksystemprüfstands. Mit dieser Arbeit wurde eine wissenschaftliche Grundlage für verschiedene Anwendungen im Test von Lenksystemen geschaffen, welche zukünftig als einzelne Bausteine im Entwicklungsprozess von Lenksystemen angewandt werden können. Hierzu zählen die Systemtests mit den Testreihen zum Übertragungsverhalten, Hardware-in-the-Loop Testreihen auf Gesamtfahrzeugebene sowie Betriebslastennachfahrversuche. Die beschriebenen Testreihen wurden mit allen drei vorgestellten Lenksystemen durchgeführt. Auf Grund des Umfangs wurden aber nur die Ergebnisse des elektromechanischen Lenksystems mit neuartigem Regelungskonzept dargestellt. Die wichtigsten Ergebnisse wurden zusätzlich im Vergleich der Lenksystemkonzepte in Kapitel 5 bewertet. Der Ansatz in dieser Arbeit ist es die Möglichkeiten darzustellen, welche Lenksystemtests grundsätzlich auf einem Lenksystemprüfstand durchführbar sind. Aus diesem Ansatz heraus entstand ein umfangreicher Testkatalog, aus welchem zukünftig je nach Testanforderung oder zu untersuchendes Lenksystemphänomen die passenden Testreihen ausgewählt werden können.

Neben den in dieser Arbeit beschriebenen Testreihen können auf Basis der Ergebnisse weitere Testreihen auf einem Lenksystemprüfstand entwickelt werden. Durch die zunehmende Reduzierung von Prototypen und gleichzeitiger Erhöhung der Variantenvielfalt findet in der Fahrzeugentwicklung eine Transformation von Fahrzeugtests in die (teil-) virtuelle Testwelt statt. In Pilotprojekten wurde bereits der Nachweis für diese Potentiale erbracht [48]. Zukünftig wird die Entwicklung von Lenksystemen auf einem Lenksystemprüfstand weiter an Bedeutung gewinnen. Im Rahmen der Entwicklung des hoch- bzw. vollautomatisierten Fahrens können umfangreiche Testreihen zum Systemverhalten und zur Absicherung, welche die Fahrzeugquerführung betreffen, effizient, kostengünstig und ohne Gefährdung des Fahrers und des Umfelds auf einem Lenksystemprüfstand durchgeführt werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] ABOU-EL-ELA, A. ; WACHINGER, M. ; KRENN, M. : HIL-Prüfstand für BMW-Aktivlenkung. In: *dSPACE NEWS* (2004), Nr. 03, S. 14–16
- [2] AYOUBI, M. ; KOEHN, P. : *New Tendencies in the Development of Steering Systems*. JSAE Spring Convention, 2003
- [3] BETZ, M. ; MÄRZ, F. : Das Lenksystem des Audi Q3. In: *ATZ extra* (2011), Nr. Juli, S. 48–51
- [4] BOCHERT, A. ; CÄSAR, T. ; EICHLER, J. : Das Lenksystem des Audi A6. In: *ATZ extra* (2011), Nr. Januar, S. 140–143
- [5] BRAESS, H. H.: Theoretische Untersuchung des Lenkverhaltens von Kraftfahrzeugen. In: *FISITA Congress. XIIIth. Volume II, FISITA, Brussels, 1970, Paper 71.1.B*, (1970), S. 1–29
- [6] BRAESS, H. H.: Lenkungen und Lenkverhalten von Personenkraftwagen. Was haben die letzten 50 Jahre gebracht, was kann und muss noch getan werden? In: *Reifen Fahrwerk Fahrbahn* Band 1632. VDI-Berichte (2001), S. 13–55
- [7] BRAESS, H.-H. ; SEIFFERT, U. : *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 3. Auflage. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2003
- [8] BRAND, W. ; BRENNER, P. : Functional Development under Conditions Similar to Series Production to Optimize the Steering Feel. In: *21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology* (2012), S. 649–660
- [9] CHEN, J. S.: *Control of Electric Power Steering Systems*. SAE Technical Paper 981116, 1998
- [10] DANNÖHL, C. : *Entwicklung eines Algorithmus zur Servokraftregelung einer elektromechanischen Lenkung*. Dissertation, Technische Universität München, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr.715, 2010
- [11] DEUSCHL, M. : *Gestaltung eines Prüffeldes für die Fahrwerksentwicklung unter Berücksichtigung der virtuellen Produktentwicklung*, Technische Universität München, Diss., 2006

- [12] DOMINKE, P. ; RUCK, G. : *Electric Power Steering - The First Step on the Way to "Steer by Wire"*. SAE Technical Paper 1999-01-0401, 1999
- [13] ENGELHARDT, R. : *Entwicklung und Umsetzung von virtuellen Freigabeteests auf einem Lenksystemprüfstand: Diplomarbeit*. Hochschule München, 2012
- [14] ERSOY, M. ; HEISSING, B. : *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. 1. Wiesbaden : Vieweg, 2007. – ISBN 9783834801050
- [15] FIALA, E. : Die Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrer. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 69 (1967), Nr. 10, S. 345–348
- [16] FIGURA, M. ; FÜSTING, C. ; FIEBIGER, F. ; BONGARTH, W. : Das elektrische Lenksystem der neuen Ford Focus Plattform. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 113 (2011), Nr. 04, S. 302–307
- [17] GIACOMIN, J. ; SHAYAA, M. S. ; DORMEGNIE, E. ; RICHARD, L. : Frequency weighting for the evaluation of steering wheel rotational vibration. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 33 (2004), S. 527–541
- [18] GIACOMIN, J. ; WOO, Y. J.: Schwingungsdynamik des Lenksystems. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 107 (2005), Nr. 05, S. 422–429
- [19] GIES, S. ; MARUSIC, Z. : Das Lenkgefühl - Merkmale der subjektiven und objektiven Beschreibung. In: *HDT-Tagung Essen* (1998)
- [20] GISSLER, J. : *Elektrische Direktantriebe: Vorteile der Direktantriebstechnik praktisch nutzen*. Poing : Franzis, 2005. – ISBN 978-3-7723-5007-8
- [21] GROLL, M. v.: *Modifizierung von Nutz- und Störinformationen am Lenkrad durch elektromechanische Lenksysteme*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2006
- [22] GÜHMANN, C. : Einsatz der Simulation in der Applikation und im automatisierten Test von Getriebesteuerungen. In: *IIR Tagung Getriebeelektronik, Regensburg* (2003)
- [23] HANGL, F. : Modern test system architectures and test procedures for future steering systems. In: *steering.tech* (2008)
- [24] HARRER, M. : Elektromechanische Lenksysteme -Herausforderungen und Entwicklungstrends. In: *15th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology* (2006), S. 1573–1586
- [25] HARRER, M. : *Characterisation of Steering Feel*, University of Bath, Diss., 2007
- [26] HARRER, M. : *Objektivierung des Lenkverhaltens*. 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik, 2008

- 
- [27] HARRER, M. ; BRUNN, P. : Objektivierung der Lenkungsrückmeldung. In: *VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr.580* (2004), S. 67–69
- [28] HARRER, M. ; HSU, H. G. S. ; GAEDKE, A. : The New Steering System in the 911 Porsche Carrera – Optimized Design of a Steering System for Sportcars. In: *21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology* (2012), S. 633–648
- [29] HENRICHFREISE, H. ; HERFELD T. ; GUDERJAHN, J. ; BLAJ E.: HiL-Simulation für die Entwicklung von Lenksystemen. In: *8. Tagung Hardware-in-the-Loop Simulation 2008, Kassel, 16.-17. September 2008*. (16.-17. September 2008)
- [30] HENRICHFREISE, H. ; JUSSEIT, J. ; NIESSEN, H. : *Functional Development under Conditions Similar to Series Production to Optimize the Steering Feel*. 5. VDI Mechatronik Tagung and Innovative Produktentwicklung Fulda, 2003
- [31] HIRAO, O. ; NAKAJIMA, T. : Versuche an Kraftfahrzeugen auf dem Prüfstand. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* (1968), Nr. 1
- [32] ISERMANN, R. : *Fahrdynamikregelung: Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik*. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006
- [33] ISO 13674-1: Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Part1: Weave test. (2003)
- [34] ISO 13674-2: Road vehicles -Test method for the quantification of on-centre handling – Part 2: Transition test. (2003)
- [35] ISO 26262: Road vehicles - Functional Safety. (2011)
- [36] ISO 4138: Passenger cars – Steady-state circular driving behaviour – Openloop test procedure. (1996)
- [37] ISO 7401: Road vehicles - Lateral transient response test methods. (1988)
- [38] ISO 8726: Road vehicles - Transient open-loop response test method with pseudo-random steering input. (1988)
- [39] JABLONSKI, T. ; ET AL.: Die neue elektromechanische Lenkung APA-BS. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Elektronik* 3 (2008), Nr. 01, S. 30–35
- [40] KLEMENT, J. : *Technologie der elektrischen Direktantriebe*. Renningen : Expert Verl., 2011 // 2008. – ISBN 978–3–8169–2822–5
- [41] KUBISCH, M. : *Modellierung und Simulation nichtlinearer Motoreigenschaften*. Berlin, Humboldt-Universität, Diss., 2008

- [42] KUSHIRO, I. ; YAMAMOTO, M. : *Vehicle Behavior Under the Influence of Steering Dynamics by Means of Low Frequency Torque Input*. SAE Technical Paper 2006-01-1178, 2006
- [43] LETSCHE, S. : *Entwicklung von Produkt- und Systemtests für Energiespeichersysteme auf einem Hardware-in-the-Loop (HiL) System*. Hamburg : Diplomica Verlag GmbH, 2011. – ISBN 978-3-8428-1928-3
- [44] LIN, J. ; SCHIMPF, R. ; PFEFFER, P. : Modelling and Simulation of Steering Shudder of Electro-mechanical Steering Systems. In: *4TH INTERNATIONAL MUNICH CHASSIS SYMPOSIUM* (2010)
- [45] LÖW, P. ; PABST, R. ; PETRY, E. : *Funktionale Sicherheit in der Praxis: Anwendung von DIN EN 61508 und ISO/DIS 26262 bei der Entwicklung von Serienprodukten*. 1. Heidelberg : dpunkt.verlag GmbH and dpunkt-Verl., 2010. – ISBN 978-3-89864-570-6
- [46] LUBISCHER, F. ; ET AL.: Kraftstoffsparpotenzial durch Lenkung und Bremse. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 110 (2008), Nr. 11, S. 996–1005
- [47] LUNKEIT, D. : Control-based potentials for electric power steering systems to improve road feedback and self aligning characteristics. In: *1ST INTERNATIONAL MUNICH CHASSIS SYMPOSIUM* (2010), S. 325–343
- [48] LUNKEIT, D. : *Ein Beitrag zur Optimierung des Rückmelde- und Rückstellverhaltens elektromechanischer Servolenkungen*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2014
- [49] LUTZ, H. ; WENDT, W. : *Taschenbuch der Regelungstechnik*. 6. Erweiterte Auflage. Frankfurt am Main : wissenschaftlicher Verlag Herri Deutsch, 2005
- [50] MITSCHKE, M. ; WALLENTOWITZ, H. : *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 4. Berlin : Springer, 2004. – ISBN 9783540420118
- [51] NEUREDER, U. : *Untersuchungen zur Übertragung von Radkraftschwankungen auf die Lenkung von Pkw mit Federbeinvorderachse und Zahnstangenlenkung*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr.518, 2002
- [52] N.N.: *CarMaker*. <http://ipg.de/de/simulation-software/carmaker/>. Version: 2016
- [53] N.N.: *dSPACE digital signal processing and control engineering GmbH: dSPACE Simulator*. <https://www.dspace.com/de/gmb/home.cfm>. Version: 2016
- [54] NOWICKI, D. ; BESTLE, D. ; STRASSER, G. : Empfindlichkeitsuntersuchungen von Kraftfahrzeugen auf bremseregte Lenkraddreherschwingungen (LDS) mit Hilfe eines Komplettfahrzeugprüfstands. In: *3. Symposium "Reifen und Fahrwerk"*, Düsseldorf (26. September 2005), S. 37–52

- [55] PFEFFER, P. : *Interaction of Vehicle and Steering System Regarding On-Centre Handling*, University of Bath, Diss., 2006
- [56] PFEFFER, P. : Aktive Fahrwerksysteme. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 113 (2011), Nr. 06, S. 444–451
- [57] PFEFFER, P. ; HARRER, M. : *Lenkungshandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2011
- [58] POIREL, P. : Perspektiven für die elektromechanische Lenkung. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 114 (2012), Nr. 06, S. 470–474
- [59] RUDERMAN, M. : *Zur Modellierung und Kompensation dynamischer Reibung in Aktuatorssystemen*. Dortmund, Technische Universität Dortmund, Diss., 2012
- [60] RUNGE, W. ; ET AL.: *Technologiewandel in der Lenkungstechnik, von der Hydrauliklenkung zur Elektrolenkung*. steering.tech, 2008
- [61] RUNGE, W. ; ET AL.: Elektrisch lenken - Notwendige Effizienzsteigerungen im Oberklassensegment. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 111 (2009), Nr. 10, S. 738–744
- [62] SCHÄFER, P. ; WAHL, G. ; HARRER, M. : Das Fahrwerk des Porsche 911. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 114 (2012), Nr. 06, S. 460–465
- [63] SCHÄUFFELE, J. ; ZURAWKA, T. : *Automotive Software Engineering: Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen*. 3. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006. – ISBN 3834890855
- [64] SCHIMPF, R. ; ECKER, H. ; PFEFFER, P. : Entwicklung und Test von Lenksystemen auf einem Lenksystemprüfstand. In: *14. Internationale VDI Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn* Band 221. VDI-Berichte (2013), S. 223–238
- [65] SCHIMPF, R. : *Entwicklung einer Simulationsumgebung für die Traktionskontrolle von Rennfahrzeugen: Master Thesis*. Hochschule München, 2007
- [66] SCHOLZ, P. : *Softwareentwicklung eingebetteter Systeme: Grundlagen, Modellierung, Qualitätssicherung*. 1. Berlin : Springer, 2005. – ISBN 9783540234050
- [67] SPECKA, F. ; SCHICK, B. ; PFEFFER, P. ; CONTINI, A. : Bewertung und Optimierung des Lenkverhaltens im Gesamtfahrzeug am "Steering-in-the-Loop" Prüfstand. In: *14. Internationale VDI Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn* Band 221. VDI-Berichte (2013), S. 239–256
- [68] SUGIYAMA, A. ; KURISHIGE, M. ; HAMADA, H. ; KIFUKU, T. : *An EPS Control Strategy to Reduce Steering Vibration Associated with Disturbance from Road Wheels*. SAE Technical Paper 2006-01-1178, 2006

- [69] WENZEL, E. : *Entwicklung eines Bewertungsverfahrens zum Vergleich von Lenkungen in Kundenhand hinsichtlich Kraftstoffverbrauch*. Dissertation, Technische Universität München, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr.700, 2008

# Firmenverzeichnis

Nachfolgend sind in diesem Verzeichnis in alphabetischer Reihenfolge die wesentlichen Hersteller der in dieser Arbeit verwendeten und für den Lenksystemprüfstand zugekauften Komponenten aufgelistet:

dSPACE digital signal processing and control engineering GmbH  
Rathenaustraße 26  
33102 Paderborn  
URL: [www.dspace.com](http://www.dspace.com)

EA Elektro-Automatik GmbH & Co. KG  
Helmholtzstr. 31-33  
41747 Viersen  
URL: [www.elektroautomatik.de](http://www.elektroautomatik.de)

IPG Automotive GmbH  
Bannwaldallee 60  
76185 Karlsruhe  
URL: [ipg.de](http://ipg.de)

SILVER ATENA Electronic Systems Engineering GmbH  
Dachauer Straße 655  
80995 München  
URL: [www.silver-atenade](http://www.silver-atenade)

Vector Informatik GmbH  
Ingersheimer Straße 24  
70499 Stuttgart  
URL: [vector.com](http://vector.com)



## Lebenslauf

### Persönliche Daten:

---

Geburtsdatum: 23.06.1979  
Geburtsort: Erbach (Odenwald)  
Familienstand: verheiratet, 1 Kind

### Beruflicher Werdegang:

---

seit 12/2013      Entwicklungsingenieur, Grundentwurf Fahrdynamikfunktionen,  
BMW AG, München  
07/2009 - 11/2013      Wissenschaftlicher Mitarbeiter u. Versuchsingenieur, Labor für  
Fahrzeugtechnik - Lenksystemprüfstand, Hochschule München  
10/2007 - 06/2009      Entwicklungsingenieur, Funktionsentwicklung aktive Lenksysteme,  
ThyssenKrupp Presta München/Esslingen GmbH

### Studium:

---

03/2010 - 07/2016      Doktoratsstudium der technischen Wissenschaften, Technische  
Universität Wien  
Titel der Dissertation: "Charakterisierung von Lenksystemen mit Hilfe  
eines Lenksystemprüfstands"  
10/2005 - 08/2007      Masterstudium Fahrzeugmechatronik, Hochschule für angewandte  
Wissenschaften München  
10/2000 - 08/2005      Diplomstudium Fahrzeugtechnik, Fachhochschule München

### Ausbildung und Wehrdienst:

---

07/1999 - 04/2000      Wehrdienst  
09/1991 - 06/1999      Gymnasium Michelstadt

München, Juni 2016