

ATZ/MTZ-Fachbuch

Peter Pfeffer
Manfred Harrer *Hrsg.*

Lenkungs- handbuch

Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik
von Kraftfahrzeugen

2. Auflage

 Springer Vieweg

ATZ/MTZ-Fachbuch

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Motoren macht einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die regelmäßig aktualisierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch und anwendungsorientiert zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

Peter Pfeffer · Manfred Harrer
Herausgeber

Lenkungshandbuch

Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik
von Kraftfahrzeugen

2., überarbeitete und ergänzte Auflage

Mit 455 Abbildungen und 35 Tabellen

 Springer Vieweg

Herausgeber

Prof. Dr. Dipl.-Ing. Peter Pfeffer
Feldafing, Deutschland

Dr. Manfred Harrer
Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-658-00976-2
DOI 10.1007/978-3-658-00977-9

ISBN 978-3-658-00977-9 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2013

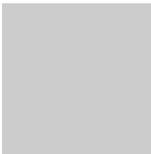
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlagbild: Lenksystemprüfstand an der Hochschule München (Quelle: SILVER ATENA Electronic Systems Engineering)

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de



Vorwort der Herausgeber

Im Mai 2011 erschien die erste Auflage des Lenkungshandbuches, das sich im deutschsprachigen Raum innerhalb kürzester Zeit als Standardwerk zum Thema Lenksysteme/Lenkverhalten etabliert hat und fester Bestandteil der renommierten ATZ/MTZ Fachbuchreihe des Springer Vieweg Verlages geworden ist. Durch die Berücksichtigung der unterschiedlichen Interessen und Anforderungen der Automobilhersteller, Zulieferer und Hochschulen und durch die Einbindung ausgewiesener Experten aus diesen Bereichen wurde dieser Erfolg möglich. Das fundierte Fachwissen von nahezu 40 Experten aus der Industrie und den Hochschulen stand für die Erstellung des Lenkungshandbuches zur Verfügung.

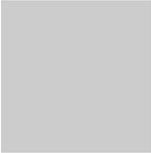
Das Lenkungshandbuch wurde für seine 2. Auflage gründlich überarbeitet und ergänzt. Wir bedanken uns bei allen Autoren für die Aktualisierung ihrer Buchkapitel und bei den Lesern für die konstruktiven Verbesserungsvorschläge. Ein großes Dankeschön ergeht auch an den Springer Vieweg Verlag für die gute Zusammenarbeit. Die Leser dieses Handbuches bitten wir weiterhin, uns Anregungen, Verbesserung- bzw. Ergänzungsvorschläge unter der E-Mail-Adresse: mail@Lenkungshandbuch.de mitzuteilen.

Das Lenkungshandbuch ist ein Gesamtwerk über Lenksysteme, Lenkgefühl und Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen. Im ersten Teil dieses Handbuches werden die kinematischen und fahrdynamischen Grundlagen eines Lenkvorganges erklärt und die wichtigsten Fahrwerkskenngrößen und deren Bedeutung für den Lenkvorgang besprochen. Der Interaktion von Fahrer – Fahrzeug wird in einem weiteren Kapitel große Aufmerksamkeit gewidmet, um den Aspekten zum Thema Lenkgefühl gerecht zu werden. Die weiteren zentralen Kapitel dieses Buches widmen sich den einzelnen Lenkungsbaugruppen, deren Auslegungsgrößen und Bauteilprüfungen. Ausführlich beschrieben sind die Komponenten und Systeme Lenkrad, Lenksäule mit Lenkzwischenwelle sowie die Zahnstangenlenkung in mechanischer, hydraulischer und elektromechanischer Ausführung. Besondere Lenksystemtechnologien wie die Überlagerungslenkung und Allradlenkung werden ebenfalls detailliert erläutert. Viel Wert wurde darauf gelegt, den aktuellen Stand der jeweiligen Lenksystemtechnologie und deren Wechselwirkung mit dem Gesamtfahrzeug abzubilden und die resultierende Komplexität detailliert, aber dennoch verständlich darzulegen. So werden auch wichtige Nebenaspekte wie akustisches Verhalten, Energiebedarf und Funktionale Sicherheit behandelt. Weiterhin werden die durch moderne Lenksysteme möglichen Fahrerassistenzfunktionen dargestellt.

Unsere Zielgruppen sind Ingenieure und Techniker in der Konzeption, Konstruktion, Entwicklung, Erprobung, Herstellung, Wartung und Überwachung von Personenkraftwagen und deren Lenkanlagen. Weiterhin Lehrende und Forschende und besonders Studierende des Ingenieur- und Fahrzeugwesens an Hochschulen, Universitäten sowie an Berufs- und Technikerschulen.

Stuttgart/Feldafing im Mai 2013

Manfred Harrer
Peter Pfeffer



Gastvorwort

Die haptische Rückmeldung über die Lenkung gibt dem Fahrer die feinfühligste Rückmeldung über den Fahrzustand und damit über die Sicherheitsreserven des Fahrzeugs. Gleichzeitig kann eine gut abgestimmte Lenkung ein Fahrzeug bei identischem Fahrwerk bedeutend sicherer machen. Trotzdem stand bisher die Lenkung weder in den Testberichten noch in der Literatur im Vordergrund.

Zurzeit findet ein wesentlicher Paradigmenwechsel statt. Gründe dafür sind:

- Die Lenkung rückt immer mehr in den Fokus einer endkundenrelevanten Eigenschaft. Die Präzision des Lenkens wird weltweit zu einem starken Kaufargument.
- Die Zahl der Lenkungstechnologien und der beeinflussbaren Fahrzeuggrößen hat sich stark erhöht.
- Die elektromechanische Servolenkung löst die elektrohydraulische als Standardlenkung ab. Eigenschaften, die bisher mechanisch eingepreßt waren, werden durch die elektromechanische Lenkung einstellbar. Dadurch wird die Lenkung:

„Die erste wesentliche Systemkomponente des Fahrwerks, die zu 100 % strategiefähig ist. Sie wird damit Nukleus eines vernetzten Fahrwerks und Basis vieler heutiger und zukünftiger Assistenzsysteme. Die Auslegung und Funktionalität der Lenkung wird die Auslegung aller anderen Fahrwerkskomponenten stark beeinflussen und wird künftig zu Beginn aller Fahrwerksauslegungen stehen.“

Elektromechanische Servolenkungen und vernetzte elektronische Regelsysteme machen unsere Fahrzeuge sicherer, agiler, komfortabler und effizienter. Sie bedeuten aber auch deutlich mehr Komplexität und erhöhte Anforderungen hinsichtlich der Kosten, Qualität und Entwicklungszeiten. Fahrzeughersteller und Zulieferer und Universitäten verlangen deshalb nach Grundlagenwissen, Methoden und Werkzeugen, mit denen sie die Funktionen und Zuverlässigkeit durchgängig im Gesamtkontext von Prozess und System designen und optimieren können.

Entsprechend der künftigen Bedeutung der Lenkungstechnik an sich und ihrer Basis für Assistenzsysteme gibt es bis jetzt dazu keine adäquate Literatur. Aufgrund der erstmaligen umfassenden Behandlung aller relevanten Lenkungs- und Vernetzungsthemen wird dieses Buch aus meiner Sicht zu einem Standardwerk für die Lenkungs- und Fahrwerktechnik sowie von Assistenzfunktionen werden.

Den Herausgebern und den Autoren danke ich für die hervorragende grundlegende Arbeit. Sie wird vielen Entwicklern und Studenten ein ständiger Begleiter werden und einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, dass unsere Fahrzeuge sicherer und umweltschonender werden.

Ravensburg im Mai 2011

Dr. Wolfgang Runge

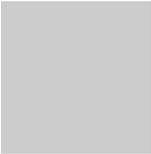
Die Herausgeber

Dr. **Manfred Harrer** studierte Fahrzeugtechnik an der Hochschule München. Von 1997 bis 1999 arbeitete er in der Fahrwerksentwicklung bei der Audi AG in Ingolstadt. Von 1999 bis 2007 war Manfred Harrer bei der BMW Group in München als Versuchsingenieur, Projektleiter und Leiter Vorentwicklung Lenksysteme beschäftigt. Von 2003 bis 2007 promovierte Manfred Harrer an der University of Bath, England. Hierbei beschäftigte er sich intensiv mit der Objektivierung fahrdynamischer Größen zur Beschreibung des subjektiv empfundenen Lenkgefühls und Fahrverhaltens. Seit 2007 ist Manfred Harrer bei der Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG innerhalb der Fahrwerksentwicklung tätig. Er verantwortete dort das Fachgebiet Lenksysteme und Räder und die Abteilung Federungs-, Lenksysteme und Energieversorgung. Aktuell leitet er die Abteilung Entwicklung Fahrdynamik und Performance.

Seit mehreren Jahren engagiert sich Manfred Harrer in zahlreichen Kooperationsprojekten zwischen Industrie, Wissenschaft und Hochschulen. Als Autor und Co-Autor hat er eine Reihe von Publikationen zu unterschiedlichen Fahrwerksthemen veröffentlicht. Manfred Harrer ist Wissenschaftlicher Beirat bei den Fahrwerkstagen *chassis.tech_{plus}* und Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn.

Prof. Dr. Dipl.-Ing. **Peter Pfeffer** studierte an der TU Wien und an der RWTH Aachen Maschinenbau. 1995 trat er in die Technische Entwicklung der Audi AG ein. Er arbeitete dort im Fahrwerksbereich und in der Akustik. Einer der Schwerpunkte der Tätigkeiten war die Aggregatlagerung, der Schwingungskomfort und Projektleitertätigkeiten. Von 2002 bis 2007 wirkte Peter Pfeffer als Lecturer an der University of Bath, England. Zu dieser Zeit forschte und promovierte er zum Thema Beeinflussung der Fahrdynamik durch Lenksysteme. Peter Pfeffer wurde 2007 als Professor für Fahrzeugtechnik an die Hochschule München berufen. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Fahrdynamik, der Schwingungskomfort, Elastomer- und Hydrolager und Lenkungen. Er leitet das Kompetenz Zentrum Fahrzeugmechanik - Fahrdynamik und ist seit 2010 Prodekan der Fakultät Maschinenbau, Fahrzeugtechnik, Flugzeugtechnik. Als Wissenschaftlicher Leiter der *chassis.tech plus* trägt er zum Wissenstransfer im Fahrwerksbereich bei. Peter Pfeffer ist zudem Stellvertretender Vorsitzender des VDI Bezirksverein München, Ober- und Niederbayern e.V., Mitglied im Beirat der „VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik“ und Sprecher des Arbeitskreises der Professoren für Fahrzeugtechnik an Fachhochschulen.

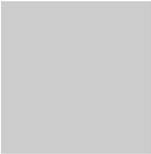




Autorenverzeichnis

Adamczyk, Dirk	ZF Friedrichshafen AG
Braess, Hans-Hermann, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h.	ehemals BMW AG
Brosig, Stefan, Dr.	Volkswagen AG
Brunner, Sina	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Gaedke, Alexander	ZF Lenksysteme GmbH
Gessat, Jochen, Dr.	TRW Automotive
Grüner, Stefan, Dr.	ZF Lenksysteme GmbH
Harrer, Manfred, Dr.	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Hauhoff, Jörg, Dr.	Willi Elbe GmbH
Heger, Markus	ZF Lenksysteme GmbH
Herold, Peter	BMW Group
Hintersteiner, Rupert, Dr.-Ing.	Audi AG
Höll, Manuel	Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Mechatronik Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Holtschulze, Jens, Dr.-Ing.	BMW Group
Huang, Pei-Shih, Dr.-Ing.	BMW Group
Hullmann, Johannes	TRW Automotive
James, David	Bishop Steering Technology GmbH
Kleiner, Wolfgang	ZF Friedrichshafen AG
Lienkamp, Markus, Prof. Dr.-Ing.	TU-München
Lunkeit, Daniel	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Maehlmann, Dirk	ZF Friedrichshafen AG

Pfeffer, Peter, Prof. Dr.	Hochschule München
Pruckner, Alfred, Dr.-Ing.	BMW Group
Reuter, Mirko	Audi AG
Saal, André	Audi AG
Sedlmeier, Ralf	Willi Elbe GmbH
Seewald, Alois, Dr.	TRW Automotive
Semmel, Dieter	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Sentpali, Stefan, Prof. Dr.	Hochschule München, BMW Group
Span, Eduard, Dr.	TRW Automotive
Sprinzl, Michael	ZF Lenksysteme GmbH
Trzesniowski, Michael, Prof.	FH Joanneum
Ulrich, Hartmut, Prof. Dr.-Ing.	Hochschule Ruhr West
Vähning, Alexander	ZF Lenksysteme GmbH
Wallbrecher, Markus	BMW Group
Walters, Markus	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Wiertz, Alexander	TRW Automotive
Zimmermann, Dirk, Dr.	TRW Automotive



Autorenverzeichnis nach Kapiteln

Adamczyk, Dirk Kapitel L	ZF Friedrichshafen AG
Braess, Hans-Hermann, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Kapitel B5, E2, G8	ehemals BMW AG
Brosig, Stefan, Dr. Kapitel S	Volkswagen AG
Brunner, Sina Kapitel C, H1	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Gaedke, Alexander Kapitel O	ZF Lenksysteme GmbH
Gessat, Jochen, Dr. Kapitel N	TRW Automotive
Grüner, Stefan, Dr. Kapitel O	ZF Lenksysteme GmbH
Harrer, Manfred, Dr. Kapitel C, G, H1, T	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Hauhoff, Jörg, Dr. Kapitel J	Willi Elbe GmbH
Heger, Markus Kapitel O	ZF Lenksysteme GmbH
Herold, Peter Kapitel Q	BMW Group
Hintersteiner, Rupert, Dr.-Ing. Kapitel F4	Audi AG
Höll, Manuel Kapitel H1	Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Mechatronik Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Holtschulze, Jens, Dr.-Ing. Kapitel B3	BMW Group

Huang, Pei-Shih, Dr.-Ing. Kapitel R	BMW Group
Hullmann, Johannes Kapitel K1 bis K4, K6 bis K7	TRW Automotive
James, David Kapitel K5	Bishop Steering Technology GmbH
Kleiner, Wolfgang Kapitel L	ZF Friedrichshafen AG
Lienkamp, Markus, Prof. Dr.-Ing. Kapitel S	TU-München
Lunkeit, Daniel Kapitel H2	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Maehlmann, Dirk Kapitel L	ZF Friedrichshafen AG
Pfeffer, Peter, Prof. Dr. Kapitel A1 bis A2, B1 bis B2, B4, B6, E, G (außer G8), T	Hochschule München
Pruckner, Alfred, Dr.-Ing. Kapitel R	BMW Group
Reuter, Mirko Kapitel P	Audi AG
Saal, André Kapitel P	Audi AG
Sedlmeier, Ralf Kapitel J	Willi Elbe GmbH
Seewald, Alois, Dr. Kapitel K, N	TRW Automotive
Semmel, Dieter Kapitel M	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Sentpali, Stefan, Prof. Dr. Kapitel F1 bis F3	Hochschule München, BMW Group
Span, Eduard, Dr. Kapitel K1 bis K4, K6 bis K7	TRW Automotive

Sprinzel, Michael Kapitel O	ZF Lenksysteme GmbH
Trzesniowski, Michael, Prof. Kapitel D	FH Joanneum
Ulrich, Hartmut, Prof. Dr.-Ing. Kapitel A3	Hochschule Ruhr West
Vähning, Alexander Kapitel O	ZF Lenksysteme GmbH
Wallbrecher, Markus Kapitel Q	BMW Group
Walters, Markus Kapitel I	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Wiertz, Alexander Kapitel K1 bis K4, K6 bis K14	TRW Automotive
Zimmermann, Dirk, Dr. Kapitel N	TRW Automotive

Inhaltsverzeichnis

Vorwort der Herausgeber.....	V
Gastvorwort	VI
Die Herausgeber.....	VII
Autorenverzeichnis	IX
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	XXVII
A Einleitung und Geschichte.....	1
Definition und Abgrenzung	2
1 Aufgabe und Bedeutung der Lenkung	2
1.1 Grundbauarten.....	3
1.2 Bauformen	3
2 Geschichte der Querdynamik.....	4
3 Geschichte der Kraftfahrzeuglenkung.....	8
3.1 Die Drehschemellenkung (Achsschemellenkung).....	9
3.2 Die Achsschenkellenkung	9
3.3 Die Lenkungen der ersten Kraftfahrzeuge.....	10
3.4 Mechanische Lenkgetriebe	12
3.5 Servolenkgetriebe (Hilfskraftlenkung).....	14
B Grundlegendes zum Lenkvorgang.....	21
1 Lenken – Fahrzeugführung quer.....	21
2 Kurvenfahrt.....	22
2.1 Langsame Kurvenfahrt	22
2.2 Schnelle Kurvenfahrt.....	22
3 Reifeneigenschaften in Querrichtung.....	24
3.1 Kraftübertragung Vertikal – Einfluss auf Latschlänge.....	24
3.2 Reifenseitenkraft, Reifennachlauf und -rückstellmoment.....	25
3.2.1 Bereich kleiner Querbeschleunigungen (lineare Reifeneigenschaften).....	25
3.2.2 Bereich höherer Querbeschleunigungen (nichtlineare Reifeneigenschaften).....	28
3.2.3 Einfluss durch Sturzwinkel.....	31
3.3 Transientes Verhalten der Reifenseitenkraft.....	32
3.4 Zusammenfassung Reifeneigenschaften.....	32
4 Lenkradmoment	33
4.1 Lenkradmomentenberechnung	34
4.2 Lenkungsverstärkung	35
4.3 Lenkunterstützungsmoment.....	38
5 Allradlenkung	39
6 Verspannungslenkung.....	40
C Anforderungen an die Lenkung –	43
1 Funktion und Lenkgefühl.....	43

2	Package	44
3	Gewicht	45
4	Kosten	46
5	Qualität	47
6	Energie und Umwelt	47
7	Akustik und Schwingungen	48
8	Systemsicherheit	48
9	Gesetzliche Anforderungen.....	49
D	Lenkkinematik	51
1	Einleitung	51
2	Kenngößen der Lenkgeometrie.....	51
3	Kenngößen der Radstellung.....	56
3.1	Lenkübersetzung	63
4	Übertragungseinrichtung.....	65
E	Fahrdynamische Grundlagen	77
1	Fahrzeugmodellierung – lineares Einspurmodell.....	77
1.1	Bewegungsgleichungen	78
1.2	Lenkwinkel – Lenkradwinkel – Lenkungsverstärkung.....	80
1.3	Stationäre Kreisfahrt.....	83
1.4	Unter-/Übersteuern	85
1.5	Transientes Verhalten – Ansprechzeit auf Lenkradwinkelsprung	86
1.6	Gierfrequenzgang	87
1.7	Lenkungsmodelle	88
1.8	Lenkungsmodell mit Lenkunterstützung und Reibeffekten	90
1.9	Analyse des Einflusses von Fahrzeug- und Lenkungsparameter auf das Fahr- und Lenkverhalten	92
2	Fahrdynamische Grundausslegung für das Lenksystem	94
2.1	Auslegung der Schwenkachse – Stationäres Rückstellmoment	94
2.2	Bestimmung des Stabilitätsfaktor (Stability Factor).....	94
2.3	Stationäre Gierverstärkung und Lenkempfindlichkeit	95
2.4	Lenkradmoment-Querbeschleunigungsgradient (stationär).....	96
2.5	Frequenzgang Lenkradmoment-Lenkradwinkel	96
2.6	Free-Control-Stabilität.....	96
2.7	Eigenfrequenz und Dämpfung der Lenkung.....	97
2.8	Minimierung des Schiefziehens bei ungleichen Bremskräften an der Vorderachse	98
2.9	Lenkstabiles Bremssystem.....	98
2.10	Einfluss der Aerodynamik auf das Fahrverhalten.....	98
2.11	Frontgetriebene Fahrzeuge	98
F	Akustik und Schwingungen	101
1	Stör- und Funktionsgeräusche.....	101
1.1	Schallquellen von Lenksystemen	102
1.2	Elektrische Lenksystemen	103
1.3	Hydraulische Lenksystemen	104
2	Stabilität.....	107
2.1	Hydraulisches Lenkungsklappern.....	108

2.2	Lenkungsrippen.....	109
2.3	Lenkraddrehschwingungen LDS.....	110
3	Körperschallübertragung durch Schläuche und Leitungen.....	112
3.1	Körperschallwellenüberlagerung.....	112
3.2	Akustisch wirksame Materialkenngrößen.....	112
3.3	Minderung der Schallübertragung durch Biegeverlegung.....	113
4	Lenksäule und Lenkrad – Auslegung hinsichtlich Schwingungskomfort.....	114
4.1	Auslegungsstrategie.....	115
4.2	Eigenfrequenzziele der Komponenten und im Gesamtfahrzeug.....	117
4.3	Berechnungsmodelle und -lastfälle.....	118
4.4	Parameterstudien.....	119
4.5	Lenkradtilger.....	121
4.6	Fazit.....	123
G	Lenkgefühl, Interaktion.....	125
1	Lenkverhalten und Lenkgefühl.....	125
2	Lenkgefühl.....	127
2.1	Führungsverhalten.....	128
2.2	Rückmeldeverhalten.....	129
2.3	Anforderungen an ein optimales Lenkverhalten und Lenkgefühl.....	129
3	Evaluierungsmethodiken des Lenkgefühls – Objektivierung.....	130
4	Subjektive Beurteilung des Lenkgefühls.....	131
5	Objektive Beurteilung des Lenkverhaltens.....	135
5.1	Messausrüstung.....	135
5.2	Fahrmanöver.....	136
5.3	Automatisierte Datenaufbereitung.....	137
5.4	Objektive Parameter.....	138
6	Korrelations- und Regressionsanalyse.....	139
7	Zielbereiche für optimales Lenkverhalten.....	139
8	Authentisches oder synthetisches Lenkgefühl – Ein objektiv bewertbares Thema?.....	141
H	Auslegung von Lenkungen.....	145
1	Grundauslegung eines Lenkgetriebes.....	145
1.1	Zahnstangenkraft.....	145
1.2	Lenkradmoment.....	146
1.3	Lenkdynamik.....	146
1.4	Lenkleistung.....	148
1.5	Lenkungsreibung.....	148
1.5.1	Negative Aspekte von Reibung im Lenkgetriebe.....	149
1.5.2	Positive Aspekte von Reibung im Lenkgetriebe.....	149
2	Übertragungsverhalten von Lenksystemen.....	151
2.1	Führungsverhalten.....	151
2.2	Rückmeldeverhalten.....	152
2.2.1	Rückmeldung bei hydraulisch unterstützten Servolenkungen.....	153
2.2.2	Rückmeldungsrelevante nichtlineare Erweiterungen bei hydraulischen Servolenkungen.....	156
2.2.3	Rückmeldung bei elektromechanisch unterstützten Servolenkungen.....	158

I	Lenkrad	163
1	Einführung	163
2	Baugruppen	163
2.1	Skelett	164
2.2	Lenkradkranz und Lenkradkorpus	167
2.3	Hupe	167
2.4	Airbag und Crash	168
2.4.1	Airbagkappe	169
2.4.2	Luftsack	169
2.4.3	Gasgenerator	170
2.5	Multifunktion	171
2.6	Schaum/Leder/Dekore	174
3	Anforderungen an die Komponenten und ZSB	175
4	Erprobung und Absicherung	175
4.1	Airbag	176
4.1.1	Allgemeine- und Crashanforderungen	176
4.1.2	Umweltsimulation	176
4.2	Lenkrad	178
4.2.1	Betriebsfestigkeit	178
4.2.2	ECE-R12	180
4.2.3	Umweltsimulation/Lacktest/Galvaniktest	180
4.3	Bedienelemente/EE	181
5	Modularisierung/Entwicklungstrends/Ausblick	182
J	Lenksäule und Lenkzwischenwelle	183
1	Einführung	183
2	Baugruppen	184
2.1	Lenkstrang Oben	185
2.2	Manuell verstellbare Lenksäule MVLS	186
2.3	Elektrisch verstellbare Lenksäule EVLS	186
2.4	Lenkzwischenwellen	187
2.4.1	Ungleichförmigkeit und Center Point	188
2.5	Komponenten der Baugruppen	190
2.5.1	Verstelleinheiten	190
2.5.1.1	Manuelle Verriegelung	190
2.5.1.2	Elektrische Antriebseinheit	191
2.5.2	Lenkstrang oben inklusive Mantelrohr	193
2.5.3	Crashelement	194
2.5.4	Gelenke	196
2.5.4.1	Einfachgelenke	197
2.5.4.2	Zentriertes Doppelgelenk	197
2.5.5	Längenausgleich der Lenkzwischenwelle	198
2.5.6	Dämpfungselemente	199
3	Erprobung der Lenksäule und Lenkzwischenwelle	200
3.1	Übertragungsfähigkeit	201
3.1.1	Statische Festigkeit	201
3.1.2	Dynamische Festigkeit	201
3.2	Steifigkeit	202
3.3	Verstelldauerlauf für Lenksäulen	203
3.4	Eigendynamisches Verhalten	203

3.4.1	Anforderung an die Lenksäule.....	204
3.4.2	Analytische Ermittlung/Messung des eigendynamischen Verhaltens.....	204
3.4.3	Einflussparameter	205
3.5	Crasheigenschaften.....	206
3.5.1	Lenkspindel	206
3.5.2	Lenksäule.....	208
3.6	Verschiebekräfte zur Einstellung der Lenksäule	209
3.7	Temperatur	210
3.8	Korrosion.....	210
4	Ausblick.....	211
K	Mechanische und hydraulische Lenkungen	213
1	Begriffsbestimmung von Zahnstangenlenkungen	213
2	Verwendbarkeit/Vor- und Nachteile	215
3	Kinematische Unterscheidungsmerkmale von Lenkgetrieben	215
3.1	Position des Lenkgetriebes relativ zur Vorderachse	216
3.2	Anbindung des Lenkgetriebes im Fahrzeug	216
3.3	Ausrichtungen des Lenkgetriebegehäuses	217
3.4	Anbindung der Spurstangen	217
3.5	Art des Übersetzungsverhältnisses	218
4	Aufbau und Hauptkomponenten eines mechanischen Zahnstangenlenkgetriebes.....	219
4.1	Lenkgetriebegehäuse	220
4.1.1	Einteiliges Lenkgetriebegehäuse	220
4.1.2	Zweiteiliges Lenkgetriebegehäuse als Verbundkonstruktion.....	221
4.2	Lenkritzeln	221
4.2.1	Lenkritzellagerung	221
4.2.2	Ausführung der Lenkritzelnverzahnung	222
4.3	Zahnstange und Zahnstangenführung.....	223
4.3.1	Zahnstangenführung	223
4.3.2	Druckstück.....	224
4.3.3	Zahnstangenlagerbuchse.....	226
5	Verzahnung und Lenkgetriebeübersetzung.....	227
5.1	Konstante Lenkgetriebeübersetzung.....	227
5.2	Variable Lenkgetriebeübersetzung	228
5.2.1	Entwicklungsgeschichte	229
5.3	Anwendungen.....	229
5.3.1	Lenksystem-orientierte Anwendung	229
5.3.2	Fahrerorientierte Anwendung	231
5.3.3	Sonderanwendungen.....	232
5.4	Technische Grenzen	235
5.4.1	Größenordnung der Übersetzungserhöhung	235
5.4.2	Kontaktlinien	236
5.4.3	Stabilität und Geräusch (NVH).....	236
5.5	Herstellungsverfahren.....	238
5.5.1	Taumelfießpressen.....	238
5.5.2	Halbwarm Schmieden.....	239
5.5.3	Rohrumformung	240
6	Anforderungen an ein mechanisches Zahnstangenlenkgetriebe.....	241
6.1	Funktionsanforderungen an Lenkgetriebe	241
6.1.1	Druckstückspiel	242

6.1.2	Lenkritzeldrehmoment.....	242
6.1.3	Zahnstangenverschiebekraft	243
6.1.4	Wirkungsgrad	244
6.1.5	Geräusch-(NVH)-Anforderungen.....	245
6.2	Festigkeitsanforderungen an Lenkgetriebe.....	245
6.2.1	Statische Festigkeit.....	245
6.2.2	Dynamische Festigkeit und Verschleißprüfung.....	245
6.3	Umweltanforderungen an Lenkgetriebe	246
6.3.1	Salzsprühnebelprüfung	246
6.3.2	Schmutzwasserprüfung.....	246
7	Designverifikation und Produktvalidierung eines Zahnstangenlenkgetriebes.....	247
7.1	Konzeptverifikation (CV).....	247
7.2	Designverifikation (DV).....	247
7.3	Produktvalidierung (PV)	247
7.4	Serienbegleitende Prüfung.....	248
8	Hydraulische Lenkungen	248
8.1	Zielsetzung	249
8.2	Notwendige Veränderungen am Fahrzeug gegenüber der manuellen Lenkung.....	249
8.3	Notwendige Veränderungen am Lenkgetriebe gegenüber der manuellen Lenkung ...	250
8.4	Besonderheiten für hydraulische Lenkgetriebe beim Einsatz im Fahrzeug	250
9	Aufbau und Komponenten hydraulischer Lenkgetriebe.....	251
9.1	Ausführungsformen.....	252
9.1.1	Endabgriff.....	252
9.1.2	Mittenabgriff.....	252
9.1.3	Paralleler Hilfszylinder.....	253
9.2	Zylinder.....	254
9.2.1	Zahnstange im Zylinderbereich	254
9.2.2	Kolben mit Kolbenring.....	255
9.2.3	Zahnstangendichtungen und Dichtsystem des Zylinders	257
9.2.4	Zylinderrohr mit Anschlüssen	260
9.3	Drehschieberventil mit Eingangswelle und Lenkritzel.....	261
9.3.1	Lenkritzel.....	262
9.3.2	Drehstab und Überlastsicherung.....	262
9.3.3	Steuerhülse mit Ventiltringen	262
9.3.4	Eingangswelle.....	263
9.3.5	Ausführungsformen	264
9.4	Weitere Komponenten eines hydraulischen Lenkgetriebes	265
9.4.1	Transferleitungen.....	265
9.4.2	Balgentlüftung	265
9.5	Typische Kennwerte hydraulischer Lenkgetriebe	266
10	Funktionsweise der Lenkungshydraulik.....	266
10.1	Lenkventil – Prinzip der Drosselung	266
10.2	Äußere Einflüsse auf die Ventilkennnung	271
10.3	Wirkung von Lenkbewegungen – Volumenstromaufteilung.....	272
10.4	Ventilgeräusche – Zischen.....	273
10.5	Innere Leckage	274
10.6	Modellbildung (Lageregelkreis)	275
10.7	Dämpfung – Instabilitäten	276
11	Hydraulische Zusatzsysteme.....	277
11.1	Mittenzentrierung.....	277
11.2	Geschwindigkeitsabhängigkeit.....	279

11.3	Dämpfungsventile.....	281
11.4	Lenkventile mit Dämpfungseigenschaften	283
11.5	Druckbegrenzung in der Zahnstangenendlage.....	284
12	Kugelumlauf Lenkgetriebe/Nfz-Lenkssysteme.....	285
12.1	Einsatzbereiche.....	285
12.2	Aufbau von Kugelumlauf Lenkgetrieben.....	286
12.3	Vergleich zwischen Kugelumlauf Lenkung und Zahnstangenlenkung	288
12.4	Technische Daten und Kennwerte.....	288
12.5	Zusatzsysteme	289
12.6	Zweikreis-Lenkung	289
13	Anforderungen an ein hydraulisches Lenkgetriebe.....	291
13.1	Funktionsanforderungen.....	291
13.2	Festigkeitsanforderungen	291
13.2.1	Statische Festigkeit – Berstdruckprüfung	291
13.2.2	Dynamische Festigkeit – Druckpulsation	291
13.3	Umweltanforderungen – Kaltstarttest.....	291
L	Spurstangen	293
1	Einleitung.....	293
2	Basisausführungen	293
2.1	Spurstangen für Kugelumlauf Lenkungen	293
2.2	Spurstangen für Zahnstangenlenkungen	294
3	Spurstangengelenke	295
3.1	Innengelenk (Axialgelenk)	295
3.1.1	Belüftungsfunktion des Innengelenks.....	297
3.2	Außengelenk (Winkelgelenk, Radialgelenk).....	297
4	Spureinstellung	298
5	Anforderungen und Auslegung	299
5.1	Auslegungsregeln von Spurstangen.....	299
5.2	Auslegung der Spurstange auf Bauteilfestigkeit.....	299
5.3	Auslegung der Gelenklagerung	301
5.4	Auslegung der Außengelenkabdichtung.....	302
6	Dämpfung/Entkopplung.....	304
7	Schnittstelle zum Radträger	304
8	Leichtbau	305
9	Ausblick.....	306
9.1	Überlastverhalten.....	306
9.2	Sensorgelenk	307
M	Hydraulische Energieversorgung	309
1	Servopumpen	309
1.1	Einführung.....	309
1.2	Flügelzellenpumpe	309
1.2.1	Flügelzellenpumpen mit Bypassventil zur Energieeinsparung	311
1.2.2	Verstellpumpe.....	312
1.3	Radialkolbenpumpe.....	315
1.4	Tandempumpe	316
2	Ölversorgung und Öle.....	316
2.1	Ölbehälter	316
2.1.1	Bauarten.....	317

2.1.2	Befüllung und Entlüftung	317
2.1.3	Filtration	317
2.1.4	Abscheidegrad	318
2.1.5	Systemreinheit	319
2.1.6	Auslegung unter Querbeschleunigung	320
2.2	Lenkungsschläuche und Leitungen	321
2.2.1	Hochdruckleitung inklusive Verschraubung (Schlauchtypen und Aufbau)	321
2.2.2	Verschraubungen von Hochdruckleitungen und Dehnschläuchen	322
2.2.3	Saug- und Rücklaufleitung	322
2.2.4	Akustik-Abstimmung/Geräuschmaßnahmen	323
2.3	Kühlung/Kühlwendel/Kühler	323
2.4	Systemgrenzen	324
2.5	Servoöle	325
2.5.1	Sonstige Spezifikationen	325
N	Elektrohydraulische Lenksysteme (EPHS)	327
1	Einleitung	327
1.1	Aufbau und Funktionsweise	327
1.2	Lenksystemklassifikation	329
1.3	Anwendungsbeispiele	330
2	Systembeschreibung	330
2.1	Systemübersicht	330
2.2	Systemauslegung	332
2.2.1	Quasi-stationäre Auslegung	332
2.2.2	Dynamische Auslegungskriterien	333
2.3	Energieverbrauch	334
2.3.1	Wirkungsgrad	334
2.3.2	Leistungsaufnahme und Energieverbrauch	335
3	Komponenten	337
3.1	Motorpumpen-Aggregat	337
3.1.1	Hauptanforderungen und Schnittstellen	337
3.1.2	Elektrisches Antriebsaggregat	338
3.1.3	Pumpe und Ventile	340
3.2	Hydraulisches Leitungssystem	342
3.2.1	Hauptanforderungen	342
3.2.2	Aufbau und Dämpfungsprinzipien	343
3.2.3	Bestimmung des Dämpfungsverhalten	343
3.2.4	Hydraulischer Widerstand	344
3.3	Weitere Komponenten	345
3.3.1	Sensoren	345
3.3.2	Fluide	345
3.3.3	Behälter und Halterungen	345
O	Elektromechanische Lenksysteme (EPS)	347
1	Einleitung	347
1.1	Analogiebetrachtung EPS zur HPS	349
2	Bauarten von EPS-Systemen	350
2.1	EPSc – Column	350
2.2	EPSp – Pinion	351
2.3	EPSdp – Dual Pinion	351

2.4	EPSapa – Axle Parallel.....	353
2.5	EPSrc – Rack Concentric	353
3	Baugruppen der EPS.....	354
3.1	Servogetriebe.....	354
3.1.1	Schneckengetriebe	355
3.1.2	Kugelgewindetrieb.....	356
3.1.3	Zahnriemengetriebe	357
3.2	Elektromotor.....	358
3.2.1	Übersicht/Vergleich/Arbeitsbereich	358
3.2.2	Gleichstrommotor mit mechanischem Kommutator	361
3.2.3	Asynchronmotor	362
3.2.4	Synchronmotor	363
3.2.5	Position-/Drehzahlsensor	365
3.3	Drehmomentsensor.....	368
3.3.1	Anforderungen/Klassifizierung	368
3.3.2	Sensoren mit Torsionsstab.....	369
3.3.3	Torsionssteife Sensoren	374
3.4	Steuergerät.....	376
3.4.1	Bauarten.....	377
3.4.2	Signalelektronik.....	379
3.4.3	Leistungselektronik	380
4	Systemauslegung.....	382
4.1	Allgemeine Systemanforderungen.....	382
4.2	Auslegungsparameter	384
4.3	Anforderungen an das Bordnetz	388
5	Systemsicherheit	389
5.1	Normatives Regelwerk	389
5.1.1	IEC 61508.....	389
5.1.2	ISO 26262.....	390
5.2	Sicherheit in EPS Anwendungen.....	390
5.2.1	Aufgabe des Sicherheitskonzepts	390
5.2.2	Risikoeinstufung von EPS-Systemen	391
5.2.3	Eigenschaften des sicheren Zustands.....	392
5.2.4	Abschaltpfade	393
5.2.5	Sicherheitsmaßnahmen für die Teilkomponenten des Systems	394
5.2.5.1	Überwachung externer Signale.....	394
5.2.5.2	Überwachung Sensorik.....	394
5.2.5.3	Überwachungskonzept des Rechnersystems.....	395
5.2.5.4	Überwachung Leistungselektronik/Aktor.....	396
5.2.5.5	Sicherheitsbezogenes ECU-Blockschaltbild.....	397
6	Lenkfunktionen und Regelung.....	397
6.1	Lenkfunktionen	398
6.1.1	Grundlenkfunktionen.....	399
6.1.1.1	Servounterstützung.....	399
6.1.1.2	Reibungskompensation.....	401
6.1.1.3	Trägheitskompensation.....	401
6.1.1.4	Dämpfung.....	402
6.1.2	Erweiterte Lenkfunktionen	402
6.1.2.1	Aktiver Rücklauf.....	402
6.1.2.2	Geradauslauf Korrektur	403
6.1.3	Funktionen auf Fahrzeugebene.....	403

6.1.3.1	Parklenkassistent	403
6.1.3.2	Fahrerwarnung/Lane Departure Warning	403
6.1.3.3	Spurführung/Lane-Keeping-System	404
6.1.3.4	Fahrdynamische Lenkmomentenempfehlung	404
6.2	Regelungskonzepte für das Lenkgefühl	404
6.2.1	Klassische Regelungskonzepte	404
6.2.2	Regelung des Fahrermoments	405
P	Überlagerungslenkung	409
1	Einleitung	409
2	Historie	409
3	Funktionsprinzip	410
4	Aufbau	411
4.1	Allgemeiner Systemaufbau	412
4.2	Aktuatorik und Aktuatorvarianten	412
4.2.1	Audi/ZFLS-Dynamiklenkung	412
4.2.2	BMW/ZFLS-Aktivlenkung	415
4.2.3	Lexus/JTEKT VGRS	416
4.3	Anpassungen am Lenksystem	417
4.3.1	Lenkübersetzung	419
4.3.2	Anpassungen zur Erfüllung von Akustikanforderungen	419
4.3.3	Anpassungen aufgrund der Lenkstabilisierung	419
4.3.4	Systemvernetzung	420
5	Funktionen der Überlagerungslenkung	420
5.1	Variable Lenkübersetzung	420
5.1.1	Niedrige Geschwindigkeiten	421
5.1.2	Mittlerer Geschwindigkeitsbereich	421
5.1.3	Stabilität bei hoher Geschwindigkeit	421
5.1.4	Kennlinienvarianten je nach Fahrerwunsch	423
6	Lenkungsstabilisierung	423
6.1	Lenkstabilisierung beim Übersteuern	424
6.2	Lenkstabilisierung beim Untersteuern	424
6.3	Lenkstabilisierung beim Bremsen auf Fahrbahnen mit unterschiedlichen Reibwerten (μ -split)	426
7	Systemsicherheit	427
8	Ausblick	429
Q	Allradlenkung	431
1	Einleitung, Historie, Grundlagen, Zielsetzung	431
2	Bauweisen	432
2.1	Mechanische Systeme	433
2.2	Hydraulische Systeme	435
2.3	Elektromechanische Systeme	436
2.4	Zentralaktor versus Einzelradaktuatoren	439
3	Auswirkungen einer Allradlenkung auf das Fahrverhalten	440
3.1	Kinematische Eigenschaften einer Allradlenkung	440
3.2	Einfluss einer Allradlenkung auf die stationären Fahreigenschaften	441
3.3	Einfluss einer Allradlenkung auf die instationären Fahreigenschaften	442
3.4	Kombination einer Hinterradlenkung mit einer Überlagerungslenkung an der Vorderachse	443

R	Steer-by-Wire	447
1	Einleitung	447
2	Komponenten	449
3	Lenkfunktion	453
4	Sicherheitskonzept	456
5	Ausblick	458
S	Überblick – Fahrerassistenz	459
	Ausgewählte Fahrerassistenzsystemfunktionen in Bezug auf die Lenkung im Überblick ...	459
1	Fahrstabilitätseingriffe	459
1.1	Funktion „Lenkempfehlung“	460
1.1.1	„Lenkempfehlung“ beim Gieren	460
1.1.2	„Lenkempfehlung“ in der μ -Split-Situation	460
1.2	Anforderungen an die Ergonomie	461
1.3	Anforderungen an die Sicherheit	462
2	Spurassistenz	462
2.1	Spurhalteassistenz (Lane Keeping Support – LKS)	463
2.1.1	Technische Realisierung	463
2.1.2	Funktionsweise	464
2.1.3	In der Praxis	464
2.2	Spurverlassenswarnung (Lane Departure Warning – LDW)	465
2.3	Ausgewählte Systeme auf dem Markt	466
2.4	Ausblick Spurhalteassistenz	467
3	Einparkassistenz – Park Assist	467
3.1	Anforderungen an das Einparksystem	468
3.2	Technische Realisierung	468
3.3	Ausgewählte Systeme auf dem Markt	470
3.4	Ausblick Einparkassistenz	470
T	Ausblick – Zukunft der Lenkung	473
1	Autonomes Fahren	473
2	Steer by Wire	474
3	Allradlenkung	474
4	Integrierte Fahrdynamikregelung	475
5	Baukasten bzw. Modularisierung von Lenksystemen	475
6	Neue Absatzmärkte	476
7	Technologiewandel in der Lenkungstechnik	476
8	Lenkradentwicklung	477
9	Lenksäulenentwicklung	478
	Sachwortverzeichnis	479

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Anti-Blockiersystem
AC	Alternating Current
AD	Analog-Digitalwandler
AFS	Active Front Steering
AHK	Aktive Hinterachskinematik
AMR	Anisotropen magnetoresistiv
APA	Achspareller Antrieb
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
ASM	Asynchronous Motor
ATF	Automatic Transmission Fluid
BCM	Body-Control-Modul
B-EPS	Achsparelles EPS
BLDC	Bürstenloser Gleichstrommotor (Brushless Direct Current)
BRIC	Brasilien, Russland, Indien, China
CAE	Computer Aided Engineering
CAN	Controller Area Network
C-EPS	Lenksäulen EPS
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
CGR	Constant Gear Ratio
CPU	Central Processor Unit
CR	Chloroprene Rubber
CR-EPS	Zahnstangen-konzentrische EPS
CS	Circular-Spline
CSM	Chlorsulfonyl-Polyäthylen-Kautschuk
CV	Konzeptverifikation
DBC	Direkt Bonded Copper
DBV	Druckbegrenzungsventil
DC	Direct Current
DCM	Direct Current Motor
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnmessstreifen
DP-EPS	Doppelritzel EPS
DV	Designverifikation

EC	Electronically Commutated Motor
ECE	Economic Commission for Europe
ECU	Electronic Control Unit
EHPS	Electro Hydraulic Power Steering
EMC	Electro Magnetic Compatibility
EMV	Elektro Magnetische Verträglichkeit
EPS	Elektromechanische Lenkung (Electric Power Steering)
EPS _{apa}	Achspannellele EPS
EPS _c	Column EPS
EPS _{dp}	Dual Pinion EPS
EPS _p	Pinion EPS
EPS _{rc}	Rack Concentric EPS
ESD	Electrostatic Discharge
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ESV	Experimental-Safety-Vehicle
EU	Europäische Union
EV	Electric Vehicle
EVLS	Elektrisch verstellbare Lenksäule
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
FB	Flex-Bearing
FCV	Fuel Cell Vehicle
FEA/FEM	Finite-Elemente-Analyse/Methode
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
FS	Flex-Spline
FS (FDR)	Fahrstabilisierung (Fahrodynamikregelung)
FS (VS)	Fahrstabilisierung (Vorsteuerung)
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GND	Ground (Bezugspotenzial)
HA	Hinterachse
HAD	Hinterachsdämpfer
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HICAS	High Capacity Actively Controlled Suspension
HNBR	Hydrierter Acrylnitrilbutadien-Kautschuk
HPS	Hydraulische Servolenkung (Hydraulic Power Steering)
IAS	Integral Aktivlenkung
IC	Elektrischer Schaltkreis
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
IMS	Isoliertes Metallsubstrat
ISO	International Standards Organization
KGT	Kugelgewindetrieb
KTL	Kathodische Tauchlackierung
LCV	Light Commercial Vehicle

LDM	Lehrdurchdrehmoment
LDS	Lenkraddehnschwingung
LDW	Lane Departure Prevention
LED	Light Emitting Diode
LIN	Local Interconnected Network
LKS	Lane Keeping Support
MFS	Multifunktionsschalter
MFS	Magnetfeldsensor
ML	Motorlager
MOST	Media Oriented Systems Transport
MPA	Motorpumpen-Aggregat
MR	Magneto-resistiv
MSG	Manuelle Lenkung
MVLS	Manuell verstellbare Lenksäule
NBR	Nitrile Butadiene Rubber
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
Nfz	Nutzfahrzeug
NHTSA	National Highway Safety Traffic Administration
Nkw	Nutzkraftwagen
NVH	Noise Vibration Harshness
OEM	Original Equipment Manufacturer
OOP	Out Of Position
OSEK/VDX	Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik in Kraftfahrzeugen/Vehicle Distributed eXecutive
PA	Polyamid
PCB	Leiterplatte
PDC	Park Distance Control
PEEK	Polyetherketone
P-EPS	Pinion EPS
Pkw	Personenkraftwagen
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
POM	Polyoxymethylen
ppm	parts per million
PTFE	Polytetrafluoroethylene
PUR	Polyurethan
PV	Produktvalidierung
PVD	Physical Vapour Deposition
PWM	Pulsweitenmodulation
QM	Qualitätsmanagement
RAM	Random Access Memory
RC-EPS	Achsversetzte EPS
RdW	Rest der Welt
ROM	Read Only Memory

SAE	Society of Automotive Engineers
SAW	Surface Acoustic Wave
SCU	Steering Control Unit
SH	Sensor Host
SIL	Safety Integrity Level
SISO	Single Input Single Output
SMD	Surface Mounted Device
SR	Switched Reluctance
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SUV	Sport Utility Vehicle
TFC	Thick Film Copper
THC	Through Hole Component
UE	Spurhebel
UV	Ultra Violette
VA	Vorderachse
VAD	Vorderachsdämpfer
V_{CC}	Common-Collector Voltage
VDA	Verband der Automobilindustrie
VGR, VGS	Variable Gear Ratio
WG	Wave Generator
WKR	Wendekreisreduzierung
ZB, ZSB	Zusammenbau
ZFLS	ZF Lenksysteme GmbH

Formelverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bezeichnung</i>
α	rad	Schräglaufwinkel des Reifens
α	rad	Beugungswinkel Gelenk Lenkzwischenwelle
β	rad	Schwimmwinkel
β	rad	Winkel zwischen den Gelenkebenen
β_T/β_U		Übertragungswinkel
β_x		Abscheidegrad
β_z	rad	Schrägungswinkel
γ	rad	Scherwinkel
γ	rad	Versatzwinkel Lenkzwischenwelle
γ	rad	Installationswinkel Ritzelachse
δ^*	rad	Spurhebeldrehwinkel
$\delta, \dot{\delta}$	rad, rad/s	Radlenkwinkel, –geschwindigkeit
δ_A	rad	Ackermannwinkel
δ_D	rad	Dynamischer Bezuglenkwinkel
δ_G	rad	Drehwinkel des Lenkstockhebels

δ_h	rad	Hinterradlenkwinkel
δ_H	rad	Lenkradwinkel
δ_H^*	rad	Ritzeldrehwinkel
δ_{LS}	rad	Lenksäulenwinkel
δ_M	rad	Additionswinkel
$\delta_{o,max}$	rad	Größter Einschlagwinkel des kurvenäußeren Vorderrades
δ_v	rad	Vorderradlenkwinkel
$\Delta\delta$	rad	Gewollter Lenkdifferenzwinkel
$\Delta\delta_A$	rad	Spurdifferenzwinkel, Lenkdifferenzwinkel nach Ackermann
$\Delta\delta_F$	rad	Lenkabweichung
$\Delta\delta_H$	rad	Lenkwinkelbereich am Lenkrad
$\Delta\delta_{H,e}$	rad	Elastische Nachgiebigkeit am Lenkrad
$\Delta\delta_{H,Re}$	rad	Lenkrad verbleibende Restwinkel
ε	rad	Radsturzwinkel
$\varepsilon_{v,\varphi,F}$		Wanklenkfaktor
ε_α		Profilüberdeckung Verzahnung
ε_β		Sprungüberdeckung Verzahnung
ε_γ		Gesamtüberdeckung Verzahnung
$\Delta\varepsilon_{v,\varphi,F}$	rad	Sturzanteil infolge des Wankens
ζ	–	Dämpfungsmaß
η		Frequenzverhältnis
η		Wirkungsgrad
κ_{ist}	1/m	Krümmung
λ	rad	Ausrichtung des Spurhebels
ρ	m	Kurvenradius, Krümmungsradius der Bahnkurve
σ	rad	Spreizung
τ	rad	Nachlaufwinkel
φ	rad	Drehwinkel
χ	1/m	Wankwinkel
$\psi, \dot{\psi}$	rad, rad/s	Gierwinkel, Gierwinkelgeschwindigkeit (Gierrate)
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit
ω_E	rad/s	Eckfrequenz
ω_n	1/s	Eigenfrequenz des Lenkstrangs

<i>Symbol</i>	<i>Beschreibung</i>
a	Luft
dyn	dynamisch
o	(kurven-) außen
i	(kurven-) innen
F	vorne
R	hinten

A

Einleitung und Geschichte

Der große Vorteil der Kraftfahrzeuge gegenüber der Eisenbahn liegt darin, dass der Fahrer die Spur des Fahrzeugs bestimmt oder mit anderen Worten, Kraftfahrzeuge sind lenkbar und an keine externe Spurvorgabe gebunden. Die Baugruppe Lenkung ist dem Fahrwerk zugeordnet. Das Fahrwerk überträgt alle Kräfte zwischen dem Fahrzeugaufbau und der Straße, abgesehen von den aerodynamischen Kräften. Typischerweise teilt man die Aufgaben des Fahrwerks in Vertikal-, Längs- und Querdynamik ein. Die Querdynamik wird im Wesentlichen von der Lenkung gemeinsam mit der Radaufhängung und dem Reifen geprägt.

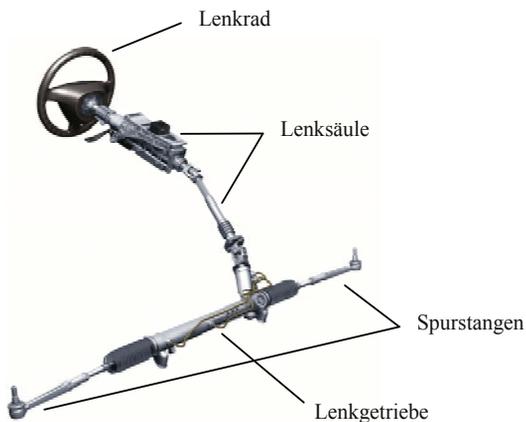


Bild A-1
Bauteile einer Lenkung (Porsche 997)

Die Bauteile der Lenkung sind das Lenkrad, die Lenksäule, das Lenkgetriebe und die Spurstangen (Lenkgestänge) **Bild A-1**. Über das Lenkrad gibt der Fahrer seine Lenkbefehle, diese werden über die Lenksäule an das Lenkgetriebe weitergeleitet. Das Lenkgetriebe wird heutzutage meistens als Ritzel-Zahnstangengetriebe ausgeführt. Dieses übersetzt die Drehbewegung in eine Linearbewegung. Über die Spurstange mit den Kugelgelenken wird die Linearbewegung an den Radträger übertragen. Da die Anlenkung des Radträgers nicht direkt an der Lenkachse erfolgt, wird schließlich eine Drehbewegung des Rades um die Lenkachse bewirkt. Die sich durch den Schräglauf des Rades aufbauenden Seitenkräfte führen zu dem angestrebten Giermoment des Fahrzeugs und somit zur Kurvenfahrt. Um die aufzubringenden Kräfte für den Fahrer zu reduzieren wird meist am Lenkgetriebe die Kraft des Fahrers unterstützt. Lenkungen mit solch einer Unterstützung werden als Hilfskraft- oder Servolenkungen bezeichnet. Die Lenkung soll ein vorhersehbares und komfortables Fahren ermöglichen ohne die nützlichen Rückmeldungen an den Fahrer zu unterbinden. Störende Einflüsse von der Fahrbahn und von den Rädern sollen jedoch vom Fahrer ferngehalten werden.

Dieses Lenkungshandbuch ist für Fachleute aus dem Fahrwerksbereich sowie für Lehrende und Studierende an Hochschulen konzipiert. Dieses Buch deckt die wissenschaftlichen Grundlagen der Lenkungen im Kraftfahrzeug ab. Weiterhin werden der Stand der Technik dokumentiert und aktuelle Entwicklungstrends aufgezeigt. Hierzu wird auf die Expertise von vielen namhaften Experten aus der Industrie und Hochschulen zurückgegriffen.

In den ersten Kapiteln werden die Historie, die Grundlagen, die Bauarten und die Anforderungen an moderne Lenksystemen erläutert. Es wird insbesondere auf die Lenkinematik, die fahrdynamischen