

Peter Pfeffer | Manfred Harrer (Hrsg.)

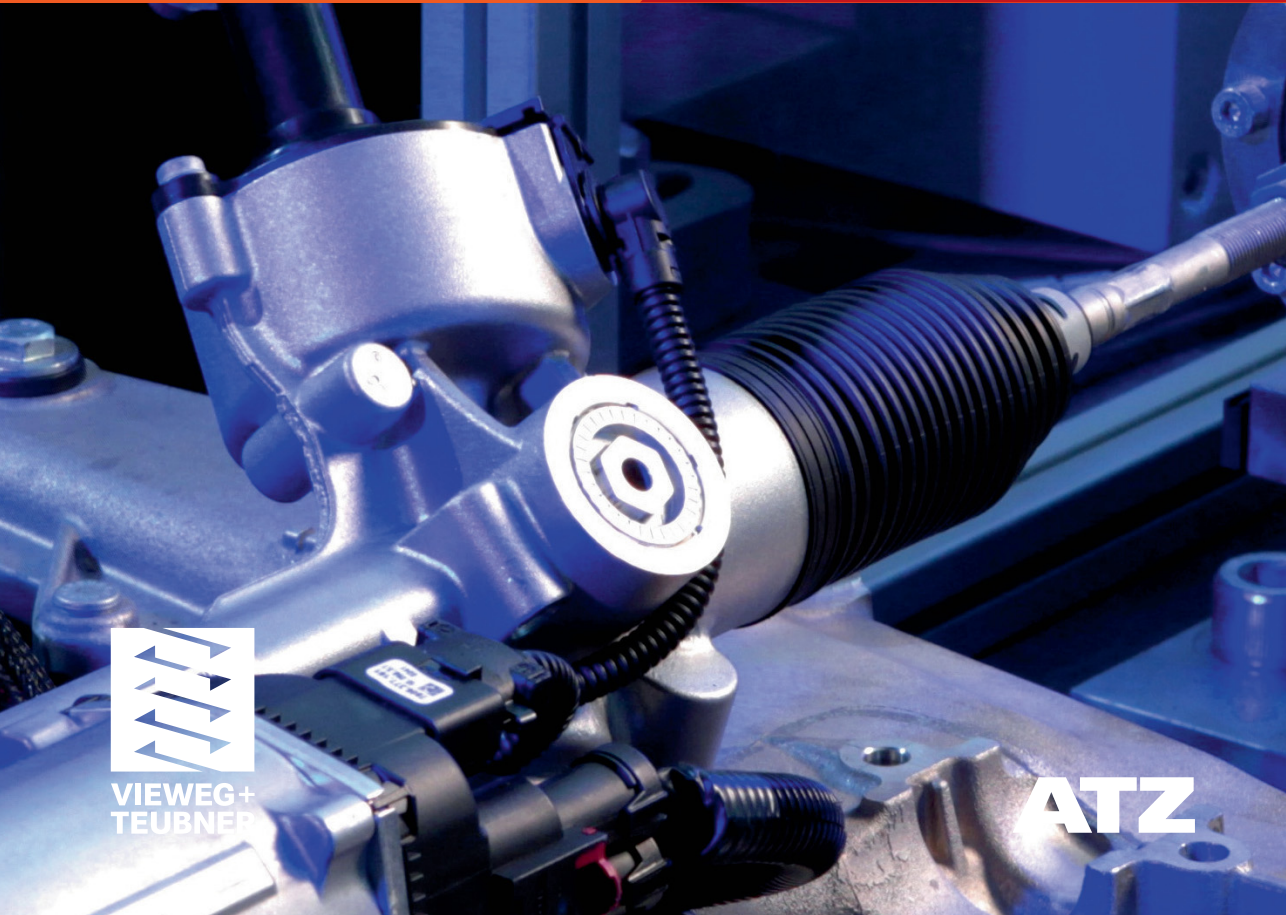
Lenkungshandbuch

Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen

PRAXIS



ATZ



Peter Pfeffer | Manfred Harrer (Hrsg.)

Lenkungsbandbuch

Handbuch Verbrennungsmotor

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

herausgegeben von H.-H. Braess und U. Seiffert

Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion

herausgegeben von H. Burg und A. Moser

Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik

von H. Eichlseder und M. Klell

Fahrwerkhandbuch

herausgegeben von B. Heißing, M. Ersoy und S. Gies

Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe

herausgegeben von R. Isermann

Bosch Autoelektrik und Autoelektronik

herausgegeben von K. Reif

Rennwagentechnik

von M. Trzesniowski

Handbuch Kraftfahrzeugelektronik

herausgegeben von H. Wallentowitz und K. Reif

Handbuch Fahrerassistenzsysteme

herausgegeben von H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf

Peter Pfeffer | Manfred Harrer (Hrsg.)

Lenkungshandbuch

Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen

Mit 455 Abbildungen und 35 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



VIEWEG+
TEUBNER

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

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

1. Auflage 2011

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Ewald Schmitt | Elisabeth Lange

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Satz: FROMM MediaDesign, Selters/Ts.

Technische Redaktion: Gabriele McLemore

Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik GmbH, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0751-9



Vorwort der Herausgeber

In den letzten Jahren haben die Lenksystemtechnologien eine rasante Entwicklung vollzogen. Verursacht durch verschärfte gesetzliche Anforderungen in den Bereichen Umwelt und Sicherheit, durch den gestiegenen Komfortanspruch des Kunden und nicht zuletzt durch den anhaltenden Kostendruck mussten und müssen neue Wege bei bestehenden Komponenten wie Lenkrad, Lenksäule und Lenkgetriebe beschritten werden. Am deutlichsten ist der Wandel anhand der fortschreitenden Substitution von konventionellen hydraulischen durch mechatronische Lenksysteme erkennbar. Mit diesem Technologiewechsel gehen eine Vielzahl von neuen Lenkfunktionalitäten einher. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Lenksystementwicklung als solche einen immer stärker werdenden Stellenwert in der modernen Fahrwerksentwicklung einnimmt.

Aufgrund eines fehlenden Standardwerks zum Thema Lenksysteme/Lenkverhalten, das dem heutigen Stand der Technik gerecht wird, haben wir uns entschlossen mit dem Vieweg+Teubner Verlag, die renommierte ATZ/MTZ-Fachbuchreihe um ein aktuelles Handbuch zum Thema Lenksysteme/Lenkverhalten zu ergänzen. Die unterschiedlichen Interessen und Anforderungen der Automobilhersteller, Zulieferer und Hochschulen an ein solches Standardwerk haben wir durch die Einbindung ausgewiesener Experten aus diesen Bereichen berücksichtigt.

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 Überlagerunglenkung 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.

Das fundierte Fachwissen von nahezu 40 Experten der Industrie und den Hochschulen stand für die Erstellung des Lenkungshandbuches zur Verfügung. Bei allen Autoren möchten wir uns recht herzlich für ihre Expertise und Ausdauer bedanken. Ebenso bedanken wir uns bei Vieweg+Teubner Verlag; insbesondere bei Frau Gabriele McLemore, Frau Elisabeth Lange und Herrn Ewald Schmitt. Nur durch das große Engagement aller Beteiligten wurde dieses Fachbuch erst möglich.

Die Leser dieses Handbuches bitten wir, uns Anregungen, Verbesserungs- bzw. Ergänzungsvorschläge unter der E-Mail-Adresse: mail@Lenkungshandbuch.de mitzuteilen. Wir werden Ihre Vorschläge bei der Weiterentwicklung des Handbuches berücksichtigen.

Stuttgart/Feldafing im Mai 2011

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 Focus 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 eine 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 als Versuchingenieur bei der Audi AG in Ingolstadt und war dort in der Fahrwerksentwicklung im Bereich Aggregatlagerentwicklung tätig.

Von 1999 bis 2007 war Manfred Harrer bei der BMW Group in München beschäftigt. Als Versuchingenieur, Projektleiter und Leiter Vorentwicklung Lenksysteme war er mit verschiedenen Entwicklungsaufgaben betraut. 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 Mai 2007 leitet Manfred Harrer das Fachgebiet Entwicklung Lenksysteme und Räder bei der Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG. Sein Aufgabengebiet umfasst die Serienentwicklung von Lenkrädern, Lenksäulen, Lenkgetrieben und Rädern.

Seit mehreren Jahren engagiert sich Manfred Harrer darüber hinaus in zahlreichen Kooperationsprojekten zwischen Industrie, Wissenschaft und Hochschulen. Als Autor und Co-Autor hat Manfred Harrer außerdem etliche Publikationen zu unterschiedlichen Fahrwerksthemen veröffentlicht und trägt durch seine Beiträge und das Mitwirken als Beirat zum Gelingen vieler Tagungen und Kongressen bei.



Prof. Dr. Dipl.-Ing. **Peter Pfeffer** studierte von 1989 bis 1995 an der TU Wien und an der RWTH Aachen Maschinenbau mit dem Studiengang Verkehrstechnik und Verkehrsmittel. 1995 trat er in die Entwicklung der Audi AG ein, er arbeitete zuerst im Fahrwerksbereich und wechselte 2000 in den Bereich 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. Er vertrat das Lehrgebiet Mechanik und leitete den Studiengang Mechanical Engineering with German. 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, Messung und Modellierung von Elastomer- und Hydrolagern und Lenksysteme. Er leitet das Kompetenz Zentrum Fahrzeugmechanik – Fahrdynamik und ist seit 2010 Prodekan der Fakultät Maschinenbau, Fahrzeugtechnik und Flugzeugtechnik. Als wissenschaftlicher Leiter der chassis.tech_{plus} trägt er zum Wissenstransfer im Fahrwerksbereich bei.





Autorenverzeichnis

Adamczyk, Dirk	ZF Lemförder GmbH
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
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 Lemförder GmbH
Lienkamp, Markus, Prof. Dr.-Ing.	TU-München
Lunkeit, Daniel	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Maehlmann, Dirk	ZF Lemförder GmbH
Pfeffer, Peter, Prof. Dr.	Hochschule München

Pruckner, Alfred, Dr.-Ing.	BMW Group
Reuter, Mirko	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, ehemals 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

Inhaltsverzeichnis

Vorwort der Herausgeber	V
Gastvorwort	VI
Die Herausgeber	VII
Autorenverzeichnis	IX
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	XXIII
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	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	24
3.2 Reifenseitenkraft, Reifennachlauf und -rückstellmoment	25
3.2.1 Bereich kleiner Querschleunigungen	25
3.2.2 Bereich höherer Querschleunigungen	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 – ein Überblick	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 der Querdynamik	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	94
2.3	Stationäre Gierverstärkung und Lenkempfindlichkeit	95
2.4	Lenkradmoment-Querbeschleunigungsgradient	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	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 Lenkungsklappen	108
2.2	Lenkungsrattern	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	117
4.3	Berechnungsmodelle und -lastfälle	118
4.4	Parameterstudien	119
4.5	Lenkradtilger	121
4.6	Fazit	123
G	Lenkgefühl, Interaktion Fahrer – Fahrzeug	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	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
H	Auslegung von Lenkungen	143
1	Grundauslegung eines Lenkgetriebes	143
1.1	Zahnstangenkraft	143
1.2	Lenkradmoment	144
1.3	Lenkdynamik	144
1.4	Lenkleistung	146
1.5	Lenkungsreibung	146
1.5.1	Negative Aspekte von Reibung im Lenkgetriebe	147
1.5.2	Positive Aspekte von Reibung im Lenkgetriebe	147
2	Übertragungsverhalten von Lenksystemen	149
2.1	Führungsverhalten	149
2.2	Rückmeldeverhalten	150
2.2.1	Rückmeldung bei hydraulisch unterstützten Servolenkungen	151
2.2.2	Rückmeldungsrelevante nichtlineare Erweiterungen bei hydraulischen Servolenkungen	154
2.2.3	Rückmeldung bei elektromechanisch unterstützten Servolenkungen	156

I	Lenkrad	161
1	Einführung	161
2	Baugruppen	161
2.1	Skelett	162
2.2	Lenkradkranz und Lenkradkorpus	165
2.3	Hupe	165
2.4	Airbag und Crash	166
2.4.1	Airbagkappe	167
2.4.2	Luftsack	167
2.4.3	Gasgenerator	168
2.5	Multifunktion	169
2.6	Schaum/Leder/Dekore	172
3	Anforderungen an die Komponenten und ZSB	173
4	Erprobung und Absicherung	173
4.1	Airbag	174
4.1.1	Allgemeine- und Craschanforderungen	174
4.1.2	Umweltsimulation	174
4.2	Lenkrad	176
4.2.1	Betriebsfestigkeit	176
4.2.2	ECE-R12	178
4.2.3	Umweltsimulation/Lacktest/Galvaniktest	178
4.3	Bedienelemente/EE	179
5	Modularisierung/Entwicklungstrends/Ausblick	180
J	Lenksäule und Lenkzwischenwelle	181
1	Einführung	181
2	Baugruppen	182
2.1	Lenkstrang Oben	183
2.2	Manuell verstellbare Lenksäule MVLS	184
2.3	Elektrisch verstellbare Lenksäule EVLS	184
2.4	Lenkzwischenwellen	185
2.4.1	Ungleichförmigkeit und Center Point	186
2.5	Komponenten der Baugruppen	188
2.5.1	Verstelleinheiten	188
2.5.1.1	Manuelle Verriegelung	188
2.5.1.2	Elektrische Antriebseinheit	189
2.5.2	Lenkstrang oben inklusive Mantelrohr	191
2.5.3	Crashelement	192
2.5.4	Gelenke	194
2.5.4.1	Einfachgelenke	195
2.5.4.2	Zentriertes Doppelgelenk	195
2.5.5	Längenausgleich der Lenkzwischenwelle	196
2.5.6	Dämpfungselemente	197
3	Erprobung der Lenksäule und Lenkzwischenwelle	198
3.1	Übertragungsfähigkeit	199
3.1.1	Statische Festigkeit	199
3.1.2	Dynamische Festigkeit	199
3.2	Steifigkeit	200
3.3	Verstelldauerlauf für Lenksäulen	201

3.4	Eigendynamisches Verhalten	201
3.4.1	Anforderung an die Lenksäule	202
3.4.2	Analytische Ermittlung/Messung des eigendynamischen Verhaltens	202
3.4.3	Einflussparameter	203
3.5	Crasheigenschaften	204
3.5.1	Lenkspindel	204
3.5.2	Lenksäule	206
3.6	Verschiebekräfte zur Einstellung der Lenksäule	207
3.7	Temperatur	208
3.8	Korrosion	208
4	Ausblick	209
K	Mechanische und hydraulische Lenkungen	211
1	Begriffsbestimmung von Zahnstangenlenkungen	211
2	Verwendbarkeit/Vor- und Nachteile	213
3	Kinematische Unterscheidungsmerkmale von Lenkgetrieben	213
3.1	Position des Lenkgetriebes relativ zur Vorderachse	214
3.2	Anbindung des Lenkgetriebes im Fahrzeug	214
3.3	Ausrichtungen des Lenkgetriebegehäuses	215
3.4	Anbindung der Spurstangen	215
3.5	Art des Übersetzungsverhältnisses	216
4	Aufbau und Hauptkomponenten eines mechanischen Zahnstangenlenkgetriebes	217
4.1	Lenkgetriebegehäuse	218
4.1.1	Einteiliges Lenkgetriebegehäuse	218
4.1.2	Zweiteiliges Lenkgetriebegehäuse als Verbundkonstruktion	219
4.2	Lenkritzell	219
4.2.1	Lenkritzellagerung	219
4.2.2	Ausführung der Lenkritzellverzahnung	220
4.3	Zahnstange und Zahnstangenführung	221
4.3.1	Zahnstangenführung	221
4.3.2	Druckstück	222
4.3.3	Zahnstangenlagerbuchse	224
5	Verzahnung und Lenkgetriebeübersetzung	225
5.1	Konstante Lenkgetriebeübersetzung	225
5.2	Variable Lenkgetriebeübersetzung	226
5.2.1	Entwicklungsgeschichte	227
5.3	Anwendungen	227
5.3.1	Lenksystem-orientierte Anwendung	227
5.3.2	Fahrerorientierte Anwendung	229
5.3.3	Sonderanwendungen	230
5.4	Technische Grenzen	233
5.4.1	Größenordnung der Übersetzungserhöhung	233
5.4.2	Kontaktlinien	234
5.4.3	Stabilität und Geräusch (NVH)	234
5.5	Herstellungsverfahren	236
5.5.1	Taumelfließpressen	236
5.5.2	Halbwarm Schmieden	237
5.5.3	Rohrumformung	238

6	Anforderungen an ein mechanisches Zahnstangenlenkgetriebe	239
6.1	Funktionsanforderungen an Lenkgetriebe	239
6.1.1	Druckstückspiel	240
6.1.2	Lenkritzeldrehmoment	240
6.1.3	Zahnstangenverschiebekraft	241
6.1.4	Wirkungsgrad	242
6.1.5	Geräusch-(NVH)-Anforderungen	243
6.2	Festigkeitsanforderungen an Lenkgetriebe	243
6.2.1	Statische Festigkeit	243
6.2.2	Dynamische Festigkeit und Verschleißprüfung	243
6.3	Umweltanforderungen an Lenkgetriebe	244
6.3.1	Salzsprühnebelprüfung	244
6.3.2	Schmutzwasserprüfung	244
7	Designverifikation und Produktvalidierung eines Zahnstangenlenkgetriebes	245
7.1	Konzeptverifikation (CV)	245
7.2	Designverifikation (DV)	245
7.3	Produktvalidierung (PV)	245
7.4	Serienbegleitende Prüfung	246
8	Hydraulische Lenkungen	246
8.1	Zielsetzung	247
8.2	Notwendige Veränderungen am Fahrzeug gegenüber der manuellen Lenkung	247
8.3	Notwendige Veränderungen am Lenkgetriebe gegenüber der manuellen Lenkung ...	248
8.4	Besonderheiten für hydraulische Lenkgetriebe beim Einsatz im Fahrzeug	248
9	Aufbau und Komponenten hydraulischer Lenkgetriebe	249
9.1	Ausführungsformen	250
9.1.1	Endabgriff	250
9.1.2	Mittenabgriff	250
9.1.3	Paralleler Hilfszylinder	251
9.2	Zylinder	252
9.2.1	Zahnstange im Zylinderbereich	252
9.2.2	Kolben mit Kolbenring	253
9.2.3	Zahnstangendichtungen und Dichtsystem des Zylinders	255
9.2.4	Zylinderrohr mit Anschlüssen	258
9.3	Drehschieberventil mit Eingangswelle und Lenkritzel	259
9.3.1	Lenkritzel	260
9.3.2	Drehstab und Überlastsicherung	260
9.3.3	Steuerhülse mit Ventiltringen	260
9.3.4	Eingangswelle	261
9.3.5	Ausführungsformen	262
9.4	Weitere Komponenten eines hydraulischen Lenkgetriebes	263
9.4.1	Transferleitungen	263
9.4.2	Balgentlüftung	263
9.5	Typische Kennwerte hydraulischer Lenkgetriebe	264
10	Funktionsweise der Lenkungshydraulik	264
10.1	Lenkventil – Prinzip der Drosselung	264
10.2	Äußere Einflüsse auf die Ventilkennung	269
10.3	Wirkung von Lenkbewegungen – Volumenstromaufteilung	270
10.4	Ventilgeräusche – Zischen	271
10.5	Innere Leckage	272
10.6	Modellbildung (Lageregelkreis)	273
10.7	Dämpfung – Instabilitäten	274

11	Hydraulische Zusatzsysteme	275
11.1	Mittenzentrierung	275
11.2	Geschwindigkeitsabhängigkeit	277
11.3	Dämpfungsventile	279
11.4	Lenkventile mit Dämpfungseigenschaften	281
11.5	Druckbegrenzung in der Zahnstangenendlage	282
12	Kugelumlaufnlenkgetriebe/Nfz-Lenkssysteme	283
12.1	Einsatzbereiche	283
12.2	Aufbau von Kugelumlaufnlenkgetriebe	284
12.3	Vergleich zwischen Kugelumlaufnlenkung und Zahnstangenlenkung	286
12.4	Technische Daten und Kennwerte	286
12.5	Zusatzsysteme	287
12.6	Zweikreis-Lenkung	287
13	Anforderungen an ein hydraulisches Lenkgetriebe	289
13.1	Funktionsanforderungen	289
13.2	Festigkeitsanforderungen	289
13.2.1	Statische Festigkeit – Berstdruckprüfung	289
13.2.2	Dynamische Festigkeit – Druckpulsation	289
13.3	Umweltanforderungen – Kaltstarttest	289
L	Spurstangen	291
1	Einleitung	291
2	Basisausführungen	291
2.1	Spurstangen für Kugelumlaufnlenkungen	291
2.2	Spurstangen für Zahnstangenlenkungen	292
3	Spurstangengelenke	293
3.1	Innengelenk (Axialgelenk)	293
3.1.1	Belüftungsfunktion des Innengelenks	295
3.2	Außengelenk (Winkelgelenk, Radialgelenk)	295
4	Spureinstellung	296
5	Anforderungen und Auslegung	297
5.1	Auslegungsregeln von Spurstangen	297
5.2	Auslegung der Spurstange auf Bauteilfestigkeit	297
5.3	Auslegung der Gelenklagerung	299
5.4	Auslegung der Außengelenkabdichtung	300
6	Dämpfung/Entkopplung	302
7	Schnittstelle zum Radträger	302
8	Leichtbau	303
9	Ausblick	304
9.1	Überlastverhalten	304
9.2	Sensorgelenk	305
M	Hydraulische Energieversorgung	307
1	Servopumpen	307
1.1	Einführung	307
1.2	Flügelzellenpumpe	307
1.2.1	Flügelzellenpumpen mit Bypassventil zur Energieeinsparung	309
1.2.2	Verstellpumpe	310
1.3	Radialkolbenpumpe	313
1.4	Tandempumpe	314

2	Ölversorgung und Öle	314
2.1	Ölbehälter	314
2.1.1	Bauarten	315
2.1.2	Befüllung und Entlüftung	315
2.1.3	Filtration	315
2.1.4	Abscheidegrad	316
2.1.5	Systemreinheit	317
2.1.6	Auslegung unter Querschleunigung	318
2.2	Lenkungsschläuche und Leitungen	319
2.2.1	Hochdruckleitung inklusive Verschraubung (Schlauchtypen und Aufbau)	319
2.2.2	Verschraubungen von Hochdruckleitungen und Dehnschläuchen	320
2.2.3	Saug- und Rücklaufleitung	320
2.2.4	Akustik-Abstimmung/Geräuschmaßnahmen	321
2.3	Kühlung/Kühlwendel/Kühler	321
2.4	Systemgrenzen	322
2.5	Servoöle	323
2.5.1	Sonstige Spezifikationen	323
N	Elektrohydraulische Lenksysteme (EPHS)	325
1	Einleitung	325
1.1	Aufbau und Funktionsweise	325
1.2	Lenksystemklassifikation	327
1.3	Anwendungsbeispiele	328
2	Systembeschreibung	328
2.1	Systemübersicht	328
2.2	Systemauslegung	330
2.2.1	Quasi-stationäre Auslegung	330
2.2.2	Dynamische Auslegungskriterien	331
2.3	Energieverbrauch	332
2.3.1	Wirkungsgrad	332
2.3.2	Leistungsaufnahme und Energieverbrauch	333
3	Komponenten	335
3.1	Motorpumpen-Aggregat	335
3.1.1	Hauptanforderungen und Schnittstellen	335
3.1.2	Elektrisches Antriebsaggregat	336
3.1.3	Pumpe und Ventile	338
3.2	Hydraulisches Leitungssystem	340
3.2.1	Hauptanforderungen	340
3.2.2	Aufbau und Dämpfungsprinzipien	341
3.2.3	Bestimmung des Dämpfungsverhalten	341
3.2.4	Hydraulischer Widerstand	342
3.3	Weitere Komponenten	343
3.3.1	Sensoren	343
3.3.2	Fluide	343
3.3.3	Behälter und Halterungen	343

O	Elektromechanische Lenksysteme (EPS)	345
1	Einleitung	345
1.1	Analogiebetrachtung EPS zur HPS	347
2	Bauarten von EPS-Systemen	348
2.1	EPS _c – Column	348
2.2	EPS _p – Pinion	349
2.3	EPS _d – Dual Pinion	349
2.4	EPS _a – Axle Parallel	351
2.5	EPS _r – Rack Concentric	351
3	Baugruppen der EPS	352
3.1	Servogetriebe	352
3.1.1	Schneckengetriebe	353
3.1.2	Kugelgewindetrieb	354
3.1.3	Zahnriemengetriebe	355
3.2	Elektromotor	356
3.2.1	Übersicht/Vergleich/Arbeitsbereich	356
3.2.2	Gleichstrommotor mit mechanischem Kommutator	359
3.2.3	Asynchronmotor	360
3.2.4	Synchronmotor	361
3.2.5	Position-/Drehzahlsensorik	363
3.3	Drehmomentsensor	366
3.3.1	Anforderungen/Klassifizierung	366
3.3.2	Sensoren mit Torsionsstab	367
3.3.3	Torsionssteife Sensoren	372
3.4	Steuergerät	374
3.4.1	Bauarten	375
3.4.2	Signalelektronik	377
3.4.3	Leistungselektronik	378
4	Systemauslegung	380
4.1	Allgemeine Systemanforderungen	380
4.2	Auslegungsparameter	382
4.3	Anforderungen an das Bordnetz	386
5	Systemsicherheit	387
5.1	Normatives Regelwerk	387
5.1.1	IEC 61508	387
5.1.2	ISO 26262	388
5.2	Sicherheit in EPS Anwendungen	388
5.2.1	Aufgabe des Sicherheitskonzepts	388
5.2.2	Risikoeinstufung von EPS-Systemen	389
5.2.3	Eigenschaften des sicheren Zustands	390
5.2.4	Abschaltpfade	391
5.2.5	Sicherheitsmaßnahmen für die Teilkomponenten des Systems	392
5.2.5.1	Überwachung externer Signale	392
5.2.5.2	Überwachung Sensorik	392
5.2.5.3	Überwachungskonzept des Rechnersystems	393
5.2.5.4	Überwachung Leistungselektronik/Aktor	394
5.2.5.5	Sicherheitsbezogenes ECU-Blockschaltbild	395
6	Lenkfunktionen und Regelung	395
6.1	Lenkfunktionen	396
6.1.1	Grundlenkfunktionen	397
6.1.1.1	Servounterstützung	397
6.1.1.2	Reibungskompensation	399

6.1.1.3	Trägheitskompensation	399
6.1.1.4	Dämpfung	400
6.1.2	Erweiterte Lenkfunktionen	400
6.1.2.1	Aktiver Rücklauf	400
6.1.2.2	Geradauslauf Korrektur	401
6.1.3	Funktionen auf Fahrzeugebene	401
6.1.3.1	Parklenkassistent	401
6.1.3.2	Fahrerwarnung/Lane Departure Warning	401
6.1.3.3	Spurführung/Lane-Keeping-System	402
6.1.3.4	Fahrdynamische Lenkmomentenempfehlung	402
6.2	Regelungskonzepte für das Lenkgefühl	402
6.2.1	Klassische Regelungskonzepte	402
6.2.2	Regelung des Fahrermoments	403
P	Überlagerungslenkung	407
1	Einleitung	407
2	Historie	407
3	Funktionsprinzip	408
4	Aufbau	409
4.1	Allgemeiner Systemaufbau	410
4.2	Aktuatorik und Aktuatorvarianten	410
4.2.1	Audi/ZFLS-Dynamiklenkung	410
4.2.2	BMW/ZFLS-Aktivlenkung	413
4.2.3	Lexus/JTEKT VGRS	414
4.3	Anpassungen am Lenksystem	415
4.3.1	Lenkübersetzung	417
4.3.2	Anpassungen zur Erfüllung von Akustikanforderungen	417
4.3.3	Anpassungen aufgrund der Lenkstabilisierung	417
4.3.4	Systemvernetzung	418
5	Funktionen der Überlagerungslenkung	418
5.1	Variable Lenkübersetzung	418
5.1.1	Niedrigen Geschwindigkeiten	419
5.1.2	Mittlerer Geschwindigkeitsbereich	419
5.1.3	Stabilität bei hoher Geschwindigkeit	419
5.1.4	Kennlinienvarianten je nach Fahrerwunsch	421
6	Lenkungsstabilisierung	421
6.1	Lenkstabilisierung beim Übersteuern	422
6.2	Lenkstabilisierung beim Untersteuern	422
6.3	Lenkstabilisierung beim Bremsen auf Fahrbahnen mit unterschiedlichen Reibwerten (μ -split)	424
7	Systemsicherheit	425
8	Ausblick	427
Q	Allradlenkung	429
1	Einleitung, Historie, Grundlagen, Zielsetzung	429
2	Bauweisen	430
2.1	Mechanische Systeme	431
2.2	Hydraulische Systeme	433
2.3	Elektromechanische Systeme	434
2.4	Zentralaktor versus Einzelradaktuatoren	437

3	Auswirkungen einer Allradlenkung auf das Fahrverhalten	438
3.1	Kinematische Eigenschaften einer Allradlenkung	438
3.2	Einfluss einer Allradlenkung auf die stationären Fahreigenschaften	439
3.3	Einfluss einer Allradlenkung auf die instationären Fahreigenschaften	440
3.4	Kombination einer Hinterradlenkung mit einer Überlagerungslenkung an der Vorderachse	441
R	Steer-by-Wire	445
1	Einleitung	445
2	Komponenten	447
3	Lenkfunktion	451
4	Sicherheitskonzept	454
5	Ausblick	456
S	Überblick – Fahrerassistenzsystemfunktionen	457
	Ausgewählte Fahrerassistenzsystemfunktionen in Bezug auf die Lenkung im Überblick ...	457
1	Fahrstabilitätseingriffe	457
1.1	Funktion „Lenkempfehlung“	458
1.1.1	„Lenkempfehlung“ beim Gieren	458
1.1.2	„Lenkempfehlung“ in der μ -Split-Situation	458
1.2	Anforderungen an die Ergonomie	459
1.3	Anforderungen an die Sicherheit	460
2	Spurassistentz	460
2.1	Spurhalteassistentz (Lane Keeping Support – LKS)	461
2.1.1	Technische Realisierung	461
2.1.2	Funktionsweise	462
2.1.3	In der Praxis	462
2.2	Spurverlassenswarnung (Lane Departure Warning – LDW)	463
2.3	Ausgewählte Systeme auf dem Markt	464
2.4	Ausblick Spurhalteassistentz	465
3	Einparkassistentz – Park Assist	465
3.1	Anforderungen an das Einparksystem	466
3.2	Technische Realisierung	466
3.3	Ausgewählte Systeme auf dem Markt	468
3.4	Ausblick Einparkassistentz	468
T	Ausblick – Zukunft der Lenkung im Automobil	471
1	Autonomes Fahren	471
2	Steer by Wire	472
3	Allradlenkung	472
4	Integrierte Fahrdynamikregelung	473
5	Baukasten bzw. Modularisierung von Lenksystemen	473
6	Neue Absatzmärkte	474
7	Technologiewandel in der Lenkungstechnik	474
8	Lenkradentwicklung	475
9	Lenksäulenentwicklung	476
	Sachwortverzeichnis	477



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}	Achsparallele 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	Lenkraddrehschwingung
LDW	Lane Departure Prevention
LED	Light Emitting Diode
LIN	Local Interconnected Network
LKS	Lane Keeping Support
MFS	Multifunktionsshalter
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.

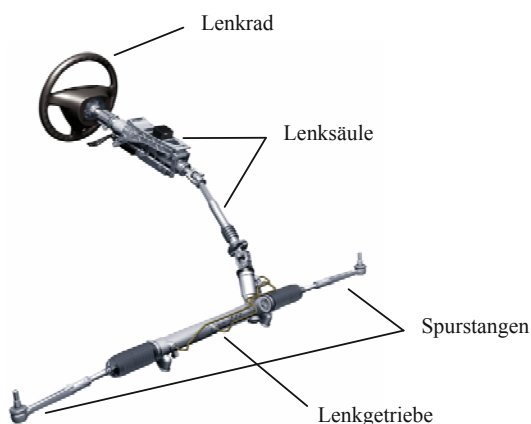


Bild A-1
Bauteile einer Lenkung (*Porsche 997*)

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 wird 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 Lenkssystemen erläutert. Es wird insbesondere auf die Lenkinematik, den fahrdynami-

A

schen Anforderungen, die auftretenden Schwingungen, auf das Lenkgefühl und auf die funktionale Grundauslegung eingegangen (Kapitel A bis H). Weiterhin widmet sich das Buch in den Kapiteln I bis O den einzelnen Baugruppen vom Lenkrad bis zur Spurstange. Die unterschiedlichen Lenkgetriebebauarten wie der manuellen, hydraulischen (HPS) oder der elektromechanischen Lenkung (EPS) werden erläutert. Eine deutliche Funktionsaufweitung bringen die speziellen Ausführungen von Lenkungen wie die Überlagerungslenkung (Kapitel P), Allradlenkung (Kapitel Q) und Steer-by-Wire-Lenkungen (Kapitel R) mit sich. Die Fahrerassistenz durch Lenksysteme und ein Ausblick auf zukünftige Trends in den Kapiteln S und T schließen das Buch ab.

Definition und Abgrenzung

Die Lenkung dient dazu, dem Fahrer die Möglichkeit der Fahrzeugquerführung zu geben, d. h. durch die Lenkung beeinflusst der Fahrer die Querdynamik des Fahrzeugs. Das System Lenkung verbindet den Fahrer mit den gelenkten Rädern des Fahrzeugs. Meist geschieht das auf die Weise, dass durch die Drehung des Lenkrades Drehbewegungen der gelenkten Räder um die Lenkachsen verursacht werden. Dieses Anstellen der (gelenkten) Räder verursacht Kräfte quer zum Rad, welche wiederum das Fahrzeug um die Hochachse beim Fahren drehen. Dieses Handbuch behandelt die Dynamik dieses Lenkvorgangs in Zusammenhang mit dem Fahrzeug und die dazu notwendigen Bauteile. Das sind das Lenkrad, die Lenksäule, das Lenkgetriebe, die Spurstangen, die Lenkunterstützung und deren Regelung und Energieversorgung. Für Achsbauteile selbst sei auf die Literatur verwiesen (siehe Heißing und Ersoy 2007 oder Reimpell und Betzler 2005). Ebenso werden Sonderbauformen wie die Überlagerungslenkung, Hinterradlenkung, Steer by Wire und Verspannungslenkung behandelt und Fahrerassistenzsysteme, welche mit der Lenkung im engeren Zusammenhang stehen. Dieses Buch beschränkt sich auf Lenkungen von Personenkraftfahrzeugen (kurz Fahrzeuge). Lenkungen von Rennfahrzeugen, Nutzfahrzeugen (Dudziński 2005), Motorrädern, Flugzeugen und Schienenfahrzeugen werden hier nicht im Detail behandelt.

1 Aufgabe und Bedeutung der Lenkung

Bei Straßenfahrzeugen erfolgt die Fahrzeugquerführung durch den Fahrer fast gänzlich über das System Lenkung. Für die Sicherheit im Verkehr ist es von essenzieller Bedeutung, dass das Fahrzeug den vom Fahrer aufgrund des Straßenverlaufs und des Verkehrsgeschehens vorgegebenen Kurs präzise und exakt folgt und weitestgehend beibehält (Braess und Seiffert 2007). Der Fahrer muss stets das sichere Gefühl haben, dass das Fahrzeug vorhersehbar und zuverlässig auf seine Lenkeingaben reagiert. Für die Qualität der Kurshaltung ist es daher wichtig, dass die Lenkeingaben von der Lenkung bzw. vom Fahrzeug sehr schnell und in dem vorhergeahnten Maße umgesetzt werden, damit der Fahrer die Kursänderungen erkennen und wiederum darauf reagieren kann.

Für die Entwicklung von Lenkungen ergeben sich daraus eine große Anzahl an Anforderungen und Aufgaben zur kundengerechten Auslegung:

- Ausreichend geringe Lenkradmomente und ein kleiner Lenkradwinkelbedarf beim Parkieren
- Leichtgängigkeit, Feinfühligkeit, Zielgenauigkeit, guter Geradeauslauf, ausreichende Direktheit, spontanes Ansprechen
- Ausgeprägter Straßenkontakt, Rückmeldung des Kraftschlusses Reifen/Fahrbahn
- Selbstständiges Rückstellen in die Mittellage, gutes Mittengefühl, stabilisierendes Verhalten bei allen Fahrmanövern
- Störgrößenunterdrückung aus Fahrbahnunebenheiten, Antrieb, Bremsung, Reifenungleichförmigkeiten

- Ausreichende Dämpfung zur Unterdrückung von Eigenschwingungen des Fahrzeugs
- Erfüllung der Craschanforderungen und -vorschriften zum Insassenschutz
- Niedriger Energiebedarf
- Ausreichende Geräuschfreiheit
- Schwingungsstabilität (keine selbst erregten Schwingungen)
- Verschleiß- und Wartungsarmut über Fahrzeuglebensdauer

1.1 Grundbauarten

Die Lenkung von zwei und mehrachsigen Straßenfahrzeugen erfolgt in der Regel durch ändern des Winkels zwischen der Fahrzeuglängsachse und den Mittelebenen einiger oder aller Fahrzeugräder (Matschinsky 2007). Die älteste Bauart ist die Drehschemellenkung, dabei wird eine starre Fahrzeugachse um deren Mittelpunkt gedreht (**Bild A-2, a**). Diese Drehschemellenkung wird bei Kutschen und Anhängern verwendet. Durch drehen des vorderen Fahrzeugteils zum hinteren kann der gleiche Effekt erzielt werden. Diese Lenkart wird als Knicklenkung bezeichnet (**Bild A-2, b**) und findet sich vorzugsweise bei Arbeits- und Sondermaschinen wieder. Nachteilig wirkt sich bei der Drehschemel- und bei der Knicklenkung die Verringerung der Standfläche und der große Hebelarm bei Störkräften aus. Dieser so genannte Störkrafthebelarm ist gleich der halben Spurweite.

Bei modernen Straßenfahrzeugen werden fast ausschließlich die Vorderräder mit der so genannten Achsschenkellenkung gelenkt. Bei Starrachsen wird diese mit einer durchgehenden Spurstange ausgeführt (**Bild A-2, c**), bei Einzelradaufhängungen wird dagegen eine geteilte Ausführung der Spurstange wie in **Bild A-2, d** schematisch dargestellt verwendet (siehe Kapitel D).

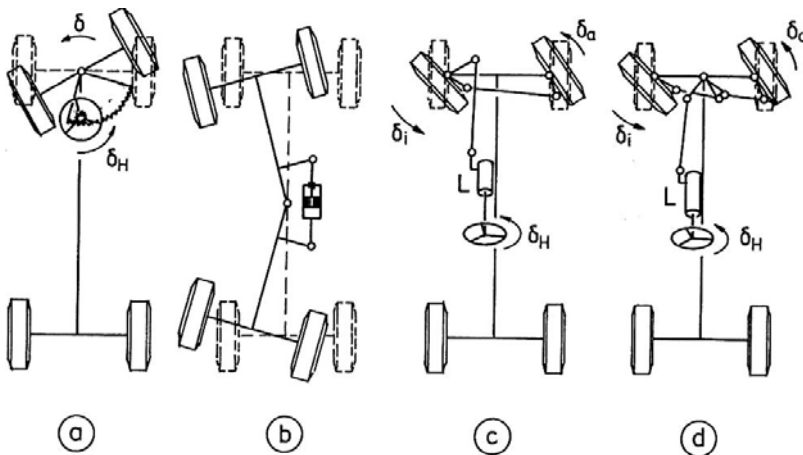


Bild A-2 Grundbauarten einer Fahrzeuglenkung (Matschinsky 2007)

1.2 Bauformen

Die beiden Standardbauformen der mechanischen Lenkung, welche in **Bild A-3** aufgegliedert sind, stellen die Kugelumlauflenkung und die Zahnstangenlenkung dar. Die Zahnstangenlenkung ist das gebräuchlichste Lenkungskonzept im Pkw-Bereich. Mit Zunahme des Pkw-Gewichts wurde die rein mechanische Lenkung durch die hydraulisch unterstützte Lenkung ersetzt (Hilfskraftlenkung, Servolenkung). Die Zahnstangen-Hydraulenlenkung (HPS, hydraulic power steering) setzte sich gegenüber der Kugelumlauf-Hydraulenlenkung durch, da diese sich als preisgünstigere Variante erwies.

A

Die Unterstützungskraft der HPS erfolgt durch einen Öl-Volumenstrom der meistens durch eine Flügelzellenpumpe erzeugt wird. Diese wird vom Verbrennungsmotor angetrieben. Eine vom Verbrennungsmotor unabhängig arbeitende Pumpe wird bei der elektrohydraulischen Lenkung (EHPS, electro hydraulic power steering) eingesetzt. Bei manchen HPS und bei der EHPS kann der Volumenstrom gesteuert werden. Dadurch erreicht man beim Parkieren eine sehr leichtgängige Lenkung. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit wird dieser Volumenstrom abgesenkt, um ein höheres Lenkradmoment zu erreichen. Dadurch wird die Stabilität des Fahrzeugs erhöht. Neben den hydraulisch unterstützten Lenksystemen werden vermehrt elektrisch unterstützte Lenksysteme (EPS, electric power steering) eingesetzt. Bei diesen Lenksystemen wird die Unterstützungskraft durch einen Elektromotor erzeugt, der über das Bordnetz gespeist wird. Je nach Einbausituation des Elektromotors im Lenksystem unterscheidet sich die EPS in eine weitere Unterteilung (siehe Kapitel O).

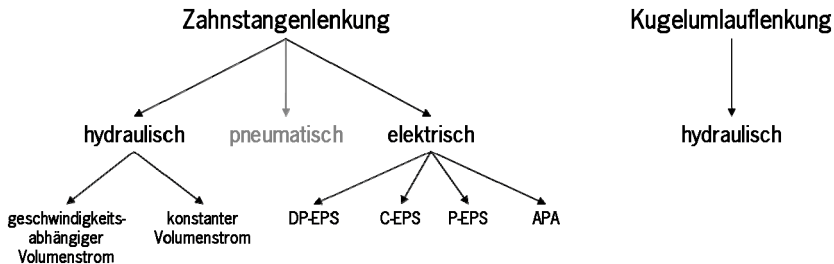


Bild A-3 Aufgliederung der Standardbauformen der mechanischen Lenkung mit Lenkunterstützung

Bei der Überlagerunglenkung wird zu dem vom Fahrer vorgegebenen Lenkwinkel ein synthetisch erzeugter Lenkradwinkel addiert oder subtrahiert. Hierbei wird ein gewöhnliches hydraulisches oder elektrisches Lenksystem als Basislenkung durch einen Lenkwinkelaktuator ergänzt (siehe Kapitel P).

2 Geschichte der Querdynamik

In den Anfängen der Menschheit wurden die oft einachsigen Wagen vom Menschen oder Zugtieren gezogen. Durch eine lange Zugdeichsel folgte der Wagen den Ziehenden. Erst als der Fahrer selbst auf den Wagen saß, spürte er die Momente um die Lenkachse. Diese sind bedingt durch die unterschiedlichen Rollwiderstände und Unebenheiten auf der Straße. Deshalb waren die ersten, oft sehr schweren Dampffahrzeuge als Dreirad mit nur einem gelenkten Rad ausgeführt (Fiala 2006). Durch das gelenkte Vorderrad entstehen viel kleinere Störmomente, die vom Fahrer kompensiert werden müssen. Das erklärt, warum die ersten Lenkungen auch teilweise selbsthemmend ausgeführt waren.

Die Anfänge der Kraftfahrzeuge in der heutigen Form wurden von Gottlieb Daimler und Carl Benz geprägt. Gottlieb Daimler legte den Schwerpunkt in der Motorisierung von bestehenden Fahrzeugen wie Kutschen oder Laufrädern. Carl Benz schenkte der Lenkproblematik von Beginn an große Aufmerksamkeit. Beim Patent Motorwagen von 1886 (**Bild A-10**) eliminierte er Störeinflüsse durch eine Gabellenkung mit Lenkrollhalbmesser Null, das bedeutet, dass Längskraftschwankungen durch Unebenheiten sich nicht auf die Betätigungskraft auswirkten. Bei der Achsschemellenkung mit dem Lenkrollhalbmesser gleich halbe Spurweite ist dieser Einfluss extrem hoch, deshalb wird diese Lenkungsart nur noch bei Anhängern, Kutschen und Sondermaschinen verwendet. Die Lenkungen der modernen Kraftfahrzeuge sind Weiterentwicklungen der Achsschemellenkung nach dem Carl Benz Patent von 1893 (siehe Kapitel A 3).