

## Reihe 1

Konstruktions-  
technik/  
Maschinen-  
elemente

Nr. 442

Dipl.-Ing. Arian Wolfien,  
Schwäbisch Gmünd

## Untersuchungen zum Beanspruchungsverhalten von Zahnstangengetrieben in PKW-Lenksystemen



# Untersuchungen zum Beanspruchungsverhalten von Zahnstangengetrieben in PKW-Lenksystemen

Von der Fakultät Maschinenwesen

der

Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

**Dipl.-Ing. Arian Wolfien**

geb. am 25. Januar 1984 in Magdeburg

Tag der Einreichung: 17. Mai 2017  
Tag der Verteidigung: 27. Februar 2018

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht  
Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Vorsitzender  
der Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing.habil. Thorsten Schmidt



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 1

Konstruktionstechnik/  
Maschinenelemente

Dipl.-Ing. Arian Wolfien,  
Schwäbisch Gmünd

Nr. 442

Untersuchungen zum  
Beanspruchungsverhalten  
von Zahnstangengetrieben  
in PKW-Lenkssystemen

VDI verlag

Wolfien, Arian

## **Untersuchungen zum Beanspruchungsverhalten von Zahnstangengetrieben in PKW-Lenkssystemen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 442 . Düsseldorf: VDI Verlag 2018 .

188 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen.

ISBN 978-3-18-344201-0, ISSN 0178-949X,

€ 67,00/VDI-Mitgliederpreis € 60,30.

**Für die Dokumentation:** Zahnstangengetriebe – Lenksysteme – Tragfähigkeit – ISO 6336 – Beanspruchung – Beanspruchbarkeit – Lastverteilung – Breitenlastverteilung – Verformungseinflussfunktion – Wöhlerversuche

Die vorliegende Arbeit soll das Verständnis über die wirkenden Beanspruchungen und Beanspruchbarkeiten von Zahnstangengetrieben erweitern. Ausgehend von den Unterschieden zwischen Stirrad- und Zahnstangengetrieben beinhaltet die Arbeit die erforderlichen Anpassungen der genormten Tragfähigkeitsberechnung sowie die Erweiterung des Verzahnungsumfeldes. Darüber hinaus wird ein prototypenähnlicher Methodenträger für die Zahnkontaktanalyse von Zahnstangengetrieben entwickelt. Die geometrischen Besonderheiten des Zahnstangenprofils werden über eine Modifizierung der Verformungseinflussfunktion in die Berechnung der Last- und Spannungsverteilung berücksichtigt. Hierbei lag der Fokus auf der lokalen Steifigkeitsveränderung des Zahnes bei einer Lasteinleitung in Zahnrandnähe. Zur vollständigen Betrachtung der Tragfähigkeit wird die Beanspruchbarkeit eines Zahnstangenzahnes mithilfe von Überrollungs- und Pulsationsversuchen untersucht.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

Dissertation Technische Universität Dresden

Fakultät Maschinenwesen

Tag der Einreichung: 17. Mai 2017

Tag der Verteidigung: 27. Februar 2018

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-949X

ISBN 978-3-18-344201-0

<https://doi.org/10.51202/9783186442017-1>

Generiert durch IP '18.216.62.43', am 23.04.2024, 11:39:17.

Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand der Robert Bosch Automotive Steering GmbH in enger Kooperation mit dem Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion (IMM) der TU Dresden unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht.

Ich bedanke mich herzlich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht für das entgegengebrachte Vertrauen, für die stets gewährte Unterstützung in meinem Promotionsvorhaben und für die ausgezeichneten Rahmenbedingungen am Lehrstuhl. Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl danke ich für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel danke ich für die Durchführung der Nebenfachprüfung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Oberingenieur Dr.-Ing. Michael Senf für die hervorragende fachliche Unterstützung und für die vielen wertvollen Diskussionsrunden am Institut. Ein großes Dankeschön möchte ich meinem Betreuer Herrn Dr. phil. nat. Christian Schroll für die außerordentliche Unterstützung, Motivation und die konstruktiven Anregungen aussprechen. Herrn Dipl.-Ing. Johannes Fauser und Herrn Dipl.-Ing. Markus Leberfinger danke ich für das Vertrauen, für den zeitlichen Rückhalt bei der Anfertigung der vorliegenden Arbeit sowie für die Ermöglichung der experimentellen Untersuchungen. Weiter gilt mein herzlicher Dank Herrn Dipl.-Ing. Michael Ilg für die vielen Ratschläge und die fortwährende Unterstützung.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kollegen des CAE-Centers für das angenehme Arbeitsklima, insbesondere beim gesamten Auslegungsteam und bei den Kollegen der früheren Methodenentwicklung. Herrn Dipl.-Ing. Jochen Rieg danke ich für die Unterstützungen bei den FEM-Berechnungen. Mein Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Jens Pfister für die Hilfestellungen bei den MKS-Simulationen.

Weiterhin möchte ich mich herzlich bei Herrn Dipl.-Ing. Thomas Schulze, Herrn Dipl.-Ing. Martin Tragsdorf und Herrn Dipl.-Ing. Robert Schröder für die gute Zusammenarbeit und für die vielen konstruktiven Ideen zur Umsetzung des Prüfstandskonzeptes und für die hervorragende Prüfstandsbetreuung bedanken.

Außerdem danke ich den wissenschaftlichen Hilfskräften Herrn B.Eng. Moritz Burger, Herrn B.Eng. Manuel Schultheiß, Herrn B.Eng. Harry Wiese, Herrn B.Eng. Christian Gernscheid, Frau Dipl.-Ing. Sylvia Richter, Herrn B.Eng. Tobias Grünewald, Herrn B.Eng. Michael Fuchs sowie Herrn B.Eng. Lukas Konietzny. Durch euer außergewöhnliches Engagement konntet ihr mich im Rahmen einer Abschlussarbeit in hohem Maße unterstützen.

Aus tiefstem Herzen danke ich meiner Familie, die mich stets in meinem Handeln unterstützte und mir so ein stabiles Fundament zum Gelingen dieser Arbeit bereitstellte. Besonders danke ich meinem Sohn Emil, meiner Tochter Marlena und meiner lieben Lebensgefährtin Julia für die ausdauernde Geduld und Rücksichtnahme.

Schwäbisch Gmünd, Februar 2018



Arian Wolfien



**Inhaltsverzeichnis**

Vorwort.....	III
Inhaltsverzeichnis .....	V
Formelzeichen, Definitionen und Einheiten.....	VIII
Indizes und Definition.....	X
Abkürzungsverzeichnis .....	XI
Abstract.....	XII
1 Einleitung.....	1
1.1 Problem- und Aufgabenstellung.....	3
1.2 Zielsetzung und Lösungsweg .....	5
2 Stand des Wissens.....	7
2.1 Einordnung der Zahnstangengetriebe .....	7
2.2 Grundsätzliche Eigenschaften von Zahnstangengetrieben .....	9
2.3 Praktische Anwendung von Zahnstangengetrieben .....	13
2.4 Von den ersten Lenkungen zum heutigen Lenkungssystem .....	17
2.5 Bisherige Forschungen an Zahnstangengetrieben .....	23
2.6 Weiterführende Literaturquellen.....	27
2.6.1 Ansatz verallgemeinerter Verformungseinflusszahlen nach Linke .....	27
2.6.2 Allgemeine Plattentheorie nach Heft.....	32
3 Normative Tragfähigkeitsberechnung für Zahnstangengetriebe .....	37
3.1 Notwendigkeit einer Anpassung der normativen Berechnungsvorschrift.....	37
3.1.1 Zahnstangengetriebe als Ersatzstirnradgetriebe nach ISO 6336.....	37
3.2 Kräftesituation im Zahnkontakt eines Zahnstangengetriebes .....	39
3.3 Flankentragfähigkeitsberechnung für ein Ritzel-Zahnstangenpaar .....	47
3.3.1 Ermittlung der Grübchentragfähigkeit bei Zahnstangengetrieben .....	47
3.4 Zahnfußtragfähigkeitsberechnung für ein Ritzel-Zahnstangenpaar.....	50
3.4.1 Der Formfaktor eines Zahnstangenzahns .....	50
3.4.2 Verifizierung der Zahnfußbiegespannung am Zahnstangenzahn.....	54
3.5 Vergleich der modifizierten Tragfähigkeitsberechnung mit dem normativen Standard .....	57
3.6 Erweiterte Umfeldbetrachtung in Bezug auf die Zahnstangenlagerung.....	59
3.7 Zwischenfazit .....	65

4	Methodenträger zur Ermittlung der Last- und Spannungsverteilung .....	66
4.1	Notwendigkeit der Berechnung einer Last- und Spannungsverteilung .....	66
4.1.1	Motivation .....	66
4.1.2	Berechnung der Last- und Spannungsverteilung am Ritzel-Zahnstangen- paar .....	67
4.2	Einfluss des Zahnstangenprofils auf die Verschiebungen .....	70
4.3	Bestimmung der Verformungseinflussfunktionen für die Ritzel- Zahnstangenpaarung .....	74
4.3.1	Verformungseinflussfunktion am unendlichen Ritzel-Zahnstangenpaar ....	74
4.3.2	Berechnung einer Verformungseinflussfunktion nach Heft .....	76
4.3.2.1	Formänderungsenergiehypothese des ebenen Dehnungszustandes .	77
4.3.2.2	Neue Grundgleichungen für den allgemeinen Ansatz nach Heft .....	79
4.3.2.3	Ergebnisse des analytischen Ansatzes nach Heft .....	83
4.4	Last- und Spannungsverteilung am geradverzahnten Ritzel-Zahnstangen- paar .....	84
4.5	Einfluss von örtlichen Steifigkeitsunterschieden auf den Reflexionsgrad .....	86
4.5.1	Einführung des Reflexionsgrades .....	87
4.5.2	Reflexion bei einem trapezförmigen Zahnflankenprofil .....	90
4.5.3	Berücksichtigung des Reflexionsgrades bei der Berechnung der Last- und Spannungsverteilung .....	93
4.5.4	Einfluss von spitzer und stumpfer Zahnstirnseite beim Zahnstangenprofil	95
4.5.5	Verifikation des Schrägungseinflusses einer trapezförmigen Stirnseite...	100
4.5.6	Reflexion bei einem Verzahnungsauslauf am Stirnradzahn .....	101
4.6	Zwischenfazit .....	105
5	Experimentelle Untersuchungen .....	107
5.1	Zielsetzung .....	107
5.2	Versuchseinrichtungen .....	108
5.2.1	Laufversuchsstand .....	108
5.2.2	Pulsatorversuchsstand .....	110
5.3	Versuchsdaten .....	112
5.3.1	Werkstoffkundliche Untersuchungen .....	112
5.3.2	Auswertung der Verzahnungsmessung .....	115
5.4	Versuchsprogramm .....	119
5.5	Versuchsdurchführung .....	121
6	Versuchsergebnisse und –auswertung .....	123

6.1	Vorbetrachtung für die Laufversuche .....	123
6.1.1	Untersuchung der Breitenlastverteilung bei Verkippung der Zahnstange	123
6.1.2	Einfluss der Zahnstangenverdrehung auf die ertragbare Lebensdauer ...	126
6.1.3	Untersuchung der Breitenlastverteilung unter Servomomenteneinfluss...	128
6.1.4	Darstellung der Ausfallerscheinungen in den Laufversuchen .....	131
6.2	Vorbetrachtung für den Pulsatorversuch .....	134
6.3	Auswertung der Wöhlerlinien des Lauf- und Pulsatorversuches .....	135
6.3.1	Statistische Versuchsauswertung am Beispiel der Versuchsreihe Nr. 3 ..	135
6.3.2	Darstellung der Zahnfußfestigkeitswöhlerlinien.....	138
7	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick.....	142
7.1	Zusammenfassung .....	142
7.2	Fazit und Ausblick.....	145
Anhang A:	Verzahnungsdatenblätter A-E .....	147
Anhang B.1:	Verformungseinflussfunktion am unendlichen Zahn, Paarung B .....	148
Anhang B.2:	Verformungseinflussfunktion am unendlichen Zahn, Paarung C .....	149
Anhang B.3:	Verformungseinflussfunktion am unendlichen Zahn, Paarung D .....	150
Anhang C.1:	Biegelinien für das trapezförmige Profil .....	151
Anhang C.2:	Biegelinien für das quadratische Ersatzpolynom nach [BAUM90] .....	153
Anhang D:	Zusammenfassung der verwendeten Grundgleichungen .....	156
Anhang E:	Zusammenfassung der verwendeten Gleichungsfolgen .....	158
Anhang F:	Vergleich der Verformungseinflussfunktionen (unendlicher Zahn).....	159
Anhang G:	Reflexionsgrad am endlichen Zahnstangenzahn in Abh. von $\theta$ .....	161
Anhang H:	Reflexionsgrad am endlichen Stirnradzahn (geradverzahnt) .....	164
Anhang J:	Werkstoffzusammensetzung der Prüfverzahnungen.....	168
Literaturverzeichnis	.....	169

## Formelzeichen, Definitionen und Einheiten

Symbol	Definition	Einheit
$a_{ij}$	Verformungseinflusszahl	[-]
$a_H$	Hauptachse der Hertzschen Kontaktellipse	[mm]
$b$	Zahnbreite	[mm]
$b_H$	Hauptachse der Hertzschen Kontaktellipse	[mm]
$b_T$	Tragende Zahnbreite	[mm]
$c$	Kopfgrundspiel	[mm]
$c_D$	Steifigkeitsfaktor nach Fronius	[-]
$D$	Steifigkeit der allgemeinen Platte	[kg cm]
$d$	Teilkreisdurchmesser	[mm]
$d_a$	Kopfkreisdurchmesser	[mm]
$d_b$	Grundkreisdurchmesser	[mm]
$d_f$	Fußkreisdurchmesser	[mm]
$d_m$	Durchmesser bei Profilmittte	
$d_z$	Zahnstangendurchmesser	[mm]
$E$	Elastizitätsmodul	[N/mm <sup>2</sup> ]
$E_{ij}$	Verformungseinflussfunktion am Zahn endlicher Breite	[-]
$E_\infty$	Verformungseinflussfunktion am Zahn unendlicher Breite	[-]
$F$	Kraft	[N]
$F_a$	Axialkraft	[N]
$F_{aR}$	Reibkraftanteil in Axialrichtung	[N]
$F_{bn}$	Flankennormalkraft	[N]
$F_k$	Klemmkraft	[N]
$F_r$	Radialkraft	[N]
$F_t$	Umfangskraft	[N]
$F_{Zst}$	Zahnstangenkraft, ausgehend von den Spurstangen	[N]
$F_R$	Reibkraft	[N]
$F_r$	Rundlaufabweichung nach DIN 3960	[µm]
$F_\beta$	Flankenlinien-Gesamtabweichung nach DIN 3960	[µm]
$F_{\beta y}$	Wirksame Flankenlinienabweichung aus DIN 3990, ISO 6336	[µm]
$FPT$	Freies Ritzelmoment	[Nm]
$f_G$	Größenfunktion	[-]
$f_L$	Abklingfunktion	[-]
$f_{r\beta}$	Profil-Formabweichung nach DIN 3960	[µm]
$f_{r\alpha}$	Profil-Winkelabweichung nach DIN 3960	[µm]
$f_{r\beta}$	Flankenlinien-Winkelabweichung nach DIN 3960	[µm]
$f_k$	Klaffen	[µm]
$f_{\beta\omega}$	Verdrehabweichung infolge der Zahnstangenverdrehung	[µm]
$f_{\beta t}$	Teilungs-Einzelabweichung	[µm]
$f_{Rand1}$	Reflexionsgrad in Abh. zu $\theta$	[-]
$f_{Rand2}$	Randefflussfunktion der Zahnverformung	[-]
$f_z$	Gesamtverformung	[µm]
$g$	Restklaffen	[µm]
$h_0$	Plattendicke	[mm]
$h_{Fe}$	Kraftbiegehebelarm	[mm]
$i$	Getriebeübersetzung	[-]
$i_{konst}$	Konstante Getriebeübersetzung	[-]
$i_{var}$	Variable Getriebeübersetzung	[-]

Symbol	Definition	Einheit
K	Relative Verformung	[-]
K <sub>A</sub>	Anwendungsfaktor, berücksichtigt äußere Zusatzlasten	[-]
K <sub>Fα</sub>	Stirnfaktor, Zahnfußbeanspruchung	[-]
K <sub>Fβ</sub>	Breitenfaktor, Zahnfußbeanspruchung	[-]
K <sub>Hα</sub>	Stirnfaktor, Zahnflankenbeanspruchung	[-]
K <sub>Hβ</sub>	Breitenfaktor, Zahnflankenbeanspruchung	[-]
K <sub>v</sub>	Dynamikfaktor, berücksichtigt dynamische Zusatzlasten	[-]
K <sub>β,T</sub>	Exp. Breitenlastverteilungsfaktor unter Teillast	[-]
M	Mittelpunkt der Zahnfußkurve	[mm]
M <sub>vz</sub>	Kippmoment aus dem Verzahnungskontakt	[Nm]
M <sub>servo</sub>	Servoseitiges Kippmoment	[Nm]
m <sub>n</sub>	Normalmodul	[mm]
N	Ertragbare Lastwechselzahl	[LW]
O	Ursprung bzw. Drehpunkt	[-]
P <sub>a</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit	[%]
p <sub>t</sub>	Teilkreisteilung	[mm]
p <sub>et</sub>	Stirneingriffsteilung	[mm]
R <sub>M</sub>	Radkörperbiegeanteil nach [WEBA53]	[mm]
R <sub>MQ</sub>	Radkörperneigung nach [WEBA53]	[mm]
R <sub>QN</sub>	Parallelverschiebung des Radkörpers nach [WEBA53]	[mm]
r <sub>a</sub>	Kopflinie	[mm]
r <sub>F</sub>	Radius der Krafteinleitung	[mm]
r <sub>f</sub>	Fußlinie	[mm]
r <sub>Ff</sub>	Fußformlinie	[mm]
r <sub>Na</sub>	Kopfnutzlinie	[mm]
r <sub>Nf</sub>	Fußnutzlinie	[mm]
r <sub>m</sub>	Linie entlang der Profilmitte	[mm]
r <sub>w</sub>	Wälzlinie	[mm]
r <sub>ü</sub>	Übergangslinie	[mm]
S	Schraubpunkt	[-]
S <sub>ij</sub>	Spannungseinflussfunktion am Zahn endlicher Breite	[-]
s <sub>a</sub>	Zahnkopfdicke	[mm]
s <sub>f</sub>	Zahnfußdicke	[mm]
T <sub>1</sub>	Antriebsmoment am Ritzel	[Nm]
t	Maß zwischen Bezugsebene und geneigter Stirnseite	[mm]
U	Elastische Formänderungsenergie	[Nmm]
v <sub>gs</sub>	Gleitgeschwindigkeit	[m/s]
v <sub>n</sub>	Flankennormalgeschwindigkeit	[m/s]
v <sub>t</sub>	Umfangsgeschwindigkeit	[m/s]
W	Potentielle Energie	[Nmm]
W <sub>f</sub>	Korrekturfunktion für den Schrägungswinkeleinfluss	[-]
W <sub>0</sub>	Linienlast	[N/mm]
w	Biegelinie	[mm]
x <sub>1</sub>	Profilverschiebungsfaktor (Ritzel)	[-]
x*	Modulbezogene Zahnbreite	[-]
Y	Faktor für die Klemmkraftaufteilung an Last- und Rückflanke	[-]
Y <sub>F</sub>	Formfaktor nach DIN 3990, ISO 6336	[-]
Y <sub>FS</sub>	Zahnkopffaktor nach DIN 3990, ISO 6336	[-]
Y <sub>S</sub>	Spannungskorrekturfaktor nach DIN 3990, ISO 6336	[-]
Y <sub>β</sub>	Schrägenfaktor (Zahnfuß) nach DIN 3990, ISO 6336	[-]
Y <sub>A</sub>	Kopfeingriffsfaktor nach Fronius	[-]

Symbol	Definition	Einheit
$y_L$	Stirnlastaufteilungsfaktor nach Fronius	[-]
$y_\beta$	Einlaufverschleiß nach DIN 3990, ISO 6336	[ $\mu\text{m}$ ]
$Z_A$	Doppeleingriffsfaktor nach Fronius	[-]
$Z_{B,D}$	Einzeleingriffsfaktoren	[-]
$Z_E$	Elastizitätsfaktor nach DIN 3990, ISO 6336	[-]
$Z_H$	Zonenfaktor nach DIN 3990, ISO 6336	[-]
$Z_\beta$	Schrägenfaktor (Zahnflanke) nach DIN 3990, ISO 6336	[-]
$Z_\epsilon$	Überdeckungsfaktor nach DIN 3990, ISO 6336	[-]
$z_1$	Ritzelzähnezahl	[-]
$\alpha$	Eingriffswinkel	[°]
$\beta$	Schrägungswinkel	[°]
$\beta_b$	Schrägungswinkel am Grundkreis	[°]
$\Delta y$	Abfall des äußeren Zahnstangenpunktes	[mm]
$\Delta s$	Druckstückspiel, Federweg	[mm]
$\delta$	Gehäusewinkel	[°]
$\epsilon_\alpha$	Profilüberdeckung	[-]
$\epsilon_\beta$	Sprungüberdeckung	[-]
$\epsilon_\gamma$	Gesamtüberdeckung	[-]
$\gamma$	Verzahnungsauslaufwinkel am Ritzel	[°]
$\theta$	Stirnseitenwinkel	[°]
$v$	Querkontraktionszahl, bei Stahl $v=0,3$	[-]
$\kappa, \omega, \nu$	Hilfsintegrale nach [HERT63]	[-]
$\xi, \eta, \zeta$	Dimensionslose Koordinaten	[-]
$\pi$	Formänderungsarbeit	[Nmm]
$\rho$	Krümmungsradius	[mm]
$\rho_F$	Fußrundungsradius	[mm]
$\rho_{FP}$	Fußrundungsradius des Bezugsprofils	[mm]
$\psi$	Verformung in Breitenrichtung	[-]
$\Sigma$	Achskreuzungswinkel	[°]
$\sigma_1$	Tangentialspannung (FEM)	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{H0}$	Nominelle Flankenpressung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_H$	Flankenpressung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{F0}$	Zahnfuß-Nennspannung nach DIN 3990, ISO 6336	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_F$	Zahnfußspannung nach DIN 3990, ISO 6336	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{Flim}$	Zahnfußfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\varphi$	i-te Grundgleichung des Biegelinienansatzes	[-]
$\varphi_z$	Ritzeldrehwinkel	[°]
$\omega_{kipp}$	Kippwinkel als Maß der Zahnstangenverdrehung um die Hubachse	[°]

## Indizes und Definition

Symbol	Definition
A	Eingriffsbeginn
B	Innerer Einzeleingriffspunkt am Ritzel
C	Wälzpunkt
D	Innerer Einzeleingriffspunkt am Rad

Symbol	Definition
E	Eingriffsende
i	Betrachteter Abschnitt
j	Mit Einzelkraft belasteter Abschnitt
ers	Ersatz-
n	Normalschnitt
rel	Modulbezogener Abstand zur Stirnseite
T	Teillast
t	Stirnschnitt
w	Betrieb
0	Ausgangszustand
1, I	Ritzel
2, II	Zahnstange

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AGMA	American Gear Manufacturers Association
BEM	Boundary-Elemente-Methode
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DMS	Dehnmessstreifen
EHPS	Electric hydraulic power steering
EPSapa	Electric power steering on a paraxial recirculating ball nut gear
EPSc	Electric power steering on the steering column
EPSdp	Electric power steering on a dual pinion
EPSrc	Electric power steering on a rack concentric servo unit
ESZ	Ebener Spannungszustand
EVZ	Ebener Verzerrungszustand
FL	Flankenlinie
FEM	Finite Elemente Methode
HPS	Hydraulic power steering
IMM	Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion
ISO	Internationale Organisation für Normung
LV	Lastverteilung
PL	Profillinie
Q	Verzahnungsqualität
RBAS	Robert Bosch Automotive Steering GmbH
RIKOR	Ritzelkorrektur (FVA Software)
SV	Zahnfußbiegespannungsverteilung
VZ	Verzahnung
ZSG	Zahnstangengetriebe

## Abstract

Today's gear teeth design in passenger car steering systems is characterized by the continuing reduction of development times, the increasing demands on the running quality, more efficient use of existing material constraints and the implementation of new lightweight construction strategies. A good understanding of the acting stresses and load capacities form the basis of a save component design. As the first step in the product lifecycle process, the normative calculation procedure plays an important part. Computed downstream calculations using Multi-Body Simulation (MBS) and the Finite Element Method (FEM) are based on the load assumptions of the analytical program giving a review of the performance quality of the running gear teeth. The standardized calculations mostly refer to a pair of spur gears, whereas the geometric, kinematic and specific bearing characteristics of a steering gear (rack, pinion) are continuously disregarded. With regard to the variety of customer enquiries, a quick, analytical assessment is a suitable tool to be used before the preferred final solution of the toothing variation is selected.

Due to the differences between the spur/spur and rack/pinion gears, necessary adjustments have to be made to the original load capacity calculation. With the help of the deflection influence coefficients methods, the load distribution along the line of contact (LVR) and stress distribution along the tooth root (SVR) are detected whereby the geometric features of the rack profile are taken into account. The contact forces and tooth root bending stresses of a single meshed gear pair are compared to a Finite Element Analysis (FEA). A FEA contact simulation verifies the resulting loads and main stresses at the tooth root of the gear.

The task is aimed at improving stress analysis for rack and pinion gears. Characteristic effects on the tooth meshing of variable, local tooth stiffness and the tooth environment are analyzed both theoretically and experimentally explaining the effect on the load bearing capacity. The importance of the load capacity as a component of the LVR and SVR are shown for steering gear teeth increasing the possibilities of analytical calculation. The modified method of identification for the stress and the provision of the component Woehler (SN-) curves form a prospective and a more accurate lifetime prediction for rack and pinion gears.