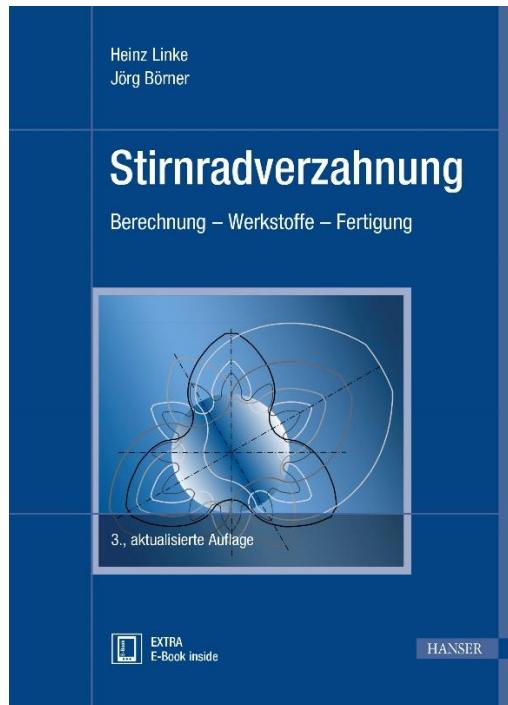


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Stirnradverzahnung

von Heinz Linke (Hrsg.) und Jörg Börner (Hrsg.)

Print-ISBN: 978-3-446-47036-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-47442-0

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446470361>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# **Vorwort**

## **zur dritten Auflage**

Seit dem Erscheinen der zweiten Auflage sind mehr als 10 Jahre vergangen. Die Bedeutung von Stirnradgetrieben für technisch anspruchsvolle Produkte und der Bedarf an ihnen in der täglichen Anwendung haben sich keinesfalls verringert, auch wenn sie oft zum „alten Eisen“ gezählt werden. Einiges hat sich in den Anwendungsbereichen geändert, z. B. durch den Elektroantrieb in der Fahrzeugtechnik, und durch die globale Orientierung an ISO-Normen. Wesentliches aber ist geblieben. Hierzu zählt nicht zuletzt die Faszination des Ingenieurs am Zusammenwirken verschiedenster Fachgebiete, wie Technische Mechanik, Fertigungstechnik, Tribotechnik, Konstruktion, Akustik und Informatik.

Nach Jahrzehntelanger, vertrauensvoller Zusammenarbeit erschien eine gemeinsame Herausgabe des Buches durch Heinz Linke und Jörg Börner geboten. Die vorliegende 3. Auflage stellt den gegenwärtigen Stand des Fachgebiets für die praktische Getriebeentwicklung dar. Es wurden alle dafür erforderlichen inhaltlichen Präzisierungen, Überarbeitungen und Ergänzungen vorgenommen. Darüber hinaus erfolgten sprachliche Korrekturen sowie eine Vereinheitlichung des Layouts. Da dieser Tage eine immer stärkere Tendenz zum Home-Office besteht, möge das Buch auch außerhalb der Hochschule und der Betriebsstätte ein nützliches Hilfsmittel sein.

Der Malstrom der Zeit wird eine tiefergehende Aktualisierung des Buches in folgenden Auflagen erforderlich machen. Neben der stärkeren Berücksichtigung der Fortschritte in der Rechentechnik sowie neuer Methoden wird eine kontinuierliche Aufbereitung erfolgen müssen, die der Vorstellungswelt und dem kreativen Denken des Ingenieurs gerecht wird. Eine künstliche Intelligenz kann dies zwar zunehmend unterstützen, aber nicht vollständig ersetzen.

Dresden, August 2022

Heinz Linke

Friedrichshafen, August 2022

Jörg Börner



# Über die Herausgeber

**Heinz Linke** wurde 1935 in Chemnitz geboren. Nach der Grundschule erlernte er den Beruf Vorrichtungsbauer und arbeitete anschließend im Motorradwerk Zschopau als Werkzeugmacher. Von 1952 bis 1955 studierte er an der Fachschule für Maschinenbau Schmalkalden Werkzeugmaschinenbau und nahm anschließend eine Tätigkeit als Berechnungsingenieur im VEB Entwicklungsbau Pirna auf. Dort war er vor allem in der Festigkeitsberechnung von Baugruppen der Gasturbinen und Strömungsgetriebe aktiv. Während dieser Arbeit studierte er an der TU Dresden im Fernstudium Strömungstechnik und widmete sich zunehmend Entwicklungs- und Forschungsaufgaben. 1968 promovierte er auf dem Gebiet Antriebsdynamik. 1971 begann Dr. Linke seine Tätigkeit an der TU Dresden am Lehrstuhl Maschinenelemente. 1973 wurde er zum Dozenten für Konstruktionstechnik und nach seiner Habilitation 1979 zum ordentlichen Professor für Konstruktionstechnik (Konstruktionslehre/Maschinenelemente) berufen. Neben Lehre und Forschung gehörte auch die Entwicklung einer einheitlichen Norm für die Tragfähigkeitsberechnung von Verzahnungen im RGW (damals um die Sowjetunion zusammengeschlossenes Wirtschaftsgebiet) zu seinen Aufgaben. In der Folgezeit wurden unter seiner Verantwortung die Grundlagen von DIN 743 zur Belastbarkeit von Wellen und Achsen und die Richtlinie VDI 2737 zur Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit von Hohlrädern/Innenverzahnungen bearbeitet.

Prof. Linke ist Oversea-Member der US-amerikanischen Normenvereinigung AGMA.

Auf dem Gebiet der Berechnung von Maschinenelementen, insbesondere Zahnradgetrieben, besitzt Prof. Linke über 60 Jahre Erfahrung. Er veröffentlichte seine Forschungsergebnisse und Erfahrungen in zahlreichen Beiträgen in Zeitschriften und auf nationalen und internationalen Tagungen.





**Jörg Börner** wurde 1960 in Elsterwerda geboren. Von 1980 bis 1985 studierte er Grundlagen des Maschinenbaus an der Technischen Universität Dresden in der Vertiefungsrichtung Konstruktionslehre. Von 1985 bis 1989 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente der TU Dresden tätig und promovierte 1989 zum Thema „Modellreduktion für Antriebssysteme mit Zahnradgetrieben zur vereinfachten Berechnung der inneren dynamischen Zahnkräfte“. Bis 1997 hat er am Institut für Maschinenelemente der TU Dresden vor allem Berechnungsprogramme für die Last- und Spannungsverteilung an Verzahnungen und deren Optimierung entwickelt. Dazu gehörte auch ein verbesserter Berechnungsansatz für die Spannungskonzentration im Zahnfuß. Nach einem zwischenzeitlichen Studienaufenthalt am GearLab von Prof. Houser an der Ohio State University in Columbus/Ohio arbeitete Dr. Börner von 1997 bis 2000 als Berechnungsingenieur in der Getriebeentwicklung von Caterpillar Inc. in Peoria/Illinois, USA.

Seit 2000 ist er als Experte für den Entwurf und die Nachrechnung von Verzahnungen in der Verzahnungsentwicklung der ZF Friedrichshafen AG in Friedrichshafen tätig. Schwerpunkt seiner Arbeit ist auch hier die Weiterentwicklung von Berechnungssoftware für Zahnräder auf der Basis theoretischer Analysen sowie von Erfahrungen aus dem Test und Einsatz von ZF-Produkten. Seine Erfahrungen und neue Berechnungsansätze wurden in mehreren Beiträgen auf Tagungen präsentiert sowie in Fachzeitschriften veröffentlicht.

# Autorenverzeichnis

Dr.-Ing. Jörg Börner  
ZF Friedrichshafen AG

Prof. em. Dr.-Ing. habil. Heinz Linke  
TU Dresden, Institut für Maschinenelemente  
und Maschinenkonstruktion

Dr.-Ing. Eckhard Röhle  
ehemals TU Dresden, Institut für  
Maschinenelemente  
und Maschinenkonstruktion

Prof. Dr.-Ing. Iris Römhild  
HTW Dresden, Professur für Konstruktion  
und Antriebstechnik

Dr.-Ing. Michael Senf  
ehemals TU Dresden, Institut für  
Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion

Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Sonntag  
ehemals TU Dresden, Institut für  
Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion

Dr.-Ing. Alfred Spengler (†)  
ehemals Bergakademie Freiberg

Dr.-Ing. Falk Spirling  
Ingenieurbüro Antriebstechnik Dr.-Ing. Spirling,  
Dresden

Dipl.-Ing. Gerhard Tripp  
ehemals A. Friedr. Flender AG, Bocholt

Dr.-Ing. Steffen Wengler  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,  
Institut für Fertigungstechnik und  
Qualitätssicherung

Abschnitt 5.3, 6.2, 6.3, Anlagen: 5, 9

Abschnitt 1, 2, 3.1, 3.2, 4, 5.1, 5.2, 6.1,  
6.5.1, 6.5.2, 6.5.3, 6.5.6, 6.5.7, 7.2, 9.1,  
Anlagen

Abschnitt 3.3

Abschnitt 7.1, 7.3

Abschnitt 6.4, Anlage 3.2

Abschnitt 6.5.4, 6.5.5, 6.6, Anlagen: 13, 14

Abschnitt 7.4, 9.3, 10.3,  
Anlagen: 11, 12

Abschnitt 6.7

Abschnitt 10.1, 10.2, Anlage 15 (in der ersten  
Auflage von Prof. W. Thyssen verfasst)

Abschnitt 8, 9.1, Anlage 3.2



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort .....</b>	VII
<b>Über die Herausgeber .....</b>	IX
<b>Autorenverzeichnis .....</b>	XI
<b>1 Überblick, allgemeine Grundlagen .....</b>	1
1.1 Entwicklung der Verzahnung.....	1
1.1.1 Entwicklung der Anwendung der Zahnräder/Zahnradgetriebe .....	1
1.1.2 Entwicklung der Verzahnungsgeometrie .....	7
1.1.3 Entwicklung der Tragfähigkeitsberechnung.....	12
1.1.3.1 Zahnfußbeanspruchung.....	12
1.1.3.2 Zahnflankenbeanspruchung – Grübchen.....	16
1.1.3.3 Fressbeanspruchung .....	18
1.2 Aufgaben und Einteilung der Getriebe und Verzahnungen.....	19
1.3 Verzahnungsgesetz für Stirnradverzahnungen .....	25
1.4 Grundbeziehungen.....	31
1.4.1 Übersetzung.....	31
1.4.2 Wirkungsgrad.....	34
1.4.3 Drehmomente.....	35
1.5 Symbole und Symbolerklärungen .....	36
<b>2 Geometrie der Verzahnung .....</b>	37
2.1 Geometrie der Geradverzahnung .....	37
2.1.1 Geometrie der Verzahnung eines Stirnrades .....	37
2.1.1.1 Evolvente.....	37
2.1.1.2 Bezugsprofil .....	47
2.1.1.3 Grundgrößen der Verzahnung eines Stirnrades .....	50
2.1.2 Geometrie der Verzahnungspaarung – Geradverzahnung.....	58
2.2 Geometrie der Schrägverzahnung .....	72
2.2.1 Erzeugung und grundlegende Eigenschaften.....	72
2.2.2 Grundgrößen der Verzahnung eines Stirnrades - Schrägverzahnung .....	81
2.2.3 Geometrie der Verzahnungspaarung – Schrägverzahnung .....	85
2.3 Ergänzungen zur Geometrie .....	89
2.3.1 Allgemeines zur Zahnfußgeometrie .....	89
2.3.2 Zahnfußgeometrie der Außenverzahnung bei Herstellung mit Wälzfräser oder Hobelkamm bei beliebigem Werkzeugprofilwinkel.....	89
2.3.2.1 Zahnfußdicke der Außenverzahnung.....	89
2.3.2.2 Krümmungsradien der Zahnfußübergangskurve der Außenverzahnung bei Herstellung mit Wälzfräser oder Hobelkamm.....	91
2.3.3 Zahnfußgeometrie bei Herstellung mit Schneidrad – Außen- und Innenverzahnung .....	95
2.3.3.1 Zahnfußdicke .....	95
2.3.3.2 Krümmungsradien der Zahnfußübergangskurve.....	97
2.3.4 Vergleichende Untersuchungen zur Zahnfußgeometrie.....	97
2.4 Symbole und Symbolerklärungen .....	99

<b>3 Eingriffsstörungen</b> .....	101
3.1 Überblick .....	101
3.2 Eingriffsstörungen bei Außenverzahnungen.....	101
3.2.1 Eingriffsstörung durch zu kleine Überdeckung.....	101
3.2.2 Eingriffsstörungen in nicht-evolventischen Bereichen.....	104
3.3 Eingriffsstörungen bei Innenverzahnungen .....	106
3.3.1 Vorberachtung.....	106
3.3.2 Eingriffsstörungen im theoretischen Eingriffsgebiet – Zahnfußeingriffsstörungen .....	108
3.3.2.1 Zahnfußeingriffsstörung am Ritzel.....	108
3.3.2.2 Zahnfußeingriffsstörung am Schneidrad des Erzeugungsgetriebes .....	111
3.3.2.3 Zahnfußeingriffsstörung am Hohlrad.....	111
3.3.3 Eingriffsstörungen außerhalb des regulären Zahneingriffsgebietes.....	114
3.3.3.1 Zahnkopfeingriffsstörung .....	114
3.3.3.2 Vorschubeingriffsstörung und radiale Einbaustörung.....	116
3.3.3.3 Passive Eingriffsstörung am Erzeugungsinnenradpaar .....	120
3.3.4 Hinweise zur Auslegung von Innenradpaaren und zur Werkzeugauswahl.....	121
3.3.4.1 Allgemeine Gesichtspunkte für den Entwurf von Innenradpaaren.....	121
3.3.4.2 Profilverschiebung zur Vermeidung von Eingriffsstörungen an Innenradpaaren .....	123
3.3.4.3 Wahl des Schneidrades zur Erzeugung der Innenverzahnung .....	125
3.4 Symbole und Symbolerklärungen.....	128
<b>4 Evolventische Sonderverzahnungen</b> .....	129
4.1 Arten und Möglichkeiten.....	129
4.2 Auslegung .....	133
4.3 Symbole und Symbolerklärungen.....	139
<b>5 Tragfähigkeit – Einführung, Ausgangswerte</b> .....	140
5.1 Schadensfälle.....	140
5.2 Möglichkeiten des Tragfähigkeitsnachweises.....	149
5.3 Belastungshäufigkeitsfunktion .....	151
5.3.1 Belastungsverlauf am Zahn.....	151
5.3.2 Erfassung des Belastungsverlaufes im Lastkollektiv .....	152
5.3.3 Experimentelle Ermittlung von Lastkollektiven.....	153
5.3.4 Erfassung von Lastkollektiven in der Tragfähigkeitsberechnung.....	155
5.3.5 Typische Lastkollektive, Besonderheiten .....	159
5.4 Symbole und Symbolerklärungen.....	161
<b>6 Tragfähigkeit / Laufverhalten Außenverzahnung und Innenverzahnung</b> .....	162
6.1 Geschwindigkeiten.....	162
6.1.1 Gleitgeschwindigkeit.....	162
6.1.2 Spezifisches Gleiten.....	165
6.1.3 Gleitfaktor .....	166
6.1.4 Summengeschwindigkeit .....	167
6.2 Zahnsteifigkeit.....	167
6.2.1 Grundlegendes .....	167
6.2.2 Zahnsteifigkeitsanteile .....	168
6.2.3 Zahnsteifigkeitsberechnung .....	169
6.2.4 Näherungsweise Zahnsteifigkeitsberechnung nach ISO 6336-1 (DIN 3990-1) .....	170
6.2.5 Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 6.2.....	171
6.3 Kräfte am Zahn.....	172
6.3.1 Grundsätzliches .....	172
6.3.2 Kräfte am Zahn aus Nutzleistung .....	172

6.3.2.1	Kraftzerlegung am Zahn .....	172
6.3.2.2	Definition der Nutzleistung für die Zahnbelastung .....	177
6.3.3	Äußere dynamische Zusatzkräfte .....	177
6.3.4	Innere dynamische Zusatzkräfte.....	181
6.3.4.1	Ursachen und Verlauf.....	181
6.3.4.2	Mechanisches Ersatzmodell .....	184
6.3.4.3	Mathematisches Berechnungsmodell .....	188
6.3.4.4	Parameter des Schwingungssystems .....	189
6.3.4.5	Schwingungsberechnung.....	193
6.3.4.6	Besonderheiten des Schwingungsverhaltens .....	195
6.3.4.7	Experimentelle Ermittlung .....	196
6.3.4.8	Ermittlung des Dynamikfaktors $K_v$ entsprechend ISO 6336-1, DIN 3990-1	197
6.3.5	Resultierende Belastung - praktisches Vorgehen, Vernachlässigungen .....	201
6.3.6	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 6.3 .....	202
6.4	Lastverteilung bei Verzahnungen.....	203
6.4.1	Grundproblem .....	203
6.4.2	Allgemeiner Berechnungsansatz.....	204
6.4.3	Verfahren der Einflusszahlen.....	205
6.4.3.1	Grundbeziehungen.....	205
6.4.3.2	Ermittlung der Verformungseinflusszahlen .....	206
6.4.3.3	Berechnung der Lastverteilung und Analyse von Besonderheiten.....	215
6.4.4	Erfassung der Lastverteilung für die Zahnflanken- und Zahnußtragfähigkeitsberechnung durch Lastverteilungsfaktoren .....	219
6.4.4.1	Stirnfaktor $K_{H\alpha}$ .....	220
6.4.4.2	Breitenfaktor $K_{H\beta}$ .....	221
6.4.4.3	Vereinfachte Lastverteilungsfaktoren.....	222
6.4.4.4	Ermittlung der Kontaktlinienabweichung .....	226
6.4.4.5	Ermittlung der wirksamen Kontaktlinienabweichung für Berechnungen.....	229
6.4.5	Maßnahmen zur Verbesserung des Breitenlastverhaltens .....	230
6.4.6	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 6.4 .....	236
6.5	Tragfähigkeitsnachweis .....	237
6.5.1	Zahnflankentragfähigkeit - Grübchen und Schäden bei Maximalbeanspruchung .....	237
6.5.1.1	Grundlagen .....	237
6.5.1.2	Zahnflankenpressung.....	241
6.5.1.3	Grübchenfestigkeit und Einflüsse .....	246
6.5.1.4	Sicherheit gegen Grübchenbildung; zulässige Beanspruchung .....	248
6.5.1.5	Sicherheit gegen bleibende Verformung, Anriß oder Sprödbruch der Randschicht bei maximaler Belastung.....	249
6.5.2	Zahnußtragfähigkeit .....	250
6.5.2.1	Grundlagen - Kerbwirkung.....	251
6.5.2.2	Zahnußspannung bei Vollrädern.....	263
6.5.2.3	Zahnußfestigkeit und Einflüsse .....	270
6.5.2.4	Sicherheit gegen Ermüdungsbruch.....	275
6.5.2.5	Sicherheit gegen bleibende Verformung Anriß oder Sprödbruch.....	276
6.5.2.6	Zahnußtragfähigkeit bei elastisch gestaltetem Zahnkranz .....	278
6.5.3	Praktisches Vorgehen beim Grundnachweis der Tragfähigkeit.....	294
6.5.3.1	Vorgehen beim Nachweis der Flankentragfähigkeit - Grübchen und Schäden bei Maximalbelastung (Methodischer Ablauf).....	294
6.5.3.2	Zahnußtragfähigkeit - Ermüdungsbruch und Schäden bei Maximalbelastung (Methodischer Ablauf).....	297
6.5.4	Schmierfilmdicke .....	301
6.5.4.1	Berechnung der Schmierfilmdicke .....	301

6.5.4.2	Zahnflankenschäden und Schmierstoffeinfluss.....	304
6.5.5	Fresstragfähigkeit.....	305
6.5.5.1	Einführung .....	305
6.5.5.2	Schadensbeschreibung und Einflussgrößen zur Fresstragfähigkeit.....	305
6.5.5.3	Ansätze zur Berechnung der Fresstragfähigkeit.....	306
6.5.5.4	Fresstragfähigkeit nach der Blitztemperatur .....	307
6.5.5.5	Fresstragfähigkeit nach der Integraltemperatur.....	312
6.5.5.6	Praktische Berechnung der Fresstragfähigkeit nach dem Integraltemperaturverfahren.....	313
6.5.5.7	Testverfahren zur Fresstragfähigkeit.....	317
6.5.6	Graufleckentragfähigkeit .....	319
6.5.7	Verschleißtragfähigkeit .....	323
6.5.8	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 6.5.....	326
6.6	Leistungsverluste/Wirkungsgrad, Getriebeerwärmung, Schmierung .....	330
6.6.1	Leistungsverluste .....	330
6.6.1.1	Gesamtverluste - Übersicht.....	330
6.6.1.2	Verzahnungsverluste.....	330
6.6.1.3	Lagerverluste.....	336
6.6.2	Getriebewirkungsgrad .....	341
6.6.3	Wärmebilanz - Wärmetragfähigkeit.....	342
6.6.3.1	Vorberichtigungen .....	342
6.6.3.2	Wärmeabgabe durch das Gehäuse .....	344
6.6.3.3	Wärmeabgabe durch den Kühlkreislauf .....	345
6.6.3.4	Ergänzungen zur Wärmebilanz .....	345
6.6.4	Schmierung und Kühlung .....	356
6.6.4.1	Schmierstoffauswahl .....	356
6.6.4.2	Schmier- und Kühlsysteme.....	360
6.6.5	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 6.6.....	365
6.7	Geräuschverhalten .....	367
6.7.1	Grundlagen.....	367
6.7.1.1	Einführung und wichtige akustische Begriffe .....	367
6.7.1.2	Rechenoperationen mit Pegelwerten.....	372
6.7.2	Mechanische Geräuschentstehung .....	373
6.7.2.1	Grundgleichung, Schallausbreitung .....	373
6.7.2.2	Körperschallanregung .....	375
6.7.2.3	Erregerfrequenzen.....	378
6.7.2.4	Übertragungs- und Abstrahlverhalten von Getriebegehäusen.....	379
6.7.2.5	Bestimmung der Gesamtschallleistung .....	384
6.7.3	Messtechnische Ermittlung der Schallleistung.....	384
6.7.3.1	Luftschall-Messverfahren .....	384
6.7.3.2	Körperschall-Messverfahren .....	386
6.7.3.3	Normen .....	386
6.7.4	Schallleistungspegel von Zahnradgetrieben.....	388
6.7.4.1	Erwartungswerte nach VDI 2159 [6.7/121] .....	388
6.7.4.2	Vergleiche mit weiteren Literaturquellen .....	389
6.7.4.3	Einfluss geräuschrelevanter Parameter.....	390
6.7.4.4	Grenzwerte der Schallemission .....	391
6.7.5	Beispiele von Schallleistungspegeln diverser Maschinen .....	392
6.7.6	Konstruktive Maßnahmen zur Geräuschminderung .....	393
6.7.6.1	Vorschriften .....	393
6.7.6.2	Grundprinzipien zur Geräuschminderung .....	394
6.7.6.3	Beeinflussung der Anregung des Zahneingriffs bei Stirnradverzahnungen ..	395

6.7.6.4	Beeinflussung der Körperschallanregung an der Lagerstelle .....	401
6.7.6.5	Gestaltung des Getriebegehäuses.....	404
6.7.6.6	Schallschutzkapseln.....	410
6.7.6.7	Antischall .....	412
6.7.7	Körperschall und Diagnose .....	412
6.7.8	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 6.7 .....	414
<b>7</b>	<b>Auslegung von Verzahnungen und Getrieben .....</b>	<b>416</b>
7.1	Stufenzahl und Aufteilung der Gesamtübersetzung .....	416
7.1.1	Vorbetrachtungen .....	416
7.1.2	Auslegung für minimale Masse .....	416
7.2	Überschlägige Bestimmung der Abmessungen .....	420
7.2.1	Überschlagskriterium Zahnflankentragfähigkeit (Grübchen).....	420
7.2.2	Überschlagskriterium Zahnußtragfähigkeit.....	422
7.3	Wahl und Aufteilung der Profilverschiebung.....	423
7.3.1	Kriterien und Tendenzen.....	423
7.3.2	Empfehlungen .....	431
7.4	Werkstoffauswahl - Festigkeitswerte .....	435
7.4.1	Grundlagen der Werkstoffwahl und Grundwerte der Werkstofffestigkeit.....	435
7.4.1.1	Allgemeine Grundlagen.....	437
7.4.1.2	Stahlauswahl nach der Härtbarkeit.....	440
7.4.2	Werkstoffe für Zahnräder ohne Randschichtverfestigung - Grundlagen .....	444
7.4.2.1	Zahnräder aus unlegierten Stählen sowie Stahlguss und unlegierten Gusseisensorten im Gusszustand .....	444
7.4.2.2	Zahnräder aus bainitischem Gusseisen .....	450
7.4.2.3	Zahnräder aus AFP-Stählen.....	451
7.4.2.4	Zahnräder aus vergüteten Stählen und aus vergüteten Eisengusswerkstoffen .....	452
7.4.3	Werkstoffe für Zahnräder mit Randschichtverfestigung - Grundlagen .....	454
7.4.3.1	Randschichtgehärtete Zahnräder.....	454
7.4.3.2	Einsatzgehärtete Zahnräder .....	456
7.4.3.3	Carbonitrierte Zahnräder.....	466
7.4.3.4	Aufgestickte Zahnräder.....	466
7.4.3.5	Nitrierte/Nitrocarburierte Zahnräder .....	467
7.4.3.6	Borierte Zahnräder .....	471
7.4.3.7	Beschichtete Zahnräder.....	472
7.4.3.8	Zahnräder aus speziellen Eisenwerkstoffen .....	472
7.4.4	Festigkeitswerte für Zahnräder .....	473
7.4.4.1	Zahnräder aus unlegierten Stählen sowie Stahlguss und unlegierten Gusseisensorten .....	473
7.4.4.2	Zahnräder aus bainitischem Gusseisen .....	473
7.4.4.3	Zahnräder aus AFP-Stählen.....	474
7.4.4.4	Zahnräder aus vergüteten Stählen und vergüteten Eisengusswerkstoffen .....	474
7.4.4.5	Randschichtgehärtete Zahnräder.....	477
7.4.4.6	Einsatzgehärtete Zahnräder .....	480
7.4.4.7	Carbonitrierte Zahnräder .....	487
7.4.4.8	Aufgestickte Zahnräder.....	487
7.4.4.9	Nitrierte/Nitrocarburierte Zahnräder .....	488
7.4.4.10	Gesinterte Zahnräder .....	495
7.4.4.11	Zahnräder aus thermoplastischen Werkstoffen.....	497
7.4.5	Vergleich der Dauerfestigkeitswerte .....	497
7.4.6	Wöhlerlinien .....	501
7.4.7	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 7.4 .....	501

<b>8 Sicherung der Qualität von Stirnradverzahnungen</b> .....	503
8.1 Einführung .....	503
8.1.1 Normung .....	503
8.1.2 Toleranzsystem.....	503
8.1.3 Getriebe-Passsystem.....	506
8.2 Messtechnische Grundlagen .....	506
8.2.1 Grenzabweichungen, Grenzabmaße und Toleranzen.....	506
8.2.2 Istmaße und Istabweichungen .....	507
8.2.3 Bezogenheit von Messgrößen bzw. Messverfahren.....	507
8.2.4 Unsicherheit der Messergebnisse.....	508
8.3 Qualitätskenngrößen .....	509
8.3.1 Flankenabweichungen.....	509
8.3.1.1 Vorbemerkungen .....	509
8.3.1.2 Abweichungen des Stirnprofils .....	512
8.3.1.3 Abweichungen der Flankenlinie.....	514
8.3.1.4 Abweichungen der Erzeugenden.....	516
8.3.1.5 Fräsertalmessung .....	516
8.3.1.6 Abweichungen der Flankenfläche .....	517
8.3.1.7 Messung modifizierter Flanken.....	518
8.3.1.8 Schränkung .....	520
8.3.1.9 Welligkeit .....	521
8.3.1.10 Toleranzfeld (K-Diagramm) .....	522
8.3.2 Teilungsabweichungen.....	522
8.3.2.1 Kreisteilungsabweichungen .....	522
8.3.2.2 Eingriffsteilungsabweichung.....	524
8.3.3 Rundlaufabweichung.....	525
8.4 Passkenngrößen .....	525
8.4.1 Flankenspiel .....	525
8.4.2 Zahndicke.....	526
8.4.3 Zahndickenprüfmaße.....	527
8.4.3.1 Vorbemerkungen .....	527
8.4.3.2 Zahnweite .....	528
8.4.3.3 Radiale Prüfmaße für die Zahndicke.....	529
8.4.3.4 Sehnen .....	531
8.4.3.5 Zweiflankenwälz-Achsabstand.....	531
8.4.3.6 Kopfkreisdurchmesser bei überschnittenen Zylinderrädern .....	532
8.5 Wälzabweichungen .....	532
8.5.1 Vorbemerkungen .....	532
8.5.2 Einflanken-Wälzprüfung .....	532
8.5.3 Zweiflankenwälzprüfung .....	534
8.5.4 Abweichungen an Radpaaren im Getriebe.....	534
8.5.4.1 Achslageabweichungen des Radpaars .....	534
8.5.4.2 Wälzabweichung von Werkradpaaren.....	535
8.6 Tragbild .....	535
8.7 Rauheitsmessung .....	536
8.8 Geräusch.....	537
8.9 Einsatz von Verzahnungslehren .....	537
8.10 Symbole und Symbolerklärungen.....	537
<b>9 Zeichnungsangaben</b> .....	539
9.1 Überblick .....	539
9.2 Geometrische Angaben .....	539

9.3	Angaben zur Wärmebehandlung und zum Beschichten .....	543
9.3.1	Angaben zur Wärmebehandlung.....	543
9.3.2	Angaben zum Beschichten .....	547
9.3.2.1	Hartstoffbeschichten.....	550
9.3.2.2	Galvanisch aufgebrachte Schichten.....	550
9.3.2.3	Chemisch aufgebrachte Schichten.....	550
9.4	Symbole und Symbolerklärungen .....	550
<b>10</b>	<b>Fertigung von Stirnradverzahnungen.....</b>	<b>551</b>
10.1	Allgemeiner Fertigungsprozess für Stirnräder.....	551
10.2	Allgemeine Gliederung der Verfahren der Zahnformgebung.....	553
10.2.1	Verfahren der Zahnformgebung.....	553
10.2.2	Urformende Herstellung von Stirnrädern.....	554
10.2.3	Umformende und zerteilende Zahnformgebung .....	555
10.2.4	Spanende Zahnformgebung durch Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide.....	560
10.2.4.1	Technologische Grundlagen.....	560
10.2.4.2	Wälzhobeln.....	565
10.2.4.3	Wälzstoßen.....	566
10.2.4.4	Wälzschälen.....	569
10.2.4.5	Wälzfräsen.....	570
10.2.4.6	Profilfräsen.....	574
10.2.4.7	Wälzschaben.....	575
10.2.4.8	Profilräumen .....	577
10.2.5	Spanende Zahnformgebung durch Werkzeuge mit geometrisch unbestimmter Schneide .....	578
10.2.5.1	Technologische Grundlagen.....	578
10.2.5.2	Diskontinuierliches Wälzschleifen mit tellerförmigen Schleifkörpern .....	582
10.2.5.3	Diskontinuierliches Wälzschleifen mit Doppelkegel-Schleifkörper .....	583
10.2.5.4	Kontinuierliches Wälzschleifen .....	585
10.2.5.5	Diskontinuierliches Profilschleifen .....	587
10.2.5.6	Kontinuierliches Profilschleifen .....	589
10.2.5.7	Wälzponen.....	590
10.2.5.8	Wälzläppen.....	592
10.2.5.9	Gleitschleifen.....	593
10.2.6	Prüfen geschliffener Stirnräder auf Schädigung der Randzone .....	594
10.2.7	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 10.1 und 10.2.....	605
10.3	Wärmebehandlung.....	605
10.3.1	Fertigungsgerechte Wärmebehandlung.....	606
10.3.1.1	Normalglühen .....	607
10.3.1.2	Perlitisieren.....	608
10.3.1.3	Weichglühen.....	608
10.3.1.4	Spannungsarmglühen.....	609
10.3.2	Beanspruchungsgerechte Wärmebehandlung .....	609
10.3.2.1	Vergüten.....	610
10.3.2.2	Bainitisieren.....	613
10.3.2.3	Randschichthärtungen.....	614
10.3.2.4	Einsatzhärten .....	620
10.3.2.5	Carbonitrieren .....	631
10.3.2.6	Nitrieren/Nitrocarburieren .....	633
10.3.2.7	Borieren.....	639
10.3.2.8	Beschichten .....	639
10.3.3	Symbole und Symbolerklärungen zu Abschnitt 10.3 .....	645

<b>Anlagenverzeichnis .....</b>	646
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	710
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	742

# 1 Überblick, allgemeine Grundlagen

## 1.1 Entwicklung der Verzahnung

### 1.1.1 Entwicklung der Anwendung der Zahnräder/Zahnradgetriebe

Dieser einleitende Rückblick soll helfen, die heutigen Entwicklungen dieses Fachgebietes richtig einzuordnen und den dazu erforderlichen Abstand vom jetzigen „Tun und Treiben“ zu gewinnen. Die genialen Leistungen der großen Wissenschaftler, Techniker und Erfinder vergangener Jahrzehnte wecken auch auf diesem Gebiet Bewunderung und Ehrfurcht, aber auch Begeisterung für dieses reizvolle Gebiet der Technik, was für uns und künftige Generationen noch ausreichend zu lösende Probleme enthält. Ihr Herangehen, Mut und ihre Gedankentiefe sind uns Anregung und Beispiel technischer Leistungen.

Zur Geschichte des Getriebebaues und der Zahnräder gibt es Spezialliteratur, z. B. *G. Matschoss* [1/1] und *Graf. v. Seherr-Thoss* [1/2]. Hier soll und kann deshalb nur eine kurze Zusammenfassung auf der Basis dieser und anderer Werke erfolgen. Dazu zählt auch die Darstellung von *K. Kutzbach* „Grundlagen und neuere Fortschritte der Zahnradherzeugung“, die einen ausgezeichneten Einblick in die damalige Fertigungstechnik gibt (1925) [1/3]. Sie bietet noch heute viel Interessantes, auch Anregungen für aktuelle Probleme, obwohl sie bereits der Geschichte zuzuordnen ist.

Die genaue Geburtsstunde des Zahnrades lässt sich nicht angeben. Zahnradähnliche Gebilde, vor über 4000 Jahren als Schmuckstücke verwendet, legen Zeugnis von früh gefertigten Exemplaren ab. In dieser Zeit sollten diese vermutlich Sonnen darstellen. Symbolhaften Wert für den Maschinenbau besitzt das Zahnrad noch heute als Firmenlogo und Emblem von Vereinigungen.

Zu den ersten überlieferten Anwendungen zählt der *antike Instrumentenbau*. 1901 wurde bei einer griechischen Insel ein aus dem 1. Jahrhundert vor der Zeitrechnung stammendes Gerät gefunden [1/2].

Ab Ende des 13. Jahrhunderts kamen die Zahnräder zunächst durch den Bau von *Räderuhren* häufiger zur Anwendung. Ein derartiges Räderwerk zeigt Bild 1/1. Es ist das Uhrenwerk des Himmelsglobusses von *H. Diepel*, siehe auch [1/4].

Ein Wasserhebewerk beschrieb *Philon* 230 vor der Zeitrechnung und lieferte damit den Hinweis auf die Existenz von Zahnrädern. Aus späterer Zeit sind uns die großartigen Beschreibungen der Bergbaumaschinen von *G. Bauer*, genannt *Agricola*, dem Arzt, Bürgermeister (von Chemnitz) und Bergbaukundigen überliefert [1/5]. Bild 1/2 gibt einen Eindruck von der Verwendung derartiger Zahnräder bei der Wasserhebung (Entwässerung) im Bergbau mit Tretantrieb und Bild 1/3 zeigt die Förderung von Trinkwasser aus einem Brunnen durch Antrieb mittels Pferdekraft (Göpelantrieb).

Holz diente als Werkstoff für diese Zahnräder. Triebstockverzahnung und auswechselbare Zähne waren kennzeichnende Konstruktionsmerkmale. Bild 1/4 zeigt einen derartigen auswechselbaren Holzzahn im verschlissenen Zustand.

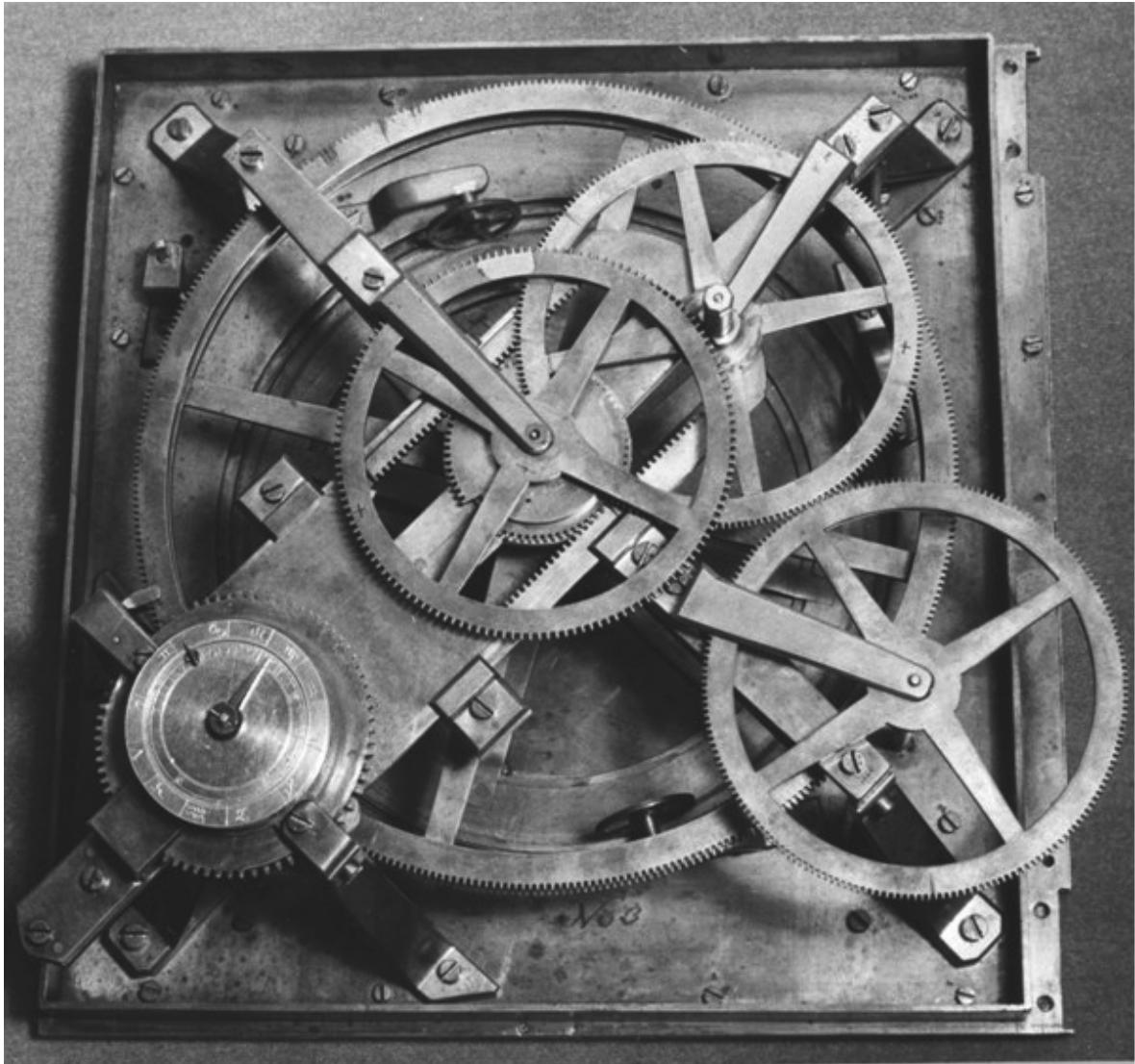


Bild 1/1 Planetenlaufwerk/Kalenderwerk des Himmelsglobusses von H. Diebel (um 1565), Mathematisch-Physikalischer Salon, Zwinger, Dresden

Beschreibungen von Wassermühlen sind von dem römischen Architekten und Baumeister *Marcus Vitruvius Pollio* aus seinem zwölfbändigen Werk um 24 v. u. Z. bekannt. Der Mühlenbau gab der weiteren Entwicklung der damaligen (Zahnrad-) Getriebetechnik starke Impulse. Die abgeleiteten Regeln waren natürlich empirisch und die Darstellung, z. T. für unser heutiges Empfinden sehr originell, wie die Textprobe (Bild 1/5) und der Ausschnitt (Bild 1/6) aus dem Buch des Professors für Mathematik an der Universität Frankfurt/Oder und Oberbaudirektors in Braunschweig, *L. Chr. Sturm* „Vollständige Mühlenbaukunst“ (1718, 1. Auflage) [1/8] zeigen. Den Wassermühlen, als den ältesten Kraftmaschinen, folgten seit dem 9. Jahrhundert die *Windmühlen*. Nachdem die Windkraft als überholt angesehen wurde, erlangten die Windkraftwerksanlagen im 20. Jahrhundert eine Wiedergeburt. Sie stellen hohe Anforderungen an den heutigen Getriebebau.

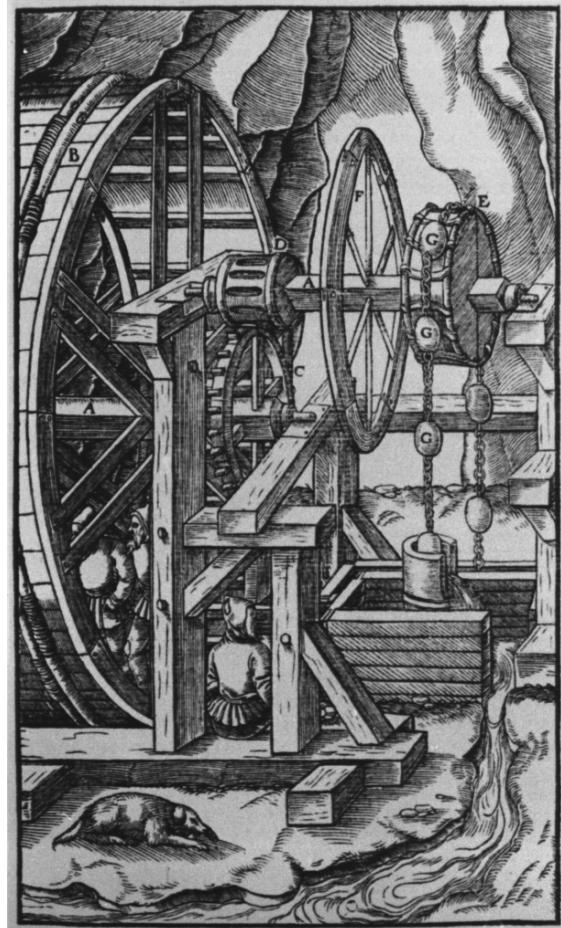


Bild 1/2 Wasserhebung mit Tretantrieb  
(Heinzenkunst), *G. Agricola*, 1556 [1/5], [1/6]



Bild 1/3 Wasserförderungsanlage mit Gopelantrieb;  
Brunnenanlage Augustusburg, Sachsen (etwa 1575)



Bild 1/4 Verschlissener Holzzahn eines  
Gopelantriebes

## Anhang/ Von Austheilung der Kamm-Räder und Getriebe.

**S**chon des berühmten Simon Stevins Sohn sehr ingenieuse Arten beschrieben / Kamm-Rad und Getriebe wohl in einander zu passen / und verdient es die Sache wohl / daß man es so genau suche als möglich ist. Aber alle seine Arten sind so beschaffen / wenn sie nicht eben mit so mathematischer Accuratezze ausgearbeitet werden / welches doch sich schwerlich thun lässt / daß denn dieselbe ärger stocken / als ganz gemein schlecht ausgearbeitete. Hier aber auf der XIV. Tab. wird ein schon vielfältig practicirter Modus gewiesen / der vollkommen gute Dienste thut / und von jedem gesuchten Müller oder Zimmermann mit dem Hobel leicht kan gemacht werden. Denn auf der Technik Banck gearbeitete Kämme und Stäbe sind nichts als eitel Sauerey. So ist nun in der 1. Fig. ein Stück von einem Getriebe vorgestellt / welches in ein Stück von einem Stern-Rad / und auf der andern Seite in ein Stück von einem Kamm-Rad eingreift.

Bild 1/5 Textprobe aus „Vollständige Mühlenbaukunst“, L. Chr. Sturm [1/8]



Bild 1/6 Zahnradpaarung, L. Chr. Sturm [1/8]

Bewundernswert vielseitig sind auch hier die Leistungen von *Leonardo da Vinci*. Seinen Vorschlägen folgend bauten die Holländer Windmühlen mit drehbarem Dach und wurden führend auf diesem Gebiet. Leonardo da Vinci schlug auch bereits eine Einrichtung zum Walzen von Stahl mit einem Rädervorgelege vor, die aber erst viel später gebaut werden konnte. Von ihm ist der Entwurf einer Feilenhaumaschine bekannt, die über ein Getriebe angetrieben wird. Entwürfe von Zahnradpaarungen sind erhalten, Bild 1/7 ([1/9]).

Bei *Hebezeugen* spielten Zahnräder sehr früh eine große Rolle. Bereits 250 v. u. Z. soll mit Hilfe der von Archimedes gebauten Zahnradwinde mit Schneckenantrieb ein großes Kriegsschiff während des Punischen Krieges mit wenigen Sklaven zu Wasser gebracht worden sein. Von Ramelli ist uns die Darstellung eines Flaschenzuges mit als Stirnrad- und Winkeltrieb ausgebildeten Zahnräder überliefert [1/10].

Die weitere Entwicklung des Werkzeugmaschinenbaus, vor allem die Erfindung der *Leitspindeldrehbank* durch *H. Maudsley* (1800), führte ebenfalls zu einem steigenden Bedarf an Zahnräden und deren erhöhten Genauigkeiten.

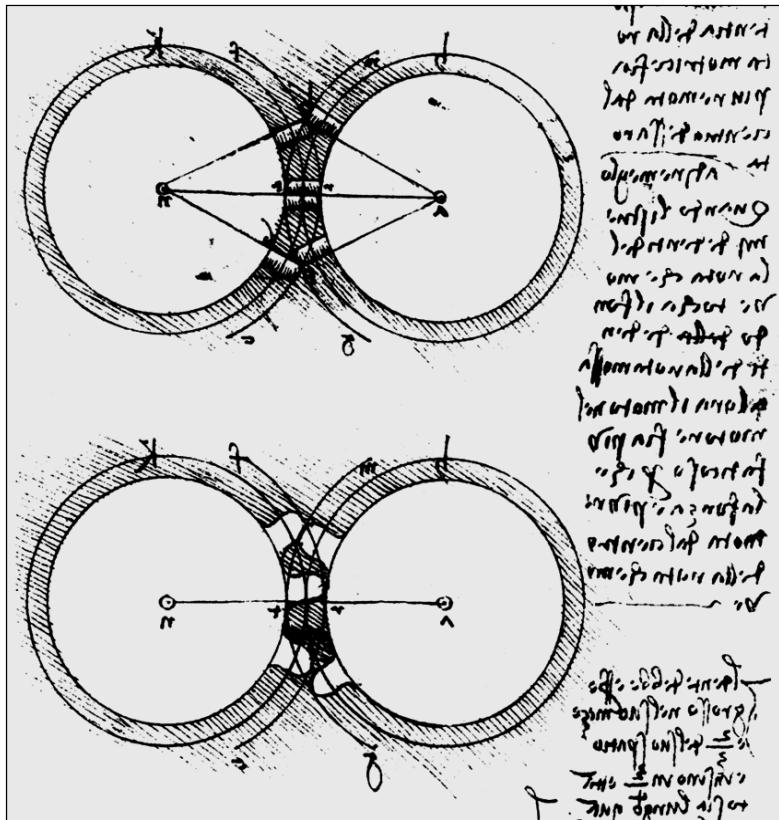


Bild 1/7 Stirnradpaar, Leonardo da Vinci (um 1500, Madrid Codex)

Durch die Entwicklung der Kraftmaschinen stiegen die zu übertragenden Leistungen und Drehmomente beträchtlich. J. Watt wählte 1782 das Umlaufgetriebe, um die hin- und hergehende Bewegung bei seiner Dampfmaschine in eine drehende zu verwandeln. Als Schiffsantrieb besaß die Dampfmaschine für die inzwischen auch erfundene Schiffsschraube eine viel zu kleine Drehzahl. Bei dem 1839 von I. K. Brunel gebauten Ozeandampfer „Great Western“ mit Schiffsschraube musste ein Getriebe zur Übersetzung ins Schnelle eingesetzt werden. Die umgekehrte Situation entstand, als gegen Ende des 19. Jahrhundert die Dampfturbine angewendet wurde. Ihre viel zu hohe Drehzahl musste durch ein Reduziergetriebe verringert werden.

Bekannt ist auch die Turbinenlokomotive von Krupp (1924 entwickelt von R. Lorenz), die bei  $6800 \text{ min}^{-1}$  eine Leistung von 2800 PS abgab. Durch ein Reduziergetriebe erfolgte eine Drehzahlherabsetzung auf  $n = 300$  bis  $400 \text{ min}^{-1}$ .

Die zunehmende Nutzung von *Elektromotoren* und *Verbrennungskolbenmotoren* (Otto, Diesel) erforderte schließlich eine immer breitere Anwendung und Entwicklung von Zahnradgetrieben, da bisher die wirtschaftlichste Lösung nur in Ausnahmefällen im Direktbetrieb besteht.

Während 1909 ein Schiffsturbogetriebe mit einer Leistung  $P = 6000 \text{ PS}$ , Drehzahl  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  und einer Übersetzung  $i = 5$  eine absolute Spitzenleistung darstellte (gebaut von Pittsburgher Westinghouse Machine Co.) werden heute als Höchstwerte Leistungen in der Größenordnung von  $P = 100000 \text{ kW}$  und Drehzahlen von  $n = 150000 \text{ min}^{-1}$  erreicht (Tab. 1/1).

Erstaunlich bleiben trotzdem auch aus jetziger Sicht viele Leistungen, z. B. das einstufige Stirnradgetriebe von E. Sykes (1921) mit  $i = 63$  ( $z_1 = 1, z_2 = 63$ ), das bei einer Drehzahl von  $n_1 = 1000 \text{ min}^{-1}$  eine Leistung von  $P = 10 \text{ PS}$  übertrug [1/2].

Tabelle 1/1 Erreichte Grenzwerte ausgeführter Getriebe

Getriebe	Leistung $P$ in kW		Max. Drehzahl		Wälzgeschwindigkeit $v$ in m/s		Übersetzung $i$		Wirkungsgrad (Stufe) $\eta$ in %		Volumen/Leistung		Gewicht/Leistung $\text{kg/kW}$
	normal	extrem	min <sup>1</sup>	normal	extrem	normal	extrem	normal	extrem	von	bis	dm <sup>3</sup> /kW	
Zahnrad-Getriebe	Stirnradgetriebe	2000	150000	150000	80	200	1...800	1000	97	99,5	0,5...0,2	2,0...0,1	
	Planetengetriebe	5000	35000	(20000)	80	100	3...13	(3...35) <sup>1)</sup>	98	99,5	0,4...0,15	1,0...0,2	
	Kegelradgetriebe	500	4000	50000	40	120	1...5	8	97	99	0,8...0,4	2,5...0,2	
	Hypoidgetriebe	300	1000	20000	30	50	4...8	1...50	50	<90	1,0...0,5	3,0...0,7	
	Kegelrad-Stirnrad-Getriebe	1000	3000							0,7...0,3	2,0...0,5		
	Schneckengetriebe	90 <sup>2)</sup>	1000 <sup>3)</sup>	300000 <sup>4)</sup>	25 <sup>4)</sup>	70	5...50	1...300	20 <sup>2)</sup>	97 <sup>2)</sup>	0,6...0,2	4,5...2,0	
	Reibradgetriebe	20	200	10000	25	50	1...6	10	90	98	20...2	80...8	
	Kettengetriebe	200	3000	10000	10	40	1...6	10	97	98	2...0,5	10...4	
Zugmittel-Getriebe	Flachriemengetriebe	150	3000	200000	60	120	1...5	20	96	98	4...0,5	6...1,5	
	Keilriemengetriebe	100	4000	6000	30	40	1...10	15	93	94	3...0,4	5...1	
Hydraulik-Getriebe	Zahnriemengetriebe	100	(400)	30000	40	70	1...10	12	96	98	1...0,25	4...1	
	Hydrostatische Getriebe	200	1000	10000 <sup>3)</sup>			...7		85	90		1,3...1,7	
	Hydrodynamische Getriebe	1000	10000	5000			1...5		85	90		0,5...1,5	

<sup>1)</sup> hoch übersetzend bis 10<sup>6</sup>,<sup>2)</sup>  $\eta$  fallend mit steigender Übersetzung,<sup>3)</sup> Antrieb,<sup>4)</sup> die serienmäßig hergestellten Getriebe haben im Allgemeinen kleinere Werte.

Die *Leistungselektronik* hat einige Getriebe verdrängt. Bei Werkzeugmaschinen stellt der durch den Motor verwirklichte stufenlose Antrieb mit der Verwendung des durch Frequenzumrichter gesteuerten Drehstrom-Asynchronmotors oder des geregelten Gleichstrommotors die moderne Lösung anstelle vorher verwendeter Schaltgetriebe dar. Auch die Wechselräder sind durch den „elektronischen Zwangslauf“ (elektronische Steuerung) entfallen.

Andererseits ist aber durch die Entwicklung der Technik der Bedarf an Zahnradgetrieben weiter stark gewachsen. Insbesondere dort, wo hohe Drehmomente auf ein anderes, meist niedrigeres Drehzahlniveau zu bringen sind, stellt die Kombination Motor-Getriebe die wirtschaftlichste Lösung dar. Bei Baggern, Kraftfahrzeugen, Schienenfahrzeugen, Kettenfahrzeugen, Schiffen und Turboanlagen wird somit auch künftig die Baugruppe Zahnradgetriebe eine große Bedeutung besitzen. Ihre richtige Auslegung und die Weiterentwicklung der Berechnungs- und Entwurfsmethoden fordern auch künftig die Ingenieure in ihrem Können. Die Informatik stellt dabei eine neue Qualität in den verfügbaren Hilfsmitteln dar.

### 1.1.2 Entwicklung der Verzahnungsgeometrie

Nach und neben der Entwicklung der Grundlagen der Bewegungslehre u. a. durch *Chr. Huygens* (1633 bis 1673; Begriff Evolute und Evolente), *G. W. v. Leibniz* (1646 bis 1716; Entstehung der Evolente), *J. Bernoulli* (1667 bis 1748; Momentanachse), *L. Euler* und *I. B. D'Alembert* (1707 bis 1783 bzw. 1717 bis 1783; Sätze zur Kinematik) bildete sich die Verzahnungslehre heraus. Als Begründer der *wissenschaftlichen Verzahnungslehre* gilt *Ph. de La Hire* (1640 bis 1718; 1695: „*Traite de Mecanique*“) [1/2]. Er entwickelte als erster eine Verzahnung mit konstanter Übersetzung nach einem Regelwerk. Für eine gegebene Zahnflanke gab er den Weg zur Ermittlung der Gegenflanke an. Er erwähnte auch bereits die Erzeugbarkeit durch Rollkurven.

Von *Ch.-E.-L. Camus* (1699 bis 1768) wurde die Rollkurve zur Erzeugung einer Paarverzahnung angewandt. Er entdeckte auch das Gleiten in Zahnflanken als Ursache der Reibung und des Verschleißes.

Die Evolente als Zahnform wurde zuerst von *L. Euler* behandelt (ab 1752). Er bewies, dass die Wälzbewegung von Zahnflanken eine Überlagerung von Gleit- und Rollbewegungen ist, leitete Regeln zur Ausführung der Verzahnungen ab, entwickelte zeichnerische Verfahren und gab eine Gleichung zur Bestimmung der Entfernung des Krümmungsmittelpunktes der beim Abrollen erzeugten Kurve vom Wälzpunkt an. Diese Gleichung ist entsprechend ihren Erfindern *L. Euler* und *F. Savary*, der sie 1845 noch einmal ableitete, unter dem Namen *Euler-Savarysche Gleichung* in der Kinematik bekannt (siehe auch Abschnitt 2.3.2.2).

Trotz dieser beachtlichen Leistungen blieb die praktische Ausführung der Verzahnungen noch lange tief in Empirie versunken. Der vorhandene theoretische Schatz musste erst gehoben werden. Neben anderen großen Technikern, leisteten *R. Willis* (1800 bis 1875) und *K. Kutzbach* (1875 bis 1942) auf dem Gebiet Hervorragendes.

Eine Verbesserung der Verzahnungsgeometrie wurde durch die notwendige Verwendung des Werkstoffes „Metall“ bei den neu entwickelten Kraftmaschinen, wie Dampfmaschine, Dampfturbine, Verbrennungskolbenmotor, Elektromotor, unumgänglich. Mit dem festeren Werkstoff war ein Einlaufen in dem bisher im Mühlenbau bekannten Maße nicht mehr möglich.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts setzte sich die *Evolventenverzahnung* durch. Entscheidend waren die fertigungstechnischen Vorteile wie Unempfindlichkeit gegen Achsabstandsänderungen und Möglichkeiten der Profilverschiebung.

Diese Vorteile wurden frühzeitig u. a. von *R. Willis*<sup>1)</sup>, *J. L. Weißbach*<sup>2)</sup>, *F. Redtenbacher*<sup>3)</sup>, *C. v. Bach*<sup>4)</sup>, *G. B. Grant*<sup>5)</sup> und *J. R. Brown*<sup>6)</sup> erkannt (siehe auch Tabelle 1/2).

*J. Weißbach* vertrat z. B. bereits 1851 [1/27] die Ansicht: „Die Evolventenverzahnung ist jedenfalls die vollkommenste aller Zahnradkonstruktionen“.

Die *Zahnradberechnung* erhielt entscheidende Impulse durch *M. Föllmer* (1873 bis 1941). Er legte den Grundstein für die weitverbreitete Theorie, die vor allem durch *K. Kutzbach*, Professor an der Technischen Hochschule Dresden, weiterentwickelt wurde.

In den USA war es Professor *E. Buckingham* (geb. 1887), der für die Verbreitung moderner Berechnungsmethoden sorgte. Er führte die Bezeichnung  $\text{inv } \alpha$  ein ( $\text{inv } \alpha = \tan \alpha - \alpha$ ).

*Kutzbach* fasste den Stand der *Zahnradherstellung* von 1925 in „Grundlagen und neuere Fortschritte der Zahnradherzeugung“ zusammen [1/3]. Die geschichtliche Entwicklung des Wälzverfahrens ist ebenfalls in einer anderen Arbeit von *Kutzbach* wiedergegeben [1/15]. Ältere Probleme der Zahnradfertigung zeigt u. a. eine Veröffentlichung von *H. Fischer* „Das Erzeugen der Zahnform für Räder“; (VDI-Zeitschrift 1898, Seite 11 bis 16) und von *T. Ritterhaus* (VDI-Zeitschrift 1898, Seite 165 bis 166).

*Kutzbach* schaffte Klarheit in den Bezeichnungen und entwarf eine Berechnungsvorschrift für *profilverschobene Verzahnungen* (DIN 870, 1931). Dabei wurde der Unterschied zwischen der Profilverschiebungssumme  $(x_1 + x_2) \cdot m$  und der Achsabstandsänderung  $(a - a_d)$  durch eine Näherungsbeziehung erfasst.

Ergänzende Angaben zur Entwicklung der Verzahnungsgeometrie enthält Tab. 1/2.

Der 1917 gegründete *Deutsche Normenausschuss* förderte in seiner folgenden Arbeit die erforderliche Vereinheitlichung, Verbreitung und Anwendung neuer Methoden entscheidend. Es sei hierzu DIN 780 (Modulreihe; 1923), DIN 867 (Zahnform für Stirnräder und Kegelräder/Bezugsprofil,  $\alpha = 20^\circ$ , 1927; siehe Bild 1/8), DIN 868 (Zahnräder, Begriffe, Bezeichnungen, Kurzzeichen; 1928) und DIN 870 (Profilverschiebung bei Evolventenverzahnung; 1931) genannt.

Die Entwicklung war aber keineswegs abgeschlossen. *M. Bergsträsser* bearbeitete die Evolventen-geometrie neu und riet 1952 davon ab, weiterhin die Näherungsgleichungen nach DIN 870 zu benutzen. Er gab exakte Gleichungen auf der Basis der Evolventenfunktionen an. In der Folgezeit setzten sich die direkten Beziehungen zwischen Betriebseingriffswinkel und Summe der Profilverschiebungsfaktoren vollständig durch (siehe Abschnitt 2.1.2 und 2.2.3). Profilverschiebung wurde zunehmend zur günstigen Beeinflussung der Beanspruchung eingesetzt.

Um diese Untersuchung nicht dem mit „vielen“ Dingen beschäftigten Konstrukteur zu überlassen, wurden Richtlinien sowohl für die Wahl der Summe der Profilverschiebungsfaktoren als auch für deren Aufteilung geschaffen, was in DIN 3992 (Profilverschiebung bei Stirnrädern mit Außenverzahnung) Ausdruck fand. Aufgrund der z. Z. neu geschaffenen Grundlagen zur genaueren Tragfähigkeitsberechnung von Verzahnungen ist die Zeit für eine Überprüfung und eventuellen Neufassung dieser Richtlinien gekommen.

Ein bedeutendes Problem stellte auch die Festlegung der zulässigen geometrischen Abweichungen (das Toleranzsystem) dar. Nachdem bereits in einigen Firmen interne Vorschriften bestanden, begannen 1936 unter der Leitung von Professor *O. Kienzle* (an der TH Berlin) systematische Untersuchungen. Einbezogen in die Problematik waren auch Professor *G. Berndt* (TH Dresden) und *Dr. Bürger* (Physikalische Technische Reichsanstalt Berlin-Charlottenburg).

<sup>1)</sup> Willis; 1800 bis 1875; Prof. in Cambridge

<sup>2)</sup> Weißbach; 1806 bis 1871; Prof. für Mathematik und Mechanik an der Bergakademie in Freiberg

<sup>3)</sup> Redtenbacher; 1809 bis 1863; Prof. in Karlsruhe

<sup>4)</sup> v. Bach; 1847 bis 1931; Prof. in Stuttgart

<sup>5)</sup> Grant; 1849 bis 1917; USA, Begründer der amerik. Zahnradmaschinenindustrie

<sup>6)</sup> Brown; 1810 bis 1876; USA, Werkzeughersteller

Tabelle 1/2 Entwicklungen der Zahnradgeometrie von Beginn des 19. Jahrhunderts bis zum Beginn der Normenarbeit in Deutschland (Auswahl)

Buchanan, Robert (Engl. Ingenieur; 1770 bis 1816)	<ul style="list-style-type: none"> <li>entwickelte die Lehre von Camus für den Maschinenbau weiter; formulierte einen Vorläufer des Verzahnungsgesetzes (1808)</li> </ul>
White, James (Engl. Techniker)	<ul style="list-style-type: none"> <li>erfand die Doppelschräg- bzw. Pfeilverzahnung</li> <li>Patentanmeldung für Schrägverzahnung (1808)</li> </ul> <p>Anmerkung: Die Idee zur Schrägverzahnung erhielt J. White von stufenartig (nur eine halbe Teilung) gegeneinander versetzten Zahnhälften</p>
Hawkins, John Isaac (Engl. Arzt und Ingenieur; 1772 bis 1865)	<ul style="list-style-type: none"> <li>erkannte (1837) die Unempfindlichkeit der Evolventenverzahnung gegen Achsabstandsänderung</li> <li>Mehrfacheingriff und damit Belastungsteilung</li> <li>Vorteile der Evolventenzähne im Gleiten gegenüber Epizykloiden</li> </ul>
Willis, Robert (Englischer Wissenschaftler; Professor in Cambridge; 1800 bis 1875)	<ul style="list-style-type: none"> <li>praktisch anwendbare Verzahnungslehre (1841); Grundlegende Definitionen (diametral &amp; circular pitch, Flankenspiel, Eingriffswinkel)</li> <li>Satzräder („set of wheels“)</li> <li>konstanter Eingriffswinkel der Satzräder (<math>15^\circ</math> vorgeschlagen)</li> <li>Vorteile der Evolventenverzahnung vorausgesagt</li> </ul>
Saxton, Joseph (USA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>(etwa 1840) erste Zahnradfräsmaschine nach dem Wälzverfahren</li> </ul>
Reuleaux, Franz (Deutscher Wissenschaftler/Kinematiker; Professor in Zürich und Berlin; 1829 bis 1905)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verfahren zur Konstruktion der Gegenflanke bei gegebener Flanke auf Grund der Bewegungsgesetze (1865)</li> <li>genauere Definition der „Eingriffslinie“</li> <li>bevorzugt Evolventenverzahnung (1862)</li> </ul>
Sang, Edward (Schottischer Wissenschaftler; 1805 bis 1891)	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Eine Zahnstange ist ein Zahnrad von unendlichem Radius“ (1852)</li> </ul>
Wiebe, Carl Hermann (Deutscher Wissenschaftler, Professor in Berlin; 1818 bis 1881)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Präzisierung des Grundgesetzes der Verzahnung (Evolventenverzahnung): Normale, Berührungspunkte, Tangente, Krafrichtung (1861)</li> </ul>
Plücker, Julius (Deutscher Professor der Mathematik und Physik in Bonn; 1801 bis 1868)	<ul style="list-style-type: none"> <li>begründete die Schraubentheorie (Theorie der Schrägverzahnung, Schnecken- und räumlicher Verzahnungen) (1868)</li> </ul>
Saalschütz, Luis (Deutscher Dozent für Mathematik und Mechanik in Königsberg)	<ul style="list-style-type: none"> <li>gab erste deutschsprachige Spezialschrift „Zur Theorie der Evolventenverzahnung“ (Königsberg; 1870) heraus; Verzahnungsgesetz und Eigenschaften der Evolventenverzahnung</li> </ul>
Pfauter, Hermann (Deutscher Ingenieur; 1854 bis 1914)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfundung des allgemeinen Schraubwälzverfahrens (Chemnitz; 1897)</li> </ul>
Schiebel, Adalbert (Professor für Maschinenelemente in Prag; 1872 bis 1931)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definition des Sprunges bei Schrägverzahnung (Sprungüberdeckung) (1913)</li> <li>detaillierte Angaben zum Zahnereibungsverlust (1913)</li> <li>Wertetabelle für Evolventenfunktion (1922)</li> </ul>
Lasche, Oscar (Deutscher Ingenieur; 1868 bis 1923)	<ul style="list-style-type: none"> <li>korrigierte Verzahnung durch Änderung der Zahnhöhen bei konstanter Aufteilung der Teilkreisteilung auf die Zahndicken (1899) (spätere AEG-Verzahnung)</li> </ul>
Maag, Max (Schweizer Ing.; 1883 bis 1960)	<ul style="list-style-type: none"> <li>kombinierte Anwendung von Profilverschiebung und Eingriffswinkeländerung (1908)</li> <li>Anwendung (erste oder eine der ersten) der Evolventenfunktion (1908)</li> </ul>
Förlmer, Max (Deutscher Ingenieur; 1873 bis 1941)	<ul style="list-style-type: none"> <li>weitere Einführung der Evolventenfunktion</li> <li>breite Anwendung der Profilverschiebung bei konstantem Werkzeug (Wälzfräsen. Begriffe: Vau-Rad, Vau-Getriebe ... (1919))</li> <li>Klärung der Fragen zur Vermeidung von Unterschnitt (1919)</li> </ul>

Für Zahnräder der Feinwerktechnik entstand bereits 1942 ein Toleranzsystem, welches auch auf den Maschinenbau ausgedehnt wurde. 1952 erfolgte dann die Herausgabe von DIN 3962 (Toleranzen für Stirnradverzahnungen nach DIN 867, zulässige Einzelfehler) und 1953 DIN 3963 (Toleranzen für Stirnradverzahnungen nach DIN 867, zulässige Flankenrichtungsfehler, zulässige Sammelfehler, Zahndickenabmaße). Diese Normungsarbeiten sind vor allem mit dem Namen *A. Budnick* verbunden [1/13].

Bei den weiterführenden Arbeiten, z. B. DIN 3961 (1978) und im RGW (ST RGW 641; 1977) unterschied man grundsätzlich zwischen Qualitäts- und Passsystem [1/20]. Die Qualitätskenngrößen sind Funktionsgruppen (bei ST RGW 641: „Kinematische Genauigkeit“, „Laufgleichmäßigkeit“, „Flankenberührungs“) zugeordnet. Führend bei diesen Arbeiten im RGW war *B. A. Taiz* (Moskau). Wesentliche Aktivitäten gingen auch von *H. Weinhold* (Magdeburg) und *W. Krause* (Dresden) aus.

Bei den kontinuierlich laufenden Arbeiten für ISO und nachfolgend für DIN zu den Verzahnungstoleranzen, Tragfähigkeiten und anderen Empfehlungen geht es u. a. um genauere und zusätzliche Angaben, die Präzisierung des Geltungsbereiches, eine Korrektur verschiedener Zahlenwerte und um eine feinere Stufung.

Bis zur Gegenwart werden auch Evolventenverzahnungen mit nicht standardisiertem *Bezugsprofil* verwendet. Zunächst war dieses durch noch vorhandene Werkzeuge begründet. Somit bestanden vor allem die  $15^\circ$ - und  $14,5^\circ$ -Verzahnung zunächst weiter. Zugunsten eines geringeren Geräusches bzw. größerer Tragfähigkeit und geringerer Verluste werden Bezugsprofile mit  $\alpha \neq 20^\circ$  (z. B.  $\alpha = 15^\circ$ ,  $17,5^\circ$  bzw.  $28^\circ$ ) verwendet, insbesondere bei Hochverzahnungen mit vergrößerter Zahnhöhe und  $\alpha = 15$  oder  $17,5^\circ$ . Ziel der Verwendung von Profilen mit  $\alpha < 20^\circ$  sind Profilüberdeckungen  $\epsilon_\alpha \approx 2$  zugunsten eines geringeren Getriebegeräusches, z. B. bei Kraftfahrzeugen.

Bezugsprofile mit  $\alpha > 20^\circ$  finden auch bis in die Gegenwart Verwendung, wenn die Zahnfuß- und die Zahnflankenbeanspruchung maßgebend sind. Durch kleinere Zahnhöhen sind bei  $\alpha \gg 20^\circ$  insbesondere bei Schrägverzahnungen wesentlich kleinere Verluste erreichbar. Durch Verzahnungen mit unsymmetrischem Profil ergeben sich weitere Tragfähigkeitssteigerungen.

Schließlich erzeugen Protuberanzwerkzeuge, die zur Vermeidung von Schleifabsätzen eingesetzt werden, ebenfalls vom Normal-Bezugsprofil (DIN 867) abweichende Endkonturen im Zahnfußbereich (Restunterwühlung, vergrößerte Zahnfüßtiefe) und ergeben mit besonderen, elliptischen Zahnfußübergangskurven und Kugelstrahlen die größten Fußtragfähigkeiten. Die Bestrebungen, die Verzahnungsdaten möglichst optimal festzulegen, führten zu *evolventischen Sonderverzahnungen* und Empfehlungen zur Profilverschiebung. Es wurde versucht, im großen Bereich der Möglichkeiten Klarheit zu schaffen. Hier sei vor allem für die historisch bedeutsamen Arbeiten *H. Winter* genannt, der in den 50er Jahren wesentliche Verzahnungssysteme untersuchte [1/11]. Die Bemühungen durch *nicht-evolventische Verzahnungen* die bisher erreichbaren Tragfähigkeiten zu übertreffen, führten nicht zum Erfolg. Allerdings ergeben die Profilmodyifikationen z. T. einen wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit und stellen eigentlich bereits nicht-evolventische Verzahnungen dar, allerdings mit relativ kleinen, in der Größenordnung der Zahnverformung liegenden Abweichungen zur Evolvente.

In die Betrachtungen wurde die Innenverzahnung meist nicht einbezogen. Durch die Einführung einer negativen Zähnezahl gehen aber nahezu sämtliche Gleichungen für die Außenverzahnung automatisch in die bisher für Innenverzahnung verwendeten Gleichungen über (DIN 3993, geometrische Auslegung von zylindrischen Innenradpaaren). Zu den Besonderheiten der Innengetriebe zählen jedoch die verschiedenartigen Interferenzerscheinungen, die insbesondere bei kleinen Zähnezahldifferenzen auftreten. Zusammenfassend liegen hierzu die Untersuchungen von *G. Schreier* [4] und aus späterer Zeit DIN 3993 vor. Die neueren Untersuchungen zur räumlichen Verzahnungsgeometrie auf mathematischer Grundlage stammen u. a. von *F. L. Litvin* [13].

Um die Entwicklung der Technik gezielt, rasch und mit gesetzlichem Charakter zu fördern, wurden in der DDR (seit etwa 1949) eigene Normen bzw. Standards unter dem Symbol TGL ... herausgegeben (bis 1956 Abkürzung für „Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen“, ab 1956 allgemeines Symbol für Normen/Standards).

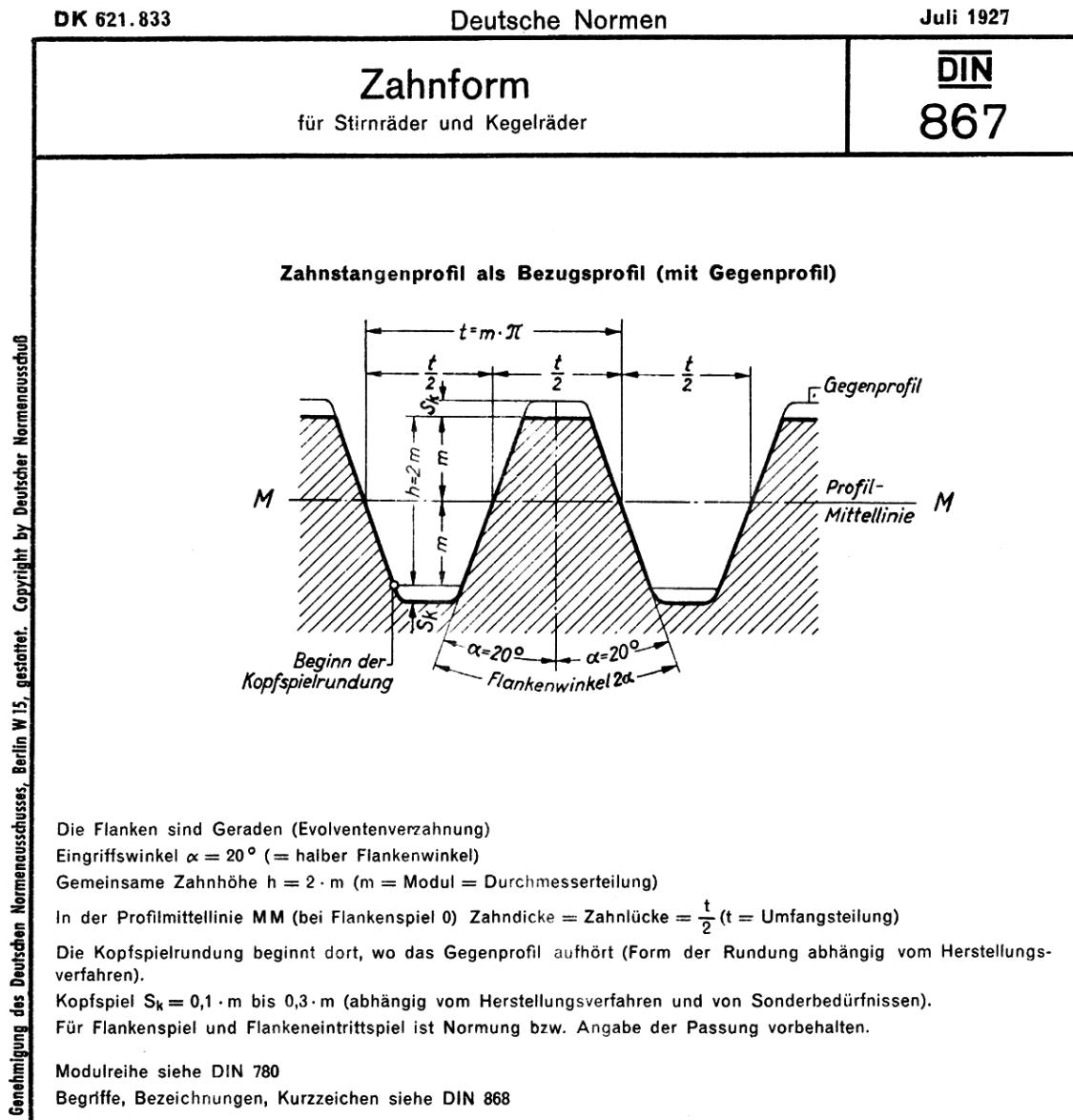


Bild 1/8 Zahnform für Stirnräder und Kegelräder nach der ursprünglichen Fassung der Norm DIN 867 von 1927 (Abdruck erfolgte mit freundlicher Genehmigung des DIN)

1962 beschloss die XVI. Tagung des RGW (ehemaliger „Rat für gegenseitige Wirtschaftshilfe“) die Bildung einer Ständigen Kommission des Rates für Standardisierung (SKS) mit dem Sitz in Berlin und die Bildung eines Institutes des Rates für Standardisierung in Moskau. Diese Gremien überarbeiteten und vereinheitlichten für den RGW-Bereich auch nahezu sämtliche Verzahnungsstandards, die bis etwa 1990 Wirksamkeit besaßen. Das Symbol für diese Standards war *ST RGW* ... und für die darauf aufbauenden Standards der DDR *TGL RGW* ....

1988 wurde die DDR ein Mitglied der 1946 gegründeten *ISO*, die aus der 1926 gebildeten *ISA* hervorging, und begann ebenfalls im TC 60 von ISO mitzuarbeiten (Technisches Komitee; Zahnräder/Zahnradgetriebe). Mit der erneuten Hinwendung zu DIN ab 1989 wurde einer historischen Entwicklung und wirtschaftlichen Notwendigkeit entsprochen. Einen Überblick zu Normen enthält Anlage 17.1.

Nicht-evolventische Verzahnungen werden heute nur noch in Ausnahmefällen verwendet. Bekannt sind die *Zykloidenverzahnung* und ihre Sonderformen (Cyclo-Getriebe, VBB-Verzahnung [2]), die *Kreisbogenverzahnung* (Uhren), die *Triebstockverzahnung* (große Drehkränze, Hebezeuge) und ebenfalls aus Kreisbögen gebildet, die *Wildhaber-Novikov-Verzahnung* (in der UdSSR im Getriebebau serienmäßig angewendet) und die *Sym-Marc-Verzahnung* (in Japan ausgeführt) [2].

### 1.1.3 Entwicklung der Tragfähigkeitsberechnung

#### 1.1.3.1 Zahnfußbeanspruchung

In früherer Zeit existierten zunächst „*Rezepte*“. Sie waren durch Erfahrung begründet und führten auch meist zu brauchbaren Konstruktionen, wenn die verwendeten Materialien (Werkstoffe), die Drehzahl- und Drehmomentbereiche beibehalten wurden. Als Beispiel soll *R. Buchanan* (siehe [1/2], Seite 262) genannt werden, der für Räder von Wassermühlen noch 1808 die Regel angibt „*Man mache die Zähne so viel Zoll breit, als die Zahl der Pferdestärken beträgt, der sie Widerstand leisten sollen*“.

Eine der ersten rechnerischen Regeln zur Ermittlung der Zahnabmessungen aufgrund der *Biegebeanspruchung* stammt von den Leidener Naturforscher *P. van Muschenbroek* (1692 bis 1761). Er stellte 1729 eine Gleichung für die relative „Festigkeit“ des Materials auf:

$$Q = m \frac{BH^2}{L} \quad (1/1)$$

$Q$	Last	$H$ Dicke
$L$	Länge	$m$ Werkstoffkonstante
$B$	Breite	

Sehr früh ging der Engländer *Th. Tredgold* von dem sehr wesentlichen Einfluss der *Breitenlastverteilung* aus. 1822 veröffentlichte er eine Beziehung für die Zahndicke, die er unter der Annahme ableitete, dass infolge von Abweichungen oder eines Fremdkörpers die gesamte Zahnkraft auf der äußersten Zahnecke wirkt (Bild 1/9).

Er erhielt eine Beziehung, die sich besonders für gusseiserne Räder lange bewährte:

$$d = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{H}{v}} \quad (1/2)$$

$d$	Zahndicke (in Zoll)
$v$	Teilkreisgeschwindigkeit (Fuß/Sekunde)
$H$	Leistung (Pferdestärke)

Von ähnlichen Annahmen gingen später auch *C. v. Bach* (Bild 1/10, [1/30]) und *F. Grashof* (Textprobe in Bild 1/11 [1/29]) aus. Als Abnutzungsgrenze setzte *Tredgold* ein Drittel der Zahndicke.

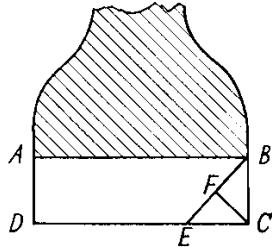


Bild 1/9 Annahme der Zahnbelaetzung durch *Tredgold* (1822), nach [1/2]

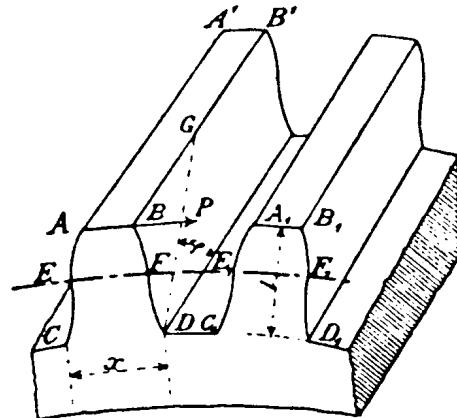


Bild 1/10 Annahme der Zahnbelaetzung analog *Tredgold* durch *C. v. Bach* [1/30]

### F. Grashof

Lebrigens kann sich bei ungenauer Lagerung der Wellen, mangelhafter Ausfuhrung der Räder oder beim Dazwischenkommen eines kleinen Körpers der noch ungünstigere Fall ereignen, dass der Druck sich an einer Zahnecke concentriert und dieselbe abzubrechen droht, am wahrscheinlichsten in einer Bruchfläche, welche unter  $45^\circ$  gegen die Stirnfläche des Zahnes geneigt ist. Diesem Fall entspricht die Maximalspannung

Bild 1/11 *Grashof* zur Annahme des Kraftangriffs (Textprobe aus [1/29])

Für die Festigkeitswerte formulierte *F. Releaux* 1869 in heutiger Schreibweise

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{K}{\sqrt[3]{v}} \quad (1/3)$$

$\sigma_{\text{zul}}$  zulässige Spannung,  $K$  Konstante,  $v$  Umfangsgeschwindigkeit

Er erkannte auch als erster, dass es zweckmäßig ist, mit einem Breitenverhältnis  $b/t$  zu rechnen ( $b$  Zahnbreite,  $t$  Zahnteilung).

Sehr wesentlich beeinflusste die praktische Berechnung der wegen seiner Verdienste für den Maschinenbau geadelte *C. v. Bach*. Er ging zunächst vom gleichen Ansatz wie *Tredgold* aus, brachte die Beziehung aber schließlich in die bekannte Form

$$P = kbt \quad (1/4)$$

$P$  Zahnkraft  $t$  Teilung  
 $k$  Belastungszahl  $b$  Zahnbreite

Zur Berücksichtigung der *Abnutzung* der Zähne empfiehlt Bach die gleiche Beziehung (1/4), die für den Verschleiß vor ihm von *W. A. H. v. Kankelwitz* aufgestellt wurde [1/16]. Gl. (1/4) gab Bach eigentlich nur für Gussräder an und empfahl für die Belastungszahl  $k$  drehzahlabhängige Werte (Verschleiß).

Die Einfachheit der Gl. (1/4) und die Erfassung von zwei unterschiedlichen Schadensarten (Zahnbruch, Verschleiß) war dem Praktiker angenehm, wirkte aber durch Verdeckung des physikalischen Gehaltes erschwerend für die Weiterentwicklung.

Nachdem *O. Lasche*, angeregt durch die steigenden Anforderungen der Elektromotorenindustrie, den Fall des ungünstigen Breitentragens nach *Tredgold* für genaue Ausführungen einen Fall Lastangriff am Zahnkopf bei gleichmäßiger Lastverteilung hinzugefügt hatte (1899), entwickelte *Karl Kutzbach* die Berechnung weiter. Er setzte neben Kraftangriff am Zahnkopf und gleichmäßiges Breitentragen ausreichende Zahnfußrundungen voraus (Bild 1/12).

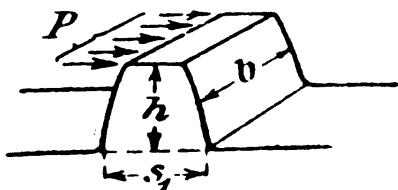


Bild 1/12 Annahme der Zahnbelastung nach *Kutzbach* (Hütte, 24. Ausgabe, 1923)

Massenkräfte berücksichtigte er ebenfalls durch Beiwerte im Festigkeitswert (1923). Normalerweise empfiehlt er auch  $b = 2t$  ( $b$  Zahnbreite,  $t$  Zahnteilung).

*M. ten Bosch* von der ETH Zürich wies darauf hin, dass infolge der Profilüberdeckung die volle Zahnkraft nicht am Zahnkopf angreift, empfiehlt aber noch lange, da Teil- und Profilfehler auftreten, aus Sicherheitsgründen mit Kopfangriff zu rechnen. Er berücksichtigte die Biege- und Druckspannung [1/28].

Sehr nachhaltig wurde die Zahnfußtragfähigkeitsberechnung von dem US-Amerikaner *C. Lewis* beeinflusst.

Er ermittelte 1892 den Zahnfußquerschnitt für die Berechnung der Zahnfußbeanspruchung, indem er eine Parabel gleicher Festigkeit (bekannt seit 1638 durch *Galileo Galilei*) in den Zahn legte (Bild 1/13). Da er von physikalischen Überlegungen ausging, wirkte seine Methode überzeugend und fand weitverbreitet lange Anwendung.

Der Engländer *H. E. Merrit* wies ebenfalls darauf hin, dass die volle Zahnkraft infolge der Profilüberdeckung nicht am Zahnkopf angreift und legte als Angriffspunkt entsprechend der jetzigen Berechnung den äußeren Einzeleingriffspunkt fest.

Die Ermittlung des Zahnfußquerschnittes mit Hilfe der Lewis-Parabel ersetzte *H. Hofer* [1/17] durch eine  $30^\circ$ -Tangente an die Zahnfußkurve (Bild 1/14). Obwohl von rein physikalischen Überlegungen im Ansatz abgewichen wurde, erwies sich diese Annahme im Rahmen der übrigen Voraussetzungen als noch zulässig und ermöglichte die Beurteilung grundsätzlicher Einflüsse. Es ergab sich daraus die Schlussfolgerung, dass durch Profilverschiebung hinsichtlich der Zahnfußbeanspruchung eine wesentliche Tragfähigkeitssteigerung möglich ist und deshalb bei  $z = 10$  bis 30 nur profilverschobene Verzahnungen verwendet werden sollten. Dieses erwies sich später in der erhofften Größe bei Ermüdungsbeanspruchung als nicht zutreffend.

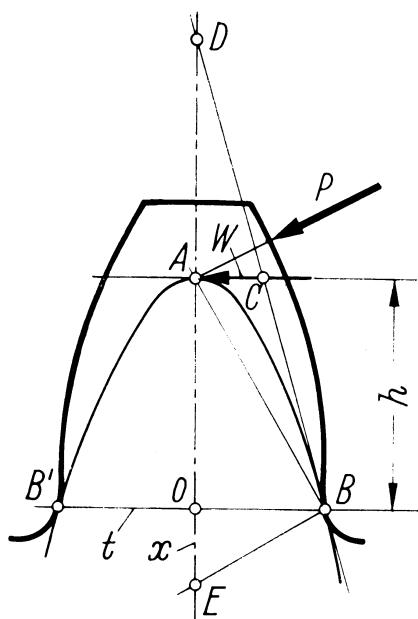


Bild 1/13 Annahme zur Berechnung der Zahnfußbeanspruchung nach *Lewis* (1892); Parabel gleicher Festigkeit (nach [1/2])

Bereits 1925 bestimmte der Schweizer Ingenieur *V. Baud* als erster die *Kerbwirkung* spannungsoptisch. Seine Ergebnisse wurden 1926 von *St. Timoschenko* ausgewertet. Er führte einen relative Spannungskonzentrationsfaktor ein. In heutiger Schreibweise würde dieser lauten:

$$Y_{S\text{ rel}} = \frac{1,6}{Y_S} \quad (1/5)$$

$$Y_S = 1 + \frac{0,15 s_{Fn}}{q_{Fn}} \quad (1/6)$$

Obwohl Ergebnisse zum Kerbeinfluss seit 1925 vorlagen und auf einen wesentlichen Einfluss hindeuteten, die amerikanische Norm 1946 zur Tragfähigkeitsberechnung den Kerbeinfluss aufnahm (*Dolan und Broghamer*), blieb in Deutschland und vielen Ländern die Änderung der Kerbwirkung noch lange Zeit unberücksichtigt.

Da die Kerbwirkung vom Schubspannungsanteil abhängt, konnte man insbesondere bei Pulsatorversuchen auch eine Hebelarmabhängigkeit der ertragenen Nennspannung beobachten.

*G. Niemann* und *H. Glaubitz* versuchten diesem zu entsprechen, indem sie eine Vergleichsnennspannung aus Biege-, Druck- und (mittlerer) Schubspannung berücksichtigten und den Beiwert zur Erfassung der Schubspannung mit  $a = 2,5$  einführten (Bild 1/15 und Gl. (1/7)) [1/18]. Damit sollte die ertragbare Spannung unabhängig vom Hebelarm sein. Sie stellten die Beziehung auf

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_b - \sigma_d)^2 + (a\tau)^2} \quad \text{mit } a = 2,5 \quad (1/7)$$

Nachdem bei der Berechnung von Wellen und stabförmigen Gebilden die Kerbspannungslehre längst fest verankert war, wandte man sich auch bei Verzahnungen diesem Problem wieder zu. Durch Messungen mit Hilfe von Dehnmessstreifen bestimmte *M. Hirt* abhängig von der Fußausrundung und dem Hebelarm die Spannungskonzentrationsfaktoren [1/25], die zur Basis der Gleichungen von ISO 6336 und DIN 3990 wurden. Dem RGW-Standard ST RGW 5744-86 und der Neuausgabe von TGL 10545 (1989) lagen an der TU Dresden durchgeführte Berechnungen auf der Basis des Singularitätenverfahrens zugrunde (Beispiel im Bild 1/16).

Diese Werte liegen etwas tiefer als nach DIN und ISO [1/20], [1/21] (ca. 10 % geringer). Es erfolgten auch Untersuchungen zu Verzahnungen mit Schleifabsätzen und Innenverzahnungen [1/22], [1/23].

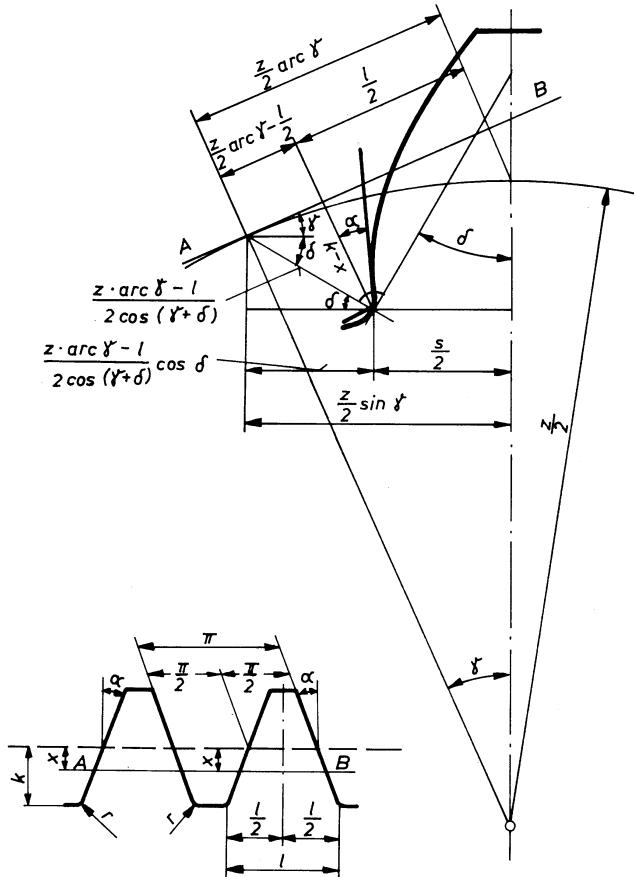


Bild 1/14 Annahme zur Ermittlung der Zahnfußbeanspruchung nach Hofer (1942), 30°-Tangente an der Zahnfußkurve [1/17]

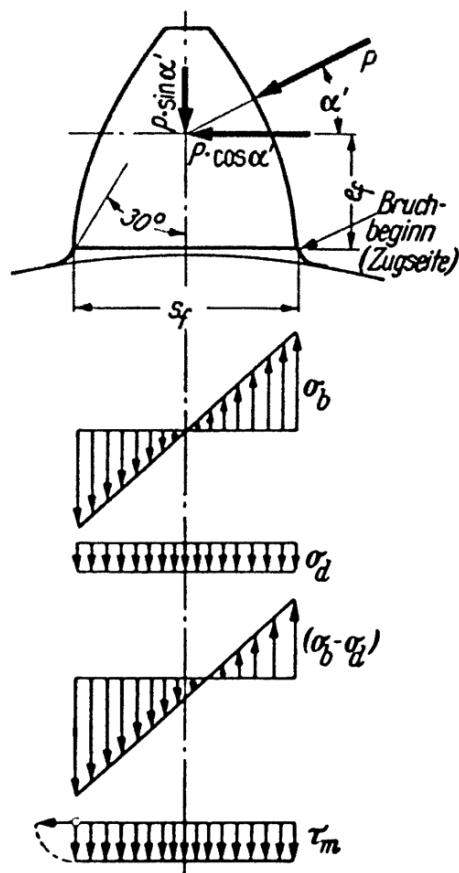


Bild 1/15 Zahnfußspannung (Niemann und Glaubitz)

Parallel hierzu wurde an der Klärung weiterer Zusammenhänge gearbeitet.

St. Fronius untersuchte u. a. die Verzahnungsabweichungen [1/19] und förderte die experimentellen Arbeiten bedeutend. Ziel der Weiterentwicklung der Tragfähigkeitsberechnung war es, neben der Kerbwirkung vor allem die Zusatzbeanspruchung infolge dynamischer Zahnkräfte und Änderung der Lastverteilung zu erfassen. In den ISO-Normen ist dieser Trend dokumentiert. H. Winter (TU München) erwarb sich dabei grundlegende Verdienste in einer langjährigen Forschungsarbeit und schwierigen internationalen Abstimmung.

Im RGW wurde aufbauend auf ISO eine eigene Berechnungsgrundlage geschaffen (ST RGW 5744-86). Mit ihr sind besonders die Namen Reschetow, Kudrjawzew, Sablonski, Filipowitsch (ehemals UdSSR), Svoboda (ehemals CSSR), Erney (Ungarn) und Arnaudow (Bulgarien) verbunden. Die federführende Bearbeitung lag bei der DDR (TU Dresden). ST RGW 5744-86 war auch die Basis des neuen Tragfähigkeitsstandards TGL 10545 (1989) der ehemaligen DDR, ebenfalls ausgearbeitet von der TU Dresden.

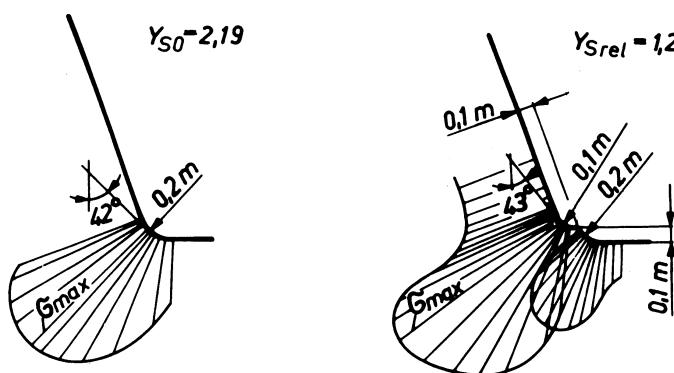


Bild 1/16 Spannungsverteilung in der Zahnfußkurve ohne und mit Schleifabsatz, berechnet nach dem Singularitätenverfahren [1/20], [1/21];  
 $Y_S = Y_{SO} \cdot Y_{Srel}$

### 1.1.3.2 Zahnflankenbeanspruchung – Grübchen

Die Grundlage für die Berechnung der Grübchenbeanspruchung bildet die Ableitung von H. Hertz (1881). A. Föppl erkannte die Bedeutung dieser Theorie, bearbeitete sie, trug sie Technikern vor und veröffentlichte sie 1897 neu. Von seinem Sohn, L. Föppl, wurde die Theorie weiterentwickelt (1936), die Spannungen im Inneren der Körper berechnet und damit die Kenntnisse zum Beanspruchungsfall der Berührung walzenförmiger Körper wesentlich erweitert.

Veranlasst durch fehlende Werte für die zulässige Belastung bei Wälzlagern, führte *R. Stribeck* umfangreiche Versuche bei Punkt- und Linienkontakt durch (1898/99). Er bestätigte und erweiterte die Anwendung der Hertz'schen Theorie und erhielt für die Praxis verwertbare Grenzbelastungen. Speziell bei Linienkontakt (Rolle gegen Ebene) erhielt er den Zusammenhang

$$P = k_1 DL \quad (1/8)$$

$P$ Belastung	$L$ Rollenbreite (Länge)
$D$ Rollendurchmesser	$k_1$ zulässige spezifische Belastung (Verformungsgrenzwert; Beanspruchungswert)

Mit *R. Stribeck* gelten die grundlegenden Untersuchungen zum „Hertz'schen“ Kontakt als abgeschlossen. *C. v. Bach* gebührt das Verdienst, die Verbreitung der Hertz'schen Gleichungen bedeutend gefördert zu haben, indem er sie 1908 in das Ingenieurtaschenbuch „Hütte“ aufnahm. Eine Anwendung der nach *H. Hertz*, *A. Föppl*, *L. Föppl* und *R. Stribeck* vorliegenden Erkenntnisse auf Zahnräder erfolgte relativ spät. Als erster brachte *E. Videcky* (1908, Budapest) die Hertz'schen Gleichungen im Zusammenhang mit Zahnräder. Er untersuchte für das Verschleißproblem die Zahnverformung und die Hertz'sche Pressung längs der Eingriffslinie.

Die Bach'sche Formel (1/4) erwies sich für Gusseisen bei den früheren Anforderungen durchaus geeignet. Um auch für Stahl eine für die steigenden Anforderungen sich bewährende Beziehung anzuwenden, greift *K. Wissmann* auf die Hertz'sche Beziehung zurück, indem er sie auch zur Beurteilung des Verschleißes für zutreffend hielt. Er bezeichnete den *Einzeleingriffspunkt* als maßgebend für die Beurteilung der Flankenbeanspruchung und gab 1908 an

$$p^2 = 0,175 \frac{F_N}{b} \cdot \frac{2E_1 E_2}{E_1 + E_2} \left( \frac{1}{\varrho_1} + \frac{1}{\varrho_2} \right) \quad (1/9)$$

$p$ Hertz'sche Pressung	$E$ Elastizitätsmodul
$F_N$ Zahnnormalkraft	$\varrho$ Krümmungsradius (Profil)
$b$ Zahnbreite	(Symbole teilweise in heutige Schreibweise geändert)

Bei den ersten Anwendungen wurde die Kontaktbeanspruchung jedoch meist in der von Stribeck geprägten Form benutzt (Stribeck'sche Wälzpressung). Hierzu zählen die Beziehungen von *Buckingham* (1920), *Kutzbach* (1926), *Niemann* (1938); (siehe auch [1/26] weiterhin *A. K. Thomas* [12], *H. Trier* [11], *G. Schreier* [4]).

Die Stribeck'sche Wälzpressung  $k$  für Zahnräder ist

$$k = \frac{F_N}{b \varrho_m} \quad (1/10)$$

$$\text{mit } \varrho_m = \frac{2\varrho_1 \varrho_2}{\varrho_1 + \varrho_2} \quad (1/11)$$

$\varrho$  Krümmungsradius (Profil)  $F_N$  Zahnnormalkraft  $b$  Zahnbreite

Zur Hertz'schen Pressung  $p$  besteht die Beziehung

$$k = \frac{2,86 p^2}{E} \quad (1/12)$$

$E$  Elastizitätsmodul

Von Niemann wurde der zulässige Wert ausgehend von dem Gedanken der Abnutzung abhängig von der Lebensdauer in Stunden angegeben ( $k_{zul} = k_{5000} \varphi$ ;  $\varphi$  abhängig von Betriebsstunden) [1/26].

In jetziger Betrachtungsweise trennen wir klar zwischen Verschleiß, der infolge der Verbesserung der Schmierung und Steigerung der Härte der Werkstoffe nur noch in Ausnahmefällen entscheidend ist, und der Grübchentragfähigkeit. Die Forschung auf diesem Gebiet bemüht sich weitere Einflüsse zu erfassen. Hierzu gehören neben Welligkeit und Rauheit, die Schubbeanspruchung und Temperaturspannung in Verbindung mit dem hydroelastischen Schmierzustand (Schubspannung) und die sich der Flankenbeanspruchung überlagernde Biegebeanspruchung oberhalb des Zahnußbereiches. Der Schmierfilm bewirkt im Allgemeinen nur geringe Abweichungen in der Größe der Hertz'schen Pressung.

Die sich überlagernde Schubspannung und die infolge der örtlichen Erwärmung entstehende Temperaturwechselspannung bedingen weitere Einflüsse, die z. Z. noch nicht befriedigend erfasst werden. Auch die Welligkeit und Rauheit sind wesentliche Einflussgrößen.

Ihre Berücksichtigung muss nach künftigen Entwicklungen auf statistischer Basis erfolgen.

Beziehungen zur Hertz'schen Pressung, ergänzt durch Schub, sind in Abschnitt 6.5.1.1 angegeben. Aussagen zu den elastohydrodynamischen Effekten findet man in Abschnitt 6.5.4.1.

### 1.1.3.3 Fressbeanspruchung

Mit der Steigerung der übertragenen Leistung pro Raumeinheit wuchs auch die Größe der Verluste und die *Getriebeerwärmung*. Insbesondere die Luftfahrtindustrie brachte neue Anforderungen und Schadensfälle. Fressen wurde nun öfter beobachtet, und es entwickelte sich das Bestreben, diese Erscheinung in der Berechnung zu berücksichtigen. *H. Hofer* (Zahnradfabrik Friedrichshafen) setzt die durch  $d \cdot b$  entstehende Fläche zur übertragenen Leistung bzw. Verlustleistung ins Verhältnis. Dieses wurde als *Wärmestauwert* (bzw. als Größe für Fresssicherheit) bezeichnet (1926):

$$S_a = \frac{z_1 m b}{20 N} \quad (1/13)$$

$z_1$  Zähnezahl (Ritzel)  $b$  Zahnbreite in mm  
 $m$  Modul in mm  $N$  Leistung in PS

Damit wurde noch nicht an die für die Ermittlung des Verschleißes bereits wesentlich früher durchgeführten Arbeiten u. a. durch *Poncelet* (1826), *Weißbach* (1852), *Bach* (1881), *Stribeck* (1894) und *Schiebel* (1911) angeschlossen. Diese hatten die Reibungsarbeit genauer, u. a. abhängig von  $(1/z_1 + 1/z_2)$  bzw. den Wälzkreisradien abgeleitet. Die später (1941) für den Wärmestauwert  $S_a$  angegebene Gleichung hatte dann auch die Form

$$S_a = \frac{z_1 m b}{10 V N} \geq 1 \frac{\text{mm}^2}{\text{PS}} \quad (1/14)$$

Mit dem Verlustgrad

$$V = 14,1 \frac{|z_2| \pm z_1}{z_1 z_2} \quad (1/15)$$

(-) für Innenradpaare mit Index = 2 für das Hohlrad  
 $m_n$  Normalmodul  $b$  Zahnbreite  
 $z_1$  Zähnezahl (Ritzel)  $N$  übertragene Leistung

Aus zahlreichen Auswertungen von Fressschäden und Bewährungen in Betrieb befindlicher bogenverzahnter Kegelrad-Hinterachsenantriebe entwickelte der Amerikaner *J. O. Almen* (1935) eine neue Formel. Er fand, dass das Produkt aus Hertz'scher Pressung und Gleitgeschwindigkeit maßgebend sei. Später (1943) ergänzte er dieses Produkt noch um den größten Abstand des Berührungs punktes auf der Eingriffslinie vom Wälzpunkt (PVT-Formel genannt; siehe auch [6]).

$$F_A = p_a v_{ga} g_a \quad (1/16)$$

$$F_A \leq F_{A \text{ Grenz}} \quad (1/17)$$

$p_a$  Hertz'sche Pressung am Zahnkopf  $v_{ga}$  Gleitgeschwindigkeit am Zahnkopf  
 $g_a$  Abstand des Kopfeingriffspunktes vom Wälzpunkt; Teileingriffsstrecke

Der Kennwert  $F_A$  wurde am Kopf des Ritzels und des Rades berechnet. Die Formel von *Almen* bewährte sich vor allem bei kleineren Flugzeugtrieben [6].

Eine bis z. Z. benutzte Gleichung stellte der Holländer *H. Blok* (1937) auf [1/24]. Er ging von der Massentemperatur und einer im Eingriff an der Berührungsstelle entstehenden örtlichen Temperaturerhöhung, dem Temperaturblitz (Blitztemperaturhypothese), aus. Auf theoretischer Grundlage erhält er eine Gleichung, die die Größe des Temperaturblitzes  $t_B$  unter der Annahme des Versagens der Schmierschicht ausdrückt (siehe auch [6] und Abschnitt 6.5.4.2).

$$t_B = 0,83 \frac{\mu F_t |v_{T1} - v_{T2}|}{b(f_1 \sqrt{v_{T1}} + f_2 \sqrt{v_{T2}}) \sqrt{b_H}} \leq t_{B \text{ max}} \quad (1/18)$$

$\mu$	Reibungszahl	$b$	Zahnbreite
$F_t$	Umfangskraft	$f$	$\sqrt{\lambda \gamma c}$
$v_T$	tangentielle Geschwindigkeit der Zahnflanke senkrecht zur Eingriffslinie ( $v_{T1} - v_{T2} = v_g$ )	$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$v_g$	Gleitgeschwindigkeit	$\gamma$	spezifisches Gewicht
		$c$	spezifische Wärme
		$b_H$	halbe Breite der Hertz'schen Abplattung

Der Grenzwert  $t_{B \text{ max}}$  ist von der Werkstoff-Schmierstoff-Kombination abhängig. Die Blok'sche Beziehung hat den unbestreitbaren Vorteil, dass sie auf theoretischen Ableitungen aufbaut, weshalb sie bis heute einen festen Platz in der Zahnradberechnung hat.

Obwohl man in der Folgezeit einen Einfluss des hydroelastischen Zustandes auf  $t_{B \text{ Grenz}}$  feststellte, blieb die Blok'sche Hypothese die Grundlage der Fresstragfähigkeitsberechnung. In Abschnitt 6.5.4.2 werden das Berechnungsverfahren und weitere Entwicklungen (Integraltemperaturmethode) näher erläutert.

## 1.2 Aufgaben und Einteilung der Getriebe und Verzahnungen

Nach der historischen Übersicht im vorherigen Abschnitt sollen nun Aufgaben und Einteilung der Getriebe und Verzahnungen zusammenfassend herausgestellt werden.

Getriebe sind Bestandteil des *Antriebes*. Sie waren, sind und werden auch künftig in vielen Fällen erforderlich sein, da der Motor allein nicht allen Forderungen und Kennlinien entsprechen kann. Eine Verzahnung kann für die heutigen Forderungen im Allgemeinen nicht mehr isoliert betrachtet werden. Die umgebenden Bauteile beeinflussen durch ihr Verformungs- und Schwingungsverhalten die Tragfähigkeit bedeutend. Im Hinblick auf die Zusatzbelastungen durch erzwungene und parametererregte Schwingungen und die meist vorliegende Nichtlinearität muss zumindest anfangs das Gesamtsystem betrachtet werden. Es wird deshalb hier auch von den Aufgaben der Getriebe im Antrieb ausgegangen und dann erst die Einteilung der Getriebe und Verzahnungen vorgenommen.

<sup>1)</sup> Der Faktor 0,83 in Gl. (1/18) wurde später in 1,11 geändert. Damit wurde eine Ellipse berücksichtigt, die besser als eine Parabel der Form der Pressungsverteilung entspricht. Gleichzeitig entspricht das dem Zustand, dass anstatt der halben Abplattungsbreite  $b_H$  die gesamte Abplattungsbreite  $2b_H$  unter der Wurzel im Nenner verwendet wurde.

# Sachwortverzeichnis

## A

Abformverfahren 555  
 Abklingfunktion der Zahnverformung 208  
 Abkühlen 444, 610  
 Abkühlungszeitkonstante 354  
 Abmaßfaktor 527  
 Abmessung, kennzeichnend 442  
 Abnutzung 13, 323  
 Abplattungsbreite 212, 239  
 Abplatzer (spalling) 141  
 Abrasivverschleiß 143  
 Abrichten 587  
 Abschreckbedingung 462  
 Abschrecken 606, 613  
 Abschreckintensität 441, 462, 622  
 Abstandsänderung 65  
 Abstrahlgrad 368, 382, 410  
 Abstrahlmaß 368, 374  
 Abstrahlverhalten 379  
 Abtriebsmoment 35, 420  
 Abweichung von der Parallelität 534  
 Achsabstand 59, 133  
 Achsabstandsabweichung 534  
 Achskreuzungspunkt 570  
 Achskreuzungswinkel 577, 589, 592  
 Achsneigung und Achsschränkung 534  
 Acoustic Emission 597  
 ADI (Austempered Ductile Iron) 450  
 Additiv 142, 304, 319, 359, 595  
 Adhäsion 143, 323, 435, 468  
 Adhäsivverschleiß 143  
 Admittanz 368  
 Äquivalenzfaktor 160  
 Allzahnhärten 617  
 Almen 18  
 Anlassbeständigkeit 472, 547, 562, 631, 641  
 Anlassen 490, 606, 610, 613  
 Anlasstemperatur 453, 459, 609, 611, 632  
 Annitrieren 634

Anriss 132, 144, 147, 249, 276, 279, 292, 294, 298  
 Anrissgefahr 274, 276  
 Anschlusskontur 280  
 Anti-Friction-Coating 641  
 Antriebsmoment 36, 177  
 Anwendungsfaktor 155, 178, 180  
 Aufhärtbarkeit 440, 454, 457, 462  
 Aufkohlen 456, 495, 546, 620, 624, 625  
 Aufkohlungstiefe 463, 544, 622  
 Aufsticken 467, 546  
 Aufsticktiefe 488  
 Ausbröckelungen 140, 248, 319  
 Auslegung 7, 63, 79, 97, 107, 121, 126, 133, 177, 230, 395, 401, 416, 420, 431  
 Ausscheidungsschicht 469, 636  
 Aussetzbetrieb 354  
 Austenit 444, 450, 607, 613, 629, 631  
 Axialkraft 173  
 Axialteilung 76, 77  
 Axialwalzen 560  
 Axial-Wälzfräsen 572

## B

Bach, C. v. 13  
 Bainit 444, 450, 453, 473, 545, 607, 613, 628  
 Bainitieren 545, 613  
 Balligkeit 518  
 - optimal 231  
 Bandbreite 369  
 Barkhausenrauschen 596  
 Baud, V. 15  
 Baustähle 444, 446  
 Bauteilgeometrie 482, 606  
 Beanspruchung bei max. Spannung 294  
 Beanspruchungsfaktor 157, 159, 295, 297  
 Beanspruchungskollektiv 153, 156, 158  
 Beanspruchungstiefenverlauf 240, 665  
 Bearbeitbarkeit 450, 563, 579, 606, 608, 610

Bearbeitungszugabe 50, 544, 573, 577, 581, 592, 658  
 Beidflankenhärten 616, 618  
 Belastung, äquivalente 159, 249, 665  
 Belastungsfaktor, thermischer 356  
 Belastungskollektiv 172, 226  
 Bereich, über-/unterkritisch 183, 198, 200, 431  
 Berührlinie 21, 73  
 Berührlinienlänge 77, 79  
 Beschichten 436, 472, 543, 547, 550, 639  
 Betriebsarten 354  
 Betriebsartenfaktor 271  
 Betriebseingriffswinkel 58  
 Betriebsviskosität 319, 341, 358  
 Betriebswälzkreisdurchmesser 59  
 Betriebswälzprüfung 535  
 Bezugsbasis 508, 540  
 Bezugsgetriebe 390, 404  
 Bezugsnennspannung 251  
 Bezugsprofil 31, 47  
 Bezugsspannung 251  
 Biegemomente im Zahnkranz 278, 281  
 Biegenachgiebigkeit 211  
 Biegesteifigkeit 371, 381, 384, 404, 408  
 Biegeverformung 168, 211, 214, 229, 232  
 Blasensieden 606, 625  
 Blitzfaktor 310, 315  
 Blitztemperatur 143, 307, 308  
 Blok, H. 19  
 Bogenlänge 46  
 Bogenverzahnung 23  
 Boridschicht 471, 639  
 Borieren 436, 547, 639  
 Bornitrid 563, 579, 604  
 Bosch, M. ten 14  
 Breitenballigkeit 230, 232, 268, 398, 654  
 Breitenfaktor 220, 221  
 Breitenlastverteilung 12, 150, 203, 214, 220, 223, 234, 244, 325, 418  
 Breitenverhältnis, günstig 13, 419, 420  
 Brinellhärte 444, 448, 451, 473, 545, 678  
 Broghammer 15

**C**

Campbell-Diagramm 537  
 Carbonitrieren 466, 631  
 Carbonitrierhärbarkeit 454, 466, 467

Carbonitrierhärte 469, 633  
 CBN (Cubic Boron Nitride) 579, 583, 585, 591, 602, 604, 693  
 Crestfaktor 413  
 CVD (Chemical Vapour Deposition) 436, 547, 640  
 C-Pegel 621, 631, 637

**D**

Dämpfung 192, 403, 409  
 Dauerbelastung 177, 181  
 Dauerbetrieb 354  
 Dauerfestigkeit 151, 156, 246, 270, 273, 293, 424, 431, 437, 445, 454, 473, 475, 477, 480, 489, 493, 497, 679  
 Dauerschalldruckpegel 370  
 Deckfläche 394, 406  
 Diagnose, Körperschall 412  
 Diagonalschaben 576  
 Diagonal-Wälzfräsen 572  
 Diffusionsschicht 468, 490, 633, 636  
 Direkthärten 623, 626, 629, 633  
 Direktschallfeld 369, 384  
 DLC (Diamond-like Carbon) 640  
 Dolan 15  
 Doppelamplitude (Spannung) 139, 280, 289  
 Doppelleingriff 62, 63, 175, 224  
 Doppelkerbe (Schleifabsatz) 263  
 Doppelschrägverzahnung 23  
 Doppelwinkelverzahnung 23  
 Dowson/Higginson 303  
 Drehfrequenz 152, 378, 660  
 Drehmomente 35  
 Drehmomentverlauf 153  
 Drehzahlbereiche 198, 200  
 Druckfließgrenze 293  
 Druckgießverfahren 554  
 Druckumlaufschmierung 343, 360  
 Dynamikfaktor 156, 183, 197

**E**

Effektivwert 369, 372  
 Eigenfrequenz 167, 182, 184, 187, 194, 201, 378, 381, 384, 404  
 Eigenkreisfrequenz 182, 185, 196  
 Eigenspannung 142, 240, 276, 454, 486, 492, 580, 594, 597, 606, 627, 629, 638, 665

- Eigenspannungs- und Härteverlauf 580  
 Eigentongebiet 380, 381  
 Einbaustörung, radial 107, 116, 122, 127  
 Einfachhärten 624, 626, 629  
 Einflankenschliff 584, 588, 590  
 Einflankenwälzprüfung 533  
 Einflussfunktion 208, 212, 269  
 Einflusszahlen 169, 205, 210, 213, 268, 270  
 Eingriffsebene 73  
 Eingriffsfaktor 243, 296, 315  
 Eingriffsfedersteifigkeit 171  
 Eingriffsfeld 73, 86  
 Eingriffsflankenspiel 526  
 Eingriffslinie 58  
 Eingriffspunkt 61, 63, 163, 237, 242  
 Eingriffssteifigkeit 170, 375  
 Eingriffsstörungen 101  
 Eingriffsstrecke 60  
 Eingriffsteilung 53  
 Eingriffsteilungsabweichung 524  
 Eingriffswinkel 31, 51, 81  
 Einhärtbarkeit 440, 456, 463  
 Einhärtungstiefe 454, 477, 618  
 Einkugelmaß 527, 531  
 Einlaufbetrag 227, 325  
 Einlauffaktor 316  
 Einlaufläppen 592, 603  
 Einlaufverschleiß 168, 325  
 Einsatzhärtbarkeit 456, 459  
 Einsatzhärten 436, 456, 466, 480, 489, 498, 546, 550, 575, 581, 591, 620  
 Einsatzhärtungstiefe, CHD 456, 462, 465, 482, 485  
 Einspannfaktoren (Hohlrad) 288  
 Einspritzschmierung 315, 333, 335, 360  
 Einstegrad 213, 234, 281  
 Eintauchtiefe 333, 335, 360  
 Einzelabweichung 507  
 Einzeleingriff 63, 175, 224  
 Einzeleingriffsfaktor 243, 296  
 Einzeleingriffspunkt 17, 63  
 Einzelfedersteifigkeit 167, 170  
 Einzelteilungsabweichung 522  
 Einzelteilerverfahren 107, 523, 558, 560, 565  
 Einzylindermaß 531  
 Elastizitätsfaktor 242  
 elastohydrodynamische Theorie 301  
 Elektronenstrahlhärten 436, 456, 614, 619  
 elliptisches Zahnpaar 21  
 Endrücknahme 231, 398, 518, 542, 655  
 Entkohlung 482, 556, 628, 629, 665  
 EP-Zusatz 143, 325, 360  
 Ermüdung 129, 140, 146, 148, 181, 250, 271, 275, 292, 294, 297, 319  
 Ermüdungsbeanspruchung 14, 266, 280, 292  
 Ermüdungsbruch 146, 250, 275, 280, 297  
 Ermüdungsfestigkeit 271, 666  
 Ermüdungsschäden 280, 294, 297  
 Erregerfrequenzen 181, 378, 409, 413  
 Erregerintensitäten 191  
 Erregerquelle 152, 181  
 Ersatzgeradverzahnung 83  
 Ersatzkrümmungsradius 241  
 Ersatzlastkollektiv 157  
 Ersatzmodell 184, 186  
 Ertel/Grubin 303  
 Ertel-Mohrenstein 303  
 Erwartungswert 226, 235, 388, 654  
 Erwärmen 441, 606, 609  
 Erwärmungszeitkonstante 353  
 Erzeugende 21, 72, 506, 509, 511, 516, 584  
 Erzeugungseingriffsstörungen 121, 125  
 Erzeugungsgetriebe 107, 111, 114, 120, 127  
 Erzeugungsprofilverschieb.-Faktor 105, 661  
 Euler-Savarysche Gleichung 7, 91  
 Evolventeneingriffsstörung 108  
 Evolventenentstehung 37  
 Evolventenfunktion 45  
 Evolventenschraubfläche 72  
 Evolventenverzahnung, Vor-/Nachteile 37  
 Exzenterbuchsen 230
- F**
- Fässler 606  
 Feder-Masse-System 198  
 Feinbearbeitung 401, 551, 554, 575, 579, 590, 633, 638  
 Feingießen 598  
 Feinkornbeständigkeit 459  
 Feinkornstahl 622, 625  
 Feinwerktechnik 10, 129, 575  
 Feldgröße 369  
 Fernfeld 369  
 Fertigbearbeitung 554, 570  
 Fertigungsgenauigkeit 563  
 Fertigungshilfsstoff 563, 569, 579, 634

Fertigungsverfahren 400, 486, 543  
 Festigkeit für maximale Belastung 274  
 Filmsieden 606, 625  
 Fingerfräser 574  
 Flächenmaß 374  
 Flamm- und Induktionshärten 455, 545, 615  
 Flanke, arbeitende 132, 542  
 Flankenbruch 144, 667  
 Flankenfläche, Abweich., Modifikation 517  
 Flankenkorrektur 660, 682  
 Flankenlinie 515  
 Flankenpressung 133, 156, 238, 241, 244, 296, 457  
 Flankenrichtung 74  
 Flankenrichtungsabweichungen 396, 398  
 Flankenspiel 105, 195, 506, 525, 653  
 Flankentragfähigkeit (Grübchen) 21, 237, 294, 296, 420, 423, 498, 665  
 Fliehkraft 235, 281, 292  
 Fließpressen 555, 557  
 Formabweichung 200, 322, 400, 506, 514  
 Formänderung 120, 443, 580, 606, 628, 638  
 Formfaktor 257, 265, 426  
 Formkreisdurchmesser 104, 109, 111, 113  
 Frästal 516, 524  
 Freifeld 369, 384  
 Freiformschmiedestück 440, 445, 447, 455  
 Fremderregung 375, 400  
 Frequenz gleicher Zahnstellung 379  
 Frequenzanalyse 201, 521  
 Frequenzbewertung 369  
 Frequenzspektrum 369, 597  
 Frequenzverhalten 369  
 Fressen 142, 305  
 Fresser (Schaden) 315, 681  
 Fressintegraltemperatur 19, 307, 313, 428, 431  
 Fresssicherheit 18, 310, 314  
 Fresstemperatur 143, 308, 311  
 Fresstragfähigkeit 19, 305, 428, 433, 472, 680  
 Fressverschleiß 640  
 Funktionsgruppen 504  
 Fußformkreisdurchmesser 105, 109, 112  
 Fußkreisdurchmesser 53, 65, 83, 125, 135  
 Fußkurve 14, 16, 29, 70, 96, 104  
 Fußnutzkreisdurchmesser 109  
 FZG-Test 307, 312, 314, 317

**G**  
 Gasaufkohlen 620  
 Gasnitrieren 470, 496, 633  
 Gefüge 425, 443, 477, 488, 595, 605, 607, 609, 612, 616, 628  
 Gefügefaktor 311, 317  
 Gefügeumwandlung 563, 594, 607, 634, 638  
 Gegenlaufräsen 571  
 Gehäuseform 380, 419  
 Gehäusewand 344, 374, 380, 405  
 Gehäusewandtemperatur 344  
 Genauigkeit 551, 563, 575, 581  
 Geometriefaktor 310, 315  
 Geradverzahnung 37  
 Geräusch 367, 370  
 Geräuschemission 370, 388  
 Geräuschkennzeichnungswert 392  
 Gesamtüberdeckung 79  
 Gesamtverformung 204, 207, 214, 216  
 Geschwindigkeitsanregung 370  
 Getriebegeräusch 388, 403  
 Getriebemasse 416, 419  
 Gewaltbruch 145, 280, 298  
 Glaubitz, H. 15  
 Gleichlaufräsen 571  
 Gleiten, spezifisch 165  
 Gleiten, stemmend/ziehend 164  
 Gleitfaktor 166  
 Gleitgeschwindigkeit 162  
 Gleitschleifen 593  
 Gleitweg 165  
 Glockenschneidrad 568, 692  
 Glühen 545, 607, 608  
 Grant 8  
 Grashof, F. 13  
 Graufleckentest 321  
 Graufleckigkeit 142, 165, 319  
 Grenzabweichung 480, 506  
 Grenzfestigkeit 276, 298  
 Grenzfrequenz 370, 382, 406  
 Grenzkohlenstoffgehalt 465, 621  
 Grenzlastwechselzahl 157  
 Grenzwert ausgeführter Getriebe 6  
 Grenzzähnezahl 71  
 Grobkorn 628  
 GROB-Verfahren 560  
 Größenfaktor 246, 274  
 Grübchenbildung (pitting) 140, 248, 304

- Grübchendauerfestigkeit 140, 246, 445, 473, 476, 481, 484, 489, 493, 499  
 Grübchentragfähigkeit 18, 237, 240, 294, 319, 434, 472, 485  
 Grubin 303  
 Grundkreisabweichung 513  
 Grundkreisdurchmesser 52, 83  
 Grundkreisteilung 52  
 Grundkreisteilungsabweichung 525  
 Grundzylinder 38, 55, 73, 75, 508, 516  
 Gusseisen 242, 408, 444, 449, 473
- H**  
 Härtbarkeit 440, 452, 466, 481, 611  
 Härtbarkeitsstreibband 440, 452, 457  
 Härtprofilberechnung 463  
 Härtesack 617  
 Härte-Streubereich 442  
 Härtetiefe 440, 454, 480, 492  
 Härte-Tiefe-Kurve 454, 477, 483, 488, 492, 616, 637  
 Härteverteilung 441  
 Härteverzug 49, 93, 557, 595, 633  
 Härtungsgrad 441, 452, 611  
 Hallfeld 371  
 Hallraumverfahren 385  
 Halten 605  
 hartamorphe Kohlenstoffschicht 640  
 Hartfeinen 591, 602  
 Hartmetall 562, 572  
 Hartschaben 591, 602  
 Hartstoffsicht 472, 547, 640  
 Härtungsgrad 441, 452, 611  
 Hauptprozessstufe 552  
 Hauptresonanz 182, 196, 198  
 Hebelarm 15, 131, 209, 212, 252, 268, 670  
 Hertz'sche Abplattungsbreite (halbe) 212, 239, 310  
 Hertz'sche Pressung 17, 212, 237, 240, 294, 424  
 Heulen 375  
 Hobelkämme 71, 92, 251  
 Hochverzahnung 129, 138, 256, 397, 672  
 Höfler 601  
 Höhe bis zum Sehnenmaß 55  
 Höhenballigkeit 219, 398, 654  
 Hofer, H. 14, 18, 103  
 Hohlrat 58, 79
- Hollomon-Jaffe-Parameter 638  
 Honen 401, 487, 536, 578, 590, 602  
 Hüllkurve 29, 40  
 Hüllschnittabweichungen 508, 563  
 Hyperboloid 21
- I**  
 Impedanz 369  
 Impulshärten 436, 614  
 induktionsgehärtet 144, 149, 480  
 Induktionshärten 436, 450, 454, 495, 614, 618  
 Innenradpaare (Auslegung) 121  
 Innenverzahnung 53  
 Innenzahnkranz 278, 288  
 Integraltemperaturverfahren 307, 313  
 Interferenz 67, 86, 101, 105, 137, 412, 434, 540, 670  
 isothermisches Umwandeln 608, 613
- J**  
 Jominy-Kurve 441
- K**  
 Kaltfließpressen 557  
 Kaltfressen 142, 305  
 Kaltwalzen 558, 598  
 Kaltziehen 556  
 Kankelwitz 13  
 Kapp 602  
 Keck 103  
 Kennzeichnung 544  
 Kerbempfindlichkeit 272, 277  
 Kerbparameter 93, 251, 284, 651  
 Kerbwirkung 15, 29, 72, 93, 131, 251, 669  
 Kernhärtbarkeit 456  
 Kernhärtetemperatur 484, 612, 625  
 Klaffungsbetrag 223, 226  
 Klang 368  
 Körperschall 371, 376, 379, 386, 401, 412  
 Körperschallmaß, -pegel 371, 380, 384  
 Kohlenstoffpegel 621  
 Kokillengießverfahren 554  
 Kolbenstrahlerbereich 383  
 Kombinationsresonanz 196  
 Komplementbezugsprofil 132  
 Konstruktion des Gegenprofils 27  
 Kontaktelastizität 168

- Kontaktlinie 73, 169, 203  
 Kontaktlinienabweichung 204, 223, 226, 229  
 Kontaktlinienlänge 220, 225  
 Kontakttemperatur 307, 428  
 Kontakttragbild 535  
 Konvektion 342, 345, 606, 687  
 Koordinatenmessgerät 509  
 Koordinatenmessmaschine 510  
 Kopf- und Fußrücknahmen 518, 654  
 Kopfbahn 29, 39  
 Kopfeingriffsstrecke 134  
 Kopffaktor 97, 257, 261, 298, 664  
 Kopfformkreisdurchmesser 108, 111  
 Kopfhöhenänderungsfaktor 67, 86  
 Kopfkantenbruch 114, 543, 573, 585  
 Kopfkantenvoreingriff 190, 217, 668  
 Kopfkreisdurchmesser 54, 83, 134  
 Kopfnutzkreisdurchmesser 60  
 Kopfrücknahme 191, 217, 316, 398  
 Kopfrücknahmefaktor 316  
 Kopfrundung 29, 49, 72, 86, 89, 93, 97, 137  
 Kopfrundungsradius 29, 71, 671  
 Kopfspiel 47, 49, 67, 83, 86, 125, 135  
 Kopfspielfaktor 102  
 Kopplungsfrequenz 371  
 Korngrenzenausscheidung 490  
 Korngrenzenzementit 498, 636  
 Korrekturfaktor, thermischer 303  
 Korrosion 140, 144, 301, 359, 488, 546, 550, 641  
 Korund 579  
 Kräfte an der Schneide 561  
 Kraftangriff 12, 169, 184, 252, 257, 264, 299, 669  
 Kraftangriffswinkel 184, 264, 299  
 Kraftanregung 371, 378  
 Kraftpegel 376  
 Kraftstufe 317, 680  
 Kranzbiegemoment 289  
 Kranzelastizität 168  
 Kreisbogenverzahnung 12, 23  
 Kreisteilungsabweichung 522  
 Krümmungsradius 45, 84, 163  
 – der Zahnfußkurve 89, 92, 97, 649  
 kubisches Bornitrid 579  
 Kugelstrahlen 480, 486  
 Külfaktor 344, 348
- Kühlkreislauf 342, 345  
 Külfaktor 344, 348  
 Kühlung 142, 353, 356, 360, 364  
 Kurzschlussbereich 384  
 Kurzzeitaustenisieren 618  
 Kurzzeitbetrieb 354
- L**  
 Lärm 368, 371  
 Lärminderung, aktiv 412  
 Lagerkraft, dynamisch 376  
 Lagerluft 228, 232  
 Lagerstuhlgestaltung 402  
 Lagerverformung 207, 226, 228, 232  
 Lagerverschiebung 232  
 Lagerzentrierung 233  
 Langsamlauf-Verschleiß 325  
 Laser-Doppler-Vibrometer 537  
 Laserstrahlhärten 619  
 Lastkollektiv 152, 155, 159, 244, 267, 295, 356  
 Lastverteilung 203, 215, 219  
 Lastverteilungsfaktoren 204, 219, 222  
 Laufruhe 63, 129, 504  
 Lebensdauerfaktor 246, 272, 474  
 Lebensdauersicherheit 150  
 Lechner 306  
 Leerlaufverlust 333  
 Legierungsfaktor 620  
 Lehrzahnrad 531  
 Lewis-Parabel 14  
 Litvin 10  
 Low-Noise-Shifting-Verfahren 587  
 Luftfahrtstahl 459  
 Luftschall 371
- M**  
 Maag 9, 322, 565, 582, 584, 601  
 Maraging-Stahl 472  
 Maßänderung 50, 409, 540  
 Massentemperatur 307, 312  
 Massivumformung 555  
 Matschoss 1  
 Maximalbeanspruchung 140, 237  
 Maximalbelastung 177, 294, 297, 427  
 Maximalhärte 452, 462  
 Meisterrad 537  
 Messzähnezahl 528

Mikro-Härteprüfung 595  
 Mikromagnetische Multiparameter-Mikrostruktur-Analyse (3MA) 597  
 mikromagnetische Randzonenanalyse 596  
 Mikrostruktur 536  
 Mindestzähnezahl 88, 106, 137  
 Mischreibung 304  
 Mittelspannung 289, 676  
 Mittelspannungsanteil 292  
 Mittenrauhwert, arithmetisch 332  
 Modellbildung 179, 416  
 Modifikationen 518, 654  
 Modul 52, 77, 422  
 Muschenbroek 12

**N**  
 Nachgiebigkeit 171, 208, 211  
 Nahfeld 371  
 ND/HD-Verfahren 622  
 Nenndrehzahl 172  
 Nennleistung 172, 177  
 Nennspannung 251, 264, 267, 278, 284  
 Nennviskosität 311, 341  
 NHD (Nitriding Hardness Depth) 492  
 nichtlinear 168, 188, 195, 376, 659  
 Niemann, G. 15, 17, 190, 306, 357, 666  
 Niles 93, 583, 601  
 Nitalätzung 596  
 Nitridschicht 471, 636  
 Nitrierbarkeit 469  
 Nitrierbedingungen 468  
 Nitrieren 436, 546, 633  
 Nitrierhärtetiefe 467, 490, 492, 495, 546  
 Nitrierschicht 468, 496  
 Nitrierstähle 491  
 Nitrocarburieren 436, 546, 633  
 Normalglühen 607  
 Normalmodul 81  
 Normalschnitt 77, 81  
 Normalteilung 82  
 Normalverteilung 149, 159  
 Normschneidrad 107, 125  
 Nullrad 66  
 Null-Verzahnung 67  
 Nutzkreisdurchmesser 86, 102, 109  
 Nutzleistung 172

**O**  
 Oberflächenbehandlung 240, 557  
 Oberflächenbeschaffenheit, Prüfung 536  
 Oberflächenschutz 539  
 Oberflächentemperatur 307  
 Öleinspritzmenge 345, 361  
 Öleinspritzung 361  
 Ölstandsmessung 361  
 Ölübertemperatur 344, 352, 356  
 Ölviskosität 143, 307, 357, 360  
 Oktavbandspektrum 369  
 Optimierung 416, 498, 586, 669  
 optische Überwachung 597  
 Oster 303  
 Oxidationskennzahl 634

**P**  
 PACVD (Plasma-Assisted Chemical Vapour Deposition) 640  
 Palmgren-Miner-Regel 156  
 Parallelschaben 576  
 parametererregt (rheonom) 19, 188, 196, 235  
 Parametererregung 192, 195, 375  
 Passmaß 506  
 Pegelwert 372  
 Perlitisieren 608  
 Pfauter 9, 570  
 Pfeilverzahnung 21  
 Philon 1  
 Phosphatieren 550, 641  
 Planschverlust 333, 361  
 Plasmanitrieren 469, 496, 633  
 plastische Deformation 249, 435  
 polykristallines Bornitrid 563  
 Polymerlösung 616, 619, 639  
 Poren 632, 636  
 Präzisionsschmieden 556, 598  
 Profilabweichungen 513,  
 Profilfräsen 574  
 Profilieren 586, 589  
 Profilräumen 577  
 Profilschleifen 587, 589, 602, 693  
 Profilüberdeckung 60, 86  
 Profilverschiebung 8, 45, 53, 65, 68, 423  
 Profilverschiebungsaufteilung 8, 105, 116,  
     423, 430, 434, 658  
 Profilverschiebungsfaktor 53, 65, 69, 85, 94

- Profilverschiebungssumme 8, 66, 85, 116, 426, 431  
 Protuberanz 50, 53, 90, 102, 258, 573, 658  
 Prüfgruppe 504  
 Prüfvorschrift 543  
 Pulver- und Pastenaufkohlen 622  
 Pulverschmieden (Sintern) 556  
 Punktberührung 471, 576  
 PVD (Physical Vapour Deposition) 640
- Q**  
 Querschaben 576  
 Querwalzen 558
- R**  
 Räderkette 33, 151, 187  
 Radial-Axial-Wälzfräsen 572  
 Radialflankenspiel 526  
 Radialgleitlager 339  
 Radialkraft 173  
 Radial-Wellendichtring 340  
 Radkörper 23, 147, 171, 207, 211, 213, 234, 278  
 Radkörperbruch 147  
 Radkranz 147, 213, 234, 278, 294  
 Räummaschine 578  
 Rainflow-Verfahren 152  
 Randeinfluss 209, 218, 269  
 Randeinflussfunktion 270  
 Randentkohlung 482, 498, 556, 628, 665  
 Randhärbarkeit 456, 462, 621  
 Randkohlenstoffgehalt 620  
 Randoxidation 481, 487, 620, 625, 627, 665  
 Randschichthärtungen 436, 454, 545, 614  
 Randschichtverfestigen 436  
 Rauheitsfaktor 274, 300, 317  
 Rauheitsmessung 536  
 Reaktionsmoment 36  
 rechtssteigend 74  
 Reflexionsschallfeld 384  
 Reibkraft 173, 181, 319  
 Reibungsmoment 338, 684  
 Reibungszahl 176, 309, 313, 331, 339  
 Reishauer 585, 601, 602, 692  
 Rekristallisation des Austenits 607  
 Releaux, F. 13, 31  
 Resonanzdrehzahl 193, 198  
 Resonanzverhalten, nichtlinear 195
- Restaustenit 306, 311, 487, 498, 595, 620, 627, 629, 632  
 Reversierbetrieb 153  
 Ringhon-Verfahren 591  
 Rissbildung an der Oberfläche 141  
 Rissprüfung 596  
 Rissverläufe bei Innenverzahnungen 148  
 Ritzeldurchmesser 417  
 Rockwellhärte 441, 678  
 Röntgendiffraktions-Analyse 595  
 Rollgeschwindigkeit 162  
 ROTO-FLOW-Verfahren 558  
 Rundlaufabweichung 506, 525, 577, 591
- S**  
 Satzrad 30, 37, 47  
 Schabrad 575, 576  
 Schabschleifen 602  
 Schadensfunktion 155  
 Schadenskraftstufe 317, 319, 321, 681  
 Schadenswahrscheinlichkeit 250, 444  
 Schälwälzfräsen 564, 570, 572, 585, 600  
 Schaftschneidrad 568  
 Schall 367, 375, 379, 388, 400, 537  
 Schallabsorptionsgrad 411  
 Schallausbreitung 369, 371, 373, 410  
 Schalldruckpegel 368, 372, 384, 389, 392, 409  
 Schallemission 370, 388, 391  
 Schallintensitätsmessverfahren 385  
 Schallleistung 368, 371, 373, 384, 388  
 Schallleistungspegel 368, 372, 374, 384, 388, 392  
 Schallpegelmessgerät 386  
 Schallschutzkapsel 410  
 Scheibenmodell 169, 186  
 Scheibenschneidrad 568, 692  
 Schichten, galvanisch aufgebracht 550, 641  
 Schichttiefe, Kurzzeichen 542  
 Schichttyp 472, 636  
 Schiebel 9, 18, 103  
 Schiele 570  
 Schleifabsatz 16, 49, 93, 105, 252, 256, 263  
 Schleifbrand 580, 594  
 Schleifkorn 578, 594  
 Schleiffriss 140, 148, 580, 594, 620  
 Schleifschnecke 585, 589, 601, 602  
 Schleifverfahren 582

- Schleifwerkzeug 105, 583  
 Schmalbandspektrum 370  
 Schmierfilmdicke 301  
 Schmierfilmfestigkeit 306  
 Schmierölviskosität 357  
 Schmierstoff 304, 356  
 Schmierstoffeinfluss 247, 304, 342, 498  
 Schmierstofffaktor 309, 317  
 Schmierungsfaktor 311, 315  
 Schneidrad 49, 70, 95, 105, 108, 111, 116, 120, 125, 566, 568, 692  
 Schneidradzähnezahl 99, 121, 125, 251  
 Schnellarbeitsstähle 562  
 Schnellepegel 372  
 Schnellerwärmen 618  
 Schnittkraft 561, 579  
 Schnittleistung 561, 579  
 Schnittmomente 281, 283  
 Schnittreaktionen 278, 281  
 Schnitttiefen 123, 585  
 Schrägenfaktor 243, 267  
 Schrägungswinkel 31, 75, 77  
 Schrägungswinkelabweichung 220, 225, 515  
 Schrägungswinkelkorrektur 219, 230, 235  
 Schrägverzahnung 72  
 Schrägzahn 72, 74, 207  
 Schraubenlinie 74, 526  
 Schraubgetriebe 21, 557  
 Schraubwälzprinzip 569, 576, 585, 590  
 Schriftfeld 544  
 Schubverformung 168, 211  
 Schutzgas 556, 607, 613, 626, 639  
 Schwellbeanspruchung 271, 293  
 Schwellfestigkeit 240, 271, 274, 292, 677  
 Schwindung 554  
 Schwingbeschleunigung 413  
 Schwinggeschwindigkeit 370, 372, 386  
 Schwingung 19, 177, 181  
 Schwingungsmodell 179, 184, 187, 189, 659  
 Schwingungsverhalten 184, 195  
 Sehne 55, 85, 526, 531, 541  
 Seitzinger 307  
 Selbstabschreckung 614  
 Sicherheit 150, 157, 245, 249, 275, 280, 294, 297, 310, 313, 320  
 Siliziumkarbid 579  
 Sinterkorund 579  
 Sintern 472, 495, 555, 598  
 Sinterstahl 472, 495, 619  
 Smith-Diagramm 293  
 Sonderverzahnung 129, 399, 568, 674  
 Spanbarkeit 459, 563, 608  
 Spannung, äquivalent 156  
 Spannung, örtlich 251, 266, 276  
 Spannung, zulässig 13, 249, 275  
 Spannungsarmglühen 609  
 Spannungseinflussfunktion 269  
 Spannungsgefälle, bezogenes 272, 652  
 Spannungskomponenten 141, 239, 294, 667  
 Spannungskonzentrationsfaktor 15, 99, 251, 257, 260, 262, 263, 283, 285  
 Spannungskorrekturfaktor 251, 474  
 Spannungsverlauf 141, 253, 254, 256, 263, 279, 671  
 Spannungszyklus 280, 291  
 Spiegelung 209, 213, 219, 269  
 Spritzgießverfahren 554  
 Spritzölfaktor 335  
 Sprödbruch 145, 249, 276, 295  
 Sprungüberdeckung 9, 77, 134, 397  
 Stahlguss 444, 473  
 Standard-FZG-Test 314  
 Stegrad 171, 213, 234  
 Steifigkeitswert 170, 190  
 Steigungshöhe 75, 567  
 Steigungsrichtung 74  
 Stickstoffdiffusion 467, 488, 631  
 Stillstandsmarkierung 144  
 Stirn- und Kopfkantenbruch 543  
 Stirnabschreckhärte 461  
 Stirnabschreckprobe 441, 460, 464  
 Stirnabschreckversuch (Jominy-Test) 440, 459  
 Stirnabstand 441, 457, 460, 463, 484  
 Stirnfaktor 220  
 Stirnlastverteilung 203, 220, 225, 244  
 Stirnmodul 82  
 Stirnprofil 506  
 Stirnprofilabweichungen 512  
 Stirnprofilmodifikationen 518, 542, 656  
 Stirnschnitt 73, 77, 81  
 Stirnteilung 82  
 Stoßbelastung 177, 245, 257, 431, 665  
 Strangpressen 556, 598  
 Streckgrenzenverhältnis 490

- Streuung,  
 - der Belastung, 149  
 - Fertigungsabweichungen 227, 322  
 - Festigkeitswerte 483, 498  
 - Messergebnisse, Schallmessung 391  
 Stribeck'sche Wälzpressung 17  
 Stülpmoment 281  
 Stützwirkung 169, 232, 247, 256, 272, 282, 288, 424, 427, 472, 639  
 Stützziffer 272, 277, 425  
 Stufenanzahl 389, 416, 418  
 Summengeschwindigkeit 167  
 Superschaben 591
- T**  
 Tangentialkraft 173  
 Tangentialkraft, äquivalente 158  
 Tauchsabben 576  
 Tauchschnierung 334, 360  
 Technologiefaktor 271  
 Teileingriffsstrecke 60  
 Teilkreisdurchmesser 51, 82, 84  
 Teilkreisteilung 52, 87  
 Teilschallleistungspegel 384  
 Teilüberdeckung 60  
 Teilung auf beliebigen Durchmesser 84  
 Teilungsabweichung 102, 151, 181, 191, 200, 220, 224, 246, 400, 510, 522, 524, 577, 592  
 Teilungsmessung im Fräsertal 524  
 Teilungsspannenabweichungen 523  
 Teilungssprung 523  
 Teilungssummenabweichung 523  
 Temperaturblitz 19, 240, 312  
 Temperguss 449  
 Teppichband-Effektivwert 413  
 Terzbandspektrum 370  
 Tiefnitrieren 491  
 Timoschenko, St. 15  
 Toleranzfeld 522  
 Toleranzsystem 503  
 Tonhaltigkeit 372  
 Torsions-Biege-Modell 185  
 Torsionsverformung 229, 233  
 Touch-Honen 591  
 Tragbild 535  
 Tragfähigkeitsnachweis 237  
 Tredgold 13
- Triangulationssensor 597  
 Tribokorrosion 144, 147  
 Tribooxidation 435, 498, 633  
 Triboverschleiß 144  
 Triebstockverzahnung 1, 12, 21
- U**  
 Überdeckungsfaktor 243, 266, 315  
 Übergangsdurchmesser (Fußausrundung zu evolventischer Flanke) 103, 106  
 Überlebenswahrscheinlichkeit 149, 172, 498  
 Überrollungszahl 246, 272, 294, 324  
 Übersetzung 20, 25, 31  
 Übersetzungsaufteilung 418  
 Übertragungsabweichung 535  
 Übertragungssadmittanz 373  
 Übertragungsmaß 370, 372, 404  
 Überzug 550, 641  
 Umfangsgeschwindigkeit 32, 40  
 Umformen 436, 553, 555  
 Umlaufhärten 614, 616  
 Umlaufrädergetriebe 34, 187  
 Unterschnitt 37, 68, 71, 104, 110  
 Unterwühlung 49, 102, 106  
 Unwucht 181, 379, 581, 586  
 Urformen 553, 554, 558
- V**  
 Vakuumbeschichten 639  
 Verbindungsschicht 467, 488, 490, 544, 546, 633, 636  
 Verbundschicht 469, 636  
 Verdrehflankenspiel 526  
 Verformung, plastische 144, 146, 249, 274, 276, 295, 609, 628, 666  
 Verformung von Wellen und Lagern 207, 227, 229, 654  
 Verformungsanteile 168, 214  
 Verformungseinflusszahlen 169, 206, 213, 270  
 Vergleichsspannung 141, 238, 276, 294, 666  
 Vergleichsspannungmaximum, Tiefe 486  
 Vergüten 545, 610  
 Vergütungsstähle 445, 452  
 Verkupfern 550, 641  
 Verlustfaktor 331, 682  
 Verlustgrad 18, 330  
 Verschleiß 323

- Verschleißabtrag 227, 323  
 Verschleißformen an der Schneide 561  
 Verschleißfortschritt 144  
 Verschleißhochlage 318, 324  
 Verschleißverlauf 324  
 Verzahnungsabweichungen 192, 219, 400  
 Verzahnungssachse 507  
 Verzahnungsdämpfung 192  
 Verzahnungsgesetz 25  
 Verzahnungsqualitäten, erreichbare 543  
 Verzahnungsreibungszahl 331  
 Verzahnungsschleifverfahren 582  
 Verzahnungssteifigkeit 167, 190  
 Verzug 435, 618, 624, 628, 638  
 Verzugskorrektur 609, 626, 638  
 Verzugsmessungen 628  
 virtuelle Zähnezahl (Ersatzzähnezahl) 87, 170, 647  
 Viskosität, dynamische 302, 304, 314  
 Viskosität, kinematische 320, 332, 336, 357  
 Vollräder 189, 213, 235, 250, 263, 282  
 Volumen-Momenten-Verhältnis 417  
 Vorschubeingriffsstörung 116, 123  
 Vorschubmarkierung 516, 565  
 V-Null-Verzahnung 67  
 V-Rad 66  
 V-Verzahnung 67
- W**
- Wälzabweichungen 532  
 Wälzebene 72, 81  
 Wälzfräsen 570, 600  
 Wälzfräser 48  
 Wälzgeschwindigkeit 6, 40, 143, 324, 326  
 Wälzhobeln 565, 599  
 Wälzonen 590, 602  
 Wälzkinematik 562, 564, 570, 583  
 Wälzkreisdurchmesser 59  
 Wälzkreise 25, 59  
 Wälzlänge 512  
 Wälzläppen 592, 603  
 Wälzlager, Verlustleistung 336  
 Wälzlagerfrequenz 378  
 Wälzpressung, Stribecksche 17  
 Wälzpunkt 7, 18, 26, 58, 60, 68, 72, 93, 134, 143, 164, 167, 173, 177, 181, 237, 241, 302, 309, 315, 320, 331, 682  
 Wälz-Rundlaufabweichung 534  
 Wälzsabben 575, 600  
 Wälzsäulen 569, 599  
 Wälzsleifen 582, 583, 601  
 Wälzstoßen 566, 599  
 Wälzylinder 32, 72  
 Wärmdauer 617, 619  
 Wärmebehandlungsbild 544, 548  
 Wärmebehandlungsplan 545  
 Wärmebehandlungstemperatur 642  
 Wärmebilanz 342, 345, 687  
 Wärmedurchgang 345  
 Wärmedurchgangszahl 345  
 Wärmegrenzleistung 353  
 Wärmeleitkoeffizient 304  
 Wärmeleitung 343  
 Wärmestauwert 18  
 Wärmestrom 343, 352, 692  
 Wärmeübergangszahl 345, 347, 350, 689  
 Wandstärke 406  
 Warmfließpressen 557  
 Warmfressen 142, 304  
 Warmpressen 556, 598  
 Warmumformung 557  
 Waschbretteffekt 587  
 Weber und Banaschek 169, 211  
 Wechselbeanspruchung 147, 153, 293, 670  
 Wechseinflusszahlen 205, 213  
 Wechselfestigkeit 292, 677  
 Wechselspannung 18, 139, 140, 250  
 Weibullverteilung 149  
 Weichglühen 608  
 Welligkeit 521  
 Wendeplatten-Wälzfräser 572  
 Werkstoffpaarungsfaktor 247  
 Werkzeugeigenschaft 604  
 Werkzeugkopfrundung 71, 89, 93, 137  
 Werkzeugprofil 28, 38, 47, 89, 540, 566, 574, 586, 647  
 Werkzeugverschleiß 508, 564  
 Wildhaber-Novikov-Verzahnung 12, 21, 23  
 Winkelfaktor 315  
 Winkelmodifikation 518, 541, 656  
 Wirkleistungsmessung 597  
 Wirkungsgrad 34, 330, 335, 341, 688  
 Wöhlerlinie 150, 156, 246, 272, 500, 501  
 Wöhlerlinienexponent 150  
 WPM-Verfahren 559  
 Wuchten 542

- Z**
- Zähigkeit 435, 443, 449, 468, 490, 562, 610, 627, 636
  - Zähnezahl, virtuelle 87
  - Zähnezahl der Ersatzgeradverzahnung (Ersatzzähnezahl) 87, 89, 91, 170, 647
  - Zähnezahlverhältnis 133, 135, 419, 426, 431, 559, 647
  - Zahnbelastung 13, 151, 177, 183, 204, 221
  - Zahnbreite, gemeinsame 88, 244, 297
  - Zahndicke 12, 54, 66, 85, 104, 132, 136, 506, 526, 653
  - Zahndickenabmaße 105, 506, 540, 653
  - Zahndickensehne 55, 85, 526, 531
  - Zahneingriffs frequenz 182, 196, 372, 378
  - Zahneingriffssteifigkeit 375
  - Zahneintrittsstoß 190
  - Zahnfedersteifigkeit 170
  - Zahnflankenkorrektur 398
  - Zahnflankenmodifikation 541
  - Zahnflankentopografie 511
  - Zahnflankentragfähigkeit 237, 297, 420, 665
  - Zahnflankenwelligkeitsnormale 509
  - Zahnform 69
  - Zahnfußbeanspruchung 12, 15, 156, 250, 264, 270, 424
  - Zahnfuß-Biegenennspannung 251
  - Zahnfuß-Dauerfestigkeit 475, 477, 481, 489
  - Zahnfußdicke 89, 95, 103, 648
  - Zahnfußeingriffsstörung 107, 108, 111, 121
  - Zahnfuß-Grundfestigkeit 437, 445, 475, 477, 481, 489, 493
  - Zahnfußhöhe 53
  - Zahnfußnennspannung 257, 268, 427
  - Zahnfußspannung 16, 61, 62, 250, 253, 263, 280, 297, 422, 427, 474, 669
  - Zahnfußtragfähigkeit 219, 250, 278, 297, 422, 424, 431, 676
  - Zahngrundhärten 616, 618
  - Zahnhöhe 53
  - Zahnkopfdicke 55, 121, 126, 131, 136, 324
  - Zahnkopfeingriffsstörung 114, 122, 126
  - Zahnkopfformkreisdurchmesser 111
  - Zahnkopfhöhe 53
  - Zahnkraft 151, 159, 172
  - Zahnkranzdicke 171, 250, 289
  - Zahnlänge, tragende 241
  - Zahnlückenhärten 616
  - Zahnlückenweite 57
  - Zahnnormalkraft 172, 221, 241, 264
  - Zahnprofilfläche 47
  - Zahnradgeometrie, Entwicklung 9
  - Zahnradkörperverformung 213
  - Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine 317
  - Zahnreibungszahl 313
  - Zahnstange 30, 39, 47, 65
  - Zahnsteifigkeit 167, 188, 221, 375, 395, 661
  - Zahnteilungswinkel 67
  - Zahnverformung 17, 49, 167, 169, 188, 191, 200, 207, 221, 225, 397, 399, 654, 661
  - Zahnweite 88, 528
  - Zeichnungsangaben 539, 544
  - Zonenfaktor 243, 245
  - ZTU-Diagramm 444, 483
  - Zufallsgröße 226
  - Zugfestigkeit 444, 449, 453, 470, 493, 545
  - Zusatzzkräfte 151, 167, 172, 177, 181, 193, 196, 201, 243, 265
  - Zweiflankenschliff 584
  - Zweiflanken-Wälzabweichung 534
  - Zweiflankenwälz-Achsabstand 531
  - Zweiflanken-Wälzsprung 534
  - Zweikugelmaß 530
  - Zweistegrad 213, 234
  - Zweizylindermaß 531
  - Zwischenglühen 624, 643
  - Zwischenrad 33, 154, 187
  - Zwischenstufenvergüten 613
  - Zykloide 12, 29, 37
  - Zykloidenverzahnung 21, 24