

Dipl.-Ing. Dirk Dennin, München

# **Einflüsse von Zahnrad-Profilkorrekturen auf Getriebe-Drehschwingungen**

Reihe **11**: Schwingungstechnik      Nr. **236**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung . . . . .	1
1.2	Literaturübersicht . . . . .	3
1.3	Ziel und Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Modellbildung und mathematische Beschreibung</b>	<b>7</b>
2.1	Körper . . . . .	8
2.1.1	Starrkörper . . . . .	8
2.1.2	Torsionselastische Wellen . . . . .	9
2.2	Kraftelemente . . . . .	12
2.2.1	Verzahnungssteifigkeit . . . . .	13
2.2.2	Dämpfung in Verzahnungen . . . . .	28
2.2.3	Reibung in Verzahnungen . . . . .	29
2.2.4	Zahnspiel . . . . .	30
2.3	Bewegungsgleichungen . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Profilkorrektur</b>	<b>36</b>
3.1	Arten der Profilkorrektur . . . . .	37
3.1.1	Profilkorrekturgeometrien . . . . .	38
3.1.2	Lange Profilkorrektur . . . . .	39
3.1.3	Kurze Profilkorrektur . . . . .	40
3.2	Modellierung der Profilkorrektur . . . . .	41
3.3	Auswirkungen der Kopfrücknahme . . . . .	42
3.4	Optimierte Profilkorrektur . . . . .	44

<b>4</b>	<b>Zweidimensionales Verzahnungsmodell</b>	<b>46</b>
4.1	Ebene Kinematik idealer Verzahnungen . . . . .	46
4.2	Verzahnungskinematik mit Deformationen . . . . .	48
4.2.1	Kontaktpunkte entlang der theoretischen Eingriffslinie . . . . .	49
4.2.2	Kontaktpunkte außerhalb der theoretischen Eingriffslinie . . . . .	53
4.2.3	Flankenwechsel . . . . .	57
4.2.4	Kräfte in den Zahnkontaktpunkten . . . . .	58
<b>5</b>	<b>Dreidimensionales Verzahnungsmodell</b>	<b>59</b>
5.1	Breitenballigkeit . . . . .	59
5.2	Parameterdarstellung der Zahnflanken . . . . .	61
5.3	Koordinatensysteme . . . . .	64
5.4	Kontaktpunktbestimmung und Relativabstand . . . . .	65
5.4.1	Relativgeschwindigkeit . . . . .	69
5.4.2	Startkonfiguration und mögliche Kontaktpunkte . . . . .	71
5.4.3	Kontaktkräfte . . . . .	72
<b>6</b>	<b>Numerische Verfahren</b>	<b>74</b>
6.1	Numerische Integration . . . . .	74
6.2	Schaltpunktsuche und Schrittweitensteuerung . . . . .	76
6.2.1	Schaltpunktsuche des zweidimensionalen Modells . . . . .	77
6.2.2	Schaltpunktsuche des dreidimensionalen Modells . . . . .	78
6.2.3	Schrittweitensteuerung . . . . .	78
6.3	Optimierung . . . . .	82
<b>7</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>84</b>
7.1	Verzahnungsprüfstand . . . . .	84
7.2	Systemmodell . . . . .	86
7.2.1	Ritzelwellen . . . . .	87
7.2.2	Radwelle . . . . .	89

7.2.3	Profilkorrektur . . . . .	90
7.3	Ordnungsanalysen . . . . .	93
7.4	Vergleich Messung - Simulation . . . . .	94
7.5	Optimierung . . . . .	100
7.5.1	Konstante Drehzahl . . . . .	100
7.5.2	Drehzahlhochlauf . . . . .	106
7.6	Vergleich ebenes - räumliches Verzahnungsmodell . . . . .	111
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>113</b>
<b>A</b>	<b>Nomenklatur</b>	<b>116</b>
<b>B</b>	<b>Mathematische Operationen</b>	<b>120</b>
B.1	Allgemeine Transformationsmatrizen . . . . .	120
B.2	Tilde-Operator . . . . .	120
B.3	Matrizen für die Bewegungsgleichungen und die Kraftelemente . . . . .	121
B.3.1	Allgemeine Darstellung der Bewegungsgleichungen . . . . .	121
B.3.2	Linearisierte Darstellung der Bewegungsgleichungen . . . . .	122
B.3.3	Matrizen für das dreidimensionale Verzahnungsmodell . . . . .	124
<b>C</b>	<b>Verzahnungsgrößen</b>	<b>125</b>
<b>D</b>	<b>Verzahnungssteifigkeit</b>	<b>127</b>
D.1	Elastizitätsmodul . . . . .	127
D.2	Formänderungsenergie aus der Querkraft . . . . .	128
D.3	GAUSS-LEGENDRE-Quadratur 4. Grades . . . . .	129
<b>E</b>	<b>Interpolationsverfahren</b>	<b>130</b>
E.1	HERMITE-Interpolation . . . . .	130
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>132</b>