

Inhaltsverzeichnis

Symbole, Benennungen und Einheiten	XXV
Abbildungsverzeichnis	XLI
Tabellenverzeichnis	CXI
Abkürzungsverzeichnis	CXXIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzungen	2
1.3 Vorgehensweise	4
2 Stand der Technik	6
2.1 Anwendungsbereich von Nennspannungskonzepten	7
2.1.1 Statischer Festigkeitsnachweis	8
2.1.2 Dynamischer Festigkeitsnachweis	8
2.2 Definition der Kerbwirkung	9
2.2.1 Formzahl α_k	10
2.2.1.1 Definition der Formzahl α_k auf Basis der Normal- bzw. Hauptspannungshypothese	12
2.2.1.2 Definition der Formzahl α_k auf Basis der Schubspannungshypothese	13
2.2.1.3 Definition der Formzahl α_k auf Basis der Gestaltänderungsenergiehypothese	14
2.2.1.4 Abbildegenauigkeit der unterschiedlichen Formzahlen	15
2.2.2 Maximale Kerbspannung σ_{Max}	17
2.2.3 Nennspannung σ_{Nenn}	18
2.2.3.1 Auf Basis der im Kontakt wirkenden Lasten	18
2.2.3.2 Auf Basis der eingeleiteten Lasten	25
2.2.4 Kerbwirkungszahl β_k	26
2.2.5 Zusammenhang zwischen Formzahl α_k und Kerbwirkungszahl β_k	27
2.2.5.1 Stützziffer n	28
2.2.5.2 Bezogenes Spannungsgefälle G'	28
2.3 Bestimmung von Näherungsgleichungen	30
2.3.1 Interpolationsverfahren	31

2.3.2	Interpolationsverfahren von Newton	32
2.3.3	Methode der kleinsten Abstandsquadrate.....	32
2.4	Aussagen zur Gestaltfestigkeit von ZWV nach [DIN 5480].....	35
2.4.1	[DIN 743].....	36
2.4.2	[DIN 5466].....	36
2.4.3	[Weso 97].....	36
2.4.4	[FVA 591 I].....	37
2.4.5	[FVA 467 I].....	38
2.4.6	[FVA 467 II].....	38
2.4.7	[FVA 700 I].....	39
2.4.8	[FVA 742 I].....	39
2.5	Gestaltfestigkeitsrelevante Effekte bei ZWV nach [DIN 5480].....	40
2.5.1	Zur Definition der Grundform	41
2.5.1.1	Nabenbreite b	41
2.5.1.2	Nabenaußendurchmesser d_{e2}	42
2.5.2	Gestaltfestigkeitsoptima	42
2.5.2.1	Modul m bzw. Zähnezahlen z	42
2.5.2.2	Wellenfußrundungsradiusverhältnis ρ_{f1}/m	42
2.6	Bezugsprofilgenerierung nach [DIN 5480].....	43
2.7	Weiterführende geometrische Randbedingungen	49
2.7.1	Nabenbreite b und Nabenaußendurchmesser d_{e2}	49
2.7.2	Nabenrestwandstärke	50
2.7.3	Auslauform.....	50
2.7.4	Nabenlage.....	51
3	Geometriebezogene Definitionen, Entwicklungen und Betrachtungen	53
3.1	Kritische Diskussion der [DIN 5480].....	53
3.1.1	Mathematische Vereinfachungen.....	54
3.1.1.1	Kopfkreisdurchmesser d_{a1} und d_{a2}	55
3.1.1.2	Fußkreisdurchmesser d_{f1} und d_{f2}	56
3.1.2	Systematik zur Profilgenerierung	56
3.2	Entwicklung eines Systems zur Profilgenerierung evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen	60

3.2.1	Systematik	62
3.2.2	Mathematische Formulierung der Grundgeometrie.....	64
3.2.2.1	Evolvente	64
3.2.2.2	Gleichung eines zur Evolvente tangentenstetigen Kreises	70
3.2.3	Mathematische Formulierung systemspezifischer Elemente	72
3.2.3.1	Winkel	72
3.2.3.2	Kopfkreise	73
3.2.3.3	Zahnfußgeometrie.....	81
3.3	System zur Profilgenerierung evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen	85
3.3.1	Eingangsparameter.....	87
3.3.2	Berechnungsgleichungen	88
3.3.3	Ergänzende Geometrieparameter.....	90
3.3.4	Geometrieäquivalenz mit Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480]... 91	
3.3.5	Geometriekompatibilität mit Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480]92	
3.4	Maximal realisierbare Fußrundungsradiusverhältnisse ρ_f^V/m	93
3.5	Vergleichbarkeit von Gestaltfestigkeiten.....	98
3.5.1	Beanspruchungsbasiert	98
3.5.2	Wellenersatzdurchmesserbasierte Torsionsformzahl $\alpha_{ktGEHdh1}$	99
3.5.3	Bezugsdurchmesserbasierte Torsionsformzahl $\alpha_{ktGEHdB}$	101
3.5.4	Umrechnung von Torsionsformzahlen α_{kt} auf andere Nenn Durchmesser d_{Nenn}	103
3.6	Definition der Nabenrestwandstärke.....	104
4	Numerikbezogene Definitionen, Entwicklungen und Betrachtungen	106
4.1	Hard- und Softwarespezifika	106
4.2	Entwicklung von Automatismen.....	107
4.2.1	Preprocessing.....	108
4.2.1.1	Geometriegenerierung	108
4.2.1.2	Vernetzung.....	117
4.2.1.3	Werkstoffmodell	121
4.2.1.4	Kontakteinstellung.....	121
4.2.1.5	Lastrandbedingung	123
4.2.1.6	Lasthöhe	125

4.2.2	Solution	127
4.2.3	Postprocessing	128
4.2.3.1	Erhebungsort	128
4.2.3.2	Erhebungsart	129
4.2.3.3	Gegenstand der Datenerhebung	131
4.3	Ergebnisabsicherung	133
4.3.1	Netzkongruenz	133
4.3.2	Modellverifizierung	139
4.3.3	Literaturauswertung	142
4.4	Relevante Aspekte zur Ergebnisinterpretation	144
4.4.1	Lasteinleitung	146
4.4.2	De Saint-Venant	147
4.4.3	Nicht gestaltfestigkeitsrelevante Lokalbeanspruchungen	148
4.4.4	Gestaltfestigkeitsrelevante Lokalbeanspruchung	149
4.4.4.1	Axialer Beanspruchungsverlauf	151
4.4.4.2	Beanspruchungsverlauf in Tiefenrichtung	152
4.5	Auswertung numerischer Ergebnisse	154
4.5.1	Zur Wahl der Vergleichsspannungshypothese	154
4.5.2	Quervergleich des Wellenfußkreisdurchmessers d_{f1}	156
4.5.3	Ort der maximalen Spannungskonzentration	156
4.5.3.1	Lagecharakterisierung in axialer Richtung	157
4.5.3.2	Lagecharakterisierung in radialer Richtung	158
4.5.4	Kerbwirkung am Ort der maximalen Beanspruchung (PGA1)	159
4.5.4.1	Torsionsformzahlen α_{kt} und ihre Differenzen	159
4.5.4.2	Bezogene Spannungsgefälle G' und ihre Differenzen	160
4.5.5	Querschnittbezogene Gestaltfestigkeitsdifferenzierung	162
4.5.6	Zug-/druckseitige Differenzierung	162
5	Experimentbezogene Definitionen, Entwicklungen und Betrachtungen	163
5.1	Versuchseinrichtungen	164
5.2	Versuchsdurchführung und -auswertung	164
5.3	Berechnung experimenteller Kerbwirkungszahlen β	165
5.3.1	Biegebelastung	166

5.3.1.1	Biegewechselfestigkeit der ungekerbten, polierten Probe σ_{bW} ..	167
5.3.1.2	Biegewechselfestigkeit der gekerbten Probe σ_{bWK}	168
5.3.2	Torsionsbelastung.....	169
5.3.2.1	Torsionswechselfestigkeit der ungekerbten, polierten Probe τ_{tW}	169
5.3.2.2	Torsionswechselfestigkeit der gekerbten Probe τ_{tWK}	170
5.3.3	Zug-/Druckbelastung.....	170
5.3.3.1	Zug-/Druckwechselfestigkeit der ungekerbten, polierten Probe σ_{zdW}	171
5.3.3.2	Zug-/Druckwechselfestigkeit der gekerbten Probe σ_{zdWK}	171
6	Optimierung der Grundform.....	173
6.1	Definition der Grundform	173
6.2	Optimierung ohne Profilmodifizierung.....	174
6.2.1	Vorgehensweise	176
6.2.1.1	Festlegung des Untersuchungsbereichs	176
6.2.1.2	Analyse und Optimierung.....	182
6.2.1.3	Mathematische Formulierung.....	186
6.2.2	Untersuchungsumfang.....	192
6.2.2.1	Konstanz des Wellenformübermaßverhältnisses c_{F1}/m	192
6.2.2.2	Variation des Wellenformübermaßverhältnisses c_{F1}/m	194
6.2.2.3	Analytisch-numerische Gegenüberstellung.....	196
6.2.3	Konstanz des Wellenformübermaßverhältnisses c_{F1}/m	197
6.2.3.1	Axialer Beanspruchungsverlauf	197
6.2.3.2	Allgemeine Einflussanalyse	201
6.2.3.3	Geometrische Ähnlichkeit	270
6.2.3.4	Zug-/druckseitige Tragfähigkeitsdifferenzierung	279
6.2.3.5	Mathematische Formulierung optimaler Verbindungen.....	287
6.2.3.6	Optimabezogene mathematische Tragfähigkeitscharakterisierung....	334
6.2.3.7	Optimierungspotenzial	362
6.2.4	Variation des Wellenformübermaßverhältnisses c_{F1}/m	375
6.2.4.1	Grenzwertbezogener Einfluss.....	376
6.2.4.2	Optimabezogener Einfluss.....	380
6.2.4.3	Optimabezogene mathematische Einflussbeschreibung.....	385

6.2.4.4	Nabenformübermaßverhältnis c_{F2}/m	396
6.2.5	Optimabezogene mathematische Tragfähigkeitscharakterisierung.....	397
6.2.6	Analytisch-numerischer Quervergleich	399
6.2.6.1	Falldefinition.....	399
6.2.6.2	Ergebnisse.....	401
6.2.7	Routine zur optimalen Gestaltung und Auslegung	404
6.3	Optimierung durch Profilmodifizierung.....	408
6.3.1	Vorgehensweise	410
6.3.2	Untersuchungsumfang.....	413
6.3.2.1	Allgemeine Einflussanalyse	413
6.3.2.2	Profilformvergleich	416
6.3.3	Allgemeine Einflussanalyse	417
6.3.3.1	Wellenfußrundungsradiusverhältnis ρ_{f1}/m	417
6.3.3.2	Modul m	420
6.3.3.3	Flankenwinkel α	423
6.3.4	Profilformvergleich	426
6.3.4.1	Geometrieäquivalenz	429
6.3.4.2	Numerikbasiert.....	435
6.3.4.3	Experimentbasiert.....	438
6.3.4.4	Schlussfolgerungen.....	450
7	Weiterführende Optimierung	452
7.1	Untersuchungsumfang	452
7.2	Ergebnisse	453
7.3	Konstruktive Schlussfolgerungen	457
8	Zusammenfassung.....	460
9	Ausblick.....	465
9.1	Torsionsmomentbezogen.....	465
9.1.1	Gültigkeitsnachweis der Ergebnisextrapolation.....	465
9.1.2	Nabenbezogene Optimierung und Tragfähigkeitsquantifizierung.....	466
9.1.3	Einfluss der Profilmodifizierung.....	466
9.1.4	Ersatzdurchmesser d_h nach [Naka 51]	467
9.1.5	Formulierung sowie Einflussbestimmung der Nabensteifigkeit	468

9.1.6	Bestimmung weiterführender geometrischer Einflüsse	468
9.1.7	Gestaltfestigkeitssteigerung durch Einsatzhärten	469
9.2	Biegemomentbezogen	469
9.3	Mehrfachbelastungsbezogen	470
9.4	Überarbeitung der [DIN 5466]	470
10	Literatur	472
10.1	Patente	472
10.2	Normen und Richtlinien	472
10.3	Weitere Literatur	473
11	Anhang	479
11.1	Numerikbezogene Definitionen, Entwicklungen und Betrachtungen	479
11.1.1	Ergebnisabsicherung	479
11.1.1.1	Modellverifizierung	479
11.2	Optimierung der Grundform ohne Profilmodifizierung	485
11.2.1	Konstanz des Wellenformübermaßverhältnisses c_{F1}/m	485
11.2.1.1	Flankenwinkel $\alpha = 20^\circ$	485
11.2.1.2	Flankenwinkel $\alpha = 30^\circ$	541
11.2.1.3	Flankenwinkel $\alpha = 37,5^\circ$	604
11.2.1.4	Flankenwinkel $\alpha = 45^\circ$	661
11.2.2	Geometrische Ähnlichkeit	718
11.2.2.1	Geometrisch ähnlich nach Gleichung (217) bzw. (218)	720
11.2.2.2	Nicht geometrisch ähnlich nach Gleichung (217) bzw. (218)	725
11.2.3	Mathematische Beschreibung optimaler Verbindungen	730
11.2.3.1	Modul m	730
11.2.3.2	Wellenzähnezahl z_1	752
11.2.3.3	Flankenwinkel α	752
11.2.3.4	Wellenfußrundungsradiusverhältnis ρ_{f1}/m	752
11.2.4	Optimabezogene mathematische Tragfähigkeitscharakterisierung	773
11.2.4.1	Datenanalyse zur Bestimmung des Einflusses der Wellenzähnezahl z_1 und des Welleninitiationsprofilverschiebungsfaktors x_{I1} auf die Formzahl	773
11.2.4.2	$\alpha_{ktGEHdB}^E$ sowie $\alpha_{ktGEHdh1}^E$	779
11.2.4.3	$K_{aktGEHdB}^{z1}$ sowie $K_{aktGEHdh1}^{z1}$	780

11.2.4.4 $K_{aktGEHdB}^{xI1}$ sowie $K_{aktGEHdh1}^{xI1}$ 782

11.2.4.5 Bezogenes Spannungsgefälle G'_{GEH} 784

11.2.5 Optimierungspotenzial 785

11.2.5.1 Beispielverbindung 785

11.2.5.2 Extremwertbetrachtung 787

11.2.6 Einfluss des Formübermaßes c_{F1} 788

11.2.6.1 $K_{aktGEHdB}^{cF1}$ 788

11.2.6.2 $K_{aktGEHdh1}^{cF1}$ 790

11.2.6.3 K_{GtGEH}^{cF1} 791

11.3 Optimierung der Grundform durch Profilmodifizierung 793

11.3.1 Werkstoffkennwerte 793

11.3.2 Geometriedefinition experimentell analysierter Prüflinge 794

11.3.3 Statische Torsion 797

11.3.4 Dynamische Torsion 798

11.4 Weiterführende Optimierung 802

11.4.1 Werkstoffkennwerte 802

11.4.2 Geometriedefinition experimentell analysierter Prüflinge 803

11.4.3 Statische Torsion in Kombination mit dynamischer Biegung 809

11.4.3.1 Standardkonfiguration 809

11.4.3.2 Einfluss der Nabenbreite 812

11.4.3.3 Einfluss der Nabenlage 815

11.4.3.4 Einfluss des Auslaufs 818

11.4.3.5 Einfluss des „Kaltwalzens“ 821

11.4.3.6 Einfluss des „Einsatzhärtens“ 824

11.4.3.7 Einfluss des „Einsatzhärtens“ bzw. des Auslaufs 827

11.4.3.8 Einfluss der Nabenrestwandstärke 830