

# **Flankenbruch - Eine Grenze der Zahnradtragfähigkeit in der Werkstofftiefe**

**Jochen Witzig**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Volk

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. B.-R. Höhn (i. R.)  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-W. Zoch (Universität Bremen)  
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Stahl

Die Dissertation wurde am 10.08.2011 bei der Tech  
München eingereicht und durch die Fakultät für M  
am 21.05.2012 angenommen.

# INHALT

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Problem- und Aufgabenstellung.....	1
1.2	Zielsetzung und Lösungsweg .....	3
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens</b> .....	<b>5</b>
2.1	Schäden mit Schadensausgang unterhalb der Bauteiloberfläche.....	5
2.2	Rechnerische Beurteilungsansätze.....	8
2.3	Weitergehende Untersuchungsergebnisse zum Einfluss von Werkstoffkenngrößen auf Flankenbruch .....	11
2.4	Schadensart Flankenbruch .....	14
2.4.1	Schadenscharakteristik.....	14
2.4.2	Abgrenzung der Schadensart Flankenbruch zu weiteren Schadensarten .	16
2.5	Zusammenfassung zum Stand des Wissens .....	20
<b>3</b>	<b>Modell zur Beurteilung einer lokalen Werkstoffanstrengung</b> .....	<b>21</b>
3.1	Charakteristische Beanspruchungen der Zahnflanke .....	22
3.2	Ermittlung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit zur Beurteilung von Schäden an und unterhalb der Bauteiloberfläche .....	23
3.2.1	Allgemeine Darstellungen zur Schubspannungsintensitätshypothese .....	23
3.2.2	Berechnung der lokalen Beanspruchungen .....	24
3.2.3	FZG-Modell zum Stirnradflankenbruch .....	26
3.2.4	Berechnung der lokalen Beanspruchbarkeit .....	29
3.3	Erweiterungen der Modellvorstellungen nach FZG/Hertter .....	30
3.4	Wahl einer Modellvorstellung zur Ermittlung einer Werkstoffgefährdung insbesondere in größeren Werkstofftiefen .....	31
3.5	Erweiterung der Beanspruchbarkeitsberechnung .....	33
3.6	Anwendung der Modellvorstellung für die Berechnung des Anstrengungstiefenverlaufs auf eine Zahnradpaarung .....	34
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b> .....	<b>39</b>
4.1	Versuchsprogramm.....	39
4.2	Prüfverzahnungen.....	40
4.3	Experimentelle Ermittlung der Flankenbruchtragfähigkeit.....	42
4.4	Neuteildokumentation und Qualitätsuntersuchungen.....	44
4.4.1	Hartfeinbearbeitung .....	44
4.4.2	Gefügeuntersuchungen .....	44
4.5	Prüfstände, Prüfverfahren, Versuchsdurchführung.....	47

<b>5</b>	<b>Versuchsergebnisse</b>	<b>49</b>
5.1	Hauptuntersuchungen	51
5.1.1	Untersuchungen mit Prüfverzahnungen aus 20MnCr5	51
5.1.2	Untersuchungen mit Prüfverzahnungen aus 18CrNiMo7-6	52
5.2	Ergänzende Untersuchungen	54
5.2.1	Untersuchungen zum Einfluss der Verzahnungsgeometrie	54
5.2.2	Untersuchungen zum Einfluss der Einsatzhärtungstiefe	58
5.2.3	Untersuchungen zum Einfluss des Wärmebehandlungsverfahrens	60
5.2.4	Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächentopographie	62
5.3	Untersuchungen zum Einfluss von Überlasten auf die Schadensart Flankenbruch	63
5.4	Versuchsbegleitende Dokumentation	67
5.4.1	Metallographische Untersuchungen	67
5.4.2	Härte- und Eigenspannungsmessungen	72
5.4.3	Reinheitsgraduntersuchungen	73
5.4.4	Schadensbilder	74
5.4.5	REM - Untersuchungen der aufgetretenen Flankenbrüche	76
5.4.6	Untersuchungen der dokumentierten Einschlüsse	78
<b>6</b>	<b>Auswertung, Zuordnung und Diskussion der Versuchsergebnisse</b>	<b>81</b>
6.1	Dynamische Simulation zur Bestimmung der lokalen Oberflächenbelastung	81
6.2	Ableitung von standardisierten Wöhlerlinien in Abhängigkeit des verwendeten Werkstoffs	85
6.3	Schlussfolgerungen aus den Versuchsergebnissen und Definition der Schadensart Flankenbruch	89
<b>7</b>	<b>Theoretische Studien zur Schadensart Flankenbruch</b>	<b>91</b>
7.1	Untersuchungen zur Entstehung der Schadensart Flankenbruch	91
7.1.1	Einfluss der Treibrichtung	91
7.1.2	Einfluss der Flankenkorrektur / des Eingriffsstoßes	92
7.1.3	Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächentopographie auf die Entstehung von Sekundär- und Tertiärrissen	95
7.1.4	FE-Analyse zur Entstehung von Sekundärrissen	96
7.2	Parameterstudie zur Identifikation maßgebender Einflussgrößen auf die Schadensart Flankenbruch	98

---

<b>8 Normfähiger, praxisorientierter Berechnungsansatz.....</b>	<b>103</b>
8.1 Ableitung eines normfähigen , praxisorientierten Berechnungsansatzes.....	103
8.1.1 Grundlagen des praxisorientierten Berechnungsansatzes.....	103
8.1.2 Ableitung des praxisorientierten Berechnungsansatzes .....	105
8.2 Verifizierung des praxisorientierten, normfähigen Berechnungsansatzes.....	111
8.2.1 Ergebnisse der umfangreichen vergleichenden Parameterstudie.....	111
8.2.2 Nachrechnung experimenteller Untersuchungsergebnisse.....	116
8.2.3 Nachrechnung von Getrieben aus der praktischen Anwendung .....	124
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>129</b>
<b>10 Literatur.....</b>	<b>133</b>