

# **Lebensdaueruntersuchungen an feinwerktechnischen Planetenradgetrieben mit Kunststoffverzahnung**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von:

**Dipl.-Ing. Michael Beier**

geboren in Biberach an der Riss

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

Tag der mündlichen Prüfung:

29.03.2010

Institut für Konstruktion und Fertigung  
in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen.....	xi
Abkürzungsverzeichnis .....	xv
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung .....	2
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Zuverlässigkeitstheorie.....	3
2.1.1 Grundbegriffe und Definitionen.....	3
2.1.2 Geläufige Kennwerte .....	4
2.2 Lebensdauerverteilungen .....	6
2.2.1 Exponentialverteilung .....	6
2.2.2 Normalverteilung .....	7
2.2.3 Weibullverteilung .....	9
2.2.4 Vertrauensbereiche in der Versuchsauswertung.....	12
2.3 Zuverlässigkeit feinwerktechnischer mechatronischer Systeme und deren Komponenten .....	13
2.3.1 Elektronische Komponenten.....	14
2.3.2 Elektromechanische Komponenten .....	15
2.3.3 Mechanische Komponenten .....	15
2.3.4 Systemzuverlässigkeit .....	17
2.4 Untersuchungsschwerpunkt Planetenradgetriebe - derzeitige Lebensdauerangaben am Markt.....	18
2.5 Unsicherheiten unvollständiger Lebensdauerangaben und Konsequenz der Datenlage .....	20
3 Untersuchte Getriebe mit Kunststoffverzahnung .....	23
3.1 Grundlagen und Aufbau von Planetenradgetrieben .....	23
3.1.1 Aufbau der untersuchten Getriebe .....	24
3.1.2 Physikalisches Wirkprinzip eines Planetenradgetriebes .....	25
3.1.3 Eingesetzte Materialien und Materialpaarungen .....	26

3.1.4	Schmierung zur Optimierung der Tribologie .....	27
3.1.5	Ausfallursachen kleiner Planetenradgetriebe .....	28
3.2	Ausgewähltes Getriebesystem .....	29
4	Prüfstandaufbau und Teststrategie .....	31
4.1	Randbedingungen.....	31
4.2	Vorhandener Prüfstand zu Motoruntersuchungen .....	32
4.2.1	Fremderregte Hysteresebremsen .....	32
4.2.2	Ansteuerung von Komplettsystemen .....	33
4.2.3	Prüfstandssteuerung und -messeinheit .....	33
4.3	Aufbau der Getriebeprüfstände.....	35
4.3.1	Hysteresebremsen-Prüfplätze .....	36
4.3.2	Neuentwicklung kostengünstiger Generatorprüfplätze .....	38
4.3.2.1	Idee.....	38
4.3.2.2	Wirkprinzip .....	39
4.3.2.3	Umsetzung .....	39
4.3.2.4	Einstellung des wirkenden Drehmoments .....	40
4.3.3	Anpassung und Erweiterung der Prüfstands Umgebung .....	40
4.3.4	Bewertung der Prüfstände .....	41
4.4	Versuchsstrategie und Planung .....	41
4.4.1	Vollständige Versuchsdurchführung .....	43
4.4.2	Design of Experiments und Versuchsreduktion .....	43
4.4.3	Festlegung der Versuchsdurchführung.....	44
4.4.4	Abgrenzung der Versuchsplanung .....	44
4.4.5	Versuchsplan .....	45
5	Ergebnisse der Untersuchungen.....	47
5.1	Ausfallursachen und Vermessung des Zustandes nach Ausfall .....	47
5.1.1	Ursachen des Getriebeausfalls.....	49
5.1.2	Ablauf des Planetenradverschleißes in den einzelnen Stufen.....	52
5.1.3	Verschleißbestimmung über eine Zahnweitenmessung .....	53
5.1.4	Vermessung der Prüflinge und Auswertung der Messwerte.....	54
5.2	Ermittelter Planetenradverschleiß in den einzelnen Getriebestufen .....	56
5.3	Einfluss der Betriebsart.....	61
5.4	Einfluss der Belastung bei gleichen Getrieben .....	64
5.5	Vergleich unterschiedlicher Getriebebauformen bei gleicher Leistung .....	67
5.6	Vergleich gleicher Linienlast bei unterschiedlicher Stufenübersetzung .....	72
5.7	Ermittelte Verteilungsfunktionen .....	78
6	Anwendung in frühen Entwicklungsphasen .....	83

6.1	Vergleich theoretischer und experimenteller Daten eines Planetenradgetriebes.....	83
6.2	Vergleich theoretischer und experimenteller Daten eines kompletten Antriebssystems .....	88
6.3	Statistische Auswertung des Ausfallverhaltens und deren Nutzung für frühe Phasen.....	90
6.3.1	Statistische Auswertung der Ausfalldaten nach der Cox-Methode.....	90
6.3.2	Beispielhafte statistische Analyse der Ausfalldaten von Motoren .....	91
6.3.3	Beispielhafte Synthese neuer Ausfalldaten für Motoren in frühen Phasen .....	93
6.3.4	Statistische Analyse der Ausfalldaten von Getrieben.....	95
6.3.5	Beispielhafte Synthese neuer Ausfalldaten für Getriebe in frühen Entwicklungsphasen auf Basis experimenteller Wöhlerkennlinien.....	98
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	101
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	101
7.2	Ausblick .....	102
	Literaturverzeichnis .....	105
	Anhang.....	111