

# **Finite Schadensakkumulation und Toleranzanalyse zur Zuverlässigkeits- untersuchung und Leistungssteigerung**

Von der Fakultät Maschinenbau  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von  
**Dipl.-Ing. (BA) Michael Engelbreit**  
geboren in Würzburg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche

Tag der mündlichen Prüfung: 29. November 2007

Institut für Konstruktion und Fertigung  
in der Feinwerktechnik  
der Universität Stuttgart

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen.....	4
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>9</b>
1.1 Motivation.....	9
1.2 Zielstellung und Vorgehensweise .....	10
<b>2 Stand der Technik.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Planetengetriebe und ihre Einsatzgebiete.....</b>	<b>12</b>
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise von Planetengetrieben .....	12
2.1.2 Einsatzgebiete von Planetengetriebe.....	15
2.1.3 Auslegung von Planetengetrieben .....	16
2.1.3.1 Tragfähigkeitsnachweis bei Verzahnungen .....	16
2.1.3.2 Lebensdauerberechnung von Wälzlagern .....	19
<b>2.2 Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Planetengetrieben.....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Grundlagen Zuverlässigkeitstechnik .....	20
2.2.1.1 Begriffe und Definitionen .....	20
2.2.1.2 Lebensdauerverteilungen .....	22
2.2.1.3 Zuverlässigkeit von Systemen.....	27
2.2.2 Systemanalyse eines Planetengetriebes .....	29
2.2.2.1 Ermittlung der Systembauelemente.....	29
2.2.2.2 Ermittlung der Systemelemente.....	30
2.2.2.3 Klassifizierung der Systemelemente.....	31
2.2.3 Ausfallverhalten der Einzelkomponenten .....	32
2.2.4 Berechnung der Systemzuverlässigkeit .....	33
<b>2.3 Verfahren zur Toleranzanalyse.....</b>	<b>35</b>
2.3.1 Toleranzarten .....	37
2.3.1.1 Bauteiltoleranzen.....	38
2.3.1.2 Montagetoleranzen.....	39
2.3.2 Arithmetische Toleranzanalyse .....	39
2.3.3 Statistische Toleranzanalyse.....	41
2.3.3.1 Statistische Grundlagen .....	42
2.3.3.2 Lineare eindimensionale Toleranzanalyse .....	43
2.3.3.3 Nichtlineare mehrdimensionale Toleranzanalyse .....	46

<b>3</b>	<b>Zuverlässigkeitseinfluss des Belastungskollektivs .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1</b>	<b>Schadensakkumulation allgemein .....</b>	<b>48</b>
3.1.1	Belastung und Beanspruchung .....	49
3.1.2	Ertragbare Belastung .....	50
3.1.3	Lebensdauerberechnung .....	53
3.1.3.1	Schadensakkumulationshypothesen .....	53
3.1.3.2	Lebensdauerberechnung bei Verzahnungen und Lagern .....	56
<b>3.2</b>	<b>Nutzungspotenziale im Planetengetriebe .....</b>	<b>59</b>
3.2.1	Lagerungen .....	60
3.2.2	Verzahnung .....	60
<b>3.3</b>	<b>Lebensdauerberechnung mit finiter Schadensakkumulation .....</b>	<b>62</b>
3.3.1	Theorie der finiten Schadensakkumulation .....	62
3.3.2	Finite Schadensakkumulation im Planetengetriebe .....	63
3.3.2.1	Finite Lastkollektive der Einzelkomponenten .....	63
3.3.2.2	Finite Bauteil-Wöhlerlinien .....	66
3.3.2.3	Finite Lebensdauerberechnung .....	70
<b>3.4</b>	<b>Beispiel zur Steigerung der Lebensdauer mittels FSA .....</b>	<b>73</b>
3.4.1	Beispielgetriebe und Belastungszyklus .....	73
3.4.2	Lebensdauerberechnung und Zuverlässigkeit .....	74
3.4.3	FSA und Lebensdaueroptimierung .....	79
<b>4</b>	<b>Auswirkungen der Tolerierung auf die Zuverlässigkeit .....</b>	<b>81</b>
<b>4.1</b>	<b>Toleranzen im Planetengetriebe .....</b>	<b>81</b>
4.1.1	Bauteiltoleranzen .....	81
4.1.1.1	Maßtoleranzen .....	81
4.1.1.2	Form- und Lagetoleranzen .....	82
4.1.2	Montagetoleranzen .....	83
4.1.3	Verteilungen der Fertigungsprozesse .....	84
<b>4.2</b>	<b>Fehlereffektgruppen im Planetengetriebe .....</b>	<b>86</b>
4.2.1	Herausarbeiten von Fehlereffektgruppen .....	86
4.2.2	Toleranzen und Fehlereffektgruppen .....	87
4.2.3	Toleranzketten in Fehlereffektgruppen .....	88
4.2.3.1	Grundprinzip der Monte-Carlo-Simulation .....	89
4.2.3.2	Toleranzanalyse mit der Monte-Carlo-Methode .....	91

<b>4.3</b>	<b>Zuverlässigkeitsverhalten unter Einfluss der Fehlereffektgruppen..</b>	<b>94</b>
4.3.1	Theoretisches Simulationsmodell zur Lastverteilung im Getriebe .	94
4.3.1.1	Simulationssystem PLANKORR.....	94
4.3.1.2	Getriebemodell in PLANKORR.....	99
4.3.2	Tragfähigkeit der Verzahnung.....	99
4.3.3	Tragfähigkeit der Lagerungen .....	103
<b>4.4</b>	<b>Ausblick zur Optimierung des Toleranzeinflusses.....</b>	<b>107</b>
<b>5</b>	<b>Finite Schadensakkumulation unter Berücksichtigung von Toleranzeinflüssen .....</b>	<b>109</b>
<b>5.1</b>	<b>Arbeitsschritte bei der Finiten Schadensakkumulation mit Toleranzeinfluss .....</b>	<b>109</b>
<b>5.2</b>	<b>Nutzen und Voraussetzungen .....</b>	<b>111</b>
<b>5.3</b>	<b>Praktische Vorgehensweisen zur Umsetzung.....</b>	<b>113</b>
<b>5.4</b>	<b>Praktische Verifikation der Vorgehensweise .....</b>	<b>116</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>119</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>121</b>
<b>8</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>128</b>