

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | Einleitung und Motivation | 1 |
| 2 | Stand der Technik | 5 |
| 2.1 | Federkraftbremse | 5 |
| 2.1.1 | Einordnung und Funktion..... | 7 |
| 2.1.2 | Anwendungen..... | 9 |
| 2.1.3 | Variantenbildung..... | 13 |
| 2.1.4 | Ansteuerung und Schaltverhalten..... | 15 |
| 2.1.5 | Auslegung..... | 19 |
| 2.2 | Prüftechnik für Bauteilveruche | 24 |
| 2.2.1 | Prüfstand Verschleißfestigkeit | 24 |
| 2.2.2 | Prüfstand Ermüdungsfestigkeit..... | 31 |
| 2.3 | Funktionale Sicherheit | 35 |
| 2.3.1 | Grundlagen der technischen Zuverlässigkeit..... | 35 |
| 2.3.1.1 | Qualitative Analyse | 37 |
| 2.3.1.2 | Quantitative Analyse..... | 39 |
| 2.3.2 | Rechtliche Rahmenbedingungen..... | 49 |
| 2.3.2.1 | Gesetze, Normen und Richtlinien | 49 |
| 2.3.2.2 | Regelwerk der Berufsgenossenschaften | 53 |
| 2.3.2.3 | Produkthaftung | 54 |
| 2.3.2.4 | Einstufung der Federkraftbremse | 55 |
| 2.3.3 | Funktionale Sicherheit von Maschinen | 60 |
| 2.3.3.1 | Risikobeurteilung und Risikominderung | 61 |
| 2.3.3.2 | Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen | 64 |
| 2.3.4 | Angaben zum Ausfallverhalten von Federkraftbremsen | 72 |
| 2.3.4.1 | Firma Intorq GmbH & Co. KG..... | 72 |
| 2.3.4.2 | SEW-EURODRIVE GmbH & Co. KG | 75 |
| 2.3.4.3 | Mayr Antriebstechnik GmbH & Co. KG..... | 76 |
| 2.3.4.4 | Gegenüberstellung | 78 |
| 2.3.5 | Federkraftbremsen in Sicherheitsfunktionen | 81 |
| 3 | Zielsetzung und weitere Vorgehensweise | 85 |
| 3.1 | Bewertung der Ausgangssituation | 85 |
| 3.2 | Zielsetzung | 90 |
| 3.3 | Weitere Vorgehensweise..... | 93 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4 | Qualitative Zuverlässigkeitsanalyse | 95 |
| 4.1 | Planung | 97 |
| 4.2 | Einsatzbedingungen | 100 |
| 4.3 | Analyse..... | 104 |
| 4.3.1 | Strukturanalyse..... | 104 |
| 4.3.2 | Funktionsanalyse (Systemebene) | 107 |
| 4.3.3 | Fehlerausschluss..... | 110 |
| 4.3.4 | Fehleranalyse (Systemebene)..... | 113 |
| 4.3.5 | Berücksichtigung von Instandhaltungsmaßnahmen | 127 |
| 4.3.6 | Fehleranalyse (Bauteilebene)..... | 131 |
| 5 | Simulative Vorstudie zum Verzahnungsverschleiß | 149 |
| 5.1 | Modellbildung | 150 |
| 5.2 | Parametrierung und Berechnung..... | 155 |
| 6 | Experimentelle Untersuchungen | 161 |
| 6.1 | Aufbau der Prüftechnik | 161 |
| 6.1.1 | Prüfstand 1 | 161 |
| 6.1.2 | Prüfstand 2 | 167 |
| 6.2 | Versuchsergebnisse | 172 |
| 6.2.1 | Bewegungsverhalten von Rotor und Ankerscheibe | 173 |
| 6.2.1.1 | Accelerometermessungen (Prüfstand 2) | 174 |
| 6.2.1.2 | LDV-Messungen (Prüfstand 1) | 176 |
| 6.2.2 | Drehmomentmessungen | 181 |
| 6.2.3 | Dauerversuch | 182 |
| 6.2.3.1 | Zwischenstand nach 10 Mio. Bremszyklen..... | 188 |
| 6.2.3.2 | Endstand nach 15 Mio. Bremszyklen | 191 |
| 6.3 | Interpretation der Versuchsergebnisse..... | 193 |
| 7 | Handlungsempfehlungen für die quantitative Zuverlässigkeitsanalyse | 199 |
| 7.1 | Berücksichtigung der Systemelemente | 201 |
| 7.1.1 | Dichtungen | 201 |
| 7.1.2 | Verzahnung Rotor / Nabe (Verschleiß)..... | 202 |
| 7.1.3 | Verzahnung Rotor / Nabe (Bruch) | 206 |
| 7.1.4 | Federn (Bruch) | 208 |
| 7.1.5 | Federn (verringerte Federkraft) | 211 |
| 7.1.6 | Ankerscheibe / Hülsenschrauben (Stufenbildung)..... | 213 |
| 7.1.7 | Spule und Mikroschalter | 214 |
| 7.2 | Abschließende Hinweise | 215 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 221 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 8.1 Zusammenfassung | 221 |
| 8.2 Ausblick | 226 |