

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                  | 1  |
| 1.1      | Zielsetzung  | 3  |
| 1.2      | Aufbau der Arbeit                                  | 5  |
| <b>2</b> | <b>Zusammenfassung</b>                             | 7  |
| <b>3</b> | <b>Grundlagen</b>                                  | 11 |
| 3.1      | CAN-Bus  | 12 |
| 3.2      | Messtechnik in der Betriebsfestigkeit              | 12 |
| 3.3      | Mathematische Methoden zur Parameteridentifikation | 15 |
| 3.3.1    | Lineare Regression                                 | 15 |
| 3.3.2    | Unrestringierte mathematische Optimierung          | 16 |
| 3.3.3    | Systemidentifikation                               | 18 |
| 3.4      | Fahrzeugdynamik                                    | 20 |
| 3.4.1    | Längsdynamik                                       | 20 |
| 3.4.2    | Vertikaldynamik                                    | 21 |
| 3.4.3    | Querdynamik  | 22 |
| 3.5      | Digitale Signalverarbeitung im Frequenzbereich     | 22 |
| 3.5.1    | Fourier-Transformation                             | 23 |
| 3.5.2    | Übertragungsfunktion                               | 25 |
| 3.6      | Grundlagen der Betriebsfestigkeit                  | 26 |
| 3.6.1    | Wöhlerlinie  | 28 |
| 3.6.2    | Lastkollektiv                                      | 29 |
| 3.6.3    | Lineare Schadensakkumulationshypthesen             | 30 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4 Stand der Technik: Dauerhafte Belastungsermittlung im Fahrbetrieb .....</b>                      | <b>33</b> |
| 4.1 Dauerhafte Belastungsermittlung zur Schädigungsüberwachung .....                                  | 33        |
| 4.2 Dauerhafte Belastungsermittlung zur Lastannahme .....   | 37        |
| 4.3 Vergleich der Methoden .....  | 39        |
| <b>5 Datenaufbereitung .....</b>  | <b>43</b> |
| 5.1 Auswahl der belastungsrelevanten CAN-Signale .....  | 43        |
| 5.2 Sind die CAN-Abtastraten ausreichend für die Belastungsermittlung? .....                          | 45        |
| <b>6 Ermittlung belastungsrelevanter Parameter .....</b>  | <b>49</b> |
| 6.1 Parameterabschätzung aus CAN-Daten .....  | 50        |
| 6.1.1 Fahrzeugmasse .....   | 50        |
| 6.1.2 Gangübersetzung .....   | 55        |
| 6.2 Parameterabschätzung aus Belastungsmessdaten .....  | 57        |
| 6.2.1 Fahrzeugschwerpunktlage .....   | 57        |
| 6.2.2 Bremskraftverteilung .....  | 60        |
| 6.2.3 Ungefederter Masse, Feder-, Dämpfer- und Stabilisatorkennung .....                              | 62        |
| <b>7 Ermittlung des niederfrequenten Anteils der Fahrwerksbelastungen .....</b>                       | <b>65</b> |
| 7.1 Niederfrequenter Anteil der Fahrwerksbelastungen in Längsrichtung .....                           | 66        |
| 7.1.1 Frontantrieb mit Handschaltgetriebe .....   | 68        |
| 7.1.2 Frontantrieb mit Doppelkupplungsgetriebe .....  | 71        |
| 7.1.3 Allradantrieb .....   | 75        |
| 7.1.4 Bremsung .....  | 78        |
| 7.2 Niederfrequenter Anteil der Fahrwerksbelastungen in Vertikalrichtung .....                        | 86        |
| 7.3 Niederfrequenter Anteil der Fahrwerksbelastungen in Querrichtung .....                            | 88        |
| <b>8 Ermittlung des hochfrequenten Anteils der Fahrwerksbelastungen .....</b>                         | <b>91</b> |
| 8.1 Hochfrequenter Anteil der Fahrwerksbelastungen in Längsrichtung .....                             | 93        |
| 8.1.1 Ableitung der empirischen Übertragungsfunktion .....  | 96        |
| 8.1.2 Berechnung der hochfrequenten Radlängskraft mithilfe der empirischen Übertragungsfunktion ..... | 103       |

|   |            |
|---|------------|
| 8.2 Hochfrequenter Anteil der Fahrwerksbelastungen<br>in Vertikalrichtung .....     | 106        |
| 8.2.1 Empirische Übertragungsfunktion zur Abschätzung<br>der Radvertikalkraft ..... | 107        |
| 8.2.2 Physikalisches Modell der<br>Fahrwerksvertikalschwingung .....                | 110        |
| 8.2.3 Ableitung der kombinierten Übertragungsfunktion .....                         | 113        |
| 8.2.4 Berechnung der Radvertikalkraft .....   | 114        |
| 8.3 Ermittlung der gesamten Fahrwerksbelastungen .....                              | 115        |
| <b>9 Validierung der Algorithmen und Ermittlung der<br/>Prognosegüte .....</b>      | <b>117</b> |
| 9.1 Validierung der Algorithmen und Prognosegüte für<br>Anwendungsfall 1 .....      | 119        |
| 9.1.1 Auswertung einer Beispilmessung .....   | 119        |
| 9.1.2 Statistische Auswertung mehrerer Messungen .....                              | 125        |
| 9.2 Auswertungen für Anwendungsfall 2 .....   | 129        |
| 9.2.1 Auswertung einer Beispilmessung .....   | 130        |
| 9.2.2 Statistische Auswertung mehrerer Messungen .....                              | 132        |
| 9.3 Auswertungen für Anwendungsfall 3 .....   | 135        |
| 9.3.1 Auswertung Beispilmessungen .....   | 136        |
| 9.3.2 Statistische Auswertung mehrerer Messungen .....                              | 141        |
| 9.4 Sensitivitätsanalyse .....  | 144        |
| <b>10 Ausblick .....</b>  | <b>149</b> |
| <b>Literaturverzeichnis .....</b>   | <b>151</b> |