

| | |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| I. Einleitung und Grundlagen | 1 |
| 1. Einleitung | 3 |
| 1.1. Motivation der Dissertation | 3 |
| 1.2. Bezug zum Forschungsprojekt VIPER | 5 |
| 1.3. Wissenschaftliche Zielsetzung | 7 |
| 1.4. Gliederung der Dissertation | 9 |
| 2. Schallausbreitung in Getrieben | 13 |
| 2.1. Körperschall | 15 |
| 2.1.1. Longitudinal- und Quasilongitudinalwellen | 16 |
| 2.1.2. Transversalwellen | 21 |
| 2.1.3. Biegewellen | 24 |
| 2.1.4. Lamb- und Rayleigh-Wellen | 31 |
| 2.1.5. Weitere Wellentypen | 33 |
| 2.2. Körperschallquellen in Getrieben | 34 |
| 2.2.1. Wechselnde Verzahnungssteifigkeit | 35 |
| 2.2.2. Vergrößerung der Zahnradüberdeckung | 36 |
| 2.2.3. Abweichung der Verzahnungsgeometrie | 36 |
| 2.2.4. Weitere Körperschallquellen | 38 |
| 2.3. Körperschallübertragung in Getrieben | 38 |
| 2.4. Körperschallwandler | 39 |
| 2.4.1. Methoden zur Körperschallwandlung | 41 |
| 2.4.2. Piezoelektrische Körperschallwandler | 42 |
| 2.5. Körperschallsignale von Getriebenverzahnungen | 45 |
| 2.6. Fazit | 51 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| II. Voruntersuchungen zu Körperschall, Getriebebelastungen und -drehzahlen | 53 |
| 3. Nachbildung realitätsnaher Belastungsprofile am Prüfstand | 55 |
| 3.1. Langzeit Feldstudie im Ernteeinsatz | 56 |
| 3.1.1. Aufbau des Ladewagens | 57 |
| 3.1.2. Datenerfassung im Ladewagen | 58 |
| 3.2. Ableitung eines realitätsnahen Belastungsprofils | 59 |
| 3.3. Aufbau des Getriebeprüfstandes und des Getriebes | 66 |
| 3.4. Fazit | 69 |
| 4. Drehzahlschätzung über künstliche neuronale Netze | 71 |
| 4.1. Verwandte Arbeiten zur Drehzahlschätzung über neuronale Netze | 74 |
| 4.2. Grundlagen zu neuronalen Netzen | 75 |
| 4.2.1. Mehrschichtiges Perzeptron | 78 |
| 4.2.2. Long Short-Term Memory | 80 |
| 4.2.3. Aufbau und Training von Regressionsnetzen | 84 |
| 4.3. Datenbasis und Aufbau der neuronalen Netze | 86 |
| 4.4. Training und Test der Netze | 90 |
| 4.4.1. Einfluss der Abtastrate und des Eingabedatentyps | 91 |
| 4.4.2. Einfluss der Länge der Eingabedaten | 94 |
| 4.4.3. Optimierung der Neuronenanzahl | 96 |
| 4.5. Fazit | 99 |
| III. Untersuchungen zu Verzahnungsschäden in Getrieben 101 | |
| 5. Untersuchung zur Erkennbarkeit von Verzahnungsschäden | 103 |
| 5.1. Verwandte Arbeiten zu Untersuchungen von Zahnflanken | 105 |
| 5.2. Experimentelle Untersuchungen | 106 |
| 5.3. Analyse der Datensätze | 110 |
| 5.3.1. Segmentierung der Schwingungssignale | 110 |
| 5.3.2. Untersuchungen im Zeitbereich | 116 |
| 5.3.3. Untersuchungen im Frequenzbereich | 120 |
| 5.4. Ableitung digitaler Filter durch LP-Spektren | 123 |
| 5.4.1. Berechnung und Orderschätzung der LP-Spektren | 124 |
| 5.4.2. Ableitung von Filtergrenzen durch Differenzspektren | 126 |
| 5.5. Fazit | 129 |
| 6. Korrelationsbasierte Detektion von Schäden an Zahnflanken | 131 |
| 6.1. Verwandte Arbeiten zur Schadensdetektion | 133 |
| 6.2. Theoretische Grundlagen des Ansatzes | 134 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3. Experimentelle Untersuchungen | 140 |
| 6.3.1. Detektion von Zahnbrüchen | 140 |
| 6.3.2. Detektion von Zahnflankenschäden | 143 |
| 6.4. Algorithmuserweiterung durch die neuronale Drehzahlsschätzung | 149 |
| 6.5. Fazit | 153 |
| IV. Resümee | 157 |
| 7. Zusammenfassung | 159 |
| Literaturverzeichnis | 163 |
| A. Notation | 177 |
| B. Abbildungen und Tabellen | 179 |