

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Ziel der Arbeit	1
2	Stand des Wissens	3
2.1	Grundlagen der Maschinenakustik	4
2.1.1	Wirkkette der Schallentstehung in der Maschinenakustik	4
2.1.2	Wahrnehmung von Schall durch das menschliche Ohr	6
2.1.3	Mithörschwelle	7
2.2	Der elektromechanische Achsantrieb für Elektrofahrzeuge	7
2.2.1	Antriebsstrangtopologien elektromechanischer Achsantriebe	8
2.2.2	Differentialbasiert Achsantrieb mit zentral angeordneter Antriebseinheit ..	9
2.3	Schwingungsanregungsmechanismen im elektromechanischen Antriebsstrang	10
2.3.1	Schwingungsanregung durch die Leistungsselektronik	12
2.3.2	Schwingungsanregung durch den Elektromotor	13
2.3.3	Grundlagen der Verzahnungsanregung	16
2.3.4	Optimierung der Schwingungsübertragung im Achsgetriebe	19
2.4	Dynamisches Verhalten von Zahnradgetrieben	22
2.5	Rechnerische Bewertung des Schwingungsverhaltens von Stirnradverzahnungen..	24
2.5.1	Drehwegfehler	25
2.5.2	Quasi-statischer und dynamischer Zahnkraftpegel	26
2.5.3	Dynamikfaktor	26
2.5.4	Anwendungskraftpegel	27
3	Aspekte zur Verzahnungsauslegung für elektromechanische Antriebsstränge	29
3.1	Ermittlung der Achsgetriebeübersetzung aus den Fahrzeug-spezifikationen	29
3.2	Schwingungsrelevante Einflussgrößen des Achsgetriebes	31
3.2.1	Anregungsarme Verzahnungshaupt- und feingeometrie	33
3.2.2	Anwendbarkeit periodisch welliger Verzahnungskorrekturen	34
3.2.3	Beeinflussung der Resonanzlage einer Verzahnung	36
3.2.4	Geometrische Randbedingungen für den unterkritischen Betrieb	37
3.2.5	Geometrische Randbedingungen zur Integration eines Drehschwingungstilgers in den Radkörper	40
3.2.6	Berücksichtigung des Strukturverhaltens des Antriebsstrangs	42
3.3	Schwingungsoptimierte Betriebsstrategie leistungsverzweigter Achsgetriebe	43
3.3.1	Betriebsstrategie zur Vermeidung von Resonanzschwingungen	44
3.3.2	Betriebsstrategie zur Minimierung des Verzahnungsgeräusches	45
3.4	Auslegung des elektromechanischen Achsgetriebes	47
4	Auslegung der Prüfgetriebe und Zielsetzung der experimentellen Untersuchungen .	49
4.1	Die Prüfgetriebe im Achsantrieb eines Kleinstelektrofahrzeugs	51
4.2	Das Prüfgetriebe des Hochdrehzahlantriebsstrangs	53
4.3	Auslegung der Prüfverzahnungen	55
4.4	Analyse der Getriebestruktur mittels der Finite-Elemente-Methode	57
4.5	Übersicht der untersuchten Prüfverzahnungen	59

5 Dokumentation der Prüfverzahnungen	61
5.1 Prüfverzahnungen im Elektrofahrzeug mit Betriebsdrehzahlen bis $12\,000\text{ min}^{-1}$	62
5.2 Prüfverzahnungen des Getriebeprüfstands mit Betriebsdrehzahlen bis $30\,000\text{ min}^{-1}$	65
5.3 Diskussion des rechnerischen Anregungsverhaltens.....	70
5.4 Schwingungsoptimierte Betriebsstrategie für das Hochdrehzahlgetriebe SPEED2E ..	73
6 Versuchsaufbau und Prüfbedingungen	77
6.1 Messtechnik	77
6.2 Prüfaufbau der Elektrofahrzeuggetriebe	78
6.2.1 Positionierung der Sensorik	79
6.2.2 Versuchsplan und Betriebsbedingungen	81
6.3 Prüfaufbau des Prüfstandprüfgetriebes	81
6.3.1 Positionierung der Sensorik	82
6.3.2 Versuchsplan und Betriebsbedingungen	83
6.4 Methoden zur Auswertung der Messungen	84
6.5 Genauigkeit der Schwingungsmesstechnik	86
7 Dokumentation der Versuchsergebnisse	87
7.1 Messauswertung am Elektrofahrzeuggetriebe MUTE.....	87
7.1.1 Auswertung motornaher Messungen.....	87
7.1.2 Auswertung der Messungen am Getriebegehäuse	89
7.1.3 Körperschallübertragung in die Fahrzeugstruktur.....	90
7.2 Messauswertung am Elektrofahrzeuggetriebe VISIO.M	91
7.2.1 Auswertung motornaher Messungen.....	91
7.2.2 Auswertung der Messungen am Getriebegehäuse	92
7.2.3 Einfluss der Zahnlängenmodifikationen	94
7.3 Auswertung der Messungen am Hochdrehzahlprüfgetriebe	96
7.3.1 Zuordnung der Schallereignisse zu den Erregerquellen	96
7.3.2 Auswertung der Prüfverzahnung PSG30k_Ref	97
7.3.3 Auswertung der Prüfverzahnung PSG30k_Eta	100
7.3.4 Auswertung der Prüfverzahnung PSG30k_zmin	102
7.3.5 Auswertung der Prüfverzahnung PSG30k_uek	104
8 Diskussion der Versuchsergebnisse	107
8.1 Vergleich der Messungen der Elektrofahrzeuggetriebe.....	107
8.2 Vergleich der Messungen am Hochdrehzahlprüfgetriebe	110
8.3 Empfehlungen zur Auslegung schwingungsschwächer Achsgetriebe.....	115
9 Zusammenfassung und Ausblick.....	119
10 Literaturverzeichnis	123

11 Anhang	137
11.1 Übersicht der Messpositionen an den Prüfgetrieben	137
11.2 Verzahnungsdaten der Final-Drive-Verzahnungen aller Prüfgetriebe	138
11.3 Verzahnungsdaten von Teilgetriebe II des Hochdrehzahlprüfgetriebes SPEED2E ...	140
11.4 Dynamischer Zahnkraftsummenpegel der Prüfgetriebe	140
11.5 Dynamikfaktorkennfelder der Prüfverzahnungen.....	142
11.6 Schwingungsoptimierte Betriebsstrategie der Prüfverzahnungen PSG30k.....	143
11.7 Betriebsstrategie zur Vermeidung von Verzahnungsresonanzen der Prüfverzah- nungen PSG30k	146
11.8 Übersicht der Anregungsordnungen.....	147
11.9 Wiederholungsmessungen eines Drehzahlhochlaufs	148
11.10 Tonzuschläge aus Luftschallmessungen des Hochdrehzahlprüfgetriebes SPEED2E	150
11.11 Pegelvergleich der Prüfverzahnungen PSG30k bei stationären Prüfbedingungen...	154
11.12 Messschriebe der Prüfverzahnungen.....	155
12 Dissertationen der FZG	161