

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	Differentialbasierter Achsantrieb mit zentral angeordneter Antriebseinheit ..	9
2.3	Schwingungsanregungsmechanismen im elektromechanischen Antriebsstrang	10
2.3.1	Schwingungsanregung durch die Leistungselektronik	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	Schwungsrelevante 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 Drehschwingungs- tilgers 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 Verzahnungsgeräuschs	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 Getriebepfprüfstands 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 motornäher 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 motornäher Messungen	91
7.2.2	Auswertung der Messungen am Getriebegehäuse	92
7.2.3	Einfluss der Zahnflankenmodifikationen	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 schwingungsarmer 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 Prüfverzahnungen 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