

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Energiebedarf von Elektrofahrzeugen	5
2.1.1 Energiebedarf durch Fahrwiderstände	6
2.1.2 Energiebedarf durch Antriebsstrangverluste	10
2.1.3 Energiebedarf durch Nebenverbraucher	17
2.2 Getriebeverluste durch Reibung	18
2.2.1 Grundlagen der Tribologie	20
2.2.2 Verzahnungsverluste	23
2.2.3 Lagerverluste	27
2.2.4 Dichtungsverluste	28
2.2.5 Schaltelementverluste	29
2.2.6 Sonstige Verluste	31
2.3 3F-Methodik	32
2.4 Elektrische Antriebskonzepte	33
2.4.1 Getriebe in Elektrofahrzeugen	36
2.4.2 Zweigängige elektrische Achsantriebe	37
2.5 Dimensionierung und Auslegung von Getriebewellen	40
2.6 Einordnung und Bewertung der vorhandenen Methoden	41
3 Ansätze zur Verlustberechnung in Getrieben	45
3.1 Verzahnungsverluste	45
3.1.1 Lastabhängige Verzahnungsverluste	45
3.1.2 Lastunabhängige Verzahnungsverluste	47

3.2	Lagerverluste	52
3.2.1	Berechnungsansatz nach INA/FAG	53
3.2.2	Berechnungsansatz nach SKF	54
3.3	Dichtungsverluste	56
3.4	Schaltelementverluste	59
3.4.1	Kupplungsverluste	59
3.4.2	Synchronisierungsverluste	64
3.5	Luftreibungsverluste	64
4	Getriebeverlusterberechnungsmodelle	67
4.1	Bauteilindividuelle Verlustberechnung	67
4.1.1	Aufbau der Bauteilindividuellen Verlustberechnung	68
4.1.2	Optimierung der Kupplungsverlusterberechnung	69
4.2	Kennfeldbasiertes Simulationsmodell	75
4.2.1	Optimierungsbedarf	76
4.2.2	Aufbau des Kennfeldbasierten Simulationsmodells	78
4.2.3	Automatisierte Getriebedimensionierung	80
4.2.4	Verlusterkennfelddatenbank für die Getriebekomponenten	90
4.3	Auswahl der geeigneten Getriebeverlustermodellierung	94
4.4	Ausgewählte Getriebekonzepte	96
4.5	Optimierung der Getriebeübersetzungen	99
5	Gesamtfahrzeugsimulationsmodelle	101
5.1	Modulares Simulationsmodell	101
5.2	3F-Simulationsmodell	102
5.3	Vergleich der Gesamtfahrzeugmodelle	105
5.4	Fahrzyklen zur Bewertung des Energieverbrauchs	106
5.5	Fahrzeugparameter und Anforderungen	108
6	Bewertung des Einflusses von Getrieben auf den Energieverbrauch	111
6.1	Effizienzvergleich der Getriebekonzepte im WLTC	111
6.1.1	Getriebekonzept 1 – Einganggetriebe	111
6.1.2	Getriebekonzept 2 – Zweiganggetriebe	112
6.1.3	Getriebekonzept 3 – Zweiganggetriebe	113

6.2	Vergleich der Gesamtfahrzeugmodelle	114
6.2.1	Auswertung der Getriebeverlustenergien	116
6.2.2	Auswertung der Wirkungsgrade	118
6.2.3	Vergleich des Gesamtenergieverbrauchs	121
6.3	Effizienzvergleich der Getriebekonzepte bei Fahrzeugvariation . .	123
6.4	Effizienzvergleich der Getriebekonzepte im Kundenbetrieb	127
6.5	Analyse und Interpretation der Simulationsergebnisse	130
7	Zusammenfassung und Ausblick	133
7.1	Zusammenfassung	133
7.2	Ausblick	136