

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	X
1 Motivation und Zielstellung	1
2 Untersuchungshintergrund	3
2.1 Forschungsvorhaben EcoTrain	3
2.2 Dieselelektrisches Hybridfahrzeug.....	4
2.3 Betrieb des Hybridfahrzeugs.....	8
3 Stand von Wissenschaft und Technik	10
3.1 Potentialanalyse.....	10
3.2 Fahrzeugtechnik.....	12
3.2.1 Antriebstechnik.....	12
3.2.2 Energiespeicher.....	15
3.3 Bestand Energieversorgungsinfrastruktur	17
3.3.1 Dieseldieseltankstellen.....	17
3.3.2 Anlagen zur kontinuierlichen Energieversorgung	17
3.3.2.1 16,7-Hz-Bahnenergieversorgung	17
3.3.2.2 50-Hz-Landesenergieversorgung	18
3.3.3 Anlagen zur diskontinuierlichen Energieversorgung	18
3.4 Kopplung zwischen Infrastruktur und Fahrzeug	19
3.5 Internationaler Entwicklungsstand.....	19
3.6 Simulationswerkzeuge.....	23
4 Technisches Nachladesystem.....	24
4.1 Systemklassifizierung des Nachladesystems.....	24
4.2 Betriebsfälle der externen Nachladung	25
4.3 Schnittstelle Kopplungssystem.....	26
4.3.1 Systembewertung konduktiver und induktiver Kopplungssysteme	26
4.3.2 Nachladung im Fahrplanbetrieb - Systemauswahl	27
4.3.3 Nachladung außerhalb des Fahrplanbetriebs - Systemauswahl	28

4.4	Bahnfahrzeug	28
4.4.1	Mechanische Integration	28
4.4.2	Elektrische Integration	31
4.4.2.1	Antriebsstruktur mit Nachladesystem	31
4.4.2.2	Ladevorgang im Fahrplanbetrieb	33
4.4.2.3	Ladevorgang außerhalb des Fahrplanbetriebs	35
4.4.3	Leittechnische Integration	37
4.4.3.1	Leittechnikstruktur	37
4.4.3.2	Ladevorgang im Fahrplanbetrieb - Ablauf	37
4.4.3.3	Ladevorgang außerhalb des Fahrplanbetriebes - Ablauf	39
4.4.3.4	Ebenenbezogene leittechnische Integration	41
4.5	Bahninfrastruktur	42
4.5.1	Varianten der Ladeinfrastruktur	42
4.5.2	Nutzung der 1AC-15-kV-16,7-Hz-Bahnenergieversorgung	42
4.5.3	Nutzung der 3AC-50-Hz-Landesenergieversorgung	44
4.5.3.1	Konzeption	44
4.5.3.2	Umspannstation mit 3AC-50-Hz-Netzanschluss	44
4.5.3.3	Ladeabschnitt mit 1AC-50-Hz-Oberleitungsanlage	45
4.5.3.4	Schutz- und Erdungskonzept für den 50-Hz-Ladeabschnitt	46
4.5.4	Kompatibilität Fahrzeug-Infrastruktur	48
5	Werkzeug zur technischen Modellvalidierung	50
5.1	Verwendete Programmumgebung	50
5.2	Fahrzeugbezogene Modellintegration	52
5.2.1	Leistungssteuerung beim Halt	52
5.2.2	Komponentenmodellierung bei Nachladung	55
5.2.2.1	Dieselmotor	55
5.2.2.2	Generator und Gleichrichter	55
5.2.2.3	Energiespeicher	56
5.2.3	Modellentwicklung zur Einflussermittlung des Nachladesystems auf die Energiespeicherlebensdauer	57
5.2.3.1	Systemgrenzen der Simulationsumgebung	57
5.2.3.2	Fallbeispiel Nachladung durch den Dieselmotor	57

5.2.3.3	Fallbeispiel Umläufe eines Betriebstages ohne Nachlademöglichkeit.....	58
5.3	Infrastruktur- und betriebsbezogene Modellintegration.....	60
5.3.1	Infrastrukturelle Integration	60
5.3.2	Betriebliche Integration	60
5.3.2.1	Ablauf des Ladevorgangs	60
5.3.2.2	Fahrzeugumläufe	62
5.3.2.3	Betriebstage	62
5.4	Technische Referenzsimulation.....	62
5.4.1	Referenzhybridfahrzeug	62
5.4.2	Referenzinfrastruktur und -betrieb	64
5.4.2.1	Beispielstrecke	64
5.4.2.2	Ladeinfrastruktur	66
5.4.2.3	Betrieb.....	68
5.5	Beispielsergebnisse der technischen Simulation	70
5.5.1	Lösungsräume mit unterschiedlicher Ladeinfrastruktur	70
5.5.1.1	Szenario A - Nachladung nach einem Umlauf am Endhalt.....	70
5.5.1.2	Szenario B - Nachladung am Wendehalt und am Endhalt	76
5.5.1.3	Szenario C - Nachladung an allen Stationshalten	81
5.5.2	Auszug ausgewählter Einzellösungen je Lösungsraum	86
5.5.2.1	Vergleichsbedingungen	86
5.5.2.2	Einfluss der Szenarien auf den Ladezustand des Energiespeichers	87
6	Werkzeug zur wirtschaftlichen Bewertung.....	92
6.1	Bewertungsansatz	92
6.2	Werkzeug zur Auswahl zu berechnender Ergebnisse.....	94
6.3	Berechnungsmethodik der dynamischen Investitionsrechnung.....	95
6.3.1	Kapitalwert.....	95
6.3.2	Zinsfaktoren.....	96
6.3.3	Restwertbestimmung und Liquidationserlös.....	97
6.4	Einflussfaktoren der externen Nachladung.....	98
6.4.1	Fahrzeugseitiges Ladesystem	98
6.4.2	Infrastruktur für fahrplanmäßigen Betrieb	99

6.4.2.1	Vorhandene 16,7-Hz-Bestandsladeinfrastruktur	99
6.4.2.2	Nachrüstung von 50-Hz-Ladeinfrastruktur	99
6.4.3	Fahrplanmäßiger Betrieb	101
6.4.3.1	Fahrzeugauflistung	101
6.4.3.2	Dieselmotorkraftstoffbezug	101
6.4.3.3	Elektroenergiebezug	101
6.5	Beispielsergebnisse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung	102
6.5.1	Kapitalwertberechnung	102
6.5.1.1	Szenario A - Nachladung nach einem Umlauf am Endhalt	102
6.5.1.2	Szenario B - Nachladung am Wendehalt und am Endhalt	107
6.5.1.3	Szenario C - Nachladung an allen Stationshalten	112
6.5.2	Zusammensetzung der Kapitalwerte	116
6.5.2.1	Szenario A - Nachladung nach einem Umlauf am Endhalt	116
6.5.2.2	Szenario B - Nachladung am Wendehalt und am Endhalt	117
6.5.2.3	Szenario C - Nachladung an allen Stationshalten	118
6.5.3	Einflussmöglichkeit veränderter Rahmenbedingungen	119
7	Fazit	121
7.1	Modellkritik und weiterer Forschungsbedarf	121
7.2	Zusammenfassung	123
	Literaturverzeichnis	127
A	Anhang	132
8	Kopplungssystem	132
8.1	Grundlagen	132
8.1.1	Leistung, Wirkungsgrad und Energie	132
8.1.2	Übertragungsweg bei konduktiven Systemen	133
8.1.3	Übertragungsweg bei induktiven Systemen	135
8.2	Variantenbildung	139
8.3	Bewertungskriterien Kopplungssystem	140
8.4	Bewertungsergebnis	144
8.5	Einsatzspezifische Auswahl	146
8.5.1	Einsatzfälle für das Ladesystem	146
8.5.2	Systemauswahl - Fahrplanmäßiger Betrieb	146

8.5.2.1	Anforderungen aus dem Lichtraumprofil	146
8.5.2.2	Variantenbildung zur Systemauswahl	148
8.5.3	Bewertungskriterien und Methodik	150
8.5.4	Wichtung der Kriterien zur Systemauswahl	154
8.6	Systemauswahl	155