

I. Inhaltsverzeichnis

I. Inhaltsverzeichnis	1
II. Kurzzusammenfassung	6
III. Abkürzungsverzeichnis	8
IV. Nomenklatur der verwendeten Formelzeichen	11
V. Abbildungsverzeichnis	15
VI. Tabellenverzeichnis	21
VII. Diagrammverzeichnis	23
1 Einleitung	25
2 Stand der Technik	28
2.1 Physikalische Grundlagen	29
2.1.1 Elektrische und magnetische Felder	29
2.1.2 Die Lorentz-Kraft	30
2.1.3 Die magnetische Durchflutung	32
2.1.4 Die elektromagnetische Induktion	33
2.2 Linearantriebe.....	34
2.2.1 Allgemeine Funktion eines Linearantriebs	34
2.2.2 Elektromechanische Linearantriebe	35
2.2.2.1 Synchroner Linearantrieb	37
2.2.2.2 Asynchroner Linearantrieb.....	40
2.2.2.3 Aufbauvarianten	44
2.2.3 Linearantrieb der Neuen Bahntechnik Paderborn	46
2.3 Der Wirkungsgrad.....	49
2.4 Linearmotor-getriebene Schienensysteme	51
2.4.1 Systeme mit geringer Reisegeschwindigkeit	52
2.4.2 Systeme mit mittlerer Reisegeschwindigkeit	53
2.4.2.1 Neue Bahntechnik Paderborn.....	53
2.4.2.2 AirTrain, SkyTrain und PUTRA LRT	57
2.4.2.3 HSST / Linimo-System (Japan)	58

I. Inhaltsverzeichnis

2.4.3	Systeme mit hoher Reisegeschwindigkeit	60
2.4.3.1	Transrapid (Deutschland).....	60
2.4.3.2	JR-MAGLEV (Yamanashi)	67
2.5	Mechatronik und Selbstoptimierung	73
2.5.1	Mechatronik.....	73
2.5.1.1	Entwicklung mechatronischer Produkte	75
2.5.2	Selbstoptimierung.....	78
2.5.2.1	Der Selbstoptimierungsprozess	80
2.5.2.2	Der Aufbau selbstoptimierender Systeme.....	81
2.5.2.3	Die Entwicklung selbstoptimierender Systeme	83
3	Motivation und Zielsetzung	89
3.1	Die Thesen.....	89
3.1.1	These I – Wirkungsgrad und Linearmotorluftspalt	89
3.1.2	These II – Die Funktion des Luftspalts.....	89
3.1.3	These III – Selbstoptimierung als Lösung.....	90
3.2	Zielsetzung und weiteres Vorgehen	91
4	Analyse des Linearantriebs der NBP und seines Umfelds.....	92
4.1	Systemanalysen der NBP und der Deutschen Bahn.....	92
4.1.1	Das RaiiCab der NBP	92
4.1.1.1	Gesamtfahrzeug und Konvoi.....	95
4.1.2	Fahrweg, Fahrbahn, Schienenweg.....	97
4.1.2.1	Untergrund und Unterbau	97
4.1.2.2	Oberbau	99
4.1.2.3	Räder und Radsätze der Schienenfahrzeuge	104
4.2	Zusammenfassung der Einflüsse auf den Luftspalt.....	105
4.3	Identifikation von Optimierungsansätzen	105
4.3.1	Die „passive Luftspalteinstellung“.....	106
4.3.2	Die „aktive Luftspaltverstellung“.....	108
4.3.2.1	Untersuchung des Potenzials eines s.o. Systems zur Luftspaltverstellung.....	108

4.3.2.2	Mögliche Ziele für ein selbstoptimierendes System.....	113
5	Das Konzept der s.o. Luftspaltverstellung	115
5.1	Entwicklung des AGAS.....	115
5.2	Die Komponenten der aktiven s.o. Luftspaltverstellung	127
5.2.1	Das fahrzeugseitige System.....	127
5.2.2	Das streckenseitige System	128
5.3	Umsetzung eines übergeordneten Sicherheitskonzepts im AGAS	130
5.3.1	Das Ampelkonzept	130
5.3.2	Die mechanische Notfallebene.....	132
5.4	Vorhersage des Luftspalts	134
5.4.1	Berechnungsmodell des Luftspalts	135
5.4.2	Die Simulationsumgebung für das Berechnungsmodell.....	136
5.4.2.1	Das Fuzzy-Modell	137
5.4.2.2	Strecken- und Fahrzeugsimulation mit integriertem TrackBuilder.....	139
5.4.2.3	Verfahrensweise zur Prognose des Luftspaltverlaufs	140
5.4.3	Ermittlung des aktuellen Luftspalts.....	143
5.4.3.1	Direkte Messung des Luftspalts.....	143
5.4.3.2	Berechnung des Luftspalts	144
6	Experimentelle Untersuchungen zur Luftspaltoptimierung	147
6.1	Der Prüfaufbau „Linearmotor“	147
6.1.1	Zweck.....	147
6.1.2	Aufbau.....	148
6.1.3	Konstruktion	148
6.1.4	Messtechnik	150
6.1.5	Regelung.....	151
6.1.6	Messungen.....	152
6.1.6.1	Messungen am asynchronen Linearmotor.....	153
6.1.6.2	Messungen am synchronen Linearmotor.....	153
6.1.7	Ergebnisse der Messungen.....	153

6.1.7.1	Asynchroner Linearmotor.....	153
6.1.7.2	Synchroner Linearmotor.....	154
6.1.8	Erfahrungen aus der Inbetriebnahme	157
6.2	Der Prüfstand „Luftspaloptimierung“	159
6.2.1	Zweck	159
6.2.2	Aufbau	160
6.2.3	Konstruktion.....	161
6.2.4	Messtechnik.....	165
6.2.5	Regelung	166
6.2.6	Messungen.....	173
6.2.7	Ergebnisse der Messungen.....	177
6.2.7.1	Rondellgeschwindigkeit $\omega = 0,5 \text{ Rad/s}$, Statorteilung 9 – 9....	177
6.2.7.2	Rondellgeschwindigkeit $\omega = 0,5 \text{ Rad/s}$, Statorteilung 3 – 3....	181
6.2.7.3	Rondellgeschwindigkeit $\omega = 0,5 \text{ Rad/s}$, Statorteilung 2 – 2....	182
6.2.7.4	Rondellgeschwindigkeit $\omega = 0,5 \text{ Rad/s}$, Statorteilung 1 – 1....	184
6.2.7.5	Rondellgeschwindigkeit $\omega = 1,0 \text{ Rad/s}$ und $\omega = 1,5 \text{ Rad/s}$	186
6.2.8	Erfahrungen aus der Inbetriebnahme	187
6.2.9	Simulationen zum Prüfstand.....	187
6.2.9.1	Die Matlab/Simulink-Simulation	188
6.2.9.2	Die CAMelView-Simulation	191
6.3	Das Autonome Messfahrzeug „AMV“.....	191
6.3.1	Zweck	191
6.3.2	Aufbau	193
6.3.3	Konstruktion.....	193
6.3.4	Messtechnik.....	195
6.3.5	Steuerung und Messdatenaufnahme.....	198
6.3.6	Messungen.....	199
6.3.7	Ergebnisse der Messungen	201
6.3.7.1	Lagemessungen der Statoren.....	201

6.3.7.2	Temperatureinflüsse auf die Statorlage	205
6.3.7.3	Messungen im Streckenoval.....	208
7	Interpretation der Messergebnisse	210
7.1	Untersuchung unterschiedlicher Konfigurationen des Linearantriebs	210
7.2	Untersuchungen auf dem Prüfstand „Luftspaltoptimierung“	211
7.2.1	Modellbildung zur Interpretation der Messungen	211
7.2.2	Interpretation der Messergebnisse.....	215
7.2.2.1	Rondellgeschwindigkeit $\omega = 0,5 \text{ Rad/s}$, Statorteilung 9 – 9 ...	215
7.2.2.2	Rondellgeschwindigkeit $\omega = 0,5 \text{ Rad/s}$, Statorteilung 3 – 3 ...	220
7.2.2.3	Rondellgeschwindigkeit $\omega = 0,5 \text{ Rad/s}$, Statorteilung 2 – 2 ...	223
7.2.2.4	Rondellgeschwindigkeit $\omega = 1,0 \text{ Rad/s}$ und $\omega = 1,5 \text{ Rad/s}$	227
7.2.3	Schlussfolgerung aus den auf dem Prüfstand „Luftspaltoptimierung“ durchgeführten Messungen.....	229
7.2.4	Fehlerquellen	230
8	Die wichtigsten Erkenntnisse im Überblick	232
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	234
9.1	Durchgeführte Arbeiten.....	234
9.2	Ausblick	236
Anhang A.	Literaturverzeichnis.....	238
Anhang A.1	Liste der Vorveröffentlichungen	238
Anhang A.2	Verwendete Literatur	241
Anhang A.3	Verwendete Normen und Richtlinien	256
Anhang A.4	Verwendete Webseiten.....	259
Anhang A.5	Sonstige Quellen (Abbildungen)	262
Anhang B.	Versuchsprogramm „Luftspaltoptimierung“	264
Anhang C.	Lebenslauf.....	267