

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Abstract	6
Zusammenfassung	7
Inhaltsverzeichnis	9
1 Einführung	15
2 Grundlagen	17
2.1 Spurgebundene Bahnsysteme	17
2.1.1 Teilnetze eines Bahnsystems	18
2.1.2 Zugfahrplan	19
2.1.3 Taktfahrplan	19
2.1.4 Integrierter Taktfahrplan	20
2.1.5 Pünktlichkeit	21
2.2 Elektrische Bahnenergieversorgung	22
2.2.1 Energieträger für die Traktion	22
2.2.2 Begriffsdefinitionen	23
2.2.3 Bahnstromsysteme	24
2.2.4 Historie des 16,7-Hz-Bahnenergienetzes	27
2.2.5 16,7-Hz-Bahnenergieversorgung	30
2.2.6 Leistungs-Frequenzregelung	35
2.2.7 Netzsicherheit	37
2.2.8 Energiemix	37
2.3 Charakteristik von Bahnenergieverbrauchern	39
2.3.1 Dezentrale Einspeisung	39
2.3.2 Fluktuation des elektrischen Bahnleistungsverlaufs	39
2.3.3 Bewegliche Verbraucher	42
2.3.4 Varianz verschiedener Bahnenergienetze	42

2.4	Energiehandel der Bahnen	43
2.4.1	Ziele des Energiehandels	43
2.4.2	Langfristige Verträge und Terminmarkt	43
2.4.3	Seebewirtschaftung	44
2.4.4	Day-Ahead Markt	44
2.4.5	Intradayhandel.	45
2.4.6	Systemdienstleistungen	45
2.5	Dimensionierung von Bahnenergieversorgungen	46
2.5.1	Zugfahrtsimulation und Lastflussrechnung	46
2.5.2	Zeitgewichtete Belastungsdauerkurve	48
2.5.3	Fourierreihenanalyse	49
2.5.4	Schnelle Schätzung der Verkehrsleistung.	49
2.6	Bisherige Prognoseverfahren	50
2.6.1	Überblick.	50
2.6.2	Lineare Regression.	51
2.6.3	Vergleichstage	51
2.6.4	Künstliche neuronale Netze.	51
2.6.5	Software und Anbieter	54
2.7	Zusammenfassung	55
3	Zielsetzungen und Methoden der Arbeit	57
3.1	Forschungsfragen	57
3.2	Methodenkonzept	58
3.3	Abgrenzung der Arbeit	61
3.3.1	Grenzen der Prognosen	61
3.3.2	Topologische Abgrenzung	61
3.3.3	Zeitlicher Vorhersagehorizont	63
3.3.4	Zeitliche Granularität	64
3.4	Zielsetzung der Erkenntnisse	65
4	Genauigkeit von Lastprognosen	67
4.1	Definition von Gütekriterien für Lastprognosen	67
4.2	Grenzen der Prognosegenauigkeit	69
4.2.1	Vom Laplaceschen Dämon zum Big Data Dämon	69
4.2.2	Stochastische Unsicherheiten	70
4.2.3	Grenzen in der Praxis	71
4.2.4	Gedankenexperiment zur deterministischen Bahn.	71
4.3	Zusammenfassung	72

5	Physikalische Modellierung der Bahnstromlast	73
5.1	Zugfahrtsimulation	73
5.2	Nebenverbraucher	75
5.2.1	Überblick	75
5.2.2	Weichenheizungen	75
5.2.3	Heizung und Kühlung der Fahrzeuginnenräume	76
5.2.4	Traktionsnebenbetriebe	79
5.2.5	Weitere Fahrzeugnebenverbraucher	80
5.3	Meteorologie	80
5.4	Lastflussrechnung	82
5.5	Erprobung der physikalischen Modellierung	83
5.6	Zusammenfassung und Bewertung	84
6	Frequenzanalysen des Lastverlaufs	87
6.1	Lastverlauf	87
6.2	Fouriertransformation des Bahnleistungsverlaufs	88
6.2.1	Durchführung der Fouriertransformation	88
6.2.2	Normierung der Fouriertransformierten	89
6.2.3	Verbessern der Frequenzauflösung	90
6.2.4	Fouriertransformation des SBB Bahnleistungsverlaufs	94
6.3	Zerlegung des Bahnleistungsverlaufs im Zeitbereich	94
6.3.1	Grundmuster des elektrischen Bahnleistungsverlaufs	96
6.3.2	Halbstundenperiodizität und deren Oberschwingungen	98
6.3.3	Minutenperiodizität	99
6.3.4	Lastrauschen	102
6.4	Vergleich mit weiteren Bahnenergieversorgungen	103
6.4.1	Frequenzanalyse des DB Lastverlaufs	103
6.4.2	Frequenzanalyse des ÖBB Lastverlaufs	105
6.4.3	Normierung und Vergleich der Periodizitäten	107
6.5	Frequenzanalyse einer Zugfahrtsimulation	110
6.6	Zusammenfassung der Frequenzanalysen	113

7	Prognosemethoden	.115
7.1	Prognosen des Grundmusters der Last	.115
7.1.1	Aggregation von Zugfahrplankennzahlen	.115
7.1.2	Künstliche neuronale Netze	.116
7.1.3	Vorwissenbasierte-Adaptive Prädiktion	.119
7.1.3.1	Erläuterung des Verfahrens	.119
7.1.3.2	Einfluss der Zugpünktlichkeit auf den Energiebedarf	.123
7.1.3.3	Adhäsionsverhältnisse	.130
7.1.3.4	Fehlerfortpflanzung	.130
7.1.4	Eigenschaften außerhalb des Trainingsdatenbereichs	.132
7.2	Prognosen der Periodizitäten	.133
7.2.1	Zielsetzung	.133
7.2.2	Synthetisieren der Periodizitäten	.134
7.2.2.1	Detektion der Amplitude durch Hüllkurvenanalyse	.134
7.2.2.2	Detektion des Phasenwinkels	.136
7.2.3	Differenzielle Vergleichsmethode	.136
7.2.4	Zusammenfassung	.138
7.3	Quantifizierung der Stochastik des Lastrauschens	.139
7.3.1	Zielsetzung	.139
7.3.2	Quantil des Lastrauschens	.139
7.3.3	Multimodale Verteilung der Pünktlichkeit	.140
7.4	Synthese der Prognosemethoden	.144
7.4.1	Zielsetzung	.144
7.4.2	Stundenprognose	.144
7.4.3	Viertelstundenprognose	.145
7.4.4	Kontinuierliche Prognose mit Rauschband	.146
7.5	Bewertung und Vergleich der Prognosemethoden	.147
8	Anwendungen der Lastprognosen	.153
8.1	Anwendungsbereiche	.153
8.2	Netzsicherheitsrechnung	.154
8.3	Kraftwerkskapazitätsplanung	.154
8.4	Energiehandel	.156
8.4.1	Anwendungsszenarien	.156
8.4.2	Potenzial der Umsatzdifferenz	.157
8.5	Reduktion der Leerlaufverluste	.161
8.5.1	Zielsetzung	.161
8.5.2	Potenzial der Einsparungen	.161

8.6	Minimierung des Ausgleichsenergiebedarfs	162
8.6.1	Regelstrategie	162
8.6.2	Potenzial der Einsparungen	165
8.7	Peakshaving	166
8.7.1	Randbedingungen	166
8.7.2	Kurzzeitiges Abschalten von Nebenverbrauchern	166
8.7.3	Kurzzeitige Reduktion der Traktionsleistung.	168
8.7.4	Eliminieren von Periodizitäten	168
8.7.5	Vorhersage von Lastspitzen	170
8.7.6	Potenziale der Realisierung des Peakshaving	172
8.8	Prognosen zur erneuerbaren Portfolioplanung	172
8.8.1	Optimierung des erneuerbaren Kraftwerksportfolios	172
8.8.2	Potenzial zur Integration erneuerbarer Energien	173
8.8.3	Verbundnetz zum Ausgleich volatiler Einspeisung.	174
8.9	Zusammenfassung	175
9	Umsetzungsempfehlungen für Prognosesysteme.	177
9.1	Zielsetzung	177
9.2	Schnittstellendefinitionen	177
9.3	Verfügbarkeit der Eingangsgrößen	178
9.4	Robustheit gegenüber Störungen.	178
9.5	Adaption	179
9.6	Implementierung auf einem Server	179
9.7	Online-Flag zur Warnung vor ungenauer Prognose	180
9.8	Zusammenfassung	180
10	Schlussfolgerungen und Ausblick	181
10.1	Beantwortung der Forschungsfragen	181
10.2	Übertragbarkeit der Ergebnisse	184
10.3	Weiterer Forschungsbedarf	185
10.4	Fazit.	187
11	Abkürzungsverzeichnis	189
12	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	191
13	Liste der Vorveröffentlichungen zur Dissertation	199
14	Literatur- und Quellenverzeichnis	201