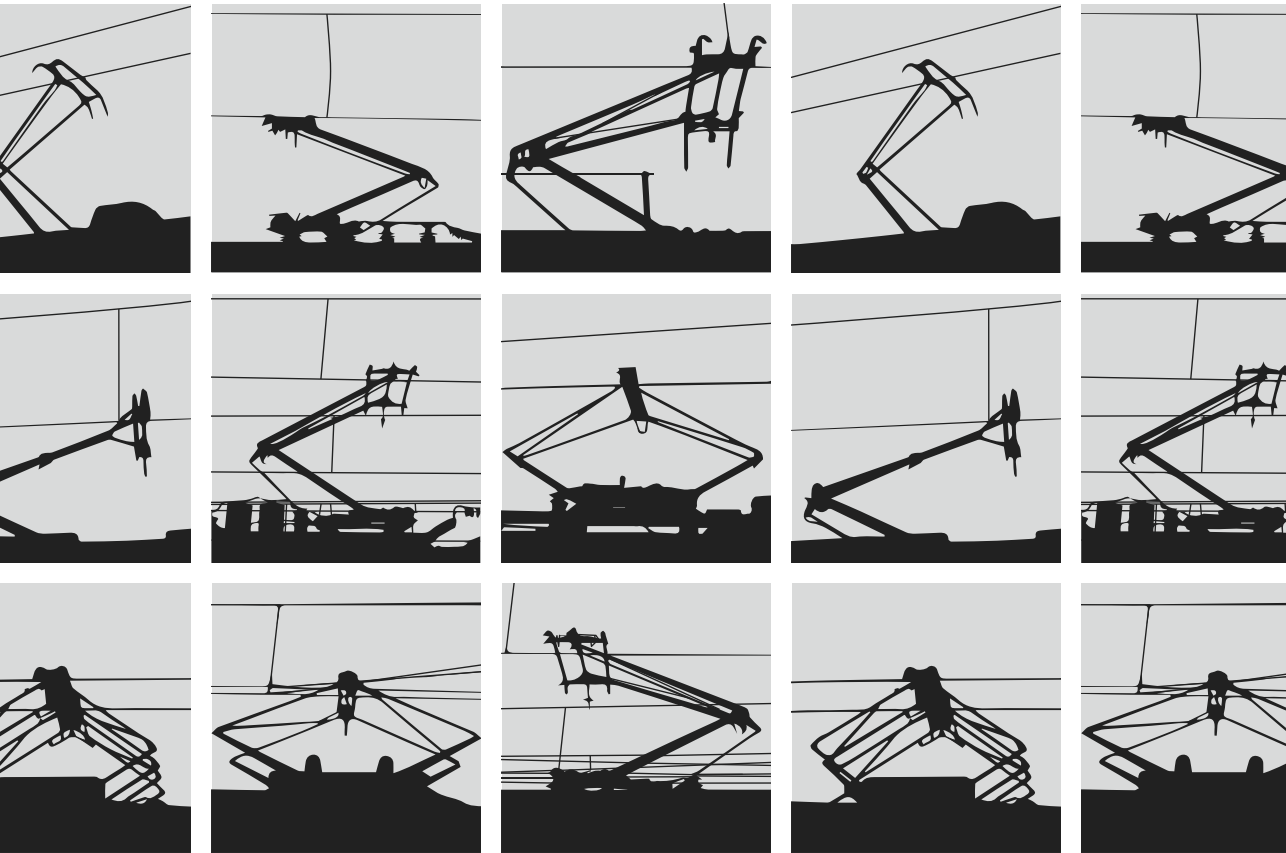


Julius Bosch

Prognosen des Leistungsbedarfs volatiler Energieversorgungsnetze am Beispiel elektrischer Bahnen



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

**Lehrstuhl für Erneuerbare und
Nachhaltige Energiesysteme**

**Prognosen des Leistungsbedarfs
volatiler Energieversorgungsnetze am Beispiel
elektrischer Bahnen**

Julius Bosch

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan, Technische Universität Dresden

Die Dissertation wurde am 20.06.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 23.01.2017 angenommen.

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

Julius Bosch

**Prognosen des Leistungsbedarfs volatiler Energieversorgungsnetze
am Beispiel elektrischer Bahnen**

ISBN Print: 978-3-96143-072-7

ISBN eBook: 978-3-96143-073-4

© 2017 ITM InnoTech Medien GmbH

Bahnhofstraße 10, 86150 Augsburg, Deutschland

Telefon: +49 821 65 04 49-0, Internet: www.eb-info.eu, www.innotech-medien.de

Umschlag: Stromabnehmer weltweit: RBS Unterzollkofen, DB Möhringen (Baden), RZD Jekaterinburg, SBB Olten, DB München, RZD Moskau, JB Kleine Scheidegg, SBB Kreuzlingen
DB München (Fotos und Bearbeitung: Autor)
Redaktion: Kathrin Fischer-Graßberger (M.A.)
Satz: Carolin Boos, Mediengestaltung
Druckerei: Druckerei Chmielorz GmbH, Wiesbaden

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen die Autoren, die Herausgeber und der Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Vorwort

Besonderer Dank gilt den Menschen, die mich bei dieser Arbeit auf unterschiedliche Weise unterstützt haben:

Ich danke Herrn Prof. Dr. Thomas Hamacher von der TU München, Lehrstuhl für „Nachhaltige und Erneuerbare Energiesysteme“, für die Betreuung der Arbeit und die Zeit, die er für zahlreiche Kolloquien investiert hat. Herrn Prof. Dr. Arnd Stephan von der TU Dresden, Professur „Elektrische Bahnen“, danke ich für sein großes Interesse für das Thema und für die Übernahme des Zweitgutachtens. Meinen Doktorandenkollegen der TU München von den Lehrstühlen für „Energiewirtschaft und Anwendungstechnik“ und „Nachhaltige und Erneuerbare Energiesysteme“ und insbesondere von der Doktorandengruppe „Flexible Last“ danke ich für den fachlichen Austausch und die stets freundliche Aufnahme. Für das Ermöglichen der Arbeit im Rahmen einer Kooperation und das entgegengebrachte Verständnis danke ich meinen Vorgesetzten von den Schweizerischen Bundesbahnen: Dr. Philipp Wenk, Frank Gundelach und Ken Brunner. Meinen Arbeitskollegen bei den Schweizerischen Bundesbahnen gilt Dank für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung, insbesondere Gerardus Kieboom für den guten Austausch bezüglich der Zugfahrtsimulation, Manuel Buser dafür, dass er meine Themenanregung für seine CAS Arbeit verwendet hat und vor allem Dr. Josep Aniceto sowie Dr. Steffen Schranil für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Bei Prof. Dr. Rudolf Füchslin und Christoph Zaugg von der Züricher Hochschule für Angewandte Wissenschaften sowie Dr. Clemens Obkircher von der ÖBB bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit bei gemeinsamen Veröffentlichungen. Außerdem danke ich Robert Strietzel und Nikolas Zbären für das Anfertigen studentischer Arbeiten zum Themengebiet.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern Brigitta und Hubert Bosch auch darüber hinaus danken, dass sie mir die Ausbildung zum Ingenieur ermöglicht haben. Meiner Partnerin Marie Leienbach danke ich für das große Verständnis und die Unterstützung.

Abstract

Forecasts of the power demand of volatile power grids using the example of electric railways

There are a large number of energy forecasting methods for 50 Hz national power supply grids. However, they can only be applied to railway power supply with limited success. On account of its particularities, such as the impact of the train timetable the railway power demand is temporal and spatial volatile, specialised prediction methods of the power demand are necessary. Therefore, in order to predict the total load of a 16.7 Hz railway power network, various forecasting methods are developed and applied. In this study, the time horizon of the forecast focuses on a period of a few days. The electric railway power profile is split up into characteristic frequency domains. For each of these frequency domains, the relationship with the influencing factors of railway operation is shown and a suitable known forecasting method is chosen or a new one is developed, with prior knowledge from the physical modelling conducted by individual consumers being applied. In addition, the stochastic components of the electric railway power profile are quantified. Applications of load forecasts are shown and are combined as appropriate and tested out for each individual forecasting method. Here, the results of the forecasting methods developed for the railway power supply outperform those of conventional and commercially available predictions. The results of the research, which was conducted using the example of electric railway power supply, are growing in significance on account of the increasing volatility of the residual load in national and industrial power grids and can also be applied in this area.

Zusammenfassung

Für 50-Hz-Landesnetze der Energieversorgung gibt es eine Vielzahl von Prognosemethoden des Energiebedarfs. Diese können aber nur mit mäßigem Erfolg als Leistungsprognose für Bahnenergieversorgungen angewendet werden. Aufgrund von Besonderheiten, wie dem Zugfahrplaneinfluss und den dadurch entstehenden zeitlich und örtlich stark veränderlichen elektrischen Bahnleistungsbedarf, werden spezialisierte Vorhersagemethoden des Leistungsbedarfs benötigt. Zur Vorhersage der Gesamtleistung eines 16,7-Hz-Bahnenergienetzes werden daher in dieser Arbeit verschiedene Prognosemethoden entwickelt und angewendet. Der Fokus des zeitlichen Vorhersagehorizonts ist auf wenige Tage gelegt. Der elektrische Bahnleistungsverlauf wird in charakteristische Frequenzbereiche zerlegt. Zu jedem dieser Frequenzbereiche werden die Zusammenhänge mit den Einflussfaktoren des Bahnbetriebs aufgezeigt und eine geeignete bekannte Prognosemethode ausgewählt oder eine neue Prognosemethode entwickelt. Dabei wird Vorwissen aus der physikalischen Modellierung der einzelnen Verbraucher angewendet. Zusätzlich werden die stochastischen Anteile des elektrischen Bahnleistungsverlaufs quantifiziert. Die Anwendungen für Lastprognosen werden aufgezeigt und für jede Anwendung die einzelnen Prognosemethoden passend zusammengefügt und praktisch erprobt. Dabei übertreffen die entwickelten Prognosemethoden in Bezug auf die Genauigkeit die Resultate konventioneller und marktüblicher Prognosen. Die Ergebnisse der Forschungsarbeit, die am Beispiel von elektrischen Bahnenergieversorgungen erarbeitet werden, gewinnen aufgrund der zunehmenden Volatilität der Residuallast in Landes- und Industrienetzen an Bedeutung und können dorthin übertragen werden.

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	Zugfahrsimulation 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

Einführung

1

Elektrische Bahnen bieten verglichen mit individuellen Straßenfahrzeugen oder dem Luftverkehr günstige spezifische Energiebedarfswerte. So wird zum Beispiel in der Schweiz ein Anteil von 17,6 % der Personenkilometer und beim Güterverkehr 40,7 % der Tonnenkilometer der Gesamtverkehrsleistung auf der Schiene erbracht, aber nur 4 % des Primärenergiebedarfs des Verkehrssektors entfallen auf den Schienenverkehr [51]. Außerdem werden 9,5 % der Verkehrsflächen für den Schienenverkehr benötigt [51]. In der Schweiz erfolgt die Zugförderung fast ausschließlich elektrisch. Ursachen für den geringeren spezifischen Energiebedarf sind die geringeren Walkverluste der Stahlrad-Schiene Kombination, die externe Energiezufuhr über die Fahrleitung¹, der verminderte relative Luftwiderstand durch das Fahren im Zugverband und die Rekuperation der Bremsenergie beim Verzögern oder Befahren von Strecken mit Gefälle. Außerdem lassen sich unterschiedliche Primärenergieträger für die Erzeugung der elektrischen Bahnenergie nutzen. Durch den Einsatz elektrischer oder teilweise elektrischer Straßenfahrzeuge (Hybridfahrzeuge) könnten künftig einige dieser Vorteile gegenüber dem Straßenverkehr schwinden. Wobei die Elektrostraßenfahrzeuge in einem nachhaltigen Verkehrskonzept eine intelligente Ergänzung zu einem elektrischen Bahnsystem wären. Die begrenzte

¹ Die Energiezufuhr über die Fahrleitung ermöglicht die Nutzung effizienter Energieträger wie Elektrizität und Wasserkraft, außerdem kann sehr gut rekuperiert werden und es müssen auf dem Fahrzeug weder Treibstoffe noch größere Energiespeicher mitgeführt werden.

Reichweite der Elektrostraßenfahrzeuge würde sich bei einem Einsatz zur Überbrückung der letzten Meilen nicht nachteilig auswirken. Daher gilt es alles daran zu setzen den elektrischen Schienenverkehr noch effizienter und ökologischer zu gestalten. Diese Arbeit leistet im Bereich der elektrischen Bahnenergieversorgung einen Beitrag dazu.

Bereits heute bietet der elektrische Schienenverkehr ideale Voraussetzungen für eine effiziente Nutzung erneuerbarer Energien. Da die Bahnen diese Möglichkeit erkannt haben, setzen sie sich das Ziel einer komplett erneuerbaren elektrischen Bahnenergieversorgung. So plant die DB (Deutsche Bahn) bis im Jahr 2050 [24], die SBB (Schweizerische Bundesbahnen) bis im Jahr 2025 [70] ihre 16,7-Hz-Bahnenergieversorgung auf 100 % erneuerbare Energien umgestellt zu haben. Dabei bieten die elektrischen Bahnenergieversorgungen Zentraleuropas ideale Voraussetzungen für die Integration erneuerbarer Energien. Nehmen die Bahnen ihre Ziele einer 100 % erneuerbaren elektrischen Bahnenergieversorgung ernst und speisen tatsächlich die erneuerbare Produktion direkt in das 16,7-Hz-Netz ein anstatt Energie unbekannter Herkunft² auf dem 50-Hz-Markt zu beschaffen und diesen anschließend durch Handel von Herkunftsnachweisen als erneuerbar zu deklarieren, könnten die Bahnen zu einem Paradebeispiel für nachhaltigen Verkehr werden. Die Zunahme der Anteile von volatilen erneuerbaren Energien bedeutet aber auch eine größere Herausforderung in den Bereichen des sicheren Netzbetriebes und Energiehandels. Da die Flexibilität bei der Bereitstellung der elektrischen Energie aufgrund der zunehmenden erneuerbaren Einspeisung abnehmen wird und die Preisvolatilität auf dem Energiemarkt zunimmt, muss Flexibilität an anderer Stelle geschaffen werden und verstärktes Augenmerk auf eine vorausschauende Planung gelegt werden. Neben der Flexibilisierung der Verbraucher in der elektrischen Bahnenergieversorgung werden künftig auch genauere Prognosen des elektrischen Bahnleistungsverlaufs wertvolle Informationen für eine bessere Planung der Netzsicherheit und eine bessere Nutzung der Chancen beim Energiehandel liefern. Außerdem kann eine bessere Prognosefähigkeit der Lasten zu einem vertieften Verständnis der Verbraucher führen, wodurch die Planung und Umsetzung von Lastflexibilisierungsmaßnahmen erleichtert wird. In dieser Arbeit werden Methoden zur Prognose des Leistungsbedarfs entwickelt und angewendet. Eine kontinuierliche Prognose des Leistungsverlaufs hat für die Bahnenergieversorgung heute bereits höchste Relevanz. In Zukunft ist zu erwarten, dass dies auch in 50-Hz-Landesnetzen und Industrienetzen an Relevanz gewinnt.

² Energie unbekannter Herkunft wird auch als Graustrom bezeichnet.

Grundlagen

2

2.1 Spurgebundene Bahnsysteme

Bahnsysteme existieren in unterschiedlichster Ausprägung, wobei das gemeinsame Merkmal die Spurgebundenheit ist (Abbildung 2.1). Die Spurgebundenheit kann

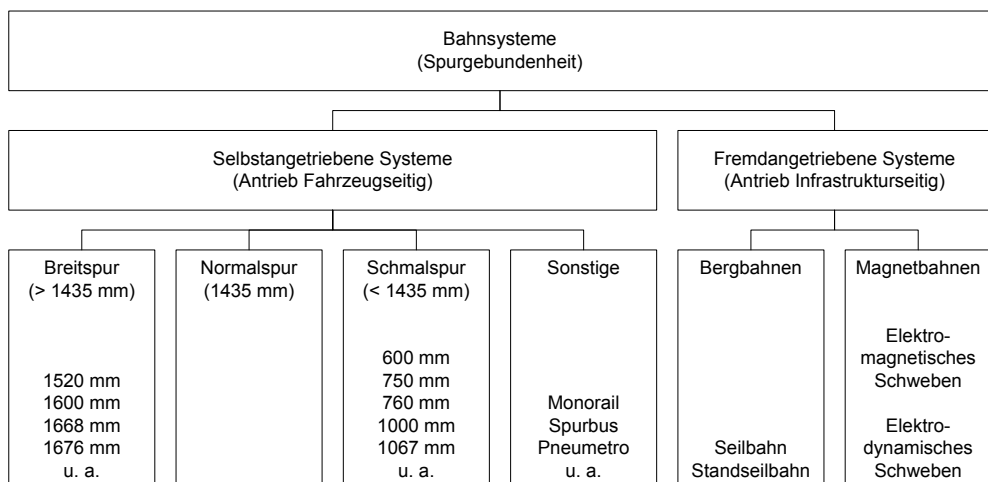


Abbildung 2.1: Klassifikation von spurgebundenen Bahnsystemen
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [75])

unterschiedlicher Art sein. Es existieren die klassische Rad-Schiene Kombination in verschiedenen Spurweiten, aber auch Bergbahnen, Hängebahnen, Schwebebahnen oder Monorailbahnen.

Die Spurgebundenheit hat zur Folge, dass ein spontanes Umfahren von Hindernissen nicht möglich ist. Der niedrige Reibwert zwischen Stahlrad und Schiene hat einen geringeren spezifischen Energiebedarf zur Folge als eine Gummireifen-Asphalt-Kombination, allerdings wird dadurch eine Fahrt auf Sicht bei höheren Geschwindigkeiten unmöglich, weil die Verzögerungswerte entsprechend gering sind. Durch diese Eigenschaften geht die Selbstorganisationsfähigkeit verloren, womit ein Zugsicherungssystem und infolge dessen ein Betriebsprogramm, meist in der Form eines Fahrplans, nötig wird [75]. Im Personenverkehr ist der Fahrplan auch aus Gründen der Kundenlenkung nötig. Die zum Bahnbetrieb nötigen Netze werden nachfolgend klassifiziert.

2.1.1 Teilnetze eines Bahnsystems

Zum Betrieb elektrischer Bahnen sind neben dem Fahrbahnnetz auch die Bahnenergieversorgung, ein Informationsnetz sowie Netze für Sicherungs- und Organisationsaufgaben nötig, siehe Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Teilnetze eines Bahnsystems und deren Funktionen für den Bahnbetrieb (Eigene Darstellung nach [89])

Fahrbahnnetz	Bahnenergienetz	Telekomnetz	Steuerungs- und Sicherungsnetz	Organisationsnetz
Tragen Führen Vorantreiben/ Bremsen	Energieversorgung Energie-rückleitung	Informations-transfer	Lenken Steuern Sichern	Entscheide Koordination Information

Dabei sind im Rahmen der Prognosen hauptsächlich das Fahrbahnnetz und das Bahnenergienetz entscheidend, wobei auch das Steuerungs- und Sicherungsnetz eine Rolle spielen. Auf das elektrische Bahnenergienetz wird ab dem Abschnitt 2.2 ausführlich eingegangen. Auf das Fahrbahnnetz und dessen Planung im Rahmen von Zugfahrplänen wird nachfolgend eingegangen.

2.1.2 Zugfahrplan

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert erzwingt unter anderem die Spurgebundenheit einen Zugfahrplan³. Der Großteil des Zugfahrplans im Personenverkehr ist länger im Voraus bekannt als der des Güterverkehrs. Beim Personenverkehr werden lediglich Verstärker- und Sonderzüge kurzfristig eingesetzt. Einer größeren Variation unterliegt hingegen das eingesetzte Rollmaterial, das je nach Auslastung oder um den Fahrzeugumlauf sicherzustellen kurzfristig um weitere Module ergänzt werden kann. Aus der Zugfahrplanung entsteht die Trassenplanung. Die Trassen definieren räumlich und zeitlich gesehen, welche Blockabschnitte die Züge belegen. Für die Güterzüge werden bei der Zugfahrplanung pauschal Trassen eingeplant, die dann vergeben werden können. Somit kann auch ein Teil der Trassen ungenutzt bleiben. Die für den Güterverkehr eingeplanten Trassen können auch kurzfristig vergeben werden, hier konkretisiert sich die Planung erst wenige Tage im Voraus. Zunehmend setzt sich das spezielle Fahrplankonzept des Taktfahrplans durch, welches nachfolgend erläutert wird.

2.1.3 Taktfahrplan

Im öffentlichen Personenverkehr wird häufig ein Taktfahrplan eingesetzt. Dabei finden die Abfahrten immer in gleichen Abständen und in der Regel auch zu gleichen Zeitpunkten innerhalb der Stunden statt. Zum Beispiel im Halbstundentakt zu den Minuten hh:05 und hh:35. Oder im Viertelstundentakt zu den Minuten hh:03, hh:18, hh:33 und hh:48. Dies hat für die Kunden die Vorteile, dass die Abfahrtszeiten leicht merkbar sind und die maximalen Wartezeiten auf eine Verbindung über den Tag verteilt gleich lang sind. Nach [65] werden die Prinzipien eines Taktfahrplans mit zwei wesentlichen Eigenschaften beschrieben:

- „Die Taktfolgezeit, also der zeitliche Abstand der sich regelmäßig wiederholenden Zugfahrten: zum Beispiel stündlich, alle halbe Stunden, alle Viertelstunden, nur alle zwei Stunden
- Eine im Idealfall identische Fahrzeit für Richtung und Gegenrichtung.“ [65]

Dadurch kreuzen sich die Züge im Takt im zeitlichen Abstand der halben Taktfolgezeit. Der Zeitpunkt der Zugkreuzung wird als Symmetrieminute bezeichnet. Auf

³ Um Verwechslungen vom Fahrplan im Sinne der Zugfahrplanung und Fahrplan der Energiewirtschaft zu vermeiden werden wenn nötig die Ausdrücke Zugfahrplan und Energiefahrplan verwendet, auch wenn üblicherweise in beiden Fachbereichen jeweils nur das Wort Fahrplan verwendet wird.

einer einzelnen Linie ist es dabei egal zu welcher Zeit sich die Züge kreuzen. Werden jedoch mehrere Linien so kombiniert, dass möglichst kurze Umsteigezeiten und somit optimale Reisezeiten bei Verbindungen mit mehreren Umstiegen entstehen, müssen die Symmetrieminuten der einzelnen Linien synchronisiert werden. Dabei entsteht ein integrierter Taktfahrplan, der im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

2.1.4 Integrierter Taktfahrplan

Unter einem Integrierten Taktfahrplan wird ein Taktfahrplan verstanden, bei dem die einzelnen Linien in der Art synchronisiert werden, dass die Ankünfte in einem Bahnhof kurz vor einer einheitlichen Symmetrieminute und die Abfahrten kurz nach der einheitlichen Symmetrieminute stattfinden. Dieser Bahnhof wird dann als Knotenbahnhof oder allgemeiner und verkürzt als Knoten bezeichnet. Dadurch ergeben sich für die Passagiere, die eine Umsteigeverbindung nutzen, kurze Umsteigezeiten im Knoten. Beim Integrierten Taktfahrplan reduziert sich die Reisezeit auf Relationen insbesondere mit mehreren Umstiegen im Verhältnis zu anderen Fahrplankonzepten deutlich. Somit entstehen unabhängig von der Reiserichtung kurze Umsteigezeiten. In einem Knotenbahnhof mit integriertem Halbstundentakt kommen alle Züge aus allen Richtungen beispielsweise kurz vor der Minute hh:00 und der Minute hh:30 an und fahren kurz danach wieder in alle Richtungen ab. Bedingung für einen integrierten Taktfahrplan ist, dass die Fahrzeiten inklusive Umsteigezeiten einem ganzzahligen Vielfachen der Differenz der Symmetrieminuten zwischen zwei Knoten entspricht. In Abbildung 2.2 wird ein integriertes Taktknotensystem schematisch dargestellt, wobei vereinfachend die Reisezeiten zwischen zwei Knoten dargestellt sind. Die Fahrzeit muss dann knapp unter der Reisezeit liegen, damit noch Zeit zum Umsteigen bleibt.

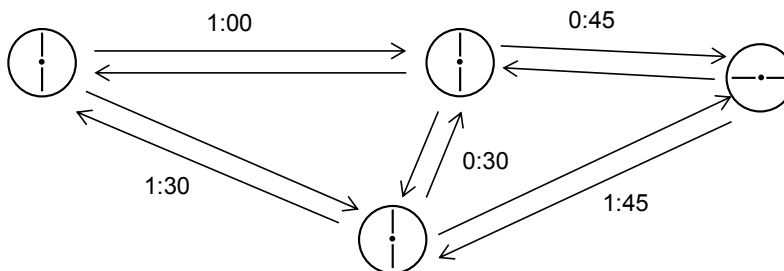


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines integrierten Taktknotensystems mit Taktknoten und Reisezeiten