



Martina Zeiner, BSc

**ATO (Automatic Train Operation)
Optimierung durch erhöhte Automatisierung auf der Vollbahn**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Umwelt und Verkehr

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn., Matthias Landgraf

Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. BA BSc MA, Martin Smoliner

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

28.05.2018

Datum



Unterschrift



ATO (Automatic Train Operation) – Optimierung durch erhöhte Automatisierung auf der Vollbahn

Masterarbeit

Abgabedatum 28.05.2018

Martina Zeiner
BSc
01030343
mzeiner@student.tugraz.at

Betreuer:
Matthias Landgraf
Dipl.-Ing. Dr.techn.
m.landgraf@tugraz.at

Martin Smoliner
Dipl.-Ing. BA BSc MA
martin.smoliner@tugraz.at



Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Veit, Leiter des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft an der Technischen Universität Graz, und Herrn Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Marschnig für das Bereitstellen und Ermöglichen dieser Masterarbeit bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Matthias Landgraf und Dipl.-Ing. BA BSc MA Martin Smoliner. Die mir, zu jedem Zeitpunkt, entgegengebrachte Hilfsbereitschaft, fachlichen Anregungen sowie Ratschläge haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso bedanke ich mich bei Frau Dipl.-Ing. BSc Melanie Messner für das Bereitstellen der Daten, welche den praktischen Teil dieser wissenschaftlichen Arbeit erst ermöglichen.

Ein großes Dankeschön möchte ich all meinen Freunden und Studienkollegen zukommen lassen. Besonders möchte ich mich bei meiner Lernrunde bedanken, mit deren Hilfe ich jede noch so große Herausforderung gemeistert habe und auch abseits des Lernens spaßige Stunden verbringen durfte. Herzlichen Dank auch an meine Mädelsrunde für den immerwährenden Beistand in jeglichen Lebenssituationen und die geniale Studienzzeit. Auch möchte ich mich bei all jenen bedanken, die meine Auslandssemester in Frankreich und Chile zu einer unvergesslichen Erinnerung gemacht haben.

Der wohl größte Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mich in all meinen Entscheidungen unterstützt haben. Danke für die großartige Hilfe, die ihr mir immer entgegengebracht habt.

Ebenso möchte ich ein großes Dankeschön an meinen Freund und meine Schwestern aussprechen, die immer die richtigen aufmunternden Worte gefunden haben und mir mit Geduld und Motivation zur Seite gestanden sind.

Kurzfassung

Automatisierung ist bereits in vielen Bereichen der Eisenbahn präsent. Um gesteckte Klimaziele zu erreichen und ein attraktives Verkehrsangebot zu bieten, ist die Vollbahn gefordert die Automatisierung weiter voranzutreiben und ATO (Automatic Train Operation) gezielt einzusetzen.

Im Rahmen der Masterarbeit wird daher analytisch untersucht, welche Automatisierungsstufe (Grade of Automation, GoA) für welche Systeme auf der Vollbahn sinnvoll ist, damit die durch Automatisierung möglichen Potentiale ausgeschöpft werden können. Grundlage dafür bietet eine ausführliche Literaturrecherche mit Fokus auf rechtliche, betriebliche und technische Anforderungen und Voraussetzungen der vier unterschiedlichen Automatisierungsstufen. Angefangen von Systemen zur Unterstützung des Fahrens (GoA1) bis hin zu selbstfahrenden Zügen (GoA4). Für den Personen- und Mischverkehr kann festgestellt werden, dass bereits durch die ersten zwei Automatisierungsstufen Energieeinsparungen sowie Kapazitätssteigerungen möglich sind. Die Potentiale im Güterverkehr, insbesondere im Verschubbetrieb, können durch den Einsatz von intelligenten Güterzügen in Stufe 4 genutzt werden. Dadurch kann vor allem die Sicherheit erhöht und eine Kostensenkung erzielt werden.

Gestützt auf die Ergebnisse aus einem Energieberechnungsprogramm, welches den Energieverbrauch unterschiedlicher Fahrweisen berechnet, wird der Nutzen von Fahrerassistenzsystemen und ATO hinsichtlich des Energieeinsparungspotentials untermauert. Der Vergleich mit realen Messdaten für einen simulierten Streckenabschnitt zeigt, dass neben einer energiesparenden Fahrweise auch eine netzübergreifende Disposition notwendig ist, um Konflikte frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden.

Aus dem deskriptiven Teil der Arbeit sowie auch aus der praxisnahen Energieberechnung geht hervor, dass mehr Automatisierung auf dispositiver Ebene (netzübergreifendes Traffic Management System) unumgänglich ist, wenn Verbesserungen hinsichtlich Energie und Kapazität erreicht werden sollen. Zudem haben diese auch Einfluss auf die Kosten sowie die Zufriedenheit der Kunden/innen. Pünktlichkeit, Einhaltung der Fahrpläne, zusätzlicher Informationsfluss sowie kostengünstigere Angebote schaffen einen Mehrwert für Nutzer/innen und folglich für die Bahn selbst.

Abstract

Automation is already present in many areas of the railway sector. In order to achieve set climate goals and offer an attractive transport service, it is essential to advance automation and systematically apply ATO (Automatic Train Operation).

Therefore, the aim of this master thesis is to investigate and analyse the potentials of higher automation (Grades of Automation, GoA) with regard to different systems. The investigation is based on detailed literature research which focuses on legal, operational, and technical requirements for the four Grades of Automation. The four levels of automation range from supporting systems (GoA1) to automotive trains (GoA4). For passenger and mixed traffic, it can be stated that energy saving and capacity increases can already be achieved with the first two Grades of Automation. The potential in freight transport, especially in shunting operations, can be exploited through the use of intelligent freight trains in GoA4. Subsequently, this leads to higher safety and cost reduction.

The results of an energy analysis program calculating the energy consumption of different driving behaviours underpin the benefits of DAS (Driver Advisory Systems) and ATO. The comparison of real measured data for a simulated railway section shows that, in addition to an energy-efficient driving style, cross-network scheduling is necessary in order to detect and avoid conflicts at an early stage.

The outcome of both the descriptive part of this thesis and the analytical part, make it clear that it is absolutely essential to elaborate automation on a dispositive level (cross-network Traffic Management System) if energy and capacity improvement are to be achieved. Moreover, these enhancements have an influence on costs, not to mention the satisfaction of customers. Hence, punctuality, adherence of timetables, additional information flow, along with cost-effective offers, bring added value to the customer and consequently boost the railway sector.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Struktur der Masterarbeit.....	2
2	Automatic Train Operation.....	4
2.1	Automatisierungsgrade der Bahn - Grades of Automation (GoA).....	4
2.2	Ziele von Automatic Train Operation auf der Vollbahn.....	6
3	Automatisierung unterschiedlicher Verkehrsträger.....	7
3.1	Status Quo im Schienenverkehr.....	7
3.2	Status Quo auf der Vollbahn.....	8
3.2.1	Status Quo bei der U-Bahn.....	9
3.3	Status Quo im Straßenverkehr.....	9
3.3.1	Status Quo bei LKWs.....	10
3.4	Status Quo im Luftverkehr.....	11
3.5	Status Quo im Schiffsverkehr.....	12
3.6	Automatisierung auf der Vollbahn im Vergleich.....	12
4	Anforderungen aufgrund von ATO.....	15
4.1	Rechtliche Rahmenbedingungen und normative Anforderungen.....	16
4.1.1	Interoperabilität.....	17
4.1.2	Einbindung ATO in TSI ZZS.....	19
4.1.3	Zertifizierung und Genehmigungen.....	21
4.1.4	Nationale gesetzliche Grundlagen.....	22
4.2	Betriebliche Anforderungen.....	23
4.2.1	Allgemeine Regeln zur Durchführung einer Zugfahrt.....	23
4.2.2	Zugsicherung und -beeinflussung.....	25
4.2.2.1	Signalgesteuerter Betrieb.....	26
4.2.2.2	Anzeigesteuerter Betrieb.....	27
4.2.2.3	ATO over ETCS.....	29
4.2.3	Effiziente Betriebsführung(-sstrategie).....	29
4.2.4	Migrationsstrategie.....	33
4.2.5	Rangieren.....	33
4.2.6	Rückfallebenen.....	35
4.3	Technische Anforderungen.....	37
4.3.1	ATO over ETCS (Level 2).....	37
4.3.2	Fahrweg.....	40
4.3.2.1	Freie Strecke.....	42
4.3.2.2	Knoten, Bahnhofsbereiche.....	43
4.3.3	Fahrzeug.....	44
4.3.3.1	Fahrzeugseitige Hinderniserkennung.....	45
4.3.3.2	Fahrzeugseitige ATO Einheit.....	46
4.4	Migration.....	49
5	Potentiale und Wirkung von ATO.....	52
5.1	Kapazität.....	52
5.1.1	Dynamische Kapazitätsoptimierung.....	53
5.1.2	Fahren im „Moving Block“.....	57
5.2	Servicequalität.....	58
5.3	Sicherheit.....	59
5.4	Energie.....	60
5.4.1	Energieverbrauch bei der Bahn.....	60
5.4.2	Allgemeine Maßnahmen zu Energieeinsparung.....	61
5.4.3	Energiesparende Fahrweise durch ATO.....	62

Inhaltsverzeichnis

5.4.4	Energieberechnung für eine energiesparende Fahrweise.....	63
5.4.4.1	Grundlagen zur Energieberechnung	67
5.4.4.2	Eingangsparameter der Energieberechnung der fünf Untersuchungsfälle	71
5.4.4.3	Vorgehensweise der Energieberechnung der fünf Untersuchungsfälle	72
5.4.4.4	Ergebnisse der Energieberechnung	73
5.5	Kosten	78
5.6	Systembezogene Potentiale und Strategien.....	79
6	Ausblick und Zusammenfassung	83
7	Literaturverzeichnis	85

Abbildungs-, Tabellen- und Formelverzeichnis

Abbildung 1: Fragestellungen der vorliegenden Masterarbeit.....	3
Abbildung 2: Automatisierungsgrade (Grades of Automation) angelehnt an (International Association of Public Transport (UITP), S. 1; Nießen et al. 2017, S. 33; Pachl 2017, S. 12)	5
Abbildung 3: Nießen, Schindler et al (Nießen et al. 2017, S. 33)	10
Abbildung 4: Zusammenspiel unterschiedlicher Stakeholder im Eisenbahnwesen (Rao 2017)	15
Abbildung 5: Allgemeine Anforderungen an ATO (GoA1-4) (Meyer zu Hörste 2017).....	16
Abbildung 6: European Rail Traffic Management System (Europäische Kommission 2016)	18
Abbildung 7: geplante ETCS Implementierung in Europa bis 2023 (grün) und 2030 (grau) (Davis 2018)	19
Abbildung 8: Integration von ATO Spezifikationen in TSI ZZS (Treydel 2017).....	20
Abbildung 9: Fahren im festen Raumabstand im signal- oder anzeigegesteuerten Betrieb angelehnt an (Marschnig 2018; Treydel 2017, 2017).....	24
Abbildung 10: Daten für eine sichere Zugführung (auch mit ATO)	25
Abbildung 11: Signalgesteuerter Betrieb - Blocksystem (Fendrich 2007, S. 582).....	26
Abbildung 12: Sollgeschwindigkeit einer LZB anhand der Bremskurvenberechnung (Pachl 2016, S. 83).....	28
Abbildung 13: Regelkreise des Eisenbahnsystems (Rao 2017).....	30
Abbildung 14: Äußerer Regelkreis: Netzoptimierung (Rao 2017)	31
Abbildung 15: Innerer Regelkreis: Optimierung der Fahrperformance (Rao 2017).....	31
Abbildung 16: Integrated Optimisation Model (Rao 2017).....	32
Abbildung 17: ETCS Level 2 (Trinckauf 2010).....	38
Abbildung 18: Funktionelles Konzept ATO over ETCS angelehnt an (Gralla 2016b, S. 6–8; Treydel 2017).....	38
Abbildung 19: Optimiertes Geschwindigkeitsprofil durch ATO Steuerung verknüpft mit einem TMS bei ATO over ETCS (Barnard et al. 2012a, S. 15).....	39
Abbildung 20: Begriffe Bahnhof und freie Strecke (Schnieder und Becker 2007, S. 272).....	41
Abbildung 21: Überwachung mittels Radarscan oder Kamera (Saner 2014).....	42
Abbildung 22: ATO Prinzipschema (Gralla 2016a, S. 11)	44
Abbildung 23: Umgebungsbild des Radarsensors und mögliche Gleisverläufe (Franzen et al. 2017, S. 46)	46
Abbildung 24: ETCS Migration in Österreich (N.N. 2017c, S. 30)	50
Abbildung 25: Mindestzugfolgezeiten, Sperrzeitentreppe und Sperrzeit angelehnt an (Pachl 2016, S. 47, 2016, S. 154)	53
Abbildung 26: Optimierung der Fahrkurven zur Vermeidung eines Halts (Ciarni, S. 40).	55

Abbildung 27: Regelkreis Fahrplanerstellung - Zugführung (Weidmann et al. 2014, S. 607).....	56
Abbildung 28: Fundamentaldiagramme für verschiedene Abstandshalteverfahren (Schnieder und Becker 2007, S. 226).....	57
Abbildung 29: Phasen einer Zugfahrt (Pachl 2016, S. 31).....	62
Abbildung 30: Energieeinsparung durch unterschiedliche Fahrprofile (Gralla 2016b, S. 15)	62
Abbildung 31: Geschwindigkeitsverlauf der drei Railjets (Messner 2014, S. 72)	64
Abbildung 32: Geschwindigkeitsverlauf der drei Railjets im betrachteten Abschnitt	65
Abbildung 33: Zusammensetzung des Fahrwiderstands (Messner 2014, S. 11).....	68
Abbildung 34: Geschwindigkeitsverläufe der fünf Untersuchungsfälle und der Messfahrten	74
Abbildung 35: Energieverbrauch unterschiedlicher Fahrweisen abhängig von Fahrwiderständen und Nebenverbrauch	77
Tabelle 1: Systemvergleich zwischen Vollbahn und U-Bahn	14
Tabelle 2: Rückfallebenen angelehnt an (Pachl 2017, S. 18; Treydel 2016, S. 32–34) ..	36
Tabelle 3: Migration: Vergleich Österreich und Schweiz.....	49
Tabelle 4: Auszug aus weiteren Automatisierungsvorhaben in Österreich und der Schweiz	49
Tabelle 5: Vergleich zwischen Energieverbrauch der realen Messfahrten und den mathematisch abgebildeten Messfahrten	66
Tabelle 6: Konstante Beschleunigung in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit.	71
Tabelle 7: Gegenüberstellung der fünf Untersuchungsfälle und den Messfahrten	73
Tabelle 8: Systembezogene Potentiale von ATO	82
(1) Energie (Messner 2014)	67
(2) Widerstände (Messner 2014)	67
(3) Energie aus Summe der Widerstände (Messner 2014)	67
(4) Einheitenumrechnung (Messner 2014)	67
(5) Einheitenumrechnung (Messner 2014)	67
(6) Energieverbrauch (Messner 2014)	67
(7) Rollwiderstand (Veit und Walter 2012a)	68
(8) spezifischer Rollwiderstand (Veit und Walter 2012a).....	68
(9) Lagerreibungswiderstand (Veit und Walter 2012a)	68
(10) spezifischer Lagerreibungswiderstand (Veit und Walter 2012a)	68
(11) Stoßwiderstand (Veit und Walter 2012a).....	69

(12) spezifischer Stoßwiderstand (Veit und Walter 2012a).....	69
(13) Luftwiderstand (Veit und Walter 2012a).....	69
(14) spezifischer Luftwiderstand (Veit und Walter 2012a).....	69
(15) Neigungswiderstand (Veit und Walter 2012a)	69
(16) spezifischer Neigungswiderstand (Veit und Walter 2012a)	69
(17) Bogenwiderstand (Veit und Walter 2012a)	70
(18) spezifischer Bogenwiderstand (Veit und Walter 2012a)	70
(19) Beschleunigungswiderstand (Veit und Walter 2012a)	70
(20) Anfahrwiderstand (Veit und Walter 2012a).....	70

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung
a	Beschleunigung	
AIS	Automatic Identification System	Automatisches Identifikationssystem
ATC	Automatic Train Control	Zugsicherung/-beeinflussung
ATO	Automatic Train Operation	
AUT	Österreich	
CBTC	Communication Based Train Control	
CER	Communauté européenne du rail	Gemeinschaft der Europäischen Bahnen
CH	Schweiz	
cm	Zentimeter	
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	
DAS	Driver Advisory System	Fahrerassistenzsystem
DMI	Driver Machine Interface	
EASA	European Aviation Safety Agency	Europäische Agentur für Flugsicherheit
EGNOS	European Geostationary Navigation	
GNSS	Global Navigation Satellite System	
EisbG	Eisenbahngesetz	
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen	
ERA	European Union Agency for Railways (vormals European Railway Agency)	Europäische Eisenbahnagentur
ERTMS	European Rail Traffic Management System	
ETCS	European Train Control Systems	Europäisches Zugsicherungssystem
EU	Europäische Union	
EVC	European Vital Computer, auch Eurocap	Fahrzeugrechner
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen	
FFFIS	Form Fit Functional Interface Specification	
FRMCS	Future Railway Mobile Communications System	
FRS	Functional Requirement Specification	
GoA	Grade of Automation	Automatisierungsgrad
GPS	Global Positioning System	
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Rail(way)	
GWh	Gigawattstunde	
IP	Innovationsprogramms	
km	Kilometer	
km/h	Kilometer pro Stunde	
kWh	Kilowattstunde	
LZB	linienförmige Zugbeeinflussung	

Abkürzungsverzeichnis

m	Meter	
min	Minute	
NGTC	Next Generation Train Control	
PZB	punktförmige Zugbeeinflussung	
RBC	Radio Block Center	ETCS-Streckenzentrale
RL	Richtlinie	
SRS	Software Requirement Specification	
TEN-T	Transeuropean Network – Transport	Transeuropäischen Netz – Verkehr
TMS	Traffic Management System	Verkehrsmanagementsystem
TSI	Technical Specification for Interoperability	Technischen Spezifikationen für Interoperabilität
TSI ZZS	TSI zum Teilsystem „Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung“	
UITP	Union Internationale des Transports Publics	Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen
Unife	Union des Industries Ferroviaires Européennes	Verband der europäischen Eisenbahnindustrie
Unisig	Union Industry of Signalling	
V	Geschwindigkeit [km/h]	
VzG	Verzeichnis der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten	
WP	Work Package	Arbeitspaket

1 Einleitung

Der Term Industrie 4.0 ist in aller Munde. Es handelt sich um eine weitere „Industrielle Revolution“, hervorgerufen durch sukzessive Automatisierung. Die erste Industrielle Revolution ist im 18. Jahrhundert durch die Entwicklung der Dampfmaschine zu verzeichnen. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde die Herstellung vieler Dinge durch Massenproduktion, Erdöl und Elektrizität beschleunigt. Eine weitere Revolution lässt sich durch die Computertechnik und Informationstechnologie ab den 70er Jahren wahrnehmen, welche sich bis heute stark weiterentwickelt hat. Industrie 4.0 beschreibt die allgegenwärtige Verarbeitung und Vernetzung von „Big data“ und „Internet of Things“ sowie die künstliche Intelligenz und die Entwicklung autonomer Systeme wie beispielsweise autonome Fahrzeuge. (Marteaux und Sobun 2017)

Die neue Revolution beeinflusst das Verhalten der Gesellschaft stark, sei es im Privat- oder Berufsleben, im Mobilitätsverhalten oder in der Wirtschaft, wo am globalen Markt Konkurrenzfähigkeit gefordert wird. Vorrangig davon betroffen sind Bereiche wie Transport und Logistik. Digitalisierung ermöglicht die Kommunikation der Verkehrssysteme untereinander sowie die Entwicklung integrierter, intermodaler Verkehrslösungen. Besonders im Hinblick auf das Bevölkerungswachstum und den damit verbundenen Folgen wie Urbanisierung, steigender Verkehrsnachfrage und dadurch entstehenden Kapazitätsengpässen bietet die Digitalisierung durch „smarte“ Lösungen große Chancen. (Marteaux und Sobun 2017, S. 20; Goulding und Morrell 2014, S. 20)

Die mit dem Bevölkerungswachstum in Zusammenhang stehenden Probleme betreffen nicht nur den Verkehr selbst, sondern beeinflussen auch die Umwelt, da mehr Energie und Ressourcen verbraucht werden. Der globale Verbrauch an Ressourcen wird 2050 um ca. ein Drittel zunehmen (Goulding und Morrell 2014, S. 24). Im Weißbuch Verkehr 2011 verfolgt die Europäische Kommission daher zehn Ziele zur Gestaltung eines wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystems – unter anderem die Reduktion von Treibhausgasemissionen ohne Einschränkungen im Mobilitätsangebot (Europäische Kommission 2011, S. 6). Dies knüpft an eine der sieben Leitinitiativen der Strategie Europa 2020, welche für die Mitgliedsstaaten der EU bindend sein sollen. Konkret handelt es sich um die Leitinitiative: „Ressourcenschonendes Europa“ (Europäische Kommission 2010, S. 5). *„Ziel ist die Unterstützung des Übergangs zu einer emissionsarmen Wirtschaft, die ihre Ressourcen wirkungsvoll einsetzt. Es geht darum, unser Wirtschaftswachstum von den Ressourcen und vom Energieverbrauch abzukoppeln, die CO₂-Emissionen zu reduzieren, die Wettbewerbsfähigkeit zu fördern und eine größere Energieversorgungssicherheit zu unterstützen.“* (Europäische Kommission 2010, S. 18)

Trinckauf (Trinckauf 2017, S. 7) weist darauf hin, dass im Bahnsektor mit einer Zunahme des Personenverkehrs zu rechnen ist; der Güterverkehr hingegen wird einen deutlichen Rückgang spüren. Der derzeit stagnierende Schienengüterverkehr (16-17% des gesamten Güterverkehrsaufkommens) begründet sich auf den längeren Transportzeiten des Einzelwagenverkehrs im Vergleich zum Straßengütertransport (Nießen et al. 2017, S. 36). Die im Weißbuch zum Verkehr betreffenden Ziele für die Bahn betreffen unter anderem eine 30%-ige Umlagerung des Straßengüterverkehrs, bei Strecken über 300 km, auf Verkehrsträger wie die Bahn bis 2030 (Europäische Kommission 2011, S. 9). Daraus folgt, dass es für die Eisenbahn wichtig ist, dem Wettbewerb mit anderen Verkehrsträgern standzuhalten, die Kapazität zu steigern, multimodale Verkehrslösungen zu entwickeln und die Kosten zu reduzieren (Trinckauf 2017, S. 7). Dies geht auch mit der Vision der ERA (europäischen Eisenbahnagentur, vormals European Railway Agency) einher, welche eine Kapazitätserhöhung sowie Kostenreduktion vorsieht, was auch im Sinne der Eisenbahnunternehmen liegt (Koch 2017).

Durch die Digitalisierung im Schienenverkehr (Schiene 4.0) können einerseits die Klimabilanz verbessert (digitale Steuerung) und umweltschonendere Logistiklösungen sowie mehr Kundenkomfort (digitale Vernetzung) ermöglicht werden; andererseits kann auch durch intelligente Leit- und Sicherungstechnik für mehr Sicherheit und Pünktlichkeit gesorgt werden (Schenk 2017, S. 14). Werden die Möglichkeiten der Automatisierung und Digitalisierung genutzt, kann der Schienenverkehr seine Wettbewerbsfähigkeit stärken. Zudem kann eine Verlagerung von anderen Verkehrsträgern auf die Schiene erzielt werden (Communauté européenne du rail (CER) 2016, S. 3). Zum Erreichen dieser Ziele ist der Einsatz von „game-changing technologies“ wie ATO (Automatic Train Operation) angedacht. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher eingehend mit dem Thema Automatisierung im Verkehrsbereich mit Fokus Eisenbahn. (Koch 2017; Union des Industries Ferroviaires Européennes (UNIFE), S. 4–5)

1.1 Struktur der Masterarbeit

Aufbauend auf einer ausführlichen Literaturrecherche wird im Rahmen der Masterarbeit die Thematik Automatisierung und ATO im Eisenbahnwesen, speziell auf der Vollbahn, erforscht. Als Leitfaden sollen die Fragestellungen aus Abbildung 1 dienen.

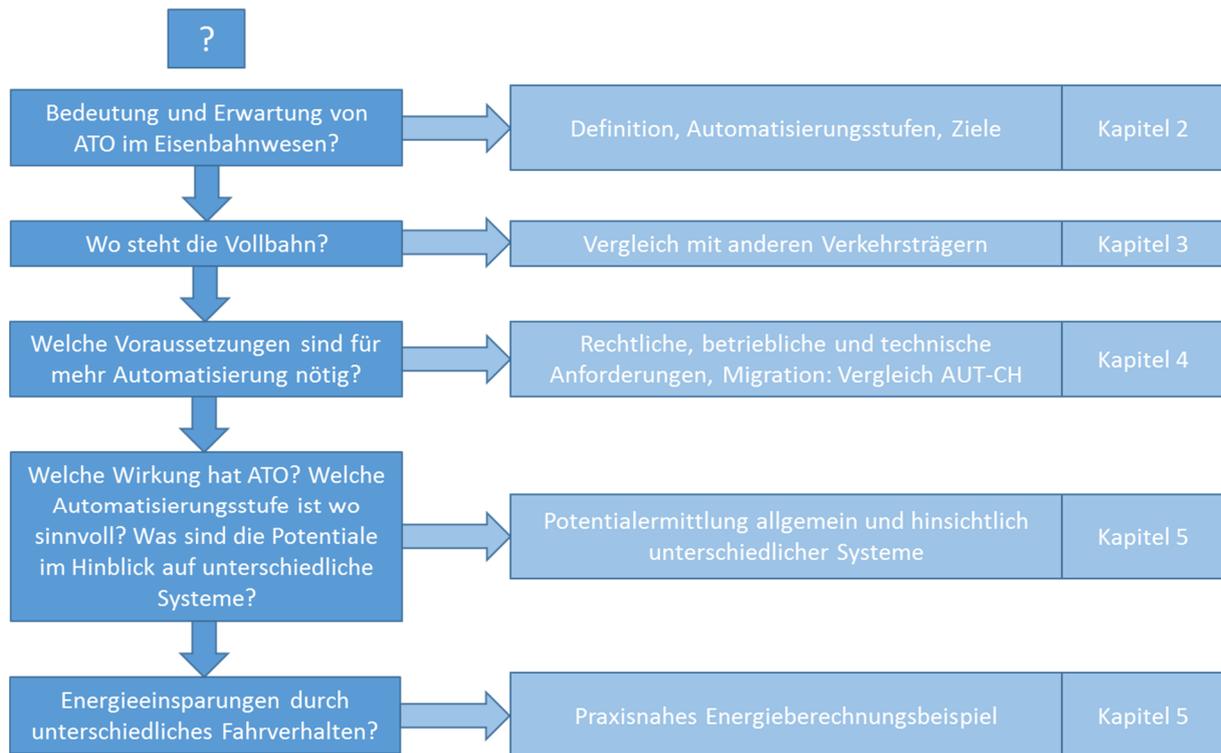


Abbildung 1: Fragestellungen der vorliegenden Masterarbeit

Zu Beginn wird auf Begrifflichkeiten im Zusammenhang ATO eingegangen und die zu erwartenden Ziele im Eisenbahnwesen durch mehr Automatisierung aufgezählt. In Kapitel 3 folgt ein Vergleich unterschiedlicher Verkehrsträger hinsichtlich Automatisierung, worin auch der Status Quo abgebildet wird. Kapitel 4 setzt sich ausführlich mit den rechtlichen, betrieblichen und technischen Anforderungen aufgrund von ATO auseinander. Abschließend folgt ein Ländervergleich zwischen Österreich und der Schweiz hinsichtlich der Migration einiger Anforderungen von ATO. In Kapitel 5 werden die in Kapitel 2.2 definierten Ziele hinsichtlich ihres Potentials genauer unter die Lupe genommen. Die damit im Zusammenhang stehende Wirkung durch ATO wird detailliert für unterschiedliche Systeme, wie z.B. Personen- und Güterverkehr analysiert. Zur besseren Veranschaulichung dient ein praxisnahes Beispiel einer Energieberechnung auf der Strecke zwischen Wien Meidling und Wiener Neustadt. Diese soll zeigen, dass durch eine energieeffiziente Fahrweise Energieeinsparungen möglich sind. Abschließend werden noch einige Herausforderungen hinsichtlich ATO im Eisenbahnwesen erwähnt.

2 Automatic Train Operation

Zum besseren Verständnis für den weiteren Verlauf der Arbeit, ist es an dieser Stelle notwendig, den Begriff ATO zu erklären und zu definieren. Nicht zu verwechseln ist dieser mit der im Straßenverkehr gebräuchlichen Begrifflichkeit des autonomen Fahrens. Hier bewegt sich das Verkehrsmittel komplett selbständig. Anweisungen erteilen eine im Fahrzeug installierte Sensorik sowie künstliche Intelligenz im Verkehrsraum. Eine Reaktion auf Änderungen in der Umgebung, auch Unvorhersehbares ist möglich. Das System entscheidet für sich, ohne jeglichen Einfluss vom Mensch. In der Kraftfahrzeugbranche bezeichnet es die letzten Stufen des fahrerlosen Fahrens (vgl. Kapitel 3.3). (Puri 2017)

Beim autonomen Fahren bewegt sich das Fahrzeug komplett selbstständig basierend auf eigens getroffenen Entscheidungen einer künstlichen Intelligenz. Automatisches oder automatisiertes Fahren beschreibt folgendes: „Das Verkehrsmittel bewegt sich wie ein *Automat*.“ (Nießen et al. 2017, S. 34) Die Steuerung des Fahrzeuges erfolgt durch eine Leitstelle. Wird die Verbindung zwischen Fahrzeug und Leitebene unterbrochen, muss ein sicherer Zustand einkehren. Aufgrund der langen Bremswege im Schienenverkehr wäre ein „Fahren auf Sicht“, speziell bei hohen Geschwindigkeiten nicht möglich, wodurch heutzutage Schienenfahrzeuge nicht ohne externe Leittechnik betrieben werden. Für die Bahn, als spurgeführtes und von außen gesteuertes System, kann demnach bei der Steuerung der Fahrzeugbewegung nur von einem automatisierten oder automatischen und nicht autonomen Fahren gesprochen werden (Pachl 2017, S. 12). (Nießen et al. 2017, S. 33–34).

2.1 Automatisierungsgrade der Bahn - Grades of Automation (GoA)

Die Begrifflichkeiten des automatischen/automatisierten Fahrens werden in der Literatur unterschiedlich gebraucht. Deshalb stützt sich diese Arbeit auf die, von dem UITP (Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen) entwickelten, Grades of Automation für den schienengebundenen Nahverkehr. Für die deutschen Begriffe wurde die Definition von Pachl (Pachl 2017, S. 12) und Nießen (Nießen et al. 2017, S. 33) in Übereinstimmung mit Emery (Emery 2017, S. 4) herangezogen, weshalb in weiterer Folge keine Unterscheidung zwischen automatisch und automatisiert getroffen wird.

Unterteilt wird bei der Bahn in vier Automatisierungsstufen (vgl. Abbildung 2), wobei auch eine Stufe 0 definiert ist. Diese entspricht einer Steuerung bei „Fahren auf Sicht“, wie beispielsweise bei Straßenbahnen. In der ersten Stufe wird der/die Lokführer/in bei der Führung des Zuges durch ein automatisches Zugsicherungssystem, welches im Notfall hält oder durch DAS (Driver Advisory Systems, zu Deutsch Fahrerassistenzsysteme) unterstützt. Erst ab GoA2 trifft die Definition von ATO zu, wobei hier nur von halbauto-

matischem Zugbetrieb die Rede sein kann, aufgrund des Vorhandenseins eines/er Triebfahrzeugführers/in der Führerstandskabine. Diese/r übernimmt überwachende Aufgaben und ist für das Öffnen und Schließen der Türen zuständig, während die Antriebs-, Fahr-, und Bremssteuerung automatisch erfolgt. Die ersten zwei Stufen sind der Definition nach daher teilweise automatisiert. (Emery 2017, S. 4; Nießen et al. 2017, S. 33)

Automatisches Fahren ist das „*automatische Fahren eines Zuges ohne Triebfahrzeugführer*“ (Pachl 2017, S. 12). Dies entspricht GoA3, wo es keinen/e Triebfahrzeugführer/in mehr in der Führerstandskabine gibt und der Betrieb vom ATO System übernommen wird. Personal an Bord kann jedoch im Notfall eingreifen und den Zug steuern (Emery 2017, S. 4). GoA3 kann als hochautomatisiert eingestuft werden (Nießen et al. 2017, S. 33).

Automatischer Zugbetrieb ohne Zugbegleiter/in entspricht der Stufe 4; in der Literatur wird hier von vollautomatischem Betrieb gesprochen (Nießen et al. 2017, S. 33). Im Nahverkehr entspricht GoA4 der Automatic Train Control (ATC), auch oft bekannt als Communication Based Train Control (CBTC), worin ATO nur eine von mehreren Komponenten und daher auch nicht dem fahrerlosen Betrieb gleichzustellen ist (Dong et al. 2010; Emery 2017, S. 4; Koch 2017; Poré 2017).

	GoA	Betriebsart	Anfahren	Halten	Türen öffnen und schließen	Betrieb im Notfall
Teilweise automatisiert	GoA1	Automatische Zugsicherung/ Zugbeeinflussung/ DAS mit Lokführer/in	Lokführer/in	Lokführer/in	Lokführer/in	Lokführer/in
	GoA2	Halbautomatischer Zugbetrieb	Automatisch	Automatisch	Lokführer/in	Lokführer/in
Hoch automatisiert	GoA3	Automatischer Zugbetrieb mit Zugbegleiter – fahrerloser Betrieb	Automatisch	Automatisch	Zugbegleiter/in	Zugbegleiter/in
Vollautomatisch	GoA4	Automatischer Zugbetrieb ohne Zugbegleiter – personalloser Betrieb	Automatisch	Automatisch	Automatisch	Automatisch

Abbildung 2: Automatisierungsgrade (Grades of Automation) angelehnt an (International Association of Public Transport (UITP), S. 1; Nießen et al. 2017, S. 33; Pachl 2017, S. 12)

ATO ist ein Teilsystem, welches je nach Automatisierungsgrad unterschiedliche Rollen übernimmt. Diese reichen vom Anfahren über exaktes Anhalten, Türöffnung- und -schließung, bis hin zur Einhaltung eines gewissen Performancelevels. ATO allein stehend ist nicht sicher, weshalb es immer in Zusammenhang mit einem Zugsicherungs/-beeinflussungssystem zu sehen ist, um den hohen Sicherheitsanforderungen im Eisenbahnwesen gerecht zu werden (Poré 2010, S. 2). Darauf wird in Kapitel 4.2.2 detailliert eingegangen. (Treydel 2016, S. 4)

2.2 Ziele von Automatic Train Operation auf der Vollbahn

Ziel ist es durch die zunehmende Automatisierung die Aufgaben des/der Triebfahrzeugführers/in nach und nach zu ersetzen und somit folgende Eigenschaften zu verbessern (Goverde 2017, S. 2; Kessell 2017):

- I Kapazität,
- I Servicequalität,
- I Sicherheit,
- I Energieeffizienz,
- I Kosten.

Durch die Anwendung von ATO können optimale Geschwindigkeitsprofile realisiert werden, wodurch der betriebliche Verkehrsfluss verbessert und Energie eingespart werden kann (Barnard et al. 2012b, S. 1). Automatisierung bringt neben verbesserter Pünktlichkeit und Kapazitätsverbesserungen mehr Flexibilität durch die Anpassung des Angebots an die Nachfrage. Darüber hinaus wird ein besseres Verkehrsmanagement in belasteten Knotenpunkten und mehr Sicherheit durch den Wegfall des menschlichen Faktors bei fahrerlosem Betrieb ermöglicht. (Communauté européenne du rail (CER) 2016, S. 3)

Mit den ersten zwei Stufen wird ein stabiles Konzept erhofft, welches für mehr Pünktlichkeit und weniger Energieverbrauch sorgt. Durch GoA3 und 4 sollen insbesondere eine höhere Flexibilität und eine Kostenreduktion erzielt werden. Detailliert wird dies in Kapitel 5 behandelt, wo untersucht wird, welche Potentiale mit ansteigendem Automatisierungsgrad tatsächlich ausgeschöpft werden können. (Treydel 2017)

3 Automatisierung unterschiedlicher Verkehrsträger

Im Zeitalter der Digitalisierung wird von Assistenzsystemen bis hin zu autonomen Fahrzeugen innerhalb unterschiedlicher Verkehrsträger geforscht. Neue Technologien versprechen Effizienzsteigerungen aufgrund gleichmäßiger Fahrweisen und Auslastungen, eine Steuerung der Auslastung, Optimierung der Kapazität sowie Verbesserung in Hinblick auf die Verkehrssicherheit und Energiebilanz (Nießen et al. 2017, S. 33).

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, muss die Wettbewerbsfähigkeit der Bahn gesteigert werden. Besonders die intensiven Anstrengungen im Bereich Forschung und Entwicklung im Automobilsektor machen es für die Bahn zur Pflicht, mehr in Automatisierung zu investieren, um in Zukunft den anderen Verkehrsträgern gegenüber konkurrenzfähig zu bleiben und die gesteckten Klimaziele zu erreichen (Marteaux und Sobun 2017, S. 36–37; Nießen et al. 2017, S. 36–37). Trotz des Wettbewerbs der Verkehrsträger, sollte die Tatsache, dass hinsichtlich der Technologie und Forschung voneinander gelernt werden kann, nicht außer Acht gelassen werden. Darüber hinaus muss es das Ziel der gesamten Verkehrsbranche sein, ein sinnvolles und verkehrsträgerübergreifendes Mobilitätsangebot zu schaffen. Nachfolgend soll eine Gegenüberstellung der Automatisierungsgrade einzelner Verkehrsträger als Überblick dienen.

3.1 Status Quo im Schienenverkehr

Im Schienenverkehr ist Automatisierung bereits in vielen Bereichen präsent (Nießen et al. 2017, S. 34). Beispiele dafür sind:

- I Computergestützte Software-Programme, welche bei der Disposition unterstützen (Nießen et al. 2017, S. 36–37).
- I Automatische Fahrstraßeneinstellung mittels Stellwerke, welche fahrplanbasiert erfolgt (Pachl 2017, S. 12).
- I Kundenorientierte Applikationen, wodurch sich zum Beispiel die Ware verfolgen lässt oder Echt-Zeit-Informationen für den Nutzer bereitgestellt werden (Union des Industries Ferroviaires Européennes (UNIFE), S. 3).
- I Roboter oder Drohnen unterstützen heutzutage bei der Zustandserfassung bzw. Instandhaltung. Beispielsweise werden Drohnen mit Infrarot Sensoren zur Heißläuferortung beim niederländischen Eisenbahninfrastrukturbetreiber ProRail verwendet oder der italienische Roboter Felix zur Weicheninspektion herangezogen. (Marteaux und Sobun 2017)
- I Zugsicherungs- bzw. beeinflussungssysteme (GoA1), zur Einhaltung des Fail-Safe-Prinzips im Eisenbahnwesen oder
- I Automatic Train Operation und fahrerloser Betrieb im Nahverkehr.

Dies sind nur einige Beispiele, die zeigen sollen, dass die Eisenbahn bereits im Zeitalter der Digitalisierung angekommen ist. Die Beispiele ließen sich um ein Vielfaches erweitern.

3.2 Status Quo auf der Vollbahn

Bei der Vollbahn läuft bereits vieles automatisch. Im Vergleich zur U-Bahn konnte GoA3 oder GoA4 noch nicht erreicht werden (Shift2Rail 2015, S. 188), wird aber in der Forschung thematisiert. Beispiele hierfür sind die für fahrerlose Züge entstehende Teststrecke der Erzgebirgsbahn in Deutschland (Steinebach 2018), der geplante Einsatz von intelligenten Güterzügen im Rangierbetrieb (vgl. 4.3.3.2) oder Testfahrten von automatisch fahrenden Güterzügen für den Erztransport in Australien (Trinckauf 2017, S. 9).

GoA1 ist schon in zwei unterschiedlichen Varianten im Einsatz. Zum einen gibt es Zugbeeinflussungssysteme in der Signal- und Sicherungstechnik, die eine automatische Geschwindigkeitsüberwachung und Bremsung ermöglichen (vgl. Kapitel 4.2.2). Zum anderen kommen Fahrerassistenzsysteme zum Einsatz, meist mit der Funktion zur Reduktion des Energieverbrauchs. Für die Vollbahn gibt es im deutschsprachigen Raum¹ mittlerweile elf solcher Systeme, wobei nur neun davon für den Güterverkehr geeignet sind. Ausgestattet mit DAS sind im deutschsprachigen Raum lediglich 15-17% der Schienenfahrzeuge (inkl. Straßenbahnen). (N.N. 2017b, S. 7)

Auch GoA2 ist auf der Vollbahn schon möglich, jedoch gibt es nur wenige Beispiele. Ein existierendes Beispiel ist das, sich seit 25 Jahren in Betrieb befindliche, tschechische System AVV, welches auf 25% des tschechischen Netzes im Einsatz ist (Kampík). Seit 2017 werden die Züge der suburbanen Linie RER-A in Paris in Stufe 2 geführt, aufbauend auf dem konventionellen Sicherungssystem SACEM mit zusätzlichen Balisen (Poré 2017). Ein weiteres Beispiel stellen die GoA2 betriebenen Intercity Züge in China dar. Hier handelt es sich um eine 2000 km lange PDL (Passenger Dedicated Lines), d.h. einer Strecke ausschließlich für die Abwicklung von Personenverkehr. Das ATO System ist in Verbindung mit dem Zugbeeinflussungssystem CTCS 2 (vergleichbar zu ETCS Level 2) im Einsatz. Im März diesen Jahres verkehrte in London der erste, auf dem System ATO over ETCS Level 2 aufbauende Zug für Personenverkehr in GoA2, (N.N. 2018a). Ein weiteres Beispiel für Stufe 2 befindet sich derzeit in Planung. So sind für 2018 Testfahrten vorgesehen, damit ein Verkehren von Güterzügen in GoA2 (bis sogar 3) auf der Betuweroute, der niederländischen Güterverkehrsstrecke an der deutsch-niederländischen Grenze, in Zukunft ermöglicht wird (Randelhoff 2018). (Poré 2017)

¹ Deutschland, Luxemburg, Österreich und Schweiz

3.2.1 Status Quo bei der U-Bahn

ATO stellt bei U-Bahnen schon lange ein bewährtes System und wird mittlerweile in vielen Städten eingesetzt. 1981 gab es die erste fahrerlose U-Bahn, mittlerweile gibt es weltweit in 25 Städten 41 U-Bahn-Linien, die fahrerlos betrieben werden (International Association of Public Transport (UITP), S. 5). Im Jahr 2013 machte der Anteil an Bestellungen oder Neubauten von U-Bahnen in Bereich von GoA4 mehr als 50% aus (Shift2Rail 2015, S. 188).

In Wien ist die erste fahrerlose U-Bahn für 2023/24 geplant. Momentan verkehren die U-Bahnen in Stufe 2, der/die Fahrer/in sitzt in der Führerstandskabine und muss nur die Befehle „Tür öffnen“, „Tür schließen“ und „Start“ geben. Die Fahrzeuge der neuen U-Bahnlinie sollen aber auch auf den konventionell betriebenen Strecken (Stufe 2) fahren können, damit das System interoperabel bleibt. (Panzera 2017)

3.3 Status Quo im Straßenverkehr

Die Forschung beschäftigt sich derzeit intensiv mit autonomen Fahrzeugen und ist damit stark gefordert, die Information zu den Aufgaben des „Autofahrens“ (Spur- und Abstandsregelung, Hinderniserkennung, Verkehrsregeln, Fahrstreckenplanung, Steuerung des Fahrzeugs etc.) und der Umgebung (Fahrbahn, Hindernisse etc.) in eine Software zu integrieren. (König 2015, S. 6)

Im Straßenverkehr werden fünf Stufen der Automatisierung unterschieden. Die letzten zwei Stufen werden als autonomes Fahren bezeichnet. Das sind jene Fälle, wo kein/e Fahrer/in mehr erforderlich ist, wobei dies für Stufe vier nur in spezifischen Anwendungsfällen gültig ist. Abbildung 3 stellt die Automatisierungsstufen von Straße und Schiene gegenüber. (König 2015, S. 7)

Automatisierung unterschiedlicher Verkehrsträger



Abbildung 3: Nießen, Schindler et al (Nießen et al. 2017, S. 33)

Prognosen gehen davon aus, dass um 2030 ausschließlich Autos der Stufe 3 oder höher hergestellt werden sollen (Marteaux und Sobun 2017). Ein bekanntes Beispiel für solch ein Fahrerassistenzsystem ist der Autopilot von Tesla, welcher derzeit ausschließlich für Autobahnen zulässig ist (Yoo 2017). Die Verantwortung trägt weiterhin der/die Fahrer/in selbst und muss auch in einer Konfliktsituation in der Lage sein einzugreifen (autobild.de 2018). Gegenwärtig werden neue Funktionen des Tesla Autopilots getestet, die jedoch noch rechtliche Genehmigung erfordern, wodurch zukünftig die Parklückensuche, das Einparken vom Fahrzeug sowie das Fahren an Kreuzungen vom Autopiloten übernommen werden soll (Tesla Inc.). Auch andere Unternehmen testen autonome Fahrzeuge. Nissan erprobt derzeit fahrerlose Fahrzeuge auf den Straßen Londons, während Uber fahrerlose LKWs und Busse testet (Marteaux und Sobun 2017).

In Österreich wird momentan u.a. an autonomen Autobussen geforscht (Projekt auto.bus Seestadt oder Digibus). Herausforderungen stellen besonders das Einlesen der gesamten Umgebungsdaten sowie die Sensoren- und Kameratechnik dar: Erschwernisse wie toter Winkel, Kurvenradius, parkenden Autos etc. müssen mitberücksichtigt werden, um ein sicheres Manövrieren ohne Fahrer/in zu ermöglichen; fehlende Straßenmarkierungen und Steigungen sind zu bewältigen; fährt das autonome Fahrzeug auf einer abgeänderten Strecke, die der Software unbekannt ist, ist eine Neukalibrierung notwendig; darüber hinaus kann beispielsweise auch Schlechtwetter die Sensoren negativ beeinflussen. (Liebermann und Rehrl 2017)

3.3.1 Status Quo bei LKWs

Im Schwerverkehr wird derzeit an „Zügen“ auf der Straße geforscht. Beim sogenannten Platooning fahren miteinander kommunizierende und mit Fahrerassistenzsystemen ausgestattete LKWs enger als herkömmlich hintereinander her. Güter-Logistikunternehmen sehen Platooning als Möglichkeit der Produktivitätssteigerung, Kostensenkung und Verbesserung der Klimabilanz (Co₂ Einsparung durch konstanteres Fahren) sowie Unfallreduktion durch übermüdete Fahrer/innen. Zudem kann beim Platooning aufgrund der Bremskurvenanpassung des nachfahrenden Fahrzeugs an das vordere, der Folgeabstand minimiert und die Kapazität erhöht werden (Koch 2017). (Marteaux und Sobun 2017; European Truck Platooning)

3.4 Status Quo im Luftverkehr

Der Luftverkehr funktioniert bereits teilweise automatisiert, indem das „Fliegen“ durch den modernen Autopiloten übernommen wird. *„‘Fliegen‘ heißt hierbei, dass der Autopilot beispielsweise die Fluglage im Raum so herstellt, dass der dreidimensionale Flugweg eingehalten werden kann“* (Braun 2017). Der Autopilot braucht hierfür genaue Vorgaben über den Flugweg und die Geschwindigkeit, die einzuhalten ist. Dies erfolgt entweder über das Flight Management System, wo der Autopilot von einer Software gesteuert wird und der/die Pilot/in die Aufgabe der Überwachung des Autopiloten hat oder durch den/die Pilot/in selbst, für den Fall, dass ein/e Fluglotse/in eine Abänderung der vorprogrammierten Route fordert. Während das Starten immer durch den/die Pilot/in erfolgt, kann die Landung nur unter bestimmten Voraussetzungen automatisch erfolgen. Hierfür müssen Flugzeug und Flughafen jedoch mit einer gewissen Technologie ausgestattet sein. Auch bestimmte Wettereinflüsse können ein automatisches Landen behindern, wodurch der/die Pilot/in übernehmen muss. Das Starten, Landen und Fliegen, sprich die Überwachung der „Luftstraßen“ erfolgt über Flutloten, die in Radarkontrollzentren sitzen und die Koordination der Flugzeuge computergestützt übernehmen. Die Startfreigabe erfolgt dabei per Sprechfunk. Zur genauen Positionsbestimmung dienen Funkanlagen (Funkfeuer) anhand des Ausstrahlungsortes der Radiowellen. (Braun 2017; Hirschler et al. 2017; Püttmann 2017)

Die bis dato übliche Funksteuerung soll in Zukunft vermehrt satellitenbasiert erfolgen, wodurch die Effizienz und Kapazität aufgrund einer exakteren Positionsbestimmung gesteigert werden kann. (Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL); Federal Aviation Administration 2016; Süddeutsche.de GmbH 2017)

Aus Sicherheitsgründen waren bisher immer zwei Pilot/innen an Bord, was sich in Zukunft eventuell ändern könnte. Neue Forschungen der NASA beschäftigen sich mit „single-pilot airline cockpits“, wo zusätzliches Personal am Boden mehrere Flüge gleichzeitig

überwacht. In der Theorie wären auch unbemannte Passagierflugzeuge möglich. Der vollautomatische Flug wurde bei militärischen Flugzeugen kürzlich erprobt. Neben der Gesetzgebung bezüglich Drohnen, stehen auch Passagiere unbemannten Flugzeugen skeptisch gegenüber. (Marteaux und Sobun 2017; Püttmann 2017)

Die Digitalisierung/Automatisierung ist auch in anderen Bereichen des Luftverkehrs wahr zu nehmen. Beispiele sind Systeme zur vorausschauenden Instandhaltung, Drohnen mit Videokameras oder Laser, die Routinechecks durchführen oder Technologie, die im Flughafenbereich kundenorientierte Lösungen anbietet, wie zum Beispiel Roboter, die Passagieren Auskunft über Ankunft und Abfahrt geben. (Marteaux und Sobun 2017)

3.5 Status Quo im Schiffsverkehr

Die manuelle Lenkung des Schiffsverkehrs wird durch ein funkbasiertes System AIS (Automatic Identification System) unterstützt, wodurch u.a. Kollisionen vermieden werden können. Übertragen werden Schiffsdaten (Name, Art, Länge etc.) sowie Kurs und Geschwindigkeit. Die Krümmung der Erde hat zur Folge, dass AIS i.d.R. nur im Küstenbereich Anwendung findet, weshalb für entlegene Gebiete eine Kombination mit Satelliten angewandt wird. International ist bei Schiffen über 300 Tonnen eine AIS Ausstattung verpflichtend. Das Verfolgen von Schiffen oder Schiffsüberführungen ist ebenfalls durch Satelliten möglich. (Hannemann; European Space Agency (ESA) 2016)

Der Schiffsverkehr ist zudem durch seine Hafenlogistik geprägt. Die Digitalisierung und Automatisierung bietet in diesem Bereich Optimierungsmöglichkeiten. (Hamburger Hafen und Logistik AG)

Auch im Schiffsverkehr wird stark an technologischen Weiterentwicklungen im Hinblick auf selbstfahrende, unbemannte Schiffe geforscht. Derzeit wird ein Prototyp eines besatzungslosen Containerschiffs an der norwegischen Küste getestet. Wie aber auch im Straßenverkehr fehlen für einen fahrerlosen Schiffsverkehr rechtliche Rahmenbedingungen. Auch dem Thema Cyber Security muss besondere Beachtung geschenkt werden. (Birger 2017)

3.6 Automatisierung auf der Vollbahn im Vergleich

Beim Vergleich des Schienenverkehrs mit dem Straßenverkehr sollte man sich bewusst darüber sein, dass die Bahn systembedingt wesentliche Vorteile hat. Zum einen durch die Spurgebundenheit, wodurch nur ein Freiheitsgrad in Längsrichtung besteht und zum anderen durch die bereits bestehende Automatisierung in vielen Bereichen (Nießen et al. 2017, S. 34). Die mediale Präsenz der Thematik des fahrerlosen Fahrens ist im Schienenverkehr jedoch bedeutend kleiner als beim Verkehrsträger Straße (Nießen et al.

2017, S. 33). Nicht zuletzt deswegen erhielten Autohersteller in Deutschland zwischen 2007 und 2017 das 59-fache an Fördergeldern für Forschung und Entwicklung als die Schienenfahrzeugindustrie (Bundestag; Flege 2017).

Der Schienenverkehr verglichen mit Anwendungen des Luftverkehrs zeigt, dass die computerunterstützte Disposition bei der Bahn und Aufgabe der Disponenten/innen ähnlich der computergestützten Steuerung in Kontrollzentren mit einem Flight Management System und den Aufgaben von Fluglotsen/innen ist. Die Aufgaben des Autopilots lassen sich mit GoA2 vergleichen, wobei die Bahn hier im Rückstand ist. Auch im Hinblick auf die Verwendung von Satelliten kann die Bahn vom Luftverkehr lernen. (Terleth und Lochem 2017)

Im Vergleich mit der U-Bahn zeigt sich folgendes: der Grund, weshalb sich höhere Automatisierungsstufen bei der Vollbahn, im Vergleich zur U-Bahn, noch nicht durchgesetzt haben, liegt am weitaus komplexeren System der Vollbahn. Auf einem Vollbahnnetz verkehren, vergleichsweise zu einem U-Bahnnetz, viele unterschiedliche Arten von Schienenfahrzeugen. Zudem können und sollen diese, solange es die Infrastrukturgegebenheiten erlauben, überall verkehren dürfen, während U-Bahn Fahrzeuge meist nur auf einer bestimmter Linie fahren (Barnard et al. 2012b, S. 3). Unterschiedliche Zugattungen (Personen- und Güterverkehr), Zuglängen, Lokomotiven, Massen, Geschwindigkeiten, Türanordnung etc. führen dazu, dass es unterschiedliche Systemanforderungen gibt. Beispielsweise erschweren die unterschiedlichen Zuglängen eine einheitliche Anordnung von Bahnsteigtüren im Bahnhofsbereich. Im U-Bahn Bereich verhindern mit der Stecke bündig abschließende Bahnsteigtüren ein Betreten der Gleise. Zudem ist auch der Bahnhofsbereich bei der Vollbahn nicht überall ident. Diese Problematik ist bei der U-Bahn im Regelfall nicht gegeben, da es sich um homogene (meist nur eine Baureihe) und geschlossene Systeme in Tunneln handelt (Emery 2017, S. 2). Die Vollbahn wiederum ist ein offenes System, wo Konflikte durch den Straßenverkehr oder die Querung von Personen und Tieren einen erhöhten Aufwand der notwendigen Sicherheit bedingt. Im Knotenbereich und auf freier Strecke sind daher weitere Anforderungen zu untersuchen. Neben diesen Unterschieden stellt das Thema der Interoperabilität eine der großen Herausforderungen für den Schienenverkehr dar. Während bei U-Bahn Systemen für ein Netz i.d.R. der gleiche technische Standard herrscht, kommen bei der Vollbahn unterschiedliche Ausrüstungen in Hinblick auf Signal- und Sicherungstechnik zum Einsatz. Hinsichtlich der Rechenkapazitäten von Computern und dem derzeit Möglichen hat die Netzgröße von Vollbahnen gegenüber der von U-Bahnen einen Nachteil. Neben dem vielfältigeren Wagenmaterial und Infrastruktur kommt hinzu, dass bei der Vollbahn die organisatorische Struktur getrennt ist, während bei der U-Bahn Betrieb und Infrastruktur in einer Hand sind. Auf diese Problematik wird in Kapitel 4 genauer eingegangen. (Randelhoff 2016)

Die Unterschiede zwischen Vollbahn und U-Bahn sind nachfolgend zusammengefasst:

Tabelle 1: Systemvergleich zwischen Vollbahn und U-Bahn

	U-Bahn	Bahn
Wagenmaterial	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Homogenes Wagenmaterial, i.d.R. auf ein bestimmtes Netz begrenzt 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unterschiedliche Zuggattungen und Schienenfahrzeuge, die im ganzen Streckennetz verkehren können, solange es die Infrastruktur erlaubt
Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geschlossenes System ▪ Gleicher technischer Standard der Streckenausrüstung ▪ Idente Bahnsteige 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Offenes System, Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern ▪ Fehlende Interoperabilität hinsichtlich Streckenausrüstung ▪ Unterschiedliche Bahnstreckengegebenheiten
Organisatorische Struktur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Integriertes Unternehmen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Betrieb und Infrastruktur getrennt, um den freien Markt zu stärken
Instandhaltungs-/Baumaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mehrheitlich außerhalb der Betriebszeiten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mehrheitlich während dem Betrieb

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Bahn technologisch gesehen den anderen Verkehrsträgern nicht unterlegen ist. Trotzdem ist es für die Bahn notwendig, um konkurrenzfähig zu bleiben, weiterhin den Automatisierungsgrad zu erhöhen. Weiters kann festgestellt werden, dass eine exakte Positionsbestimmung bei allen Verkehrsträgern eine absolute Grundbedingung darstellt, um einen kollisionsfreien, vollautomatisierten Betrieb zu erreichen. Durch die Verwendung von Satelliten als Positionierungssystem sind der Schiffs- und Flugverkehr der Bahn in dieser Hinsicht einen Schritt voraus. Wie der Vergleich zwischen Vollbahn und U-Bahn zeigt, kann ATO (ab GoA2) nicht 1:1 auf die Vollbahn umgelegt werden. In weiterer Folge wird daher auf die Anforderungen von ATO (ab GoA2) detailliert eingegangen.

4 Anforderungen aufgrund von ATO

Die drei Hauptelemente der Bahn bilden Infrastruktur, Wagenmaterial und Betrieb. Normen und Regelungen sorgen für ein sicheres Zusammenspiel. Im Eisenbahnbetrieb erfordert dies ein entsprechendes Zusammenwirken unterschiedlicher Stakeholder, da strecken- und fahrzeugseitige Komponenten miteinander kompatibel sein müssen, auch bei der Einführung neuer Systeme wie ATO. (Knollmann 2017)

Stakeholder sind Fahrzeughersteller, Hersteller von Infrastrukturkomponenten sowie Eisenbahnunternehmen (vgl. Abbildung 4). Aufgrund der Neuorganisation im europäischen Eisenbahnwesen (RL 91/440/EWG) werden Eisenbahnunternehmen in Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) unterschieden. Erstere sind für das Betreiben der Eisenbahninfrastruktur zuständig und stellen das Netz zur Verfügung. Ihr Verantwortungsbereich liegt daher im Bau sowie der Unterhaltung von Schienenwegen, der Koordination der Trassen und der Führung von Sicherheitssystemen. Sie sind für einen sicheren und pünktlichen Betriebsablauf zuständig. Eisenbahnverkehrsunternehmen sind die Infrastrukturbenutzer und stellen Eisenbahnverkehrsleistungen zur Verfügung. Wollen sie die Infrastruktur für eine Zugfahrt in Anspruch nehmen, müssen sie beim EIU eine Fahrplantrasse bestellen, welche die jeweiligen Trassenwünsche anhand von Fahrplänen koordiniert. EIU und EVU müssen daher auch bei der Einführung von ATO zusammenarbeiten, da strecken- und fahrzeugseitige Anforderungen zu berücksichtigen sind. (Fendrich 2007, S. 572)



Abbildung 4: Zusammenspiel unterschiedlicher Stakeholder im Eisenbahnwesen (Rao 2017)

Abbildung 5 zeigt, dass sich die Anforderungen aufgrund von ATO, basierend auf den Komponenten der Bahn, in drei Kategorien unterteilen lassen. Betriebliche Erfordernisse (operation) umfassen die sichere und pünktliche Lenkung des Verkehrs, auch in Abhängigkeit der Nachfrage. Im technischen Bereich (technology) spielen die Fahrzeug- und Streckenausstattung, die Datenübertragung, Lokalisierung und Hinderniserkennung eine wesentliche Rolle, damit ein sicherer und pünktlicher Betrieb gewährleistet werden kann.

Betrieb und Technik müssen sich jedoch an gewisse rechtliche Rahmenbedingungen (legal) halten und normative Anforderungen erfüllen. Im nächsten Kapitel werden daher Aspekte hinsichtlich Sicherheit, Zertifizierung oder Testversuche näher beleuchtet werden. (Meyer zu Hörste 2017)

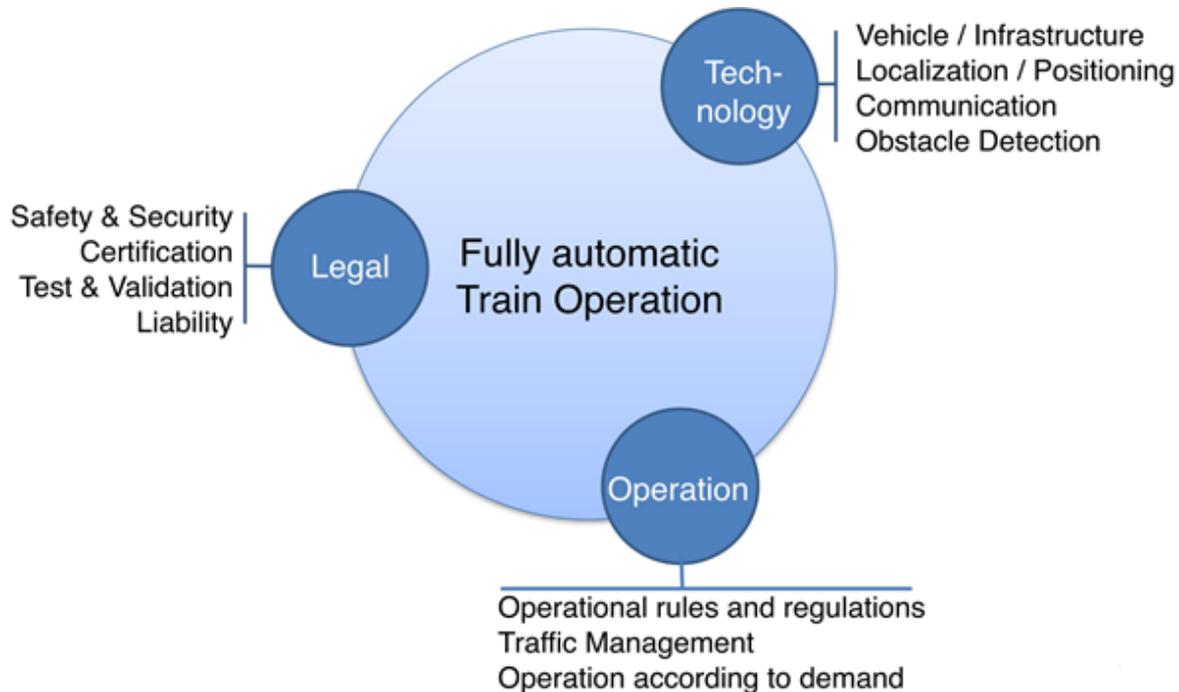


Abbildung 5: Allgemeine Anforderungen an ATO (GoA1-4) (Meyer zu Hörste 2017)

4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen und normative Anforderungen

In Österreich gilt aufgrund des verfassungsgesetzlichen Grundrechts der Gewährleistung „auf Leben und körperliche Integrität sowie das Grundrecht auf Schutz des Eigentums“, dass nur Techniken erlaubt sind, wo daraus entstehende Gefahren auf ein ethisch akzeptables Minimum reduziert werden. Für ATO folgt daher, dass der Betrieb gleich dem jetzigen Betrieb mit Lokführer/innen zu setzen ist und das automatisierte System in jeder Betriebssituation gleich handeln kann, „wie der sorgfältige und maßstabsgerechte, für dieses Verkehrssystem konkret ausgebildete Mensch im Stande ist“. (Mächler 2017, S. 7)

Die normativen Grundlagen, die einer Systementwicklung im Schienenverkehr zugrunde liegen sind vielseitig. Sie reichen von nationalen Verordnungen und Gesetzen über technische Normen bis hin zu EU-Richtlinien und -Verordnungen. Auch im Zertifizierungsprozess ist dieser normative Rahmen daher einzuhalten. Eine tragende Rolle beim Entwurf von EU-Verordnungen und -Richtlinien hat die europäische Eisenbahnagentur ERA. Eine Übersicht dazu gibt Manz (Manz 2017, S. 64). (Manz 2017, S. 63)

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, ist der Sicherungstechnik bei der Einführung von ATO ein hoher Stellenwert zuzuschreiben. Detailliert wird das Thema der Zugsicherungssysteme im Zusammenhang mit ATO in Kapitel 4.2.2 behandelt. Um also Sicherheit zu gewährleisten, ist es wichtig, dass gewisse Standards vorherrschen, bevor ATO auf der Vollbahn tatsächlich zur Praxisanwendung gelangen kann. Für die U-Bahn gibt es schon seit 2009 die Standardisierung IEC 62267, welche die Sicherheitsanforderungen für fahrer- und personallosen Betrieb regelt (Meyer zu Hörste 2017). Für die Vollbahn gibt es so bis dato keine Regelungen (Treydel 2017). Spezifikationen und Standardisierung befinden sich derzeit noch im Entwicklungsstadium, siehe Kapitel 4.1.2.

4.1.1 Interoperabilität

Europaweit gibt es historisch bedingt viele verschiedene, nicht miteinander kompatible Zugsicherungssysteme. Für den grenzüberschreitenden Verkehr haben sich daraus Mehrsystemlokomotiven entwickelt, die mit bis zu zehn Zugsicherungssystemen ausgestattet sind. Neben unterschiedlichen Zugsicherungen, stellen auch unterschiedliche Stromversorgungssysteme und Spurweiten eine Herausforderung für den grenzüberschreitenden Verkehr dar. Mit Einführung der Technischen Spezifikationen für Interoperabilität (TSI), entstanden durch die EU-Richtlinie 2008/57/EG, wurde ein Meilenstein für einen einheitlichen europäischen Schienenverkehr gesetzt. (Pucher und Schausberger 2017; Randelhoff 2016)

Zuständig für die Erstellung und Überwachung dieser TSI ist gemäß RL EU 2008/57/EG die europäische Eisenbahnagentur (Manz 2017, S. 63). Im Rahmen des vierten Eisenbahnpakets wurde diese Richtlinie durch die EU 2016/797 (Richtlinie über Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union) ersetzt. Weitere Neuerlassungen waren die RL (EU) 2016/798 (Richtlinie über Eisenbahnsicherheit), worin sicherheitsrelevante Themen geregelt sind und die RL (EU) 2016/796, welche der europäischen Eisenbahnagentur mehr Aufgaben einräumt (siehe 4.1.3). Alle Neuerlassungen sollen zur Verbesserung der Funktionsweise des einheitlichen europäischen Eisenbahnraums beitragen (vgl. Abs. 3 RL EU 2016/796). (Gstettenbauer 2017, S. 33–36)

In den letzten 15 Jahren wurde, in Zusammenarbeit mit Signaltechnikherstellern und Eisenbahnunternehmen, ERTMS (European Rail Traffic Management System) entwickelt. Es steht für eine interoperable Lösung für Zugbeeinflussungssysteme und soll den Schienenverkehr sicherer sowie wettbewerbsfähiger machen, siehe Abbildung 6. Eine der Komponenten des ERTMS ist das europäische Zugsicherungssystem ETCS (European Train Control Systems), worauf in Kapitel 4.2 und 4.3 detailliert eingegangen wird.

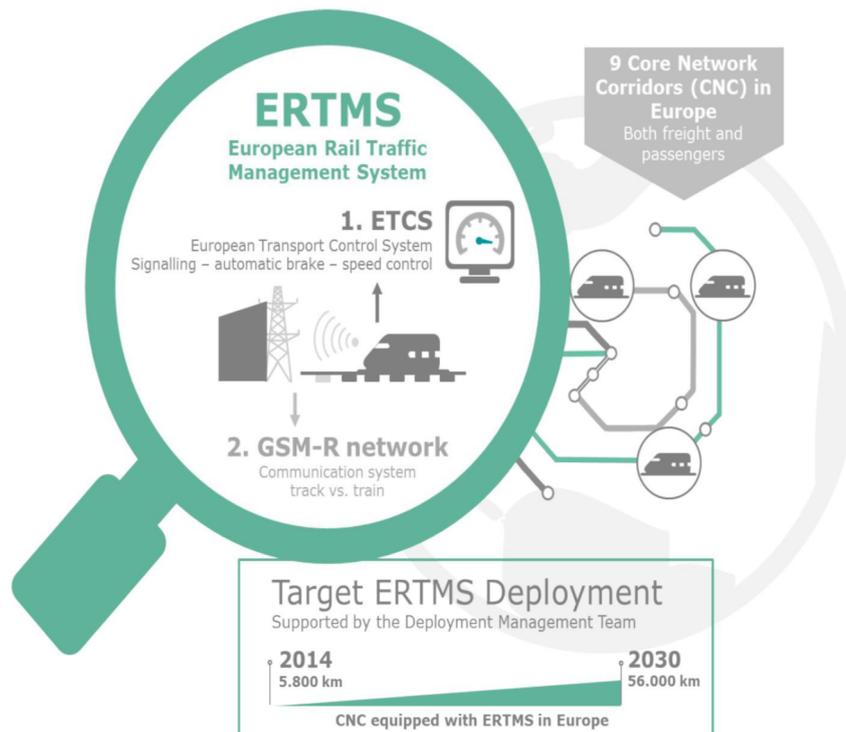


Abbildung 6: European Rail Traffic Management System (Europäische Kommission 2016)

Die Anforderungen an das ERMTS sind in den TSI zum Teilsystem „Zugsteuerung, Zug-sicherung und Signalgebung“ (TSI ZZS) verankert, worin Spezifikationen zu den unterschiedlichen Systemversionen angeführt sind. Die aktuellste Version betrifft die Spezifikation Nr. 2 der ETCS Baseline 3. Für eine tatsächliche Umsetzung von ERMTS in der Praxis sorgten Verordnungen und Absichtserklärungen, wodurch die Implementierung auf sechs Güterverkehrskorridoren, Hochgeschwindigkeitsstrecken und wichtigen Kernverbindungsstrecken des TEN-T (Transeuropäischen Netz für Verkehr), als Ziel gesetzt wurde (Europäische Kommission 2016). Abbildung 7 zeigt das europäische „Hauptnetz“ und dessen geplante ETCS Implementierung bis 2023 (grün) und 2030 (grau). (Europäische Kommission 2016; European Union Agency for Railways 2017,)

Um Interoperabilität und Harmonisierung weiter voranzutreiben und gegenüber anderen Verkehrsträgern im digitalen Zeitalter konkurrenzfähig zu bleiben, setzen viele (europäische Eisenbahngesellschaft, CER, ERMTS Users Group, UNIFE sowie einzelne Bahnbetreiber wie die SBB oder Hersteller wie Alstom) bei der Einführung von ATO auf das Konzept ATO over ETCS (siehe Kapitel 4.2.2.3). Die Einführung von ATO hat so zu erfolgen, dass sie europaweit die Interoperabilität im Schienenverkehr stärkt. Es soll die Zusammenarbeit und das Know-how vieler genutzt werden, sodass standardisierte Produkte entwickelt werden, die auf europäischer Ebene effizient einsetzbar sind. (Barnard et al. 2012b, S. 2; Communauté européenne du rail (CER) 2016, S. 1)

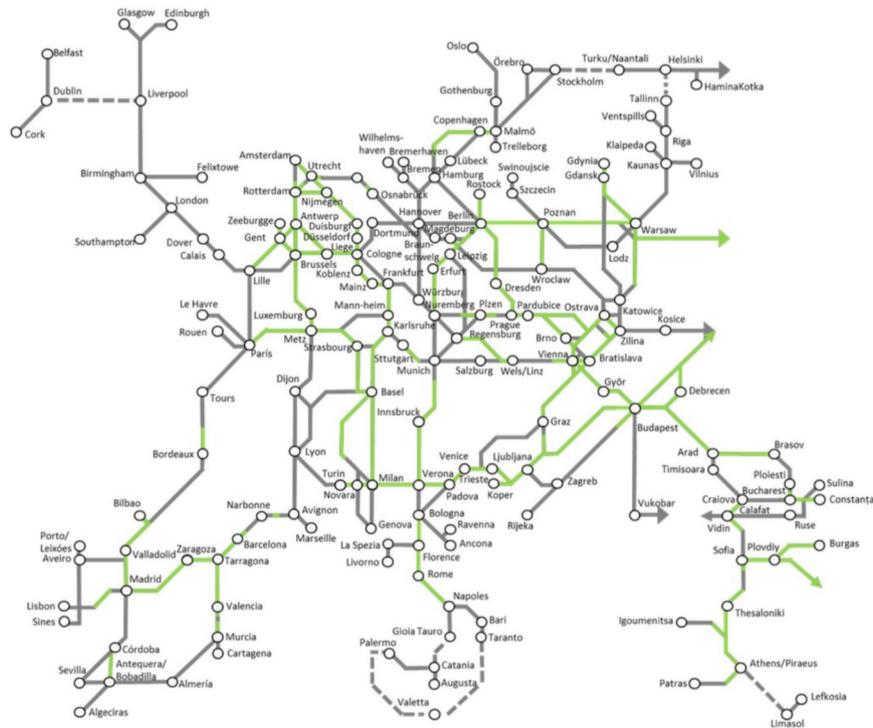


Abbildung 7: geplante ETCS Implementierung in Europa bis 2023 (grün) und 2030 (grau) (Davis 2018)

4.1.2 Einbindung ATO in TSI ZSS

Mangels Standardisierung werden derzeit daher auf europäischer Ebene Spezifikationen zu dem Betriebskonzept ATO über ETCS erarbeitet. Im Rahmen dieses Konzepts werden momentan Spezifikationen zu ATO bis GoA4 erarbeitet, die in weiterer Folge in die TSI ZSS übernommen werden sollen. Die europäische Eisenbahnagentur, als Verantwortliche für die TSI, nimmt eine tragende Rolle bei der Entwicklung von ATO über ETCS Spezifikationen ein. (European Union Agency for Railways 2017, S. 19)

Im Rahmen des TEN-T WP12 startete die Unisig (Union Industry of Signalling) mit technischen Spezifikationen für die GoA2. Der Output wurde an die ERA weitergeleitet. Die ERA hätte die Spezifikationen in die ERMTS Baseline R3 der TSI ZSS einarbeiten sollen, was aber nicht möglich war. Das Ziel im Projekt Next Generation Train Control (NGTC) von 2013-2017 war die Entwicklung einheitlicher Spezifikationen für ATO und Zugsicherung (Software Requirement Specification sowie Functional Requirement Specification) für das System Bahn und U-Bahn. Der Unterschied der beiden Systeme (Vollbahn und U-Bahn) hatte zur Folge, dass im Laufe des Projekts keine Spezifikation entworfen werden konnten. Stattdessen erfolgte ein großer Wissensaustausch, besonders im Hinblick auf die Funktionsweise von ATO im urbanen Raum. (Treydel 2017)

Die Ergebnisse aus dem WP12 und NGTC dienen als Input für das Projekt Shift2Rail, welches aufbauend auf fünf Innovationsprogrammen, die europäische Bahnindustrie stärken soll (Union des Industries Ferroviaires Européennes (UNIFE), S. 3–4). Ziele des zweiten Innovationsprogramms (IP2) ist die Weiterentwicklung von Signal- und Zugsicherungssystemen, aufbauend auf dem aktuellen ERMTS. Dadurch kann ein „*intelligentes Verkehrsleitsystem mit automatisch gefahrenen Zügen*“ zur Kapazitäts- und Zuverlässigkeitserhöhung sowie Lebenszykluskostensenkung geschaffen werden (Shift2Rail, S. 4). Im Rahmen des IP2 wird daher unter anderem an Spezifikationen für ein interoperables ATO der unterschiedlichen Automatisierungsgrade gearbeitet. Diese sollen in weiterer Folge als Standards für ATO (bis GoA4) dienen. (Shift2Rail 2015, S. 190)

Der Input aus den Vorprojekten, aufbauend auf dem Betriebskonzept, dient besonders dem WP1 (Work Package 1) von 2016-2019, wo für die GoA1 und 2 Spezifikationen auf Basis der Systemanforderungen entwickelt wurden. Momentan werden die Ergebnisse, i.e. die erarbeiteten Anforderungen für GoA1 und GoA2 over ETCS noch von ERA und Unisig überprüft. Testversuche (test benches) und Pilotprojekte (pilot line demonstrators), welche bis 2019 geplant sind, dienen zur Validierung der gewählten Anforderungen. Bis 2022 ist die Veröffentlichung der Spezifikationen in den TSI ZZS geplant. Das WP2 beschäftigt sich mit den Entwicklungen für GoA3 und 4, wobei hier noch kein betriebliches Konzept vorliegt. Momentan wird nur an den prinzipiellen Hauptanforderungen gearbeitet. Sobald ein operationelles Konzept vorliegt, sollen auch hier Spezifikationen entwickelt und Pilotversuche durchgeführt werden. Die Wunschvorstellung wäre eine Spezifikation für alle GoAs. Abbildung 8 zeigt den Einarbeitungsprozess in Shift2Rail schematisch. (Treydel 2017)

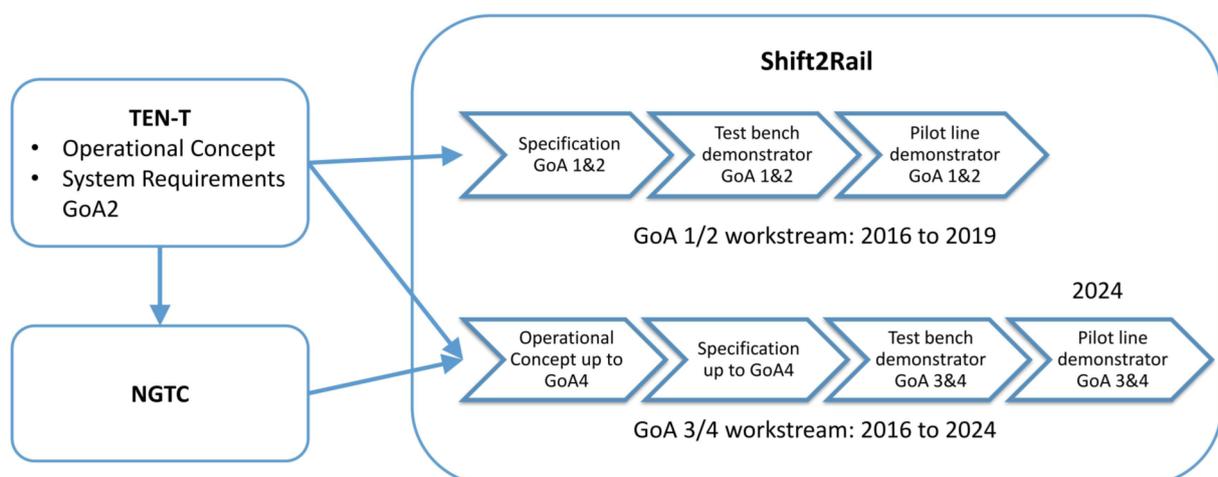


Abbildung 8: Integration von ATO Spezifikationen in TSI ZZS (Treydel 2017)

Die Entwicklung von ATO over ETCS ist jedoch abhängig von den Entwicklungen des ERMTS, weshalb viele Hersteller an eigenen Systemen arbeiten (Emery 2017, S. 8). Um einen gewissen Standard und Sicherheit zu gewährleisten, muss im rechtlichen Zusammenhang daher auch die Zertifizierung der verschiedenen Produkte beachtet werden.

4.1.3 Zertifizierung und Genehmigungen

Die Gewährleistung eines sicheren Schienenverkehrs bei neuen Systementwicklungen ist Pflicht. Wichtig ist es demnach, das ATO System zu zertifizieren, also nachzuweisen, dass es bestimmten Anforderungen entspricht. Nach der Konzepterstellung, Systemdefinition, Risikoanalyse, Auswahl der Systemanforderungen und während der Implementierung ist es wichtig, dass das System validiert wird und den Sicherheitsanforderungen, gemäß des normativen Rahmens, entspricht. Nachdem sich die genauen Anforderungen für ATO noch in der Entwicklungsphase befinden und stetig neue Technik auf den Markt kommt, wäre es viel Aufwand, den Zertifizierungsprozess immer wieder neu zu beginnen. Das Unternehmen Ricardo schlägt deshalb als Alternative vor, neue Systeme während dem Betrieb einzusetzen. Dies unter strenger Überwachung des/der Lokführers/in und ständiger Ausarbeitung der Verhaltensdaten des neuen Systems. (Koch 2017)

Ähnlich wird es im Flugverkehr gemacht, wo bei der Implementierung „Feedback loops“ in das System integriert werden, wodurch ständig vom System gelernt und dieses verbessert werden kann. Ein Beispiel dafür war eine neue Regelung innerhalb der Zertifizierung, welche die Übertragung der Seehöhe an den Piloten erfordert, da mangels dieser Informationen immer wieder Probleme in sturmreichen Zonen entstanden. Ein Flugzeug kann auch nur dann erworben werden, wenn es zertifiziert ist und von einem zertifizierten Unternehmen verkauft wird. Die Zertifizierung im Luftverkehr wird durch entsprechende Agenturen wie der EASA (European Aviation Safety Agency) übernommen. Hier hat die Bahn einen wesentlichen Nachteil, da sich viele Unternehmen unabhängig voneinander um die Zertifizierung kümmern. Eine einheitliche europäische Zertifizierung wäre demnach zielführender. Im Falle von ATO over ETCS soll die europäische Eisenbahnagentur dazu beitragen, dass ein einheitlicher Zertifizierungsprozess entwickelt wird (Communauté européenne du rail (CER) 2016, S. 6). (Terleth und Lochem 2017)

Auch die Genehmigung von Fahrzeugen muss in Zukunft bedacht werden. Mit der RL (EU) 2016/797 wurde die europäische Eisenbahnagentur mit der Aufgabe betraut, „Genehmigungen für das Inverkehrbringen von Eisenbahnfahrzeugen und von Fahrzeugtypen sowie von einheitlichen Sicherheitsbescheinigungen auszustellen“ (Gstettenbauer 2017, S. 36). Hier wurde der Schritt in Richtung einer entsprechenden Prüfbehörde für die Zulassung grenzüberschreitender Fahrzeuge gemacht. Für den Fall, dass das Verwendungsgebiet sich aber auf ein Netz oder Netze innerhalb eines Mitgliedsstaats bezieht, kann

auch die nationale Sicherheitsbehörde die Genehmigung erteilen, vgl. Art. 21 RL (EU) 2016/797.

4.1.4 Nationale gesetzliche Grundlagen

Abgesehen von den zuvor genannten Problematiken ist für ATO auch in nationalen Gesetzen eine Änderung vorzunehmen. Gemäß des österreichischen Eisenbahngesetzes (EisbG) ist fahrerloser Betrieb bis dato noch nicht möglich, da das Führen und Bedienen eines Triebfahrzeuges nur durch Anwesenheit eines/er Triebfahrzeugführers/in mit Sicht auf das Fahrziel erlaubt ist. Mit der Einführung von ATO müssen auch Gesetzesänderungen in Hinblick auf Sicherheitsanforderungen, Betrieb einer Eisenbahn und von Schienenfahrzeugen sowie die Ausbildung und Prüfung des Personals etc. stattfinden. Besonders davon betroffen wäre die Eisenbahnbau- und -betriebsverordnung. Im Hinblick auf Versuchsfahrten wäre es sinnvoll auch hier bereits Änderungen im Gesetz vorzunehmen, wenn davon ausgegangen werden kann, dass der *„Versuchsbetrieb in einen Regelbetrieb übergehen wird“* (Mächler 2017, S. 8). Ohne gesetzliche Regelungen sind vom Betriebsunternehmer und Hersteller für Versuchsfahrten bei der Obersten Eisenbahnbehörde Nachweise zu erbringen, dass sie für jegliche Schäden im Zuge der Versuchsfahrten aufkommen. In Anbetracht der Entwicklungen auf europäischer Ebene bezüglich der Sicherheitsanforderungen (Spezifikationen) ist ein Alleingang auf nationaler Ebene nicht ratsam, da dies eventuell erneute Änderungen im Gesetzestext mit sich führen würde (Mächler 2017, S. 16). (Mächler 2017, S. 8–10)

Hinsichtlich ATO in Bezug auf die rechtlichen Anforderungen kann zusammenfassend gesagt werden, dass hier noch viel Arbeit bevorsteht. Neben gesetzlichen Grundlagen im nationalen Recht und Spezifikationen allgemein, fehlt vor allem ein einheitlicher Zertifizierungsprozess sowie die erforderlichen Zulassungen durch entsprechende Prüfbehörden (Pluta 2017, S. 4). Mit der Entwicklung von Spezifikationen, der Anwendung von ATO over ETCS und den Änderungen der neuerlassenen Richtlinien wird zumindest versucht, eine einheitliche Richtung vorzugeben. Abseits der rechtlichen Anforderungen an die Einführung der Technologie muss auch geklärt werden, wie etwaigen Vorkommnissen oder Verstößen mit straf- und zivilrechtlicher Auswirkung begegnet werden kann.

4.2 Betriebliche Anforderungen

Wie bereits mehrmals betont, hat Sicherheit im Bahnbetrieb oberste Priorität. Zum besseren Verständnis wird nun auf allgemeine betriebliche Anforderungen näher eingegangen, die Grundvoraussetzung für die Durchführung einer sicheren Zugfahrt sind. Diese müssen auch im Falle von ATO garantiert werden können.

4.2.1 Allgemeine Regeln zur Durchführung einer Zugfahrt

Damit eine Fahrt überhaupt stattfinden kann, benötigt das EVU vom EIU eine zugewiesene Zugtrasse. Der zur Verfügung gestellte Fahrplan enthält unter anderem Informationen zu den zugelassenen Geschwindigkeiten. Die zugelassene Geschwindigkeit hängt von der Trassierung und der technischen Ausstattung der Infrastruktur sowie der zugelassenen möglichen Geschwindigkeit des Fahrzeugs ab und kann durch explizit signalisierte Geschwindigkeiten oder Langsamfahrstellen eingeschränkt werden (Pachl 2017, S. 14). (Fendrich 2007, S. 576)

Eine weitere Anforderung ist das Freigeben der Zugfahrt, die dem/der Lokführer/in *„garantiert, dass alle fahrwegseitigen Kriterien für die sichere Durchführung der Zugfahrt eingehalten sind.“* (Pachl 2017, S. 13) Die Führung einer Zugfahrt kann auf technischem oder nichttechnischem Weg erfolgen. Beim technischen Betriebsverfahren wird zwischen signalgeführtem Betrieb und anzeigengesteuerten Betrieb unterschieden. Im Ersteren wird die Fahrerlaubnis durch durchgehende ortsfeste Signale erteilt, im Zweiteren durch Führerstandanzeigen, siehe Abbildung 9 (detailliert in Kapitel 4.2.2.1 und 4.2.2.2). Eine mündliche oder schriftliche Fahrerlaubniserteilung wird nur in Ausnahmefällen getätigt, im Gegensatz zum nichttechnischen Betrieb, wo die Fahrerlaubnis fernmündlich über den/die Fahrdienstleiter/in erfolgt (z.B. für einfache betriebliche Verhältnisse wie Nebenbahnen). (Fendrich 2007, S. 573)

Zur Zugfolgesicherung ist die Signalisierung i.d.R. durch Streckenblöcke verbunden. Diese sichere Abstandsregelung führt dazu, dass Züge heutzutage im festen Raumabstand verkehren. Gleiches gilt prinzipiell im anzeigegesteuerten Betrieb. Für das Fahren im festen Raumabstand gilt, dass Züge nur in freien Blockabschnitten verkehren dürfen. Bestimmend ist das Schlussignal eines Zuges, da nur so festgestellt werden kann, dass ein bestimmter Gleisabschnitt tatsächlich geräumt und für den nächsten Zug frei ist. (Fendrich 2007, S. 578) Hierfür kommen Gleisfreimeldeanlagen, wie Gleisstromkreise oder Achszähler zur Anwendung (Pachl 2016, S. 66) oder in seltenen Fällen auch augenscheinliche Überwachung an den Zugfolgestellen. (Pachl 2016, S. 63, 2016, S. 66)

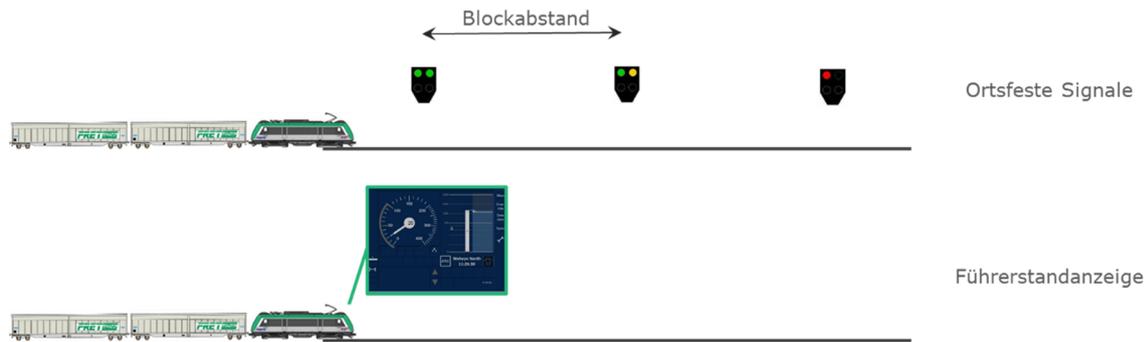


Abbildung 9: Fahren im festen Raumabstand im signal- oder anzeigegesteuerten Betrieb angelehnt an (Marschnig 2018; Treydel 2017, 2017)

Neben der Abstandsregelung muss für Kreuzungsbereiche sichergestellt werden, dass für ein Fahrzeug keine Entgleisungs- und Kollisionsgefahr besteht. Aus diesem Grund müssen vor Fahrerlaubniserteilung alle beweglichen Elemente des Fahrwegs durch Stellwerke in die richtige Lage gebracht werden. Dadurch werden Folge-, Gegen- und Flankenfahrten verhindert. Heutzutage kommen i.d.R. elektronische Stellwerke zum Einsatz. Entlang der Strecke und in Bahnhöfen befinden sich Signale, Weichen und Gleisfreimeldeeinrichtungen, welche von einer Betriebsleitzentrale aus gesteuert werden, wo Fahrdienstleiter/innen und Disponenten/innen ihre Arbeit computerunterstützt für größere Netzabschnitte verrichten. (Pachl 2016, S. 96; Trinckauf 2010, S. 8)

Zur Überprüfung, ob Geschwindigkeiten und Signale tatsächlich eingehalten werden, dienen Zugsicherungs/-beeinflussungssysteme verschiedenster Art (siehe Kapitel 4.2.2). Bei unzulässiger Fahrweise, wie z.B. einer Geschwindigkeitsüberschreitung oder beim Überfahren eines Signals können sie überwachend eingreifen oder den Zug zwangsbremsen, sodass die Zugfolge beim Fahren im festen Raumabstand eingehalten wird. Hier greift das Fail-Safe-Prinzip des Eisenbahnwesens, welches besagt, dass auch bei menschlichem Versagen, Sicherheit gewährleistet werden muss. (Pachl 2016, S. 76)

Neben der Zulassung der Zugfahrt und den Informationen zur zulässigen Geschwindigkeit benötigt der/die Lokführer/in auch Informationen zu den Verkehrshalten (Ankunft- und Abfahrzeit sowie Lage des gewöhnlichen Halteplatzes). Weiters sind Informationen zu sonstigen Begebenheiten, welche Einfluss auf die Fahrweise haben (wie beispielsweise Steigungen) oder zu infrastrukturseitigen Störfällen, welche ein Handeln des/der Lokführers/in erfordern (beispielsweise „Fahren auf Sicht“), nötig. Diese ganzen Daten liegen den Fahrer/innen entweder als Informationen an Bord vor (in elektronischer oder gedruckter Form) oder werden ihnen während der Fahrt von der Infrastruktur übermittelt. Im letzteren Fall werden die, vom Stellwerk erzeugten, Daten vom Fahrweg zum Zug übertragen. Zudem verfügen Lokfahrzeugführer/innen auch über Informationen aufgrund

ihrer Streckenkenntnis. Ihre Aufgabe besteht darin, diese Informationen aufzunehmen, auszuwerten und folglich daraus Fahr- und Bremsbewegungen zu bestimmen, wodurch sich unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile ergeben. (Pachl 2017, S. 13–15)

Bei der Anwendung von ATO (ab GoA2) sind diese erwähnten Datenbestände durch das System aufzunehmen und zu interpretieren, sodass eine automatische Antriebs-, Fahr- und Bremssteuerung erfolgen kann. Besonders die an Bord bereitgestellten Daten müssen erweitert werden durch „zugspezifische Daten, die das Fahr- und Bremsverhalten beeinflussen, aber auch Infrastrukturdaten in Form eines Streckenatlas“ (Pachl 2017, S. 14–15), sodass von der Infrastruktur übertragene Daten richtig interpretiert werden. Hinzu kommt, dass die Genauigkeit und Aktualität der Streckendaten im Verantwortungsbereich der Infrastrukturmanager/innen liegen, während Lok-Betreiber/innen dafür verantwortlich sind, die Zugdaten aktualisiert zu halten (Gralla 2016a, S. 13). (Pachl 2017, S. 14–15)

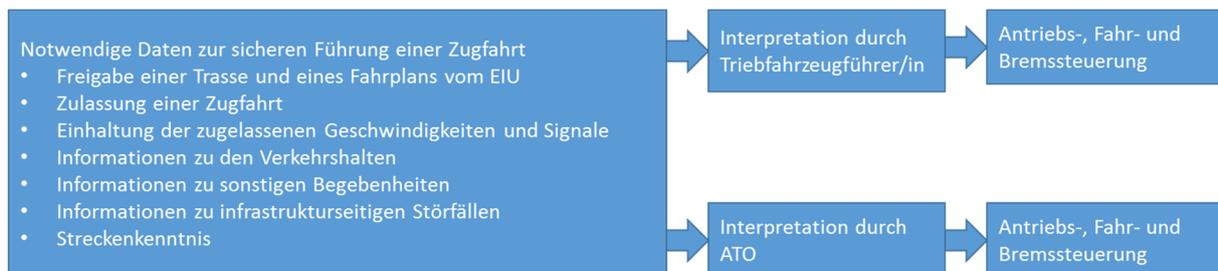


Abbildung 10: Daten für eine sichere Zugführung (auch mit ATO)

4.2.2 Zugsicherung und -beeinflussung

Wie bereits zuvor beschrieben, dient die Zugsicherung dazu, bei unzulässiger Fahrweise oder fehlerhaftem Handeln eine Schutzreaktion auszulösen. Zugbeeinflussungsanlagen sind daher auch Grundvoraussetzung für ein sicher funktionierendes ATO System, da sie dafür sorgen, die Geschwindigkeiten nicht zu überschreiten und das Fahrzeug im Notfall zum Stillstand zu bringen. Zugbeeinflussungsanlagen übertragen Informationen zur zulässigen Fahrweise vom Fahrweg zum Fahrzeug. Fahrzeugseitig befindet sich eine Auswerteeinrichtung, die punktuell oder linienförmig überwacht. Der Vorteil der linienförmigen Überwachung besteht in der kontinuierlichen Bremskurvenüberwachung, weshalb sie der punktförmigen vorzuziehen ist. Je nach technischer Ausstattung wirken Zugbeeinflussungssysteme entweder ergänzend zu ortfesten Signalen oder ermöglichen einen anzeigesteuerten Betrieb. Abhängig von der Informationsübertragung ergibt sich nachstehende Unterteilung. (Pachl 2016, S. 76; Fendrich 2007, S. 650–651; Barnard et al. 2012b, S. 4)

Anforderungen aufgrund von ATO

- I punktförmige Zugbeeinflussung (PZB),
- I linienförmige Zugbeeinflussung (LZB) oder
- I punkt- und linienförmige Zugbeeinflussung.

Wie die Begrifflichkeiten schon zu erkennen geben, erfolgt die Datenübertragung bei einer PZB nur an bestimmten Punkten der Strecke, bei einer LZB kontinuierlich. Die Übertragung der Informationen erfolgt heutzutage fast nur mehr über elektromagnetische Induktion. Je nach Informationsumfang und technischer Ausstattung können einfache oder komplexere Datentelegramme übertragen werden. Bei der kontinuierlichen Übertragung kommen i.d.R. Kabellinienleiter zum Einsatz. Eine weitere Möglichkeit der Datenübertragung stellt das Mobilfunknetz dar. (Fendrich 2007, S. 651–652; Pachl 2016, S. 76–77)

Auch wenn Zugbeeinflussungssysteme ein Anforderungskriterium für ATO sind, gilt zu berücksichtigen, dass nicht jedes Zugsicherungssystem einen sicheren teilautomatisierten bis vollautomatischen Betrieb ermöglichen kann, weshalb in weiterer Folge der signalgesteuerte und anzeigesteuerte Betrieb näher erläutert werden.

4.2.2.1 Signalgesteuerter Betrieb

Wie zuvor erklärt erfolgt der Betrieb mit ortsfesten Signalen durch Streckenblöcke und daher im festen Raumabstand, wie in Abbildung 11. An den Hauptsignalen wird dem/der Triebfahrzeugführer/in die Fahrerlaubnis erteilt oder nicht. Dies ist abhängig von den Randbedingungen, die erfüllt werden müssen, wie Zugfolgesicherung und Zugschluss, Gegen-, Folge-, und Flankenschutz sowie das Freisein des Blockabschnitts durch Gleisfreimeldung. Ein wichtiges Element beim signalgesteuerten Betrieb sind die Vorsignale, welche aufgrund der langen Bremswege vor den Hauptsignalen informieren, ob ein Halt zu erwarten ist. Die Mindestlänge von Blöcken beträgt aufgrund des maximalen Bremsweges der darauf verkehrenden Züge etwa 1000 Meter (Pachl 2016, S. 39). (Pachl 2016, S. 44)

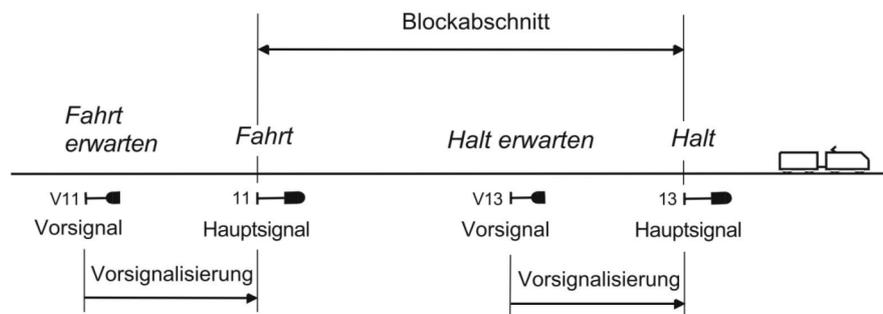


Abbildung 11: Signalgesteuerter Betrieb - Blocksystem (Fendrich 2007, S. 582)

Die PZB kommt in Kombination mit signalgesteuertem Betrieb zur Anwendung. Sie dient in dieser Betriebsart besonders dazu, dass der/die Triebfahrzeugführer/in Halt zeigende Signale nicht überfährt, weshalb sie daher vor Signalstandorten angeordnet ist. Diskrete Informationen werden diskontinuierlich an das Fahrzeug geliefert. Für den Fall, dass sich ein Halt zeigendes Signal während der Annäherung ändert und die Fahrt zugelassen wird, wird keine weitere Information an das Fahrzeug übertragen. In diesem Fall handelt der/die Triebfahrzeugführer/in. Dies ist auch der Grund, weshalb signalgesteuerter Betrieb, i.d.R. mit einer PZB ausgestattet, nicht für die Anwendung von ATO tauglich ist. (Pachl 2016, S. 76–77)

Signalgesteuerter Betrieb dominiert jedoch im heutigen Eisenbahnbetrieb (Pachl 2016, S. 40). Allein in Deutschland ist signalgesteuerter Betrieb in mehr als 90% des Streckennetzes in Anwendung. Daher wäre es theoretisch sinnvoll, ATO Lösungen auch für den signalgesteuerten Betrieb zu entwickeln. Lösungsmöglichkeiten würde die Bildverarbeitung bieten, sodass Züge die Signale erkennen und verarbeiten können. Voraussetzung dafür wäre eine genaue, klare Signalanordnung. Die Tendenz bei Einführung von ATO geht jedoch in Richtung des anzeigesteuerten Betriebs. Ein weiterer Grund dafür ist die Kapazitätsbeschränkung aufgrund des „Blocksystems“, welche ausführlicher in Kapitel 5.1.2 behandelt wird. (Pachl 2017, S. 16)

4.2.2.2 Anzeigesteuerter Betrieb

Das Kennzeichen einer LZB ist die kontinuierliche Datenübertragung vom Fahrweg zum Fahrzeug, was die Führung des Triebfahrzeugs nach Vorgaben der LZB möglich macht. Anstelle von ortsfesten Signalen wird der Betrieb durch die Führerraumsignalisierung anhand einer analogen Anzeige gesteuert (Pachl 2016, S. 77). Beim anzeigesteuerten Betrieb wird in der Führerstandanzeige die Sollgeschwindigkeit angezeigt (Pachl 2017, S. 15). Diese Sollgeschwindigkeit wird aus einer Bremskurve berechnet, welche sich aus den übertragenen Informationen ergeben. Diese setzen sich aus der örtlich zulässigen Geschwindigkeit, der Zielentfernung bis zum nächsten Geschwindigkeitswechsel und der Zielgeschwindigkeit zusammen, vgl. Abbildung 12 (Pachl 2016, S. 83). Zur Ortung der Fahrzeuge können Funksysteme oder verlegte Kabelleiter dienen, die sich nach einem gewissen Abstand kreuzen. Dazwischen erfolgt die Wegmessung mit einem Odometer (Pachl 2016, S. 82). Die Zugfolgesicherung wird i.d.R. durch Gleisfreimeldeanlagen gewährleistet.

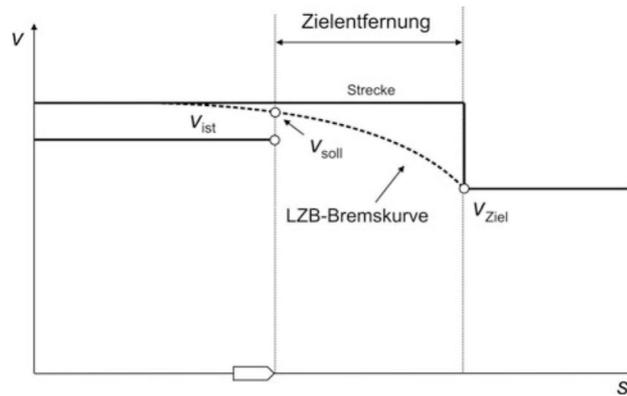


Abbildung 12: Sollgeschwindigkeit einer LZB anhand der Bremskurvenberechnung (Pachl 2016, S. 83)

Weshalb anzeigesteuerter Betrieb als Basis für ATO verstanden wird, begründet sich auf der sicheren Geschwindigkeitsregelung (anhand der Bremskurve berechnete Sollgeschwindigkeit) aufgrund der kontinuierlichen Übertagung und Überwachung. Folglich fehlen zur Umsetzung nur noch eine Fahrplanverknüpfung (hinsichtlich der Verkehrshalte) und eine Gefahrenraumüberwachung. (Pachl 2017, S. 15)

Der anzeigesteuerte Betrieb, auf Basis einer LZB, ist auch für einen höheren Automatisierungsgrad insofern Voraussetzung, da diese Betriebsweise es ermöglichen kann, die Züge in kürzeren Blockabschnitten verkehren zu lassen. Dadurch ist eine Annäherung an das Fahren im absoluten Bremswegabstand machbar. Der Abstand ließe sich aus der geschwindigkeitsabhängigen Bremslänge des zweiten Zuges berechnen, im Vergleich zum Fahren im festen Raumabstand, welcher durch die Blocklängen aufgrund der max. Bremslänge begrenzt ist. Anforderungen für ein sicheres Fahren im absoluten Bremswegabstand (auch „Moving Block“) sind die kontinuierliche Ortung der Züge sowie eine fahzuggestützte Überwachung der Zugvollständigkeit, damit unbemerkte Zugtrennungen ausgeschlossen werden können. Im Nahverkehr kommt diese Abstandsregelung bereits in der höchsten Automatisierungsstufe, dem vollautomatischen Betrieb, auch als CBTC bekannt, zur Anwendung. Auf der Vollbahn findet diese Abstandsregelung mangels derzeitiger, noch nicht exakt durchgehender Ortung des Fahrzeugs und mangelnder Bestimmung der Zugintegrität noch keine Anwendung. Im Falle einer LZB mit Kabellinienleiter können die Positionsinformationen nur an der Stelle der kreuzenden Kabelleiter entnommen werden, dazwischen findet keine exakte Positionsbestimmung statt. Bei funkbasierten LZB kommt die Abhängigkeit des Funksignals zum Tragen, wie z.B. in Tunnelbereichen. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die kontinuierliche Ortung durch die einzelnen Sensoren, des Rechners und der Datentransferrate begrenzt ist (Manz 2016). (Pachl 2016, S. 37–38)

4.2.2.3 ATO over ETCS

Aus dem zuvor Beschriebenen kann zusammengefasst gesagt werden, dass ATO allein stehend nicht sicher ist und eine kontinuierliche Zugbeeinflussung eine Mindestanforderung darstellt. Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, spielt auf europäischer Ebene im Hinblick auf einen harmonisierten europäischen Eisenbahnraum ein einheitliches Zugbeeinflussungssystem eine wichtige Rolle. Die Vision ist daher ein auf das Konzept ERMTS aufbauendes System, bekannt als ATO over ETCS. ERMTS besteht aus den folgenden Komponenten (Pachl 2016, S. 86):

- I dem Zugsicherungssystem ETCS, in drei Entwicklungsstufen und
- I der Sprach- und Datenkommunikation GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway), ein GSM-Standard basierendes Digitalfunksystem.

Bei ATO over ETCS bietet ETCS die Gewährleistung eines sicheren Betriebs, wobei auf freier Strecke mindestens ETCS Level 2 vorhanden sein muss (Randelhoff 2018). Dies beruht darauf, dass für die Betriebsführung mit ATO eine kontinuierliche Zugbeeinflussung erforderlich ist, was erst ab Level 2 zutrifft. Hier werden die Züge über eine kontinuierliche Zugbeeinflussung mittels Funk (GSM-R) geführt. (Pachl 2016, S. 86–89)

ETCS Level 1 entspricht einem punktuellen Zugbeeinflussungssystem und ist in zwei Ausführungen im Einsatz. Die vom Stellwerk generierten Daten werden über eine LEU (Line-side Electronic Unit) an die im Gleis verlegten Eurobalisen übermittelt und an das Fahrzeug übertragen. Die Übertragung kann auch durch Euroloops zwischen Vor- und Hauptsignal Balisen zur zeitweise kontinuierlichen Übertragung über mehrere hundert Meter aufgewertet werden, wodurch auch eine Fahrerlaubnis ohne ortsfeste Signale möglich ist. In ETCS Level 1 Limited Supervision folgt der/die Fahrer/in ortsfesten Signalen. Das ETCS dient daher nur der Bremsüberwachung; die Führung der Züge erfolgt signalgesteuert basierend auf den Stellwerksinformationen. Zugfolgesicherung erfolgt konventionell über Gleisfreimeldeanlagen. (Pachl 2016, S. 86–87).

ETCS Level 3 funktioniert wie Level 2 ebenfalls funkbasiert, wobei auch die Zugfolgesicherung über Funk erfolgt, wodurch ein Fahren im beweglichen Raumabstand möglich wäre. Das System ist derzeit noch nicht ausgereift. (Fendrich 2007, S. 657–659)

4.2.3 Effiziente Betriebsführung(-strategie)

Neben der Sicherungstechnik ist auch eine effiziente Betriebsführung im Eisenbahnverkehr von Bedeutung (Weidmann et al. 2014). Effizient einerseits im Hinblick den Energieverbrauch und andererseits hinsichtlich des Traffic Managements, welches die Optimierung des Verkehrsflusses bezeichnet. Die Optimierung kann auf unterschiedlichen Ebenen

Anforderungen aufgrund von ATO

erfolgen: von der Optimierung eines einzelnen Zuges zwischen zwei Haltepunkten, über die Optimierung eines Zuges auf seiner gewöhnlichen Trasse bis hin zu einer netzweiten Optimierung (Marinov 2018, S. 8–9).

Grundlage des Traffic Management bildet die Fahrplanerstellung. Der tägliche Eisenbahnverkehr läuft aber nicht ausschließlich fahrplanmäßig ab. Verspätungen, Zugausfälle oder Gleissperren wegen Bauarbeiten beeinflussen den fahrplanmäßigen Zugverkehr. Solche Störungen sind nicht vermeidbar. Um dennoch einen pünktlichen Betrieb zu gewährleisten, ist es wichtig, negative Auswirkungen oder Konflikte frühzeitig zu erkennen. Es gilt diese minimal zu halten und Lösungen zu finden, die in den Betriebsablauf implementiert werden können, sodass dieser optimiert werden kann. (Marinov 2018, S. 10–11; Ostermann et al. 2005, S. 127)

In der Literatur wird die Optimierung im Bereich der Automatisierung durch sogenannte „loops“ (zu Deutsch Regelkreise) zwischen Infrastruktur und Fahrzeug beschrieben. Der „inner loop“ bezieht sich auf das Fahrzeug, während der äußere Regelkreis die Infrastruktur betrachtet. (Ciami, S. 9; Goverde 2017; Rao 2017)

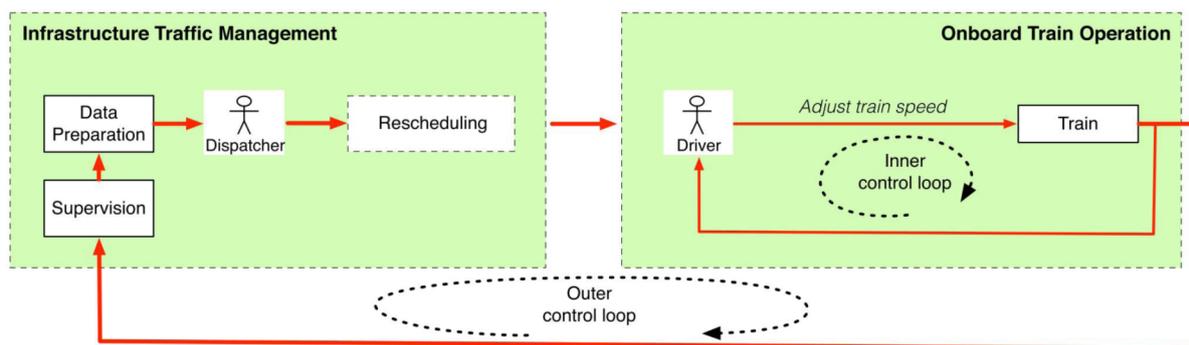


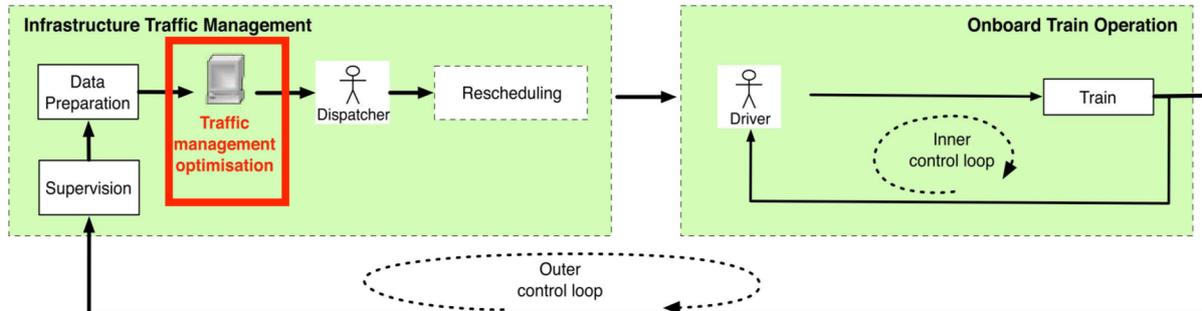
Abbildung 13: Regelkreise des Eisenbahnsystems (Rao 2017)

Fahrzeugseitige Optimierungslösungen sind DAS (Driver Advisory Systems) der GoA1. Hier bekommt der/die Triebfahrzeugführer/in den fahrplanmäßigen Verlauf angezeigt. Die Fahrzeugposition wird durch GPS (Genauigkeit: 3-5 m) abgegriffen und mit dem fahrplanmäßigen Verlauf abgeglichen. Für den Fall einer verfrühten Ankunft wird dem/der Fahrer/in eine niedrigere Geschwindigkeit vorgeschlagen, um eine möglichst energieeffiziente Fahrweise zu gewährleisten. Bei einer Verspätung wird eine höhere Geschwindigkeitserhöhung empfohlen (im Rahmen der zulässigen Geschwindigkeit), um den Fahrplan bestmöglich einzuhalten. Durch die genaue Vorgabe eines Geschwindigkeitsprofils kann auch eine Optimierung der Fahrperformance durch ein ATO System (GoA2 und höher) erfolgen. Der Nachteil dieser Varianten ist jedoch, dass damit keine direkte Verbesserung für das gesamte Netz erfolgt. Dies kann durch die Verknüpfung mit einem Traffic Ma-

Anforderungen aufgrund von ATO

nagement System (TMS) erzielt werden, welches die Zugbewegungen analysiert und reguliert. Eine schematische Darstellung der beiden Prinzipien zeigen Abbildung 14 und Abbildung 15. (Kessell 2017; N.N. 2016b; Rao 2017)

Strength: rail network-wide optimisation



Weakness: no direct improvement in train driving performance

Abbildung 14: Äußerer Regelkreis: Netzoptimierung (Rao 2017)

Strength: improve local train driving performance

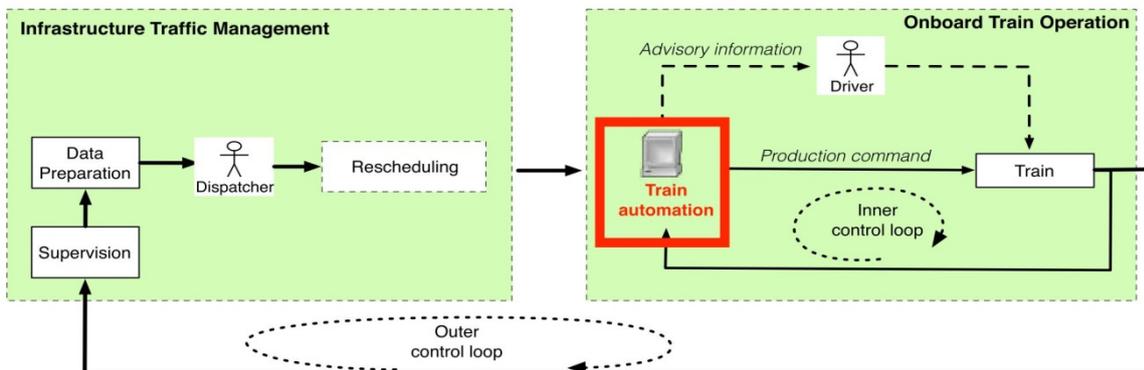


Abbildung 15: Innerer Regelkreis: Optimierung der Fahrperformance (Rao 2017)

Die Steuerung und Überwachung der Zugfahrten erfolgt i.d.R. durch zentralisierte Betriebsführung (Betriebszentralen), wo Stellwerksbefehle automatisiert über große Distanzen übermittelt werden (Weidmann et al. 2014, S. 606). In den Betriebszentralen werden Disponenten/innen durch Dispositionssysteme und Planungstools unterstützt. Einzelne rechnergestützte Dispositionssysteme sind in der Lage durch Simulation Konflikte zu erkennen und dem/der Disponent/in Lösungsvorschläge zu geben. Der/die Disponent/in kann dann manuell Fahrbefehle erteilen bzw. automatisiert die Züge auf andere Routen lenken und so zur Optimierung des Verkehrsablaufes beitragen. Diesen Optimierungsverfahren sind Grenzen gesetzt (Weidmann et al. 2014, S. 609). Eine Echt-Zeit angepasste

Disposition kann hierfür Abhilfe schaffen, wobei sie für ein großes Netz bis dato nur theoretisch möglich ist (vgl. dynamische Kapazitätsoptimierung in Kapitel 5.1.1). Eine Herausforderung und Vision von ATO verknüpft mit TMS ist es, dass auch bei der Disposition keine menschliche Entscheidung mehr mitspielen soll (Schöbel 2017). (Pachl 2016, S. 236)

Ein erster Schritt Richtung Netzoptimierung wäre die Verwendung von C-DAS (Connected Driver Advisory System). Diese würde das fahrzeugseitige DAS (aus GoA1) mit dem TMS verknüpfen und so die Fahrzeugbewegung anderer mitberücksichtigen, wobei dies aufgrund technischer Hürden (besonders hinsichtlich der Datenübertragung) noch nicht ausgereift ist (N.N. 2016b). Damit durch Einführung von ATO (auch in höheren Automatisierungsstufen) eine effiziente Betriebsführung auf höchster Ebene erreicht werden kann, ist eine Verkopplung zwischen ATO und einem Traffic Management System notwendig. Dadurch könnte der Zug ein energieeffizientes, an den Fahrplan und an das Netz angepasstes Fahrprofil aufweisen. An der optimalen Nutzung hinsichtlich Kapazität und Energieeffizienz durch Verbindung der beiden Regelkreise wird derzeit noch geforscht, wie z.B. am Integrated Optimisation Model von Rao, siehe Abbildung 16. Jedenfalls erfordert dies neben komplexen Algorithmen, hohe Rechnerleistungen (Datenübertragung) und robuste Mobilfunknetze. (Kessell 2017; Rao 2017)

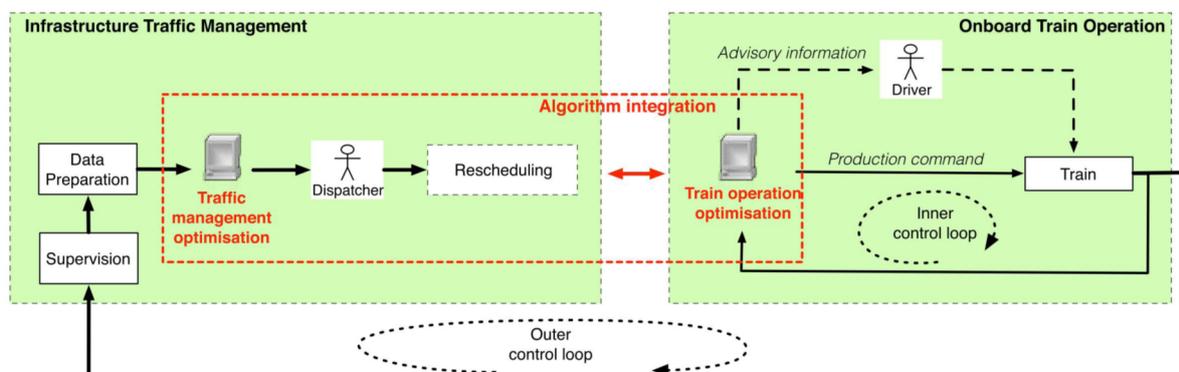


Abbildung 16: Integrated Optimisation Model (Rao 2017)

Die (gemeinsame) Betrachtung der Regelkreise ist aber auch von der Betriebsstrategie abhängig:

- I Welche Ziele sollen mit ATO erreicht werden?
- I Soll nur ein Zug oder das ganze Netz optimiert werden?
- I Welche Ziele sollen primär verfolgt werden? Soll ein bestimmtes Ziel priorisiert werden?
- I Ist die Implementierung tages- bzw. tageszeitabhängig?

Je nachdem welche Betriebsstrategie verfolgt wird und daher nur ein Regelkreis betrachtet wird oder eine Verknüpfung stattfinden muss, werden auch unterschiedliche technische Anforderungen an das System gestellt (reine DAS Implementierung oder sogar Verknüpfung mit einem TMS). (Schöbel 2017)

4.2.4 Migrationsstrategie

Aus betrieblicher Sicht muss neben einer Betriebsstrategie auch eine Migrationsstrategie, abhängig von den technischen und betrieblichen Gegebenheiten, verfolgt werden. (Knollmann 2017; Rao 2017)

Migrationskonzepte könnten sein (Knollmann 2017):

I Überlagerung/Weiterentwicklung:

Es werden Strecken und Fahrzeuge betrachtet, die bereits einen gewissen Standard in der Signaltechnik erfüllen. Diese Systeme werden mit DAS und in weiterer Folge mit TMS, welches von einer Leitzentrale aus kontrolliert wird, überlagert. Es erfolgt eine kontinuierliche Erhöhung des Automatisierungsgrades.

I Diskontinuierlich:

Segmentweise Implementierung von ATO, d.h. es wird dort begonnen, wo die Einführung von ATO einfach ist. Dort kann ein fahrerloser Betrieb zum Einsatz kommen, während in anderen Bereichen (z.B. im Haltestellenbereich) der/die Triebfahrzeugführer/in die Lenkung übernimmt.

I Reduktion:

Die Anlage wird auf das reduziert, was tatsächlich gebraucht wird und folglich mit dem „neuen System“ ausgestattet.

4.2.5 Rangieren

Neben der Zugfahrt ist ein weiterer betrieblicher Prozess des Eisenbahnverkehrs zu erwähnen: das Rangieren, da unabhängig vom Automatisierungsgrad Verschubfahrten stattfinden werden (Pachl 2017, S. 19). Viele Abläufe im Verschub sind heutzutage schon automatisiert. Um eine Vollautomatisierung zu erzielen, müssen die Prozesse, welche derzeit noch Personal erfordern, ersetzt werden. Zum besseren Verständnis wird daher kurz auf den Verschub eingegangen.

Im Personenverkehr beschränkt sich das Rangieren weitgehend *„auf das Bereitstellen und Abräumen der Zügeinheiten am Beginn und Ende des Zuglaufs, den Wechsel von Triebfahrzeugen und das Umsetzen von Fahrzeugen in den Nebengleisanlagen der Betriebswerke.“* (Pachl 2016, S. 245)

Rangierbewegungen im Güterverkehr sind je nach Betriebsart unterschiedlich. Die Betriebsarten lassen sich unterteilen in:

- I Direktverkehr (Ganzzugverkehr oder Blockzüge) oder
- I Einzelwagenverkehr.

Direktverkehr wird dadurch definiert, dass die Zuggestalt zwischen Quell- und Zielpunkt nicht verändert wird. Dies entspricht einem sogenannten Punkt-zu-Punkt Verkehr. Eine Sonderform von Ganzzugverkehr findet sich beim Transport von Rohstoffen (z.B. Heavy-Haul-Transporte). Besonders der Minenverkehr ist geprägt durch einfache betriebliche Verhältnisse. Die bis zu sieben Kilometer langen Züge verkehren meist in abgelegenen Gebieten und fahren beladen zum nächsten Versandbahnhof/Hafen und kommen leer wieder zurück. Ähnlich wie beim Personenverkehr finden Rangierbewegungen beim Ganzzugverkehr i.d.R. nur beim Be- und Entladen statt. Diese Be- und Entladevorgänge werden in Anschlussbahnen, auf Umschlagbahnhöfen oder beim Triebfahrzeugwechsel verrichtet. Dies macht den Ganzzugsverkehr, auch auf Mischverkehrsnetzen wesentlich wirtschaftlicher als den Einzelwagenverkehr. Der Einzelwagenverkehr ist geprägt durch einzelne Wägen, welche durch mehrfachen Übergang auf andere Züge durch das Netz geleitet werden (Pachl 2016, S. 245). Beim Einzelwagenverkehr werden daher durch Sammlung, Umstellung und Verteilung der Wägen in sogenannten Verschiebe- oder Rangierbahnhöfen neue Züge gebildet. In Europa macht der Einzelwagenverkehr mit Rangiersystem um die 35% aus (Dannehl 2008, S. 60). (Marschnig 2018; Veit und Walter 2012b) Die Zugbildung kann durch folgende Verfahren erfolgen (Pachl 2016, S. 245–246):

- I Umsetzverfahren:
Ein einzelner Güterwagen ist an ein Triebfahrzeug gekuppelt und die Rangierfahrt wird so für jede Fahrzeugbewegung vorgenommen.
- I Abstoßverfahren:
Wägen werden durch ein schiebendes Triebfahrzeug beschleunigt und durch die Umstellung von Weichen in die gewünschten Zielgleise geführt. Aufgehalten werden die Wägen durch automatische Bremssysteme oder in Altanalgen von manuell angebrachten Hemmschuhen, welche hohe Sicherheitsrisiken mit sich bringen (Pachl 2016, S. 257).
- I Ablaufverfahren:
Wägen laufen Abrollberge hinunter und werden durch automatisches Umstellen der Weichen in die Gleisziele gebracht.

Erfolgt die Bremsung der Güterwägen automatisch, müssen Mitarbeiter heutzutage nur noch das Kuppeln übernehmen. Ein Wagenmeister ist für die Bremsüberprüfung verantwortlich. Mit modernen Rangierlokomotiven kann die Zugbildung auch schon fahrerlos,

mittels Fernfunkübertragung eines/r Lokrangierführer/in erfolgen. Eine vollautomatische Steuerung gibt es derzeit noch nicht. Dies wäre besonders bei „Überführungsfahrten von Wagengruppen innerhalb ausgedehnter Nebengleisbereiche“ in Anschluss oder Nebengleisen sowie direkt im Bahnsteigbereich für Abräum- und Bereitstellungsfahrten interessant (Pachl 2017, S. 19). Damit der Verschubbetrieb gänzlich automatisch erfolgen kann, sind Kuppelvorgang und Bremsprobe zu automatisieren (vgl. Kapitel 4.3.3). (Müller-Hildebrand 2017)

Das Ablaufverfahren ist das leistungsfähigste, wobei es in Österreich nur zwei solcher vollautomatisierter Abrollberge gibt (Wien-Kledering und Villach-Süd) (Veit und Walter 2012b, 2012b, S. 33). Anlagen mit Umsetz- und Abstoßverfahren haben den Nachteil des hohen Personalbedarfs, tragen eine erhöhte Unfallgefahr mit sich und sind durch harte Arbeitsbedingungen geprägt. Weitere Automatisierung hätte daher sicherheits- und kostentechnische Vorteile, vgl. Kapitel 5.3 und 5.5. (Pachl 2016, S. 246)

Ein wesentlicher betrieblicher Unterschied zu Zugfahrten sei an dieser Stelle angemerkt. Bei Rangierfahrten ist keine technische Fahrwegsicherung nötig, da hier nach dem Prinzip „Fahren auf Sicht“ verkehrt wird (Fendrich 2007, S. 577). Verkehren die Züge nach abgeschlossenem Rangiervorgang wieder im Netz sind die bisher beschriebenen betrieblichen Anforderungen an ATO hinsichtlich einer sichereren Zugfahrt einzuhalten. Diese betrifft den Güter- sowie auch den Personenverkehr. (Nießen et al. 2017, S. 36)

4.2.6 Rückfallebenen

Aus betrieblicher Sicht ist es hinsichtlich der Einführung von ATO notwendig, Rückfallebenen, sprich Lösungen für Störfälle, zu entwickeln. Es ist notwendig, Möglichkeiten für jene Fälle zu entwickeln, wo das System oder Teilprozesse nicht funktionsfähig sind bzw. ausfallen. Hinsichtlich ATO sind das jene Ebenen, wo normalerweise der/die Triebfahrzeugführer/in mitwirkt. Theoretische Lösungen beim Ausfall bestimmter Bereiche sind teils bereits vorhanden, wobei es zumeist noch an der Umsetzung fehlt. Aus den Lösungsansätzen zeigt sich, dass adäquate Rückfallebenen noch eine große Herausforderung darstellen werden (Schöbel 2017). (Pachl 2017, S. 18)

Tabelle 2 zeigt einige betroffene Ebenen und stellt diesen Lösungsvorschläge gegenüber.

Tabelle 2: Rückfallebenen angelehnt an (Pachl 2017, S. 18; Treydel 2016, S. 32–34)

Rückfallebene	Lösungsvorschlag
Beauftragung des/der Triebfahrzeugführer/in zum „Fahren auf Sicht“	Bis GoA3: Automatisches „Fahren auf Sicht“ mit Überwachung durch Zugpersonal Bis GoA4: vollautomatisches „Fahren auf Sicht“ oder ferngesteuertes „Fahren auf Sicht“ mit Kamerabild
Zugpersonal muss Sicherungshandlungen am Fahrweg übernehmen, wie z.B. ersatzweise Sicherung eines Bahnübergangs	Bis GoA3: Behebung durch Zugpersonal GoA4: neue Informationskanäle, Steuerung aus der Betriebszentrale, voll/automatisches „Fahren auf Sicht“
Weiterfahrt nach einer Zwangsbremung	Aufhebung durch den/die Fahrdienstleiter/in zu veranlassen
Bestätigung der Zugvollständigkeit dem/der Fahrdienstleiter/in durch Zugpersonal	Bis GoA3: Bestätigung durch Zugpersonal GoA4: ohne Zugpersonal kann die Zugvollständigkeit derzeit nicht überprüft werden
Ausfall des ATO Systems	Bis GoA2: manuelle Übernahme Ab GoA3: Lösung für ein sicheres Erreichen bis zum nächstmöglichen Haltepunkt bzw. Räumung
Erkennen und Managen von Notsituationen an Bord	GoA4: Lösungen hierfür sind notwendig

Zu Zwangsbremungen sei angemerkt, dass diese meist die Auswirkung einer fehlerhaften, unterlassenen oder nicht zeitgerechten Handlung des/der Triebfahrzeugführer/in ist. Ab GoA2 sollten Zwangsbremungen daher zum größten Teil wegfallen. (Pachl 2017, S. 18)

4.3 Technische Anforderungen

Abhängig von der Automatisierungsstufe sind unterschiedliche Änderungen oder Erweiterungen auf der Strecke und am Fahrzeug vorzunehmen (Gralla 2016a, S. 11–13). Die Migration von einem reinen Zugbeeinflussungssystem (GoA1) auf Zugbeeinflussungssystem plus ATO System hat infrastruktur- sowie auch fahrzeugseitige Auswirkungen. Dadurch ist auch die Zusammenarbeit von EVUs und EIU gefordert (Costa und Villalba, S. 4). Aus den betrieblichen Anforderungen und europäischen Zielen geht hervor, dass ETCS Level 2 als Voraussetzung für ATO (ab GoA2) zu sehen ist. In weiterer Folge werden daher die technischen Anforderungen für den Einsatz von ATO aufbauend auf ETCS Level 2 beschrieben. Auf etwaige Ergänzungen oder andere technische Anforderungen für Sonderfälle, wie Nebenbahnen oder Vershub, wird gesondert eingegangen.

Nachdem ein kompletter Umstieg auf ETCS Level 2 bzw. auch die sofortige Aufrüstung aller Fahrzeuge auf höheren Automatisierungsgrad unrealistisch ist, sind hier einige Anforderungsprinzipien aus europäischer Sicht angeführt (Communauté européenne du rail (CER) 2016, S. 5):

- I ATO Einsatz unter Anwendung von anderen Sicherungssystemen als ERTMS soll einen späteren Einsatz von ERTMS ermöglichen
- I Möglichkeit auf einer ATO Strecke auch ohne fahrzeugseitigem ATO System verkehren zu können
- I Möglichkeit auf einer nicht ATO Strecke (d.h. GoA1) einen Zug mit GoA2 Ausrüstung fahren zu lassen (gilt nicht für GoA3 und 4), Anm.: GoA2 Stufe wird i.d.F. nicht ausgeführt
- I ATO Ausstattung (hinsichtlich fahrzeugseitiger- und streckenseitiger Ausstattung) unterschiedlicher Hersteller soll kompatibel sein, auch als FFFIS (Form Fit Functional Interface Specification) bekannt

4.3.1 ATO over ETCS (Level 2)

Wie bereits bei den betrieblichen Anforderungen kurz angesprochen, ist Level 2 ein kontinuierliches Zugbeeinflussungssystem, welches die Züge mittels Funk (GSM-R) führt. Gesteuert wird durch ein zentrales, streckenseitiges Radio Block Center (RBC), welches mit Schnittstellen mit dem Stellwerk verbunden ist. Die Zugfolgesicherung erfolgt konventionell über Gleisfreimeldung (GMF), wie Achszähler oder Gleisstromkreise. Die Ortung erfolgt zum einen über das Odometer, welches durch die Radumdrehung eine Wegemessung vornimmt. Zum Einsatz können auch Geräte wie Radimpulsgeber oder Doppellerradar kommen. Zum anderen wird über nicht schaltbare Balisen an absoluten Ortspunkten die Position bestimmt. Solche Festdatenbalisen enthalten auch Informationen

Anforderungen aufgrund von ATO

über die Strecke, wie Trassierung, Steigung oder erlaubte Geschwindigkeit. Die Übertragung erfolgt mittels Balisenantennen an das ETCS Fahrzeuggerät. Dort werden im sog. European Vital Computer (EVC) die Datensätze aus der Festdatenbalise und Wegemesung gespeichert und ein dynamisches Geschwindigkeitsprofil (Bremskurve) berechnet. Der EVC gibt die ermittelte exakte Fahrzeugposition, Fahrtrichtung und Geschwindigkeit und gibt sie an das RBC weiter. Mit den gesammelten Informationen über die Strecke und Belegung der Blockabschnitte erzeugt das RBC eine Fahrerlaubnis, die an das ETCS im Fahrzeug mittels Funk gesendet wird. Die technischen Komponenten von ETCS Level 2 sind nachfolgend abgebildet. (Pachl 2016, S. 87; Pluta 2017, S. 2)

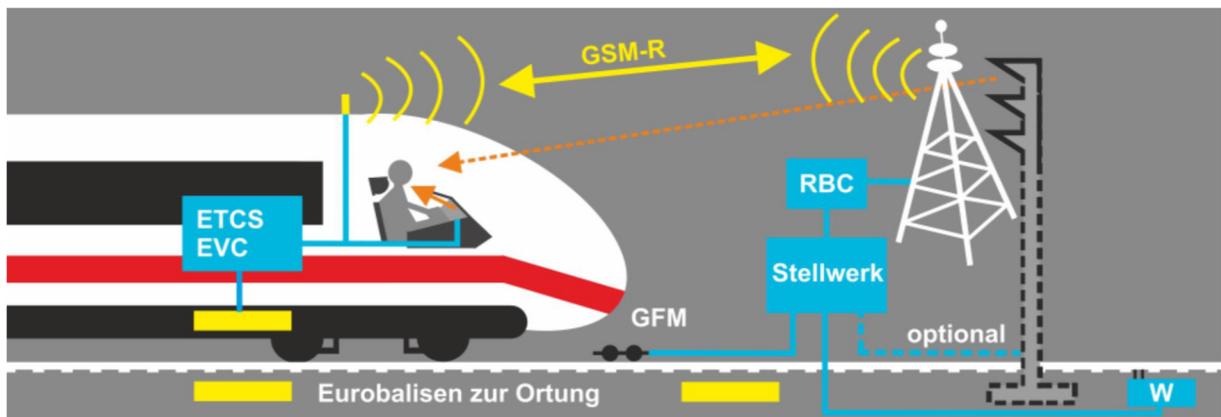


Abbildung 17: ETCS Level 2 (Trinckauf 2010)

Eine Überlagerung des Sicherungssystem ETCS Level 2 mit ATO ergibt folgendes funktionelles Konzept:

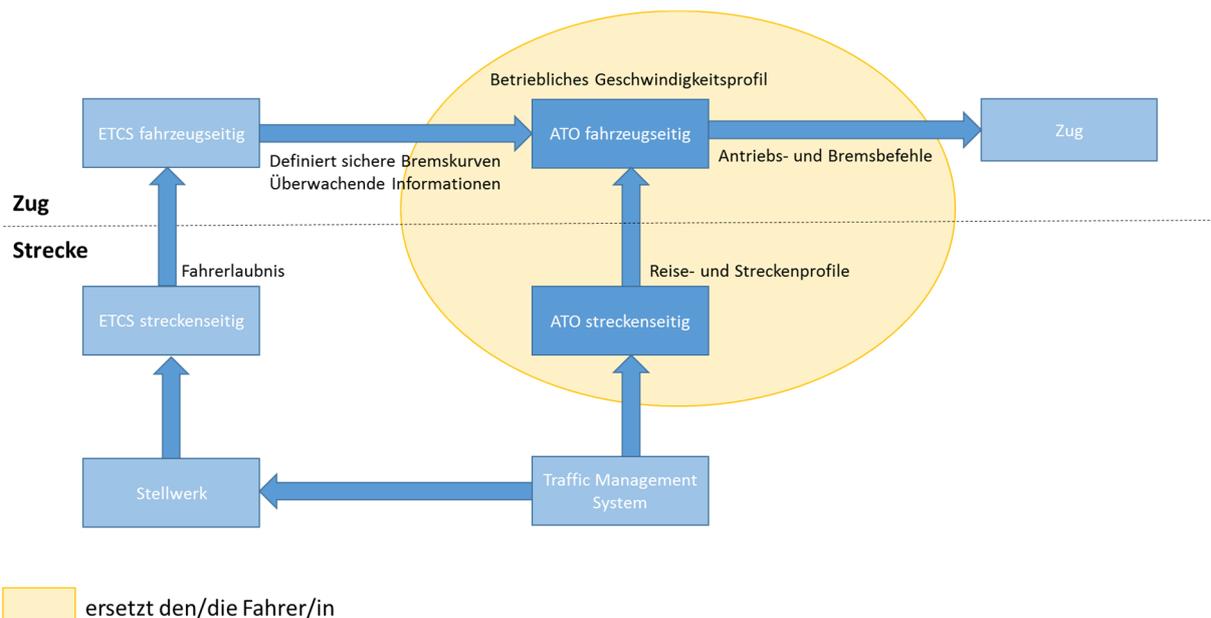


Abbildung 18: Funktionelles Konzept ATO over ETCS angelehnt an (Gralla 2016b, S. 6–8; Treydel 2017)

Das fahrzeugseitige ETCS überwacht das fahrzeugseitige ATO und übernimmt die oben beschriebenen Aufgaben. Die Fahrerlaubnis bekommt es vom streckenseitigen ETCS mittels Funk. Basierend auf der Sollgeschwindigkeit kann das fahrzeugseitige ATO System die Antriebs- und Bremssteuerung übernehmen und je nach Automatisierungsgrad auch das Halten (Gralla 2016b, S. 6–8). Das ATO System gewährleistet daher eine optimale Zugbewegung. Das streckenseitige ATO System ist mit einem Traffic Management System verknüpft. Dieser streckenseitige „ATO Server“ überträgt dem ATO System im Fahrzeug mittels Funk ein Reise- und Streckenprofil. Ersteres enthält Echt-Zeit Fahrplandaten und zweiteres verfügt über Echt-Zeit Infrastrukturinformationen (Bienfait 2014). Auf Basis des Reise- und Streckenprofils und den Informationen aus dem fahrzeugseitigen ETCS lässt sich ein optimiertes Geschwindigkeitsprofil (vgl. Abbildung 19) vom ATO im Fahrzeug berechnen. Dies ist besonders zu Steigerung der Kapazität notwendig (vgl. Kapitel 5.1.1). An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Übertragung vom streckenseitigen ATO an die On-Board Einheit derzeit nur von der Strecke zum Fahrzeug funktioniert. Sinnvoll wäre eine dynamische Übertragung der ATO On-Board Informationen an die Strecke zur Neuberechnung. (Gralla 2016a, S. 11–13; Treydel 2017; Trinckauf 2010)

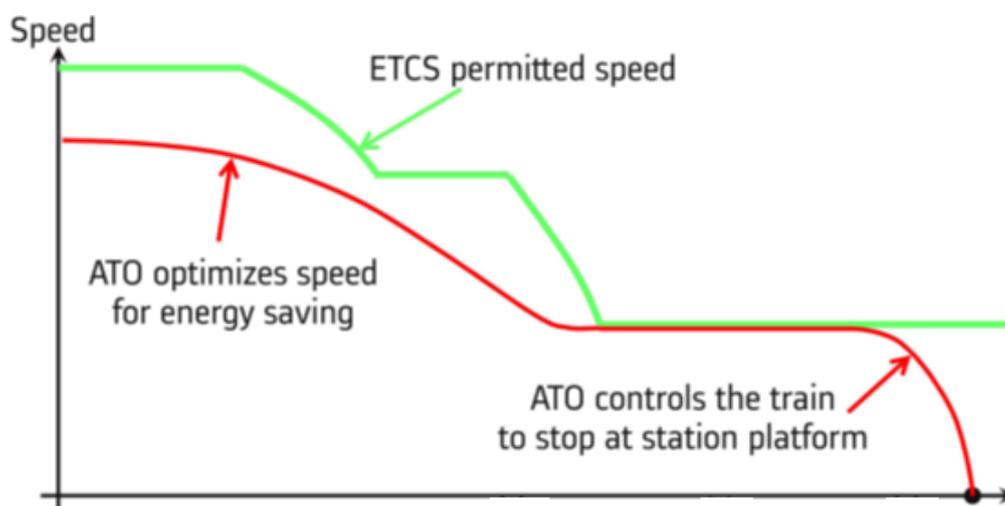


Abbildung 19: Optimiertes Geschwindigkeitsprofil durch ATO Steuerung verknüpft mit einem TMS bei ATO over ETCS (Barnard et al. 2012a, S. 15)

Wie das funktionale Konzept zeigt, sind fahrzeug- oder streckenseitig Änderungen bzw. Erweiterungen notwendig - jedoch abhängig von der Automatisierungsstufe. Bis GoA2 sind nur Erweiterungen im Fahrzeug vorzunehmen, da ETCS Level 2 fahrwegseitig über ausreichend Informationen verfügt. Notwendige Infrastrukturdaten werden, wenn nötig, im EVC gespeichert. Für GoA3 im Personenverkehr und GoA4 auch im Güterverkehr wird zusätzlich ein streckenseitiger ATO Server, welcher an ein TMS geknüpft ist, benötigt. (Gralla 2016a, S. 11–13)

Neben der Ergänzung durch strecken- und fahrzeugseitige ATO Systeme sind auch eine Hinderniserkennung und eine Gefahrenraumsicherung zu berücksichtigen. Solange ein/e Triebfahrzeugführer/in im Führerstand sitzt, können gewisse Kontrollaufgaben übernommen werden. Heutzutage können so beispielsweise passierende Züge überwacht werden, herabfallende Gegenstände können dem/der Triebfahrzeugführer/in gemeldet werden oder der/die Fahrer/in kann per Funk über Hindernisse auf der Strecke rechtzeitig gewarnt werden. Um Gegenstände im Gleis wie Lawinen, Erdbeben oder Steinschlag festzustellen, gibt es heutzutage zudem Lösungen wie elektrische Zäune entlang des Fahrwegs oder Radarscans im Bereich von Bahnübergängen. Elektrische Zäune sind an Zugsicherungssystem gekoppelt und leiten beispielsweise bei Eintritt eines Steinschlags eine Zwangsbremmung ein. Danach wird auf „Fahren auf Sicht“ (30-40 km/h) umgestellt, sodass durch rechtzeitiges Sehen/Erkennen vor dem Hindernis gebremst werden kann. Andere Fälle, wo „Fahren auf Sicht“ der Betriebsgeschwindigkeit entspricht sind z.B. bei gestörten Bahnübergängen oder bei Bauarbeiten. Hinzu kommt, dass „Fahren auf Sicht“, aufgrund der zentralen Betriebssteuerung, oftmals die einzige Möglichkeit ist, das Freisein eines Gleisabschnittes festzustellen (Pachl 2017, S. 18). (Emery 2017, S. 12-13; Pachl 2017, S. 17)

Die beschriebenen visuellen (Überprüfungs-)Aufgaben des/der Lokführers/in müssen beim automatisierten Betrieb ab GoA3 durch entsprechende Technik gelöst werden. Eine Aufrüstung fahrweg- und fahrzeugseitig zur Gefahrenfreimeldung/-sicherung sowie Hinderniserkennung ist bei der Einführung von ATO deshalb zu berücksichtigen und wird in weiterer Folge detailliert behandelt.

4.3.2 Fahrweg

Die grundlegende fahrwegseitige Ausrüstung bei ETCS Level 2 setzt sich aus dem Stellwerk, dem RBC und den fahrwegseitigen Bestandteilen der Zugsicherung wie Gleisfreimeldeanlagen sowie den Festdatenbalisen zur Ortung zusammen. Eine zusätzliche fahrwegseitige Voraussetzung ist eine flächendeckende Mobilfunkausrüstung (Pluta 2017, S. 3). GSM-R ist ein, auf das GSM aufbauendes, Mobilfunksystem, welches für die Bahn entwickelt wurde und vor allem der Zugsicherung (ETCS Level 2) dient (Fendrich 2007, S. 478).

Wie bereits mehrmals erwähnt ist der Personen- und Güterverkehr mit der Thematik der Interoperabilität gefordert und auch die Umsetzung von ETCS erfolgt langsam. Im untergeordneten Verkehr mit geringer Verkehrsbelastung, wie beispielsweise im regionalen Netz, sollen durch Automatisierung die betrieblichen Kosten gesenkt werden (Pelz 2016, S. 5). Für kleine Regionalstrecken ist jedoch die Investition in Zugbeeinflussungsanlagen wie z.B. ETCS nicht tragbar (Stadlmann, S. 195). Die Streckenausrüstung bei Nebenbah-

nen könnte daher durch andere Ortungssysteme mit Hilfe von Satelliten ersetzt werden (Trinckauf 2017, S. 9). GNSS (Global Navigation Satellite System) stellen eine billigere Alternative dar, weil auf streckenseitige Komponenten verzichtet werden kann. Es gibt unterschiedliche Systeme wie beispielsweise das von den USA entwickelte GPS (Global Positioning System) mit einer Genauigkeit von etwa 2,5 m mit dem europäischen Äquivalent EGNOS (European Geostationary Navigation). Das sich derzeit im Entwicklungsstadium befindliche GNSS Galileo mit 30 Satelliten erreicht eine Genauigkeit von 45 cm. Das GNSS muss sicherstellen, dass die genaue und verlässliche Übertragung der Position gewährleistet wird, woran es in der Praxis teils noch scheitert. Für Signalausfälle in Tunnelbereichen muss beispielsweise noch eine Lösung gefunden werden. (Marinov 2018, S. 84–85)

Hinsichtlich der Stellwerkstechnik sei folgendes angemerkt: Auch wenn heutzutage i.d.R. elektronische Stellwerke zum Einsatz kommen, gibt es ältere Stellwerksgenerationen, die sich nicht fernsteuern lassen. Diese technische Anforderung ist hinsichtlich der automatischen Fahrplannerstellung wesentlich (vgl. Kapitel 5.1.1). (Weidmann et al. 2014, S. 608)

Für die Hinderniserkennung und Gefahrenraumsicherung ist es notwendig den Fahrweg nicht als Gesamtes zu betrachten, sondern eine Aufteilung in freie Strecke und Bahnhofsbereich vorzunehmen. Gemäß § 4 Abs. 2 (2) Eisenbahnverordnung sind Bahnhöfe *„Betriebsanlagen mit mindestens einer Weiche, wo Zugfahrten beginnen, enden, ausweichen oder wenden dürfen. Als Grenze zwischen den Bahnhöfen und der freien Strecke gelten im Allgemeinen die Einfahrsignale oder Trapeztafeln, sonst die Einfahrweichen“*. Anschaulich zeigt dies Abbildung 20. Für beide Bereiche gilt es den Gefahrenraum, besonders ab GoA3 entsprechend zu sichern (Kessell 2017).

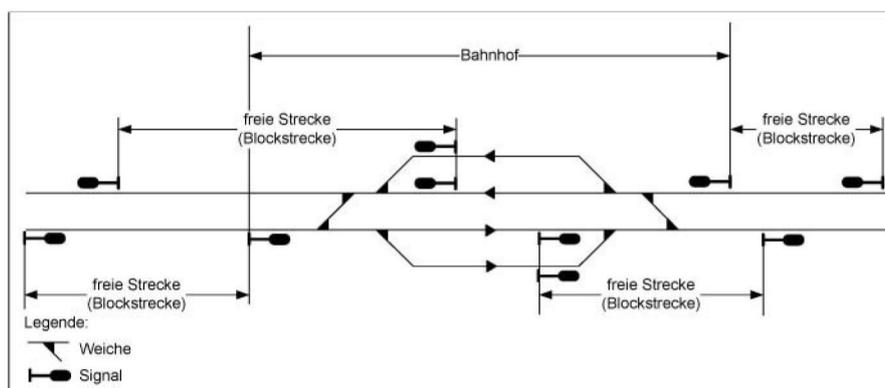


Abbildung 20: Begriffe Bahnhof und freie Strecke (Schnieder und Becker 2007, S. 272)

4.3.2.1 Freie Strecke

Das Gefahrenpotential auf der freien Strecke, speziell im Personenfernverkehr, liegt einerseits in Bahnübergängen und andererseits bei Bahnsteigen von Durchfahrbahnhöfen (Nießen et al. 2017, S. 36). Unfalltote an Bahnübergängen in Europa machen zwischen 50-80% aller Todesopfer des Schienenverkehrs aus (Schnieder und Becker 2007, S. 331). Bahnübergänge können signal- oder zuggesteuert überwacht sein (Fendrich 2007, 361). Bei signalgesteuerten Anlagen kann die Gefahrenraumfreimeldung mit Hilfe von Kamerabildern oder auch über Radarscan erfolgen (Fendrich 2007, S. 362).



Abbildung 21: Überwachung mittels Radarscan oder Kamera (Saner 2014)

Der heutige Stand der Technik bietet für die Hinderniserkennung und Gefahrenraumsicherung auf freier Strecke folgende technische Lösungen:

1 Laser, Radar oder Infrarotkameras (im Drohnenmodus)

Radar, Laser oder Infrarotkameras gekoppelt an ein Bildverarbeitungsprogramm dienen zur Erkennung von Formen oder beweglichen Gegenständen (Emery 2017, S. 12–13). Mit Hilfe von Radar, Laser oder Infrarot kann eine Lichtschranke gebildet werden, die in regelmäßigen Abständen eine Fläche abtastet. Bei signalgesicherten Bahnübergängen wird der Gefahrenraum in ca. 1 m Höhe gescannt. Die reflektierenden Strahlen erzeugen ein Bild, welches mit einem gespeicherten Bild, das den freien Zustand abbildet, abgeglichen wird. Bei negativer Übereinstimmung gilt der Bahnübergang als nicht frei. (Fendrich 2007, S. 615)

Überwachung durch Drohnen, die mit Infrarotsensoren ausgestattet sind, stellt eine weitere Möglichkeit zur Überwachung dar. Derzeit finden solche Drohnen zur Heißläufererkennung bei dem niederländischen EIU ProRail Anwendung. Die Deutsche Bahn setzt Micro-Infrarot-Drohnen bei Verschanlagen ein, um Vandalismus vorzubeugen. Diese kreisen in einer Höhe von 150 Meter über den Anlagen. (Goulding und Morrell 2014, S. 45)

I Einsatz von Videoüberwachung (im Drohnenmodus)

Eine fahrwegseitige Lösung für die visuelle Überprüfung im Modus „Fahren auf Sicht“ könnte auch durch ferngesteuertes „Fahren auf Sicht“ mit Auswertung von Kamerabildern im Drohnenmodus erfolgen. Eine Person in einer Betriebsleitzentrale würde über mehrere Bildschirme die visuelle Überprüfung ersetzen und im Störfall würde manuell gesteuert werden. (Fendrich 2007, S. 615; Pachl 2017, S. 18)

I Fiber Optic Sensing

Eine weitere Alternative zur Überwachung bietet die Technologie Fiber Optic Sensing. Fiber Optic Sensing ermöglicht eine kontinuierliche Gefahrenüberwachung. Mit der Hilfe von Glasfaserkabel werden akustische Signale aus der Umgebung aufgenommen. Pro Sekunden werden 2500 Laser-Impulse durch eine Glasfaser geleitet. Tritt von außen ein Schallimpuls auf die Faser ändert sich dadurch das Signal. Eine elektronische Analyse kann Veränderung feststellen und erkennt, um welches Geräusch es sich handelt (z.B. Steinschlag, Schritte, Tiere, Zugfahrt etc.). Die Auswertung erfolgt alle 80 km, wodurch Signale 40 km weit empfangen werden können. Ergebnisse sind bis auf 10 Meter genau, wobei die Kabelverlegung in Bogenbereichen Einfluss auf die Signalgeschwindigkeit und folglich die Genauigkeit haben kann. (Peter 2017)

Ein Vergleich der unterschiedlichen Technologien zeigt Folgendes: Auf der freien Strecke stellt eine durchgehende fahrwegseitige Ausrüstung von Radar oder Laser einen zu hohen technischen und wirtschaftlichen Aufwand dar. Die Verwendung von Radar oder Laser hat gegenüber Fibre Optic Sensing aber den Vorteil, dass sie erprobter und leistbarer sind (Koch 2017). Besteht die Möglichkeit vorhandene Kabel aus der Leit- und Sicherungstechnik zu nutzen, wo Glasfasern als Telekommunikationsleitungen dienen, bestünde hierin eventuell ein Vorteil für die Nutzung der Fiber Optic Sensing Technik (Peter 2017). Eine Alternative für die freie Strecke stellt auch die Einzäunung oder Gefahrenraumfreimeldung durch Bildverarbeitung auf dem Triebfahrzeug. Eine Einzäunung ist jedoch im Bereich von Bahnübergängen oder Arbeiten im Nachbargleis keine relevante Lösung. An kritischen Punkten, wie Bahnübergängen oder im Haltestellenbereich „sollten“ fixe Radar- und Laser Sensoren eingebaut werden (Koch 2017). Aufgrund des schwachen Verkehrsaufkommens verfügen Nebenbahnen i.d.R. nicht über Schranken oder Lichtsignalanlagen mit Video oder Radarscan sondern werden zugesteuert ausgelöst. Im automatisierten Betrieb ab GoA3 müsste daher entsprechend nachgerüstet werden. (Fendrich 2007, S. 491; Pachl 2017, S. 17)

4.3.2.2 Knoten, Bahnhofsbereiche

Im Bahnsteigbereich ist die effizienteste Lösung zur Gefahrenraumfreihaltung die Verwendung von Bahnsteigtüren. Diese öffnen sich erst nach Anhalten des Zuges. Eine

Kopplung zwischen einem fahrwegseitigen Überwachungssystem am Bahnsteig und Fahrzeug ist daher notwendig (Treydel 2016, S. 29). Die Vielfalt der verkehrenden Züge auf der Vollbahn und damit unterschiedliche Türanordnung bzw. Zuglänge sowie die derzeit noch fehlende Möglichkeit exakt zu halten machen es nötig, andere technische Möglichkeiten zur Gefahrenraumsicherung anzuwenden. Diese kann einerseits durch entsprechende Längszäune (die vor Abfahrt wieder schließen) ermöglicht werden. Andererseits kann der Lichtraum von Bahnsteiggleisen auch mit derselben fahrwegseitigen Bildverarbeitungstechnologie die bei Bahnübergängen zur Anwendung kommt (Laser- oder Radar) überwacht werden (Fendrich 2007, S. 615). (Pachl 2017, S. 17)

Die Gefahrenraumsicherung bei Rangierfahrten in Nebengleisen oder Verschiebebahnhöfen stellt gegenüber der freien Strecke und dem Personenverkehr insofern einen Vorteil dar, dass das Betreten für Unbefugte ohnehin verboten ist (Pachl 2017, S. 19).

4.3.3 Fahrzeug

Fahrzeugseitig begründen sich die notwendigen technischen Anforderungen in erster Linie aus den Elementen der Zugsicherung. Hinzu kommt eine ATO Einheit an Bord und eine Hinderniserkennung. Bei der Anwendung von ETCS Level 2 umfasst dies jene Komponenten aus Abbildung 22.

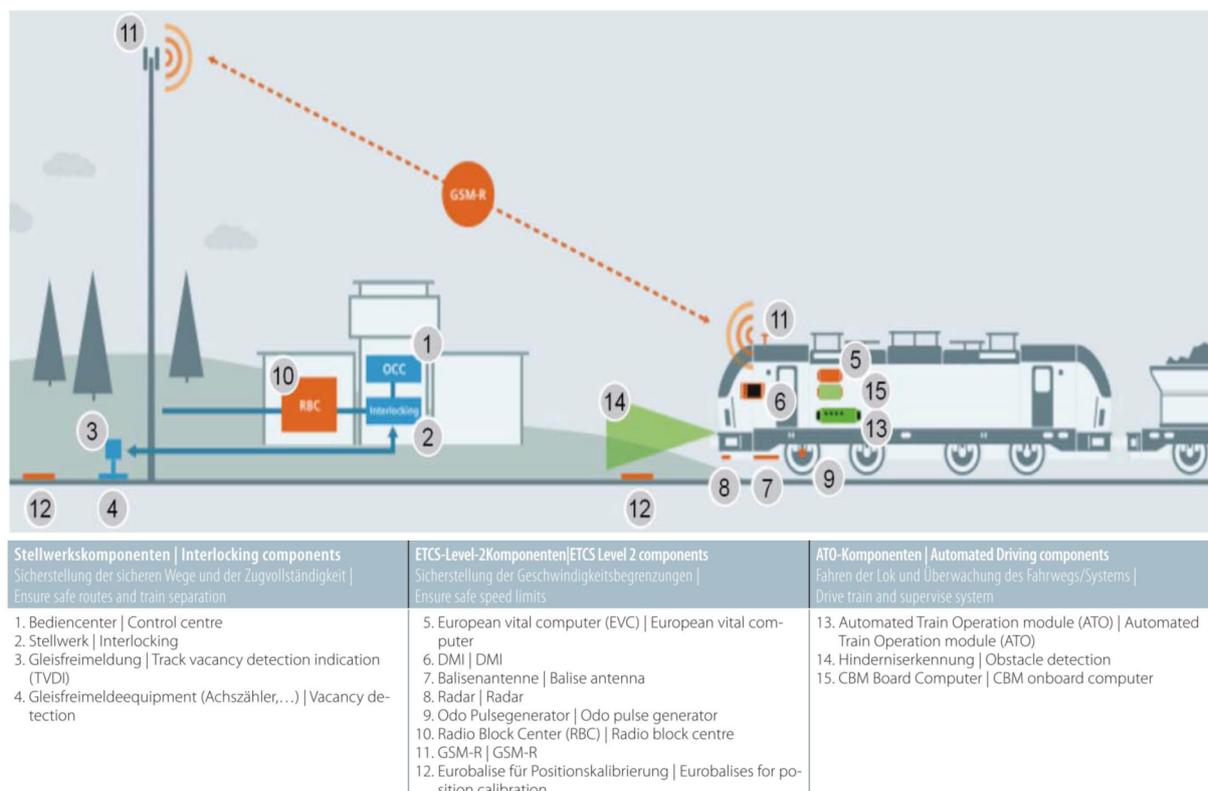


Abbildung 22: ATO Prinzipschema (Gralla 2016a, S. 11)

4.3.3.1 Fahrzeugseitige Hinderniserkennung

Die Hinderniserkennung spielt, wie im vorigen Kapitel bereits näher erläutert, besonders ab GoA3 eine wesentliche Rolle, da bis GoA2 der/die Triebfahrzeugführer/in überwachende Funktionen hat. Fahrzeugseitige Hinderniserkennung kann durch

- I Radar,
- I Infrarot,
- I Laser oder
- I Kamera übernommen werden.

Die Radar- und Lasertechnik, die in der Automobilindustrie derzeit erforscht wird, kann besonders bei geringen Geschwindigkeiten (<40 km/h) übernommen werden (Koch 2017), wobei nachfolgende Aspekte berücksichtigt werden sollten (Stadlmann et al. 2018). Um einen Bremsweg unter 20 Metern zu erreichen, bei einer Bremsverzögerung von 1m/s^2 , müsste die Geschwindigkeit jedoch auf 15 km/h reduziert werden (Pachl 2017, S. 18).

Aufgrund der unterschiedlichen Reichweiten und der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Sensoren ist zur sicheren Hinderniserkennung ein simultaner Einsatz sinnvoll. Die Hinderniserkennung reicht von 60 m (Infrarot) bis etwa 100 m (Laser) und sogar darüber (Radar). Radar hat die Vorteile, dass er bei Nebel und starkem Regen besser zur Objekterkennung dient als visuelle Sensoren oder Laser. Während bei Laser die Reichweite auf 20 m sinken kann, kann ein Radarsystem noch bis zu 100 m Objekte erkennen. Radar hat aber den Nachteil, dass durch Objekte wie Weichen und Schienenlachsen die Reflexionen gestört werden können. Infrarot dient besonders zur Erkennung von „*living objects*“, wie Fußgänger oder Tieren. (Stadlmann et al. 2018)

Ein wichtiger Aspekt bei der Anwendung dieser Sensoren ist die Umlegung des fahrzeugseitigen Koordinatensystems auf jenes der Strecke. Grund dafür sind Nick-, Roll-, und Gierwinkel. Bogenbereiche, Federung der Fahrzeuge sowie Beschleunigungs- oder Bremsbewegung machen eine Umlegung notwendig. (Stadlmann et al. 2018).

Die direkte Anwendung von auf der Straße erprobten Radarprodukten zeigt, dass der Schienenverlauf unter Umständen nicht im Sichtfeld des Radars liegt (vgl. Abbildung 23). Zur korrekten Zielerkennung ist deshalb zusätzlich eine kamerabasierte Lösung notwendig. Die Verknüpfung mit Infrastrukturdaten und einer entsprechenden Positionierung/Einstellung der Radargeräte könnte dies zukünftig ebenso ermöglichen. (Franzen et al. 2017, S. 46)

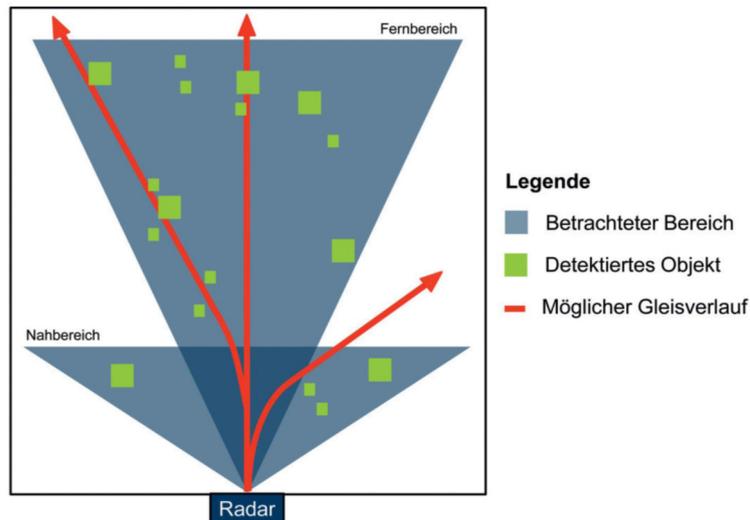


Abbildung 23: Umgebungsbild des Radarsensors und mögliche Gleisverläufe (Franzen et al. 2017, S. 46)

Zudem ist abzuklären, ob Bewegungen außerhalb des Lichttraums zu berücksichtigen sind oder nicht (Stadlmann et al. 2018). Bei nicht mit Strom betriebenen Lokomotiven ist zudem eine entsprechende Energieversorgung für die an der Fahrzeugschleife angebrachten Hinderniserkennungssysteme zu berücksichtigen (Franzen et al. 2017, S. 46).

4.3.3.2 Fahrzeugseitige ATO Einheit

Die ATO On-Board Einheit hat drei Hauptschnittstellen (vgl. Abbildung 18). Diese bestehen:

- I zur fahrzeugseitigen Zugsicherung (bei ATO over ETCS das ETCS Level 2),
- I zum streckenseitigen ATO (in weiterer Folge zum TMS) und
- I zum Fahrzeug bzw. dessen Steuerung (Antriebs- und Bremssteuerung, Haltemanagement).

An diesen Schnittstellen wird im Rahmen des Shift2Rail Projekts durch die Entwicklung von sogenannten "subsets" gearbeitet, worin die Anforderungen an die Schnittstellen definiert werden, die in den TSI Platz finden sollen. Diese Spezifikationen sind noch nicht zur Gänze entwickelt und werden momentan teils auch überarbeitet. An dieser Stelle sei daher nur erwähnt, dass die Möglichkeit besteht, das ATO On-Board System in den EVC (der bordseitigen Einheit des ETCS) zu integrieren oder als separates Produkt zu verwenden. Die Schnittstelle zum Zugsicherungssystem ist jedenfalls in beiden Fällen notwendig. Diese Schnittstelle ist wichtig, da das Zugsicherungssystem die Bremskurve ermittelt

und das vom ATO System ausgeführte Geschwindigkeitsprofil kontinuierlich überwacht und notfalls eingreift. (Gralla 2016a, S. 11–13; Treydel 2017)

Hinsichtlich der Schnittstelle zum Zug ist zu sagen, dass sichergestellt werden muss, dass das System so startet, fährt und hält, so dass der Beschleunigungs- und Bremsvorgang nicht ruckartig verlaufen (Treydel 2016, S. 17). Das ATO System an Bord muss die Zugeigenschaften kennen (Barnard et al. 2012b, S. 8). ATO muss dazu fähig sein, den Zug zum Bremsen zu bekommen (Knollmann 2017).

Im Haltestellenbereich ist es notwendig, das Fahrzeug an einem exakten Punkt zum Halt zu bringen. Bei der Verwendung von ATO over ETCS liegt die Positionsgenauigkeit bei den Möglichkeiten der Elemente der Zugsicherung, sprich Odometer und Balisenantennen, wobei auch die Positionierung der infrastrukturseitigen Balisen einen Einfluss auf die Genauigkeit haben kann (Barnard et al. 2012b, S. 7–8). Aufgrund der Anforderungen an ETCS variiert die Haltegenauigkeit bei 5% um +/- 5 m. Dies wird als unzureichend für den Einsatz von ATO ab GoA3 erachtet. Zum Tragen kommt diese Problematik u.a. beim Einsatz von Bahnsteigtüren im Personenverkehr, da aufgrund der Vielfalt der Fahrzeuge unterschiedliche Fälle berücksichtigt werden müssen. Das Halten an einem präzisen Punkt ist auch besonders im Güterverkehr für das Be- und Entladen von Gütern von Bedeutung (Treydel 2016, S. 29). (Abdalla 2017, S. 9; Barnard et al. 2012b, S. 7–8)

Für die ATO On-Board Einheit müssen ab GoA3 weitere fahrzeugseitige Aspekte, die bei fahrerlosen U-Bahnen bereits zur Anwendung kommen, berücksichtigt werden (N.N. 2017a, S. 3):

- I Eine Türspaltüberwachung, die neben einer Überwachung zudem dafür sorgt, dass der Zug erst losfährt, wenn alle Türen geschlossen sind. Das Öffnen und Schließen der Türen muss mit einem Überwachungssystem der Fahrgäste auf den Bahnsteigen gekoppelt sein (Treydel 2016, S. 29). Auch dürfen die Türen nicht von selbst öffnen, wenn z.B. der Haltepunkt überfahren wurde. (Treydel 2016, S. 17)
- I Eine Türnotentriegelung, die gesperrt ist, sobald der Zug in Bewegung ist und im Störfall erst öffnet, wenn die Betriebsleitzentrale dies bestätigt. Damit können beispielsweise im Tunnel zuerst die Stromschienen spannungslos geschaltet werden.
- I Eine Brandmeldetechnik ist vorzusehen, die per Notrufknopf eine Verbindung zur Betriebsleitzentrale herstellen kann. Durch Rauchmelde- und Temperatursensoren können Gefahren bereits bei der Entstehung erkannt werden und bei der Betriebsleitstelle Alarm auslösen.
- I Eine Notsprechstelle für Fahrgäste ist erforderlich, damit diese im Bedarf Kontakt zur Leitstelle aufnehmen können.

Zur Türöffnung und -schließung sei angemerkt, dass dies eine Problematik im Personenverkehr ist. Bei Güterzügen oder beim Verschub ist sie nicht gegeben. (Goverde 2017)

Im Verschub ist fahrzeugseitig ein anderer Aspekt zu berücksichtigen. Durch den bereits per Funk möglichen (fahrerlosen) Rangierbetrieb fehlt im Verschub zum Erreichen einer Vollautomatisierung noch die Automatisierung des Kuppelvorganges und der Bremsprobe (vgl. auch Kapitel 4.2.5). In Europa kommen seit 150 Jahren im Güterverkehr vorwiegend die Schraubenkupplungen zum Einsatz. Die Fahrzeuge zu kuppeln und entkuppeln ist mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden. Ebenso müssen die Druckluftleitungen der Bremsen händisch gekuppelt werden. Abhilfe dafür schaffen Mittelpufferkupplungen, welche bereits seit über 100 Jahren in den USA zum Einsatz kommen, sich in Europa aus diversen Gründen (detailliert in (Stuhr 2013)) bis dato aber nicht durchgesetzt haben. Moderne automatische Mittelpufferkupplungen ermöglichen neben dem automatischen Kuppeln auch das Verbinden von pneumatischen Leitungen der Bremsen sowie von elektrischen Datenleitungen. Zudem wurde unlängst ein Prototyp zur automatischen Bremsprobe entwickelt. Die technischen Anforderungen zum Erreichen der Vollautomatisierung sind also bereits vorhanden. Mitte dieses Jahres ist der erste länderübergreifende Einsatz eines solch „intelligenten Güterzuges“ in Österreich und der Schweiz geplant. (Martin et al. 2015, S. 31; Müller-Hildebrand 2017; Stuhr 2013, S. 1)

Zusammengefasst kann zu den rechtlichen, betrieblichen und technischen Anforderungen beim Einsatz von ATO in unterschiedlichen Automatisierungslevels folgendes gesagt werden (Goverde 2017):

- I Rechtliche Rahmenbedingungen müssen geklärt werden.
- I Ein Zusammenwirken zwischen Stakeholdern muss erreicht werden.
- I Betriebs- und Migrationsstrategien müssen definiert werden.
- I ATO bringt mit sich, dass Algorithmen zur Verknüpfung unterschiedlicher Schnittstellen – hinsichtlich betrieblicher und technischer Aspekte erarbeitet werden müssen.
- I Eine Standardisierung und Migration speziell im Hinblick auf Zugsicherung ist notwendig; auch unter Berücksichtigung von Strecken mit geringerer Verkehrsbedeutung.
- I Technische Anforderungen ab GoA3, speziell betreffend Sicherheit im Personenverkehr und Rückfallebenen im Allgemeinen, sind zu berücksichtigen und zu entwickeln.
- I Eine adäquate Hinderniserkennung muss etabliert werden. Technische Lösungen für die Hinderniserkennung und Gefahrenraumsicherung gibt es zwar bereits, wobei die Anwendung (im automatisierten Betrieb) derzeit noch zu teuer ist (Meyer zu Hörste 2017).

4.4 Migration

Abschließend wird anhand eines Vergleichs zwischen Österreich und der Schweiz auf die kritischen Aspekte der ATO-Migration eingegangen.

Tabelle 3: Migration: Vergleich Österreich und Schweiz

	Österreich	Schweiz
Gesamtnetz	<ul style="list-style-type: none"> 4917 km (N.N. 2016a) 	<ul style="list-style-type: none"> 4034 km (N.N. 2016a)
GoA1 Zugsicherung	<ul style="list-style-type: none"> PZB und LZB, vereinzelt ETCS Level 1 und 2 	<ul style="list-style-type: none"> Level 1 Limited Supervision, teilweise Level 2
GoA1 DAS	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz von elektronischem Zugfahrplan, der in zweiter Spalte optimale Geschwindigkeiten anzeigt 	<ul style="list-style-type: none"> Adaptive Zuglenkung (C=DAS)
GoA2-4	-	-
Disposition/TMS	<ul style="list-style-type: none"> ARAMIS (automatische Konflikterkennung bis zu einer Stunde im Voraus, Lösung durch Disponent) 	<ul style="list-style-type: none"> C-DAS TMS momentan noch teilautomatisiert Entwicklung von Dispositionstools zur Echt-Zeit Fahrplanerstellung (vgl. 5.1.1)

Tabelle 4: Auszug aus weiteren Automatisierungsvorhaben in Österreich und der Schweiz

	Österreich	Schweiz
Weitere Automatisierungsvorhaben	<ul style="list-style-type: none"> Teststrecke für vollautomatische Züge Friedberg-Oberwart Adaptive Zuglenkung in Planung Entwicklung „intelligenter Güterzüge“ (vgl. 4.3.3.2) 	<ul style="list-style-type: none"> TMS bis 2025 vollautomatisiert Entwicklung „intelligenter Güterzüge“ Ab 2025 Umstieg auf GoA2 im Personenverkehr und GoA3/4 im Güterverkehr

Anforderungen aufgrund von ATO

Wie in Tabelle 3 und Tabelle 4 ersichtlich, nimmt die Schweiz eine Vorreiterrolle ein. Als Nicht-EU-Mitglied ist es das erste Land, welches ein vollständig ERMTS-kompatibles Netz besitzt. Im Projekt Rail 4.0² soll die Automatisierung weiter vorangetrieben werden. Bis 2025 ist eine Komplettumstellung des ganzen Wagenmaterials auf ETCS Level 2 geplant und nur mehr der Einsatz von Level 2 (mit einer 70%-igen Anlagenreduktion) und 3 angedacht.

Ein Hindernis für die Einführung von ETCS in Österreich bildet die vielfach veraltete Stellwerkstechnologie, da ETCS i.d.R. elektronische Stellwerke voraussetzt. Eine weitere Hürde ist die Tatsache, dass die Strecken in Österreich zum größten Teil mit PZB (LZB nur auf der Westbahn) ausgestattet sind und dieses Zugbeeinflussungssystem bis etwa 2030 weiter genutzt werden soll. 2014 betrug die ETCS Ausstattung in Level 1 knapp 3% (155 km) und Level 2 etwa 6% (320 km) des Gesamtnetzes (N.N. 2017d, S. 27). Erst nachdem die Hauptstrecken mit ETCS (vgl. Abbildung 24) ausgestattet sind, ist ein kontinuierlicher Abbau (ab ca. 2035) von PZB Systemen vorgesehen. In Anbetracht dieses Zeitrahmens bis zu einer Umstellung auf ETCS, stellt sich die Frage, inwieweit höhere Automatisierungsstufen, abseits des Versuchs, realisierbar sind. (N.N. 2017c, S. 10–11)

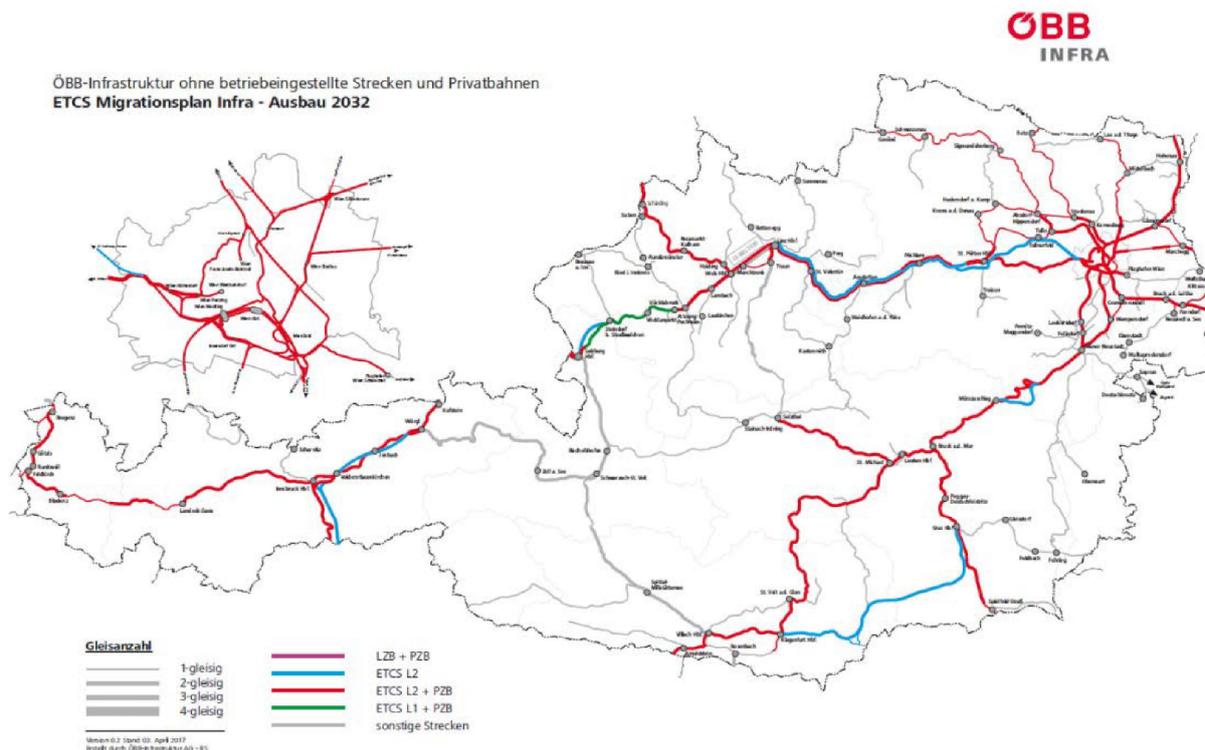


Abbildung 24: ETCS Migration in Österreich (N.N. 2017c, S. 30)

² Zusammenschluss mehrerer Partner aus der Industrie, den Universitäten, Öffentlichen Institutionen, der deutschen Bahn, SNCF etc.

Auch bei der Anwendung von GoA1 in Hinblick auf Fahrerassistenzsysteme kann die Schweiz als Vorreiter betrachtet werden. Die adaptive Zuglenkung zur Energieverbrauchsoptimierung (C-DAS) in der Schweiz funktioniert wie folgt: passiert ein Zug ein Lichtsignal wird die Betriebszentrale darüber informiert. Dadurch kann die Position, Geschwindigkeit und Verspätung jedes einzelnen Zuges ermittelt werden. Eine Software berechnet im drei Sekundentakt, „*wann ein Zug wo sein wird*“ und ermittelt Lösungsvorschläge, damit Züge ohne außerplanmäßigen Halt verkehren können (Gantenbein 2015). Die Empfehlung der Geschwindigkeit wird dem/der Lokführer/in auf ein Tablet übermittelt. In Österreich ist dies bis 2021 geplant. Das System soll energieoptimierte Konfliktlösungen bereitstellen, die dann in Echt-Zeit an den/die Triebfahrzeugführer/in übermittelt werden. Bisher werden die Konflikte durch den Disponenten gelöst und Vorschläge per SMS an den/die Lokführer/in übermittelt. (Kaufmann et al. 2016, S. 18)

Ein anderes Beispiel für die Verknüpfung zu einem TMS mit dem Zug bietet die Strecke des Lötschberg-Basistunnels in der Schweiz. Anhand der Standort- und Bewegungsinformationen über ETCS Level 2 wird die optimale Geschwindigkeitsvorgabe berechnet und an den Zug übermittelt. (Weidmann et al. 2014, S. 609)

Auch hinsichtlich der Datenübertragung kann sich Österreich die Schweiz zum Vorbild nehmen. Während in Österreich noch am netzweiten Ausbau von GSM-R gearbeitet wird (N.N. 2018b), ist GSM-R in der Schweiz bereits Standard für die Datenübertragung. Ab 2025 ist in der Schweiz ein Wechsel auf FRMCS/5G geplant. FRMCS (Future Railway Mobile Communications System) gilt als der Nachfolger von GSM-R und wird derzeit finalisiert; 2020 ist der kommerzielle Einsatz geplant (Barrow 2017). (Schneider 2017)

Im Hinblick auf das Erreichen höherer Automatisierungsstufen wird in Österreich stark auf die Automatisierung bzw. Zentralisierung von Prozessen gesetzt, wie beispielsweise eine zentrale Steuerung, besseres TMS zur Vermeidung von Stopps oder Energiereduktion (Sagmeister 2017). In der Schweiz ist ab 2020 ein Umstieg auf GoA2 im Personenverkehr und auf GoA3/4 im Verschub geplant. In Stufe 3 ist es angedacht eine Hinderniserkennung fahrzeugseitig zu etablieren, woran auch in Österreich geforscht wird, vgl. Stadlmann (Stadlmann et al. 2018). Weiters soll im Rahmen des Projekts Rail 4.0 in der Schweiz ein ausgeklügeltes Traffic Management System entwickelt werden, welches nur mehr IT-basierend arbeitet und in weiterer Folge lediglich über ein Breitbandnetz mit den Zügen in Kontakt steht. Die Stellwerkstechnik soll auf geometrische ETCS Stellwerke reduziert werden. Neben ATO soll zukünftig zugseitig eine genaue und automatische Lokalisierung möglich sein. (Schneider 2017)

5 Potentiale und Wirkung von ATO

Durch voranschreitende Automatisierung hat die Bahn die Chance die „4 K“-Ziele (Kunde, Kosten, Kapazität und Kohlendioxid) zu erreichen (Philips 2017). In Kapitel 2.2 wurden die Ziele hinsichtlich ATO (bis GoA4) bereits angeführt. Die Potentiale und Wirkung dieser Ziele werden in weiterer Folge genauer beschrieben. Anhand eines praxisnahen Rechenbeispiels wird das Energiepotential näher betrachtet. Abschließend werden systembezogene Potentiale untersucht. Es wird analysiert welche Automatisierungsstufe für die jeweiligen Systeme sinnvoll ist. Hierfür wird der Eisenbahnverkehr einerseits unterteilt in:

- I Systeme nach Verkehrsbedeutung (Haupt- und Nebenbahnen) und
- I Systeme nach Beförderungsart (Personen-, Güter- und Mischverkehr).

5.1 Kapazität

Bevor auf das Potential der Kapazität näher eingegangen wird, werden einige Grundbegriffe aus der Fahrplanerstellung näher erläutert und abschließend grafisch dargestellt (siehe Abbildung 25):

I Sperrzeit und Sperrzeitentreppe

Ist jene Zeit eines Fahrwegabschnittes (Block oder Fahrstraße), in der die Nutzung für andere Fahrten gesperrt ist, da dieser Abschnitt betrieblich beansprucht wird (Pachl 2016, S. 46). Die Sperrzeit einer Zugfahrt für die durchfahrene Strecke aufgetragen auf einem Weg-Zeit-Diagramm ergibt die Sperrzeitentreppe (Fendrich 2007, S. 582).

I Mindestzugfolgezeit

Die Mindestzugfolgezeit lässt sich aus der Sperrzeitentreppe ableiten (Fendrich 2007, S. 582). Sie ist jene Zeit, in der ein Fahrzeug ohne Bremsvorgang seine Fahrstrecke durchfahren kann. Die mittlere Mindestzugfolgezeit bestimmt die Leistungsfähigkeit einer Betriebsanlage. Sie hängt von den Mindestzugfolgezeiten des Signalsystems und der Struktur der Zugfolge ab, d.h. der Geschwindigkeitsschere und falls vorhanden, den Richtungswechseln auf den Gleisen. Die mittlere Mindestzugfolgezeit ändert sich durch ATO, aufgrund der festen Blockabschnitte der derzeitigen verwendeten Zugsicherungssysteme, nicht (Barnard et al. 2012b, S. 4). (Pachl 2017, S. 13)

I Pufferzeit

Die minimale Zugfolgezeit wird im Eisenbahnverkehr durch sogenannte Pufferzeiten verlängert, um im Fahrplan gewissen Störungen vorzubeugen und Folgeverspätungen zu begrenzen. Sie ist nicht Teil der Sperrzeit. (Schnieder und Becker 2007, S. 85)

In der Praxis stellen 50% der theoretisch nutzbaren Kapazität Pufferzeit dar. Eine bessere Ausnutzung bzw. Reduktion der Pufferzeit kann die Leistung erheblich steigern, ohne dass zusätzlicher Infrastrukturausbau erforderlich ist. (Pachl 2017, S. 13)

I Fahrzeitreserve

Ist ein Aufschlag auf die technische Fahrzeit bei Normalbedingungen (Marschnig 2018).

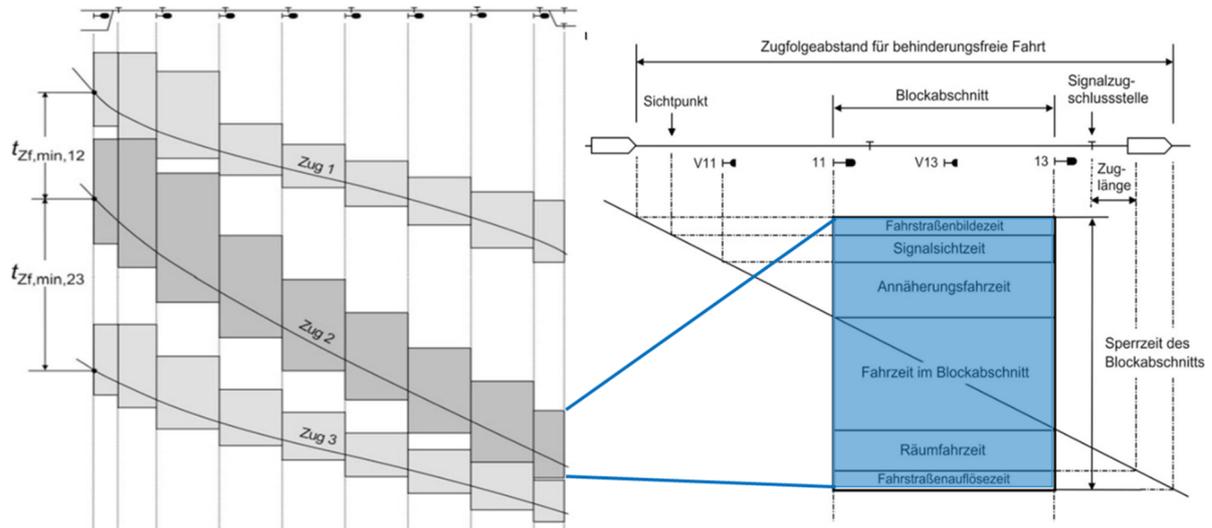


Abbildung 25: Mindestzugfolgezeiten, Sperrzeitentreppe und Sperrzeit angelehnt an (Pachl 2016, S. 47, 2016, S. 154)

5.1.1 Dynamische Kapazitätsoptimierung

Damit der Betrieb stabil abläuft, werden, wie bereits erwähnt, Reserve- und Pufferzeiten eingebaut, welche zwischen 15% und 25% der möglichen Kapazität betragen. Für mehr Kapazität ist in erster Linie notwendig, an Engpassstellen (Knoten) diese Reserven zu reduzieren, wodurch automatisch mehr Kapazität im gesamten Netz gewonnen werden kann. Eine Methode hierfür bietet das Konzept der dynamischen Kapazitätsoptimierung. Durch Eliminierung der Reserven an kritischen Engpassstellen können Zugfolgezeiten von 90-100 Sekunden erreicht werden. Dieses Potential der Kapazitätserhöhung kann durch automatische Zugführung ausgeschöpft werden. Neben der automatischen Zugführung sind für eine dynamische Kapazitätsoptimierung zusätzlich auch andere betriebliche-technische Anforderungen notwendig, welche nachstehend beschrieben werden (Weidmann et al. 2014, S. 606):

I Automatische Fahrplanerstellung in Echt-Zeit

Heutzutage werden der Betrieb und die Disposition bereits durch die Leitsysteme unterstützt. Durch zugseitige Echt-Zeit-Daten werden Betriebsdaten bzw. der Ist-Zustand der Züge erfasst, worauf Prognosen für den Betriebsablauf erstellt und durch mathematische

Optimierungsverfahren teilautomatisierte Lösungen vorgeschlagen werden (Weidmann et al. 2014, S. 608). Der/die Disponent/in trifft aufbauend darauf und anhand seiner Erfahrung eine Entscheidung. Die Optimierung durch die manuelle Disposition ist insofern eingeschränkt, dass die Handlungsmöglichkeiten groß sind und nicht alle Lösungen überblickt werden können. Besonders bei Geschwindigkeiten über 160 km/h stößt der Mensch an seine Grenzen. Zudem kommt, dass die Referenzgröße für Entscheidungen der ursprüngliche Fahrplan ist. Züge verkehren in der Praxis aber unpünktlich (wenn auch nur im Sekundenbereich), weshalb immer eine Abweichung zum ursprünglichen Fahrplan besteht. Aus diesem Grund ist es zielführender den Fahrplan permanent neu zu planen. Nötige Informationen sind: die aktuelle Betriebslage (Lage und Bewegungszustände aller Züge), Zugeigenschaften (Länge, Beschleunigungs- und Bremsvermögen), Transportketten für Reisende und Güter (vereinbarter Fahrplan inkl. Priorisierungskriterien), Block- und Gleisabschnitte, Optimierungskriterien. (Weidmann et al. 2014, S. 606)

Aus mathematischer Sicht ist die automatische Fahrplanerstellung heutzutage möglich. Für die praktische Umsetzung in einem großen Netz muss derzeit noch ein mehrstufiger Ansatz verfolgt werden. Im ersten Schritt wird auf makroskopischer Ebene ein vereinfachtes Infrastrukturmodell betrachtet. Die Zugläufe werden anhand ihrer Ankunft, Abfahrt und Durchfahrt an Bahnhöfe und andere wichtige Betriebspunkte geplant. Randbedingungen stellen minimale Fahrzeiten, Haltezeiten und Zugfolgezeiten sowie minimale und maximale Umsteigezeiten dar. Die Rechenzeit steigt, im ungünstigsten Fall, exponentiell mit der Problemgröße. Deshalb wurden Dekompositionsverfahren entwickelt. Gruppen von Zügen werden nacheinander eingeplant und können dann nur noch in bestimmten Zeitfenstern verschoben werden. Dekompositionsverfahren reduzieren die Rechenzeit, wodurch innerhalb weniger Minuten eine automatische Fahrplanerstellung für größerer Netze (z.B. Schweiz) möglich ist. Mikroskopische Methoden dienen als Detaillierung in einem zweiten Planungsschritt, damit ein sekunden- und gleisgenauer Plan zu Verfügung steht, worin die Konflikte zwischen möglichen Fahrwegen untersucht werden. Tests am Bahnhof Bern zeigen, dass dies innerhalb weniger Sekunden möglich ist. (Weidmann et al. 2014, S. 608)

„Die volle Nutzung der automatischen Fahrplanerstellung bedingt die präzise Umsetzung der Fahrvorgaben durch die Aussenanlagen und die Züge“. (Weidmann et al. 2014, S. 608) Voraussetzung ist, dass Ist-Zugdaten nicht abschnittsweise, sondern meter- und sekundengenau vorliegen, wofür sich ETCS Level 2 eignet. Zudem kommt die Notwendigkeit, dass Stellwerksbefehle ferngesteuert gegeben werden können. Weiters müssen die Abläufe mit einer Genauigkeit von einer Zehntelminute erstellt werden können und vollständige Informationen über die täglich verkehrenden Züge zur Verfügung stehen. (Weidmann et al. 2014, S. 608)

I Optimierung der Fahrkurven

Die permanente Fahrplanaktualisierung hat zur Folge, dass die ständig aktualisierten Fahrvorgaben genau eingehalten werden müssen. Kleine Änderungen können Konflikte mit sich führen und ein Abbremsen erzwingen, wie z.B. vor einem gerade sich ändernden Vorsignal. Durch die Trägheit der Züge kann ein erneutes Anfahren zu einem Fahrzeitverlust von etwa zwei Minuten führen, was mit einer Verspätung einhergeht. Die Berechnung des Geschwindigkeitsverlaufs, dessen Optimierung sowie eine präzise Fahrweise sind daher Voraussetzung. Die Optimierung der Fahrkurven kann neben der Fahrplaneinhaltung auch andere Ziele verfolgen, wie z.B. minimalen Energieverbrauch oder Fahrkomfort, vgl. nachfolgende Kapitel. (Weidmann et al. 2014, S. 606–607)

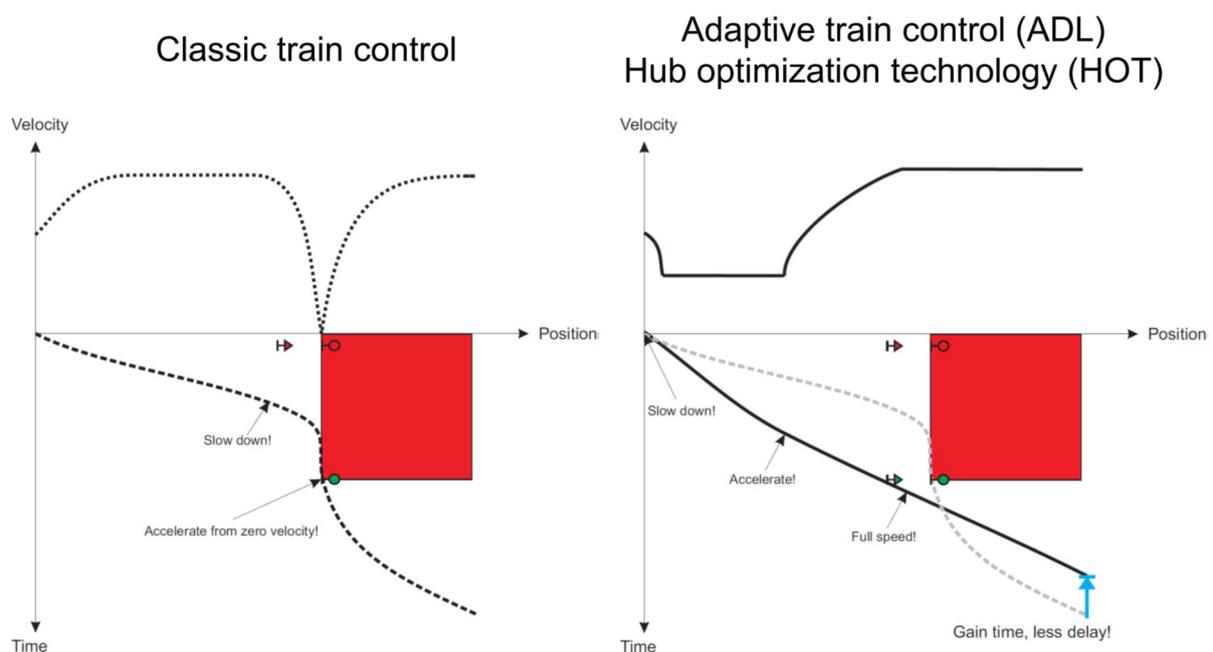


Abbildung 26: Optimierung der Fahrkurven zur Vermeidung eines Halts (Ciarni, S. 40)

I Regelkreis Fahrplanerstellung – Zugführung

Zur genauen Steuerung des Fahrtverlaufs ist eine kontinuierliche Interaktion der Fahrplanautomatik und der Traktionstechnik der Züge erforderlich.

Im äußeren Regelkreis (rot) wird das Fahrplansystem mit dem Zug verknüpft. Der permanent neu gerechnete Fahrplan wird an den Zug übertragen. Dieser übermittelt ständig Zuginformationen und -position. Der innere Regelkreis (gelb) stellt die Verbindung zur Traktionstechnik dar. Anfahr-, Bremskräfte und Zuggeschwindigkeiten werden an Antrieb und Bremse übertragen. (Weidmann et al. 2014, S. 607)

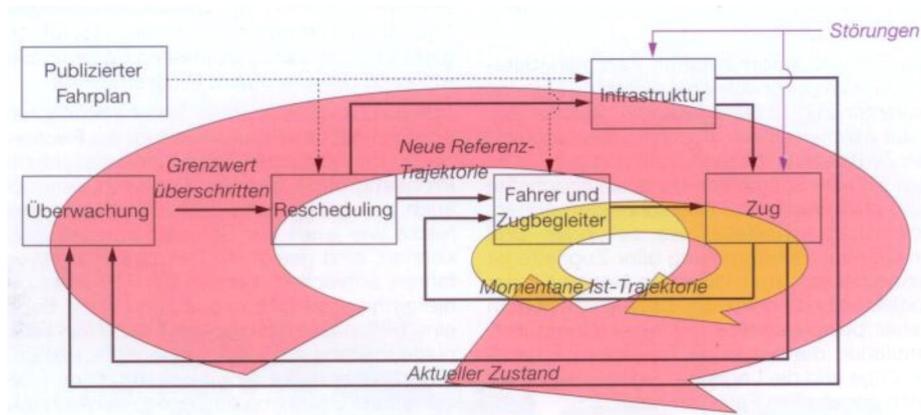


Abbildung 27: Regelkreis Fahrplannerstellung - Zugführung (Weidmann et al. 2014, S. 607)

I Automatische Zugführung

Der Mensch kann einen Zug mit einer Genauigkeit mit Schwankungen im Minutenbereich führen. Für die dynamische Kapazitätsbewirtschaftung ist dies zu ungenau, da sich aktualisierte Fahrplanweisungen innerhalb von weniger als einer Minute ändern können. Eine genauere Umsetzung der Fahrplanweisung an die Traktionssteuerung ist deshalb erforderlich, wodurch eine automatische Zugführung zur Umsetzung (zumindest an Engpassstellen) unumgänglich ist. (Weidmann et al. 2014, S. 607)

I Optimierte Reservezuteilung

Die Fahrzeitreserven können in solch einem dynamischen System nicht komplett weglassen werden. Sie werden durch die individuelle Fahrweise, welche Verspätungen mit sich führen können, reduziert. Der verbleibende Reservebedarf setzt sich somit aus externen Unsicherheiten sowie Ungenauigkeiten in der Steuerung und Sensorik zusammen.

Zusammenfassend sei gesagt, dass eine Kapazitätssteigerung durch die Verknüpfung zu einem zentralen Dispositionssystem bzw. Traffic Management System erzielt werden kann (vgl. Lötschberg-Basistunnel). Dies hat die Aufgabe, Konflikte zu erkennen und den Betriebsverlauf zu prognostizieren sowie automatisch den Fahrplan, bestenfalls in Echtzeit, zu aktualisieren. Die automatische Zugführung sorgt durch die präzise Fahrweise für genaues Einhalten aktualisierter Fahrbefehle und optimaler Geschwindigkeitsprofile. Fazit ist, dass ein Kapazitätsgewinn durch ATO dann voll ausgeschöpft werden kann, wenn die Informationstechnologie effizient genutzt wird. So ist ein Kapazitätsgewinn möglich, ohne Infrastruktur ausbauen zu müssen (Weidmann et al. 2014, S. 606). Abhängig vom Netz und den möglichen bzw. auch nötigen Änderungen an Fahrzeug und Infrastruktur sind Kapazitätssteigerungen durch ATO zwischen 10% und 50% im Bereich der Erwartungen (Shift2Rail 2015, S. 192).

5.1.2 Fahren im „Moving Block“

Eine andere Möglichkeit die Kapazität zu erhöhen bietet, das bereits in Kapitel 4.2.2.2 angesprochene, Fahren im beweglichen Raumabstand („Moving Block“). Durch die Aufhebung der Blockabstände und das Fahren im absoluten Bremswegabstand kann ein Kapazitätsgewinn erzielt werden. Die Sperrzeiten, folglich auch die Mindestzugfolgezeiten, werden dadurch reduziert (Pachl 2016, S. 49). Dies ist jedoch nicht auf den Einsatz von ATO zurückzuführen, sondern auf die Aufhebung der Blockabschnitte. Ein Vergleich der möglichen Kapazitätsausschöpfung ermittelt aus Simulationen ist in nachstehender Grafik ersichtlich. Die Fundamentaldiagramme wurden auf Basis einer 10 km langen Strecke mit einer maximalen Zuglänge von 250 Metern ermittelt. Einerseits im Betriebsverfahren „Moving Block“ und andererseits mit Fahren im festen Raumabstand mit Blocklängen von jeweils einem Kilometer.

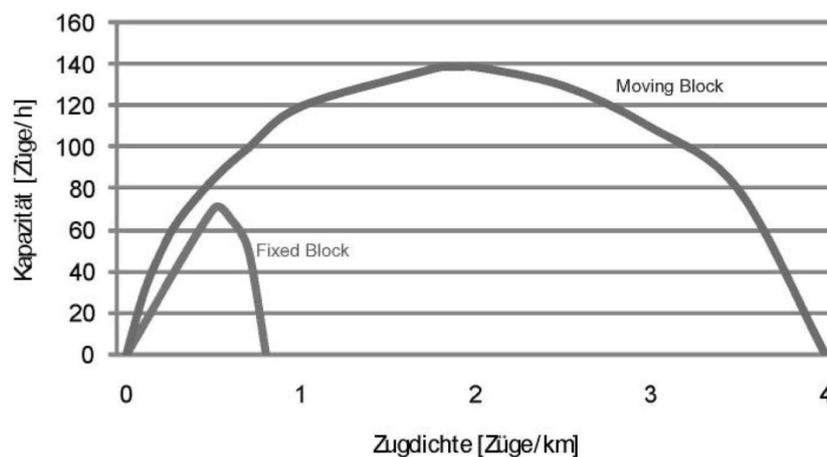


Abbildung 28: Fundamentaldiagramme für verschiedene Abstandshalteverfahren (Schnieder und Becker 2007, S. 226)

Bei der U-Bahn wird das Fahren im beweglichen Raumabstand bereits praktiziert. Auf der Vollbahn ist es Vision im ETCS Level 3, wobei es für die Vollständigkeitsprüfung der Zugintegrität noch keine praxistaugliche Lösung gibt (Pachl 2016, S. 91). Lösungen hierfür sind deshalb notwendig, da unter Verzicht auf ortsfeste Blöcke und Gleisfreimeldeanlagen Züge in der Lage sein müssen, ihren Zugschluss kontinuierlich an den Folgezug zu senden (Randelhoff 2016). Ein Faktor, der beim Fahren im „Moving Block“ ausschlaggebend werden kann, ist das Stellen der Weichen, da dadurch Zeit in Anspruch genommen wird. Zahlen hierfür liefert eine Untersuchung auf der Strecke zwischen Olten und Bern (in der Schweiz). Für den Fall, dass keine Weichen gestellt werden müssen, kann durch das Fahren im beweglichen Raumabstand eine Zugfolgezeit von 58 Sekunden erreicht werden. Ist allerdings das Stellen von Weichen erforderlich, erhöht sich die Zugfolgezeit um 14 Sekunden. (Schöbel 2017)

5.2 Servicequalität

Servicequalität kann unterschiedlich verstanden werden. Nachstehend wird auf Qualitätsverbesserungen für den/die Kunden/innen in Bezug auf Pünktlichkeit, Fahrkomfort und bedarfsorientiertes Angebot eingegangen.

Die Betriebsqualität wird durch jene Wartezeiten in einem System definiert, welche „*sich für den Nutzer des Systems als Verzögerung seines Beförderungsvorganges negativ bemerkbar machen.*“ (Pachl 2016, S. 143) Die pünktliche Führung eines einzelnen Zugs kann bereits durch Systeme wie DAS der GoA1 verbessert werden, indem die aktuelle Position abgegriffen und mit dem Fahrplan abgeglichen wird (vgl. Kapitel 4.2.3). Wie im Kapitel 5.1 beschrieben, kann durch eine dynamische Kapazitätsbewirtschaftung eine Reduktion der Pufferzeiten erzielt werden. Durch frühzeitige Konflikterkennung und automatische Fahrplanerstellung in Echt-Zeit sowie die automatische Führung können Folgeverspätungen verhindert bzw. begrenzt werden. Eine an den aktualisierten Fahrplan angepasste Fahrweise durch ATO kann daher Wartezeiten verringern. Dies wirkt sich nicht nur auf die Betriebsqualität, sondern auch positiv auf die Kunden/innen aus. Einerseits aufgrund der reduzierten Wartezeiten und andererseits aufgrund der genaueren Auskunft bzw. Vorhersehbarkeit von Zugankünften/-abfahrten (Shift2Rail 2015, S. 193). (Barnard et al. 2012b, S. 3; Poré 2017)

Eine weitere Verbesserung der Servicequalität kann erzielt werden, indem maximales Beschleunigen und Bremsen in der Befehlsvorgabe des ATO Systems untersagt wird. Im Gegensatz dazu kann nämlich das aggressive Bremsverhalten mancher Fahrer/innen in der Praxis nicht auf diese Art kontrolliert werden. Der Fahrkomfort durch vorgeschriebenes und einheitlich umgesetztes Fahrverhalten kann somit erhöht werden. (Schöbel 2017)

Flexibilität ist durch ATO insofern gegeben, dass bei Verknüpfung mit einem TMS besser und schneller auf Störungen sowie auf sich verändernde Nachfrage eingegangen werden kann. Beispielsweise könnten auf Nebenbahnen kleine Gefäße, die selbstständig verkehren, nachfrageorientiert eingesetzt werden. Durch computerunterstützte Disposition kann besser optimiert werden, da, wie in Kapitel 5.1 beschrieben, der Mensch ab einer gewissen Komplexität des Systems schnell an seine Grenzen stößt.

5.3 Sicherheit

Das Thema Sicherheit birgt neben Potentialen auch Risiken. Durch den Wegfall des/der Triebfahrzeuglenker/in, sprich der menschlichen Fehlerquelle, kann die Verkehrssicherheit gesteigert werden. Menschliche Fehler können beispielsweise durch Ablenkung, Müdigkeit oder Eintönigkeit hervorgerufen werden (Morse 2017). (Mächler 2017, S. 6; Pahl 2017, S. 12; Schaafsma 2017; Schneider 2017)

Ein weiterer Aspekt, welcher ab GoA3 ein Potential hinsichtlich der Sicherheit mit sich bringt, ist die Überwachung per se. Durch Bewachung von Bahnsteiggleisen oder in Bahnhöfen, welche ab GoA3 erforderlich ist, ist ein Senken von Vandalismus möglich. Beispielsweise wurde in der Londoner U-Bahn die Kriminalrate verringert (Poré 2017).

Der Wegfall der Fehlerquelle Mensch führt aber dazu, dass Lösungen für andere Versagensfälle gefunden werden müssen. Zudem darf die gegenwärtige Sicherheit im Eisenbahnverkehr durch neue Risiken nicht verschlechtert werden und Redundanz muss in sämtlichen Systemen vorhanden sein (Randelhoff 2016). Relevant ist dies bei Themen wie Cyber-Kriminalität, Hersteller- und Providerversagen oder beim Ausfall von Systemen (Mächler 2017, S. 6). Trotz des Hinzukommens neuer Fehlerquellen wird davon ausgegangen, dass die Sicherheit erhöht wird (Pahl 2017, S. 12).

Wie in Kapitel 4.2.5 erwähnt, ist der Verschub besonders durch harte Arbeitsbedingungen und eine höhere Unfallgefahr (insbesondere im Winter) geprägt. Verletzungen durch Arbeitsunfälle führen neben dem Verlust von Arbeitstagen auch dazu, dass Arbeiter/innen schwere gesundheitliche Folgen davontragen. Beispielsweise war die Verletzungsrate in Großbritannien 2008 durch Unfälle während dem Verschub doppelt so hoch wie jener von Gleisbauarbeitern/innen und lag bei über 20 von 1.000. Die Todesrate im Vergleich zur Unfallrate ist relativ gering. Im Vergleich zu anderen bahnbezogenen Berufen (Gleisbauarbeiter/in 1:7.500 oder Lokfahrer/in 1:28.000) ist sie jedoch mit einer Rate von 1:5.200 hoch. Eine weitere Automatisierung im Verschub durch automatisches Kuppeln oder automatische Bremsüberprüfung kann insofern Abhilfe schaffen, dass körperliche anspruchsvolle Arbeit wegfällt. Weiters wird die Sicherheit für das Personal erhöht, da Arbeiter/innen nicht mehr den Gefahren im Gleisbereich ausgesetzt sind. (Fletcher 2012)

5.4 Energie

Es ist allgemein bekannt, dass die Bahn im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern umweltfreundlicher ist. So betragen die CO₂ Emissionen auf der Bahn 2013 lediglich 3,5% bei einem 8%-igen Modal Split im Güter- und Personenverkehr. Der Energieverbrauch sowie auch der CO₂ Verbrauch auf der Bahn sind zwischen 1975 und 2013 weltweit gesunken. Trotzdem wurden von der UIC/CER im Rahmen der Sustainable Mobility Strategy 2030 Klimaziele definiert, die eine weitere Reduktion von CO₂ Emissionen sowie bessere Energieeffizienz im Eisenbahnsektor verfolgen. Bis 2030 ist eine CO₂ Einsparung von 50% pro Personen- und Tonnenkilometer gefordert und bis 2050 soll der Eisenbahnbetrieb sogar vollkommen CO₂ frei sein. Hinsichtlich der Energieeffizienz soll der Verbrauch pro Personen- und Tonnenkilometer bis 2030 um 30% und 2050 um 50% reduziert werden. In den vielen Eisenbahnländern haben sich daraus unterschiedliche Ziele entwickelt. (Gorner et al. 2016)

Auch die ÖBB verfolgt konkrete Energieeinsparungsziele und konnte seit 2013 insgesamt 124,51 GWh pro Jahr einsparen. Die damit erreichte Gesamteinsparung ist gleichzusetzen mit dem durchschnittlichen Stromverbrauch von ca. 30.000 Haushalten. Ebenso konnte der CO₂ Verbrauch seit 2006 um 32% verringert werden. Bis 2020 soll die konzernweite Energieeffizienz um weitere 7,5% gegenüber 2014 gesteigert werden. (ÖBB 2018b)

Energieeinsparung geht neben dem Erreichen von Klimazielen mit einer Reduktion von Kosten einher (vgl. Kapitel 5.5), wodurch die Wettbewerbsfähigkeit der Bahn gestärkt wird (Marinov 2018, S. 7).

5.4.1 Energieverbrauch bei der Bahn

Der Energiebedarf im Schienenverkehr fällt mit 88% primär für die Traktion von Zügen an (Findansoy et al. 2017, S. 42). Aber nicht nur die Traktion verbraucht Energie. Fahrzeugseitig wird z.B. Energie für Klima- oder Zugheizanlagen, Stromversorgung für Steckdosen, Verbrauch in Speisewagen etc. benötigt. Andere Energieverbraucher, die in den Transportbereich der Bahnen, fallen sind Verbraucheranlagen wie (Fendrich 2007, 477ff):

- ┆ Bahnhöfe, Haltepunkte einschließlich der Versorgung Dritter (z.B. Beheizung und Kühlung von Gebäuden, Beleuchtungsanlagen)
- ┆ Tunnelanlagen,
- ┆ Zugbehandlungsanlagen,
- ┆ Anlagen der Leit- und Sicherungstechnik (z.B. Stellwerke, Bahnübergangssicherungstechnik u.a.)
- ┆ Anlagen der Telekommunikation (z.B. Repeaterstationen für GSM-R)

Messdaten der ÖBB zeigen, dass der Nebenverbrauch ca. 3 kWh pro Minute beträgt. Dieser bezieht sich auf das Fahrzeug während dem Halt in Bahnhofsbereichen. (Messner 2014, S. 51)

5.4.2 Allgemeine Maßnahmen zu Energieeinsparung

Durch bestimmte Maßnahmen, infrastruktur- sowie fahrzeugseitig, kann Energie und CO₂ im Schienenverkehr reduziert werden. Mögliche Maßnahmen zur Energieeinsparung bieten (Marinov 2018, S. 20–21) :

- I Nutzung erneuerbarer Energiequellen
- I Bessere fahrzeugseitige Ausrüstung (z.B. Glühbirnen oder Fenster) (Donnelly 2010)
- I Massenreduktion des Wagenmaterials (bis zu 10%)
- I Antriebsenergie einsparen z.B. durch Abschalten einer Motorengruppe (bis zu 10%)
- I Einsatz von autarken Geräten (Marinov 2018, S. 88–89)
- I Regeneratives Bremsen (bis zu 20%)

Das regenerative Bremssystem fungiert als Generator, sprich die kinetische erzeugte Energie wird während des Bremsvorgangs in elektrische Energie umgewandelt und kann unter bestimmten Voraussetzungen in das Stromnetz zurückgespeist werden (Watanabe et al. 2018, S. 50). Die Bremsvorgänge eines Zuges können so für die Beschleunigungsvorgänge andere Züge Energie zur Verfügung stellen (Randelhoff 2016).

Hinsichtlich der Umsetzung solcher Maßnahmen bei der ÖBB kann folgendes gesagt werden: Etwa 90% des benötigten Bahnstroms beziehen die ÖBB aus Wasserkraft, woraus fast die Hälfte aus eigenen Kraftwerken kommt. Trotzdem möchten sie erneuerbare Energiequellen durch Optimierung der bestehenden Wasserkraftwerke und verstärktem Ausbau von Windkraft und Photovoltaik besser nutzen. Ein weiteres Ziel ist Energieeinsparung durch Optimierungen von Gebäude- und Anlagenbereichen. Hinsichtlich des Wagenmaterials verfügen alle neuen Fahrzeuge der ÖBB über eine Rückspeisebremse. Lokführer/innen werden durch Schulungen über energie- und spritsparende Fahrweisen unterrichtet. (ÖBB 2018b)

5.4.3 Energiesparende Fahrweise durch ATO

Eine Zugfahrt wird durch vier Elemente definiert: Anfahren (Beschleunigungsphase), Beharrung (Konstant fahren), Auslauf (Ausrollen) und Bremsen. Ein Energieverbrauch für die Traktion findet in allen Phasen, ausgenommen der Auslaufphase, statt.

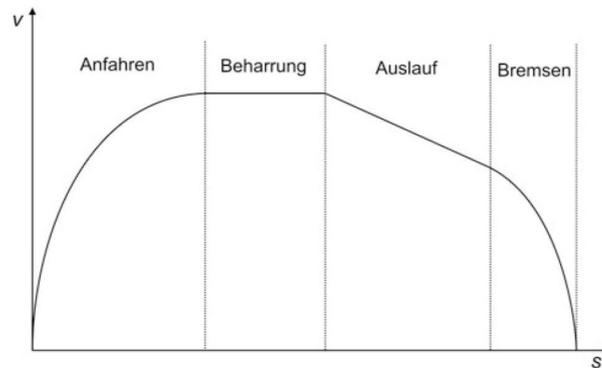


Abbildung 29: Phasen einer Zugfahrt (Pachl 2016, S. 31)

In den letzten 15 Jahren wurde das Fahrverhalten im Hinblick auf eine Energieeinsparung in vielen Forschungsprojekten untersucht (Marinov 2018, S. 16–17). Ergebnisse zeigen, dass die unterschiedliche Fahrweise von Fahrer/innen Auswirkungen auf den Energieverbrauch haben (Barnard et al. 2012b, S. 9). Eine effiziente Nutzung von Antriebs- und Bremskräften ist für die Energiereduzierung wesentlich. Beispielsweise konnte auf einer 12 km langen Teststrecke durch die Reduktion des Bremsens von 18% auf 10% der Energieverbrauch um 38% reduziert werden. (Marinov 2018, S. 18–20)

Neben weniger Antriebs- und Bremsvorgängen kann auch durch niedrigere Maximalgeschwindigkeiten (im Beharrungsbereich) Energie eingespart werden, wenn das Ziel pünktlich erreicht werden kann (Barnard et al. 2012b, S. 10). Zudem kann durch die Nutzung der Auslaufphase durch antriebsloses Fahren (Ausrollen) Energie eingespart werden (Gralla 2016b, S. 15). Es gibt daher viele Möglichkeiten durch unterschiedliches Fahrverhalten das Ziel pünktlich zu erreichen (vgl. Abbildung 30).

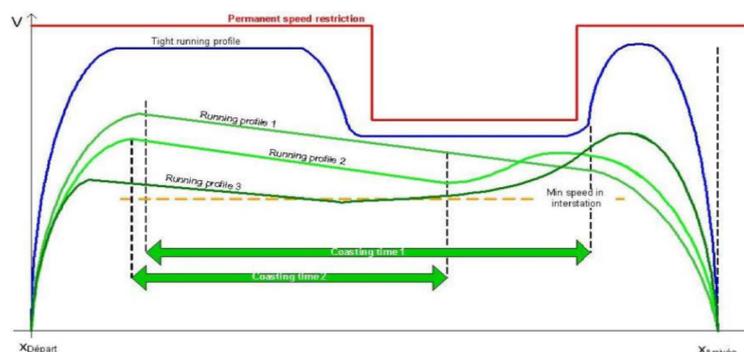


Abbildung 30: Energieeinsparung durch unterschiedliche Fahrprofile (Gralla 2016b, S. 15)

Großes Potential Energie einzusparen liegt daher in der Steuerung des Fahrverhaltens der Triebfahrzeugführer/innen bzw. Einhaltung eines optimierten Fahrprofils. In GoA1 wird dieses zu einem gewissen Grad bereits durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen erzielt. Dass durch ein ATO System das unterschiedliche Fahrverhalten reduziert bzw. ausgeglichen wird haben ab GoA2 Simulationen bestätigt (Poré 2017). Studien haben gezeigt, dass durch automatisches Fahren eine Einsparung zwischen 12-20% möglich ist (Shift2Rail 2015, S. 192). Nach Gralla (Gralla 2016b, S. 15) kann ATO sogar Energieeinsparungen von bis zu 30% erzielen. Die Unterschiedlichen Zahlen lassen darauf schließen, dass das Einsparungspotential nicht pauschal auf jede Strecke gleich umgelegt werden kann. Unterschiedliche Randbedingungen wie z.B. Fahrzeugausstattung, Trassierung oder Fahrplan beeinflussen die Optimierungsmöglichkeiten. Gralla führt folgende Strategien zur Energieeinsparung an:

- I Roll-Optimierung
- I Leistungsbegrenzung
- I Definierte Beschleunigung
- I Geschwindigkeitsbegrenzung
- I Optimierung der elektrischen Bremse

Mit der Verknüpfung des ATO zu einem TMS kann zudem Energie eingespart werden. Erstens im Hinblick auf Konfliktvermeidung und Vermeidung von unnötigem Halten und zweites hinsichtlich der Ausführung eines optimierten Geschwindigkeitsprofils durch das On-Board ATO System. (Barnard et al. 2012b, S. 8)

5.4.4 Energieberechnung für eine energiesparende Fahrweise

Anhand einer praxisnahen Energieberechnung soll in weiterer Folge gezeigt werden, welche Auswirkungen unterschiedliche Fahrstrategien auf dem Streckenabschnitt zwischen Wien Meidling und Wiener Neustadt auf den Energieverbrauch haben.

Als Grundlage der Energieberechnung dient ein Energieberechnungsprogramm, welches im Rahmen der Masterarbeit von Messner (Messner 2014) mit Visual Basic in Microsoft Excel entstanden ist. Der Energieverbrauch eines beliebigen Zuges auf einer beliebigen Strecke kann durch die Umlegung der bei einer Zugfahrt auftretenden Widerstände auf die dafür erforderlich aufzuwendende Energie berechnet werden. Aufgrund etwaiger Ungenauigkeiten sind die Berechnungen als Annäherungsmodell zu sehen (Messner 2014, S. 86). Auf den mathematischen Hintergrund wird in Kapitel 5.4.4.1 noch genauer eingegangen.

Im Rahmen der genannten Masterarbeit diente das Energieberechnungsprogramm u.a. dazu, den mathematisch berechneten Energieverbrauch der Südbahn zwischen Wien Meidling und Graz Hauptbahnhof mit realen Messdaten der ÖBB zu vergleichen. Als Berechnungsgrundlage für die Geschwindigkeitsprofile (siehe Abbildung 31) und den Vergleich des Energieverbrauchs dienten:

- I Fahrzeugdaten eines Railjets 555 zusammengesetzt aus einer Taurus 1116 mit sieben Wägen sowie die
- I Streckendaten des betrachteten Abschnitts der Südbahn zwischen Wien Meidling und Graz Hauptbahnhof
- I und Messdaten aus 2013 mit der RailwayBox, welche den Energieverbrauch, die Position, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bzw. Verzögerungen im Minutentakt aufzeichneten.

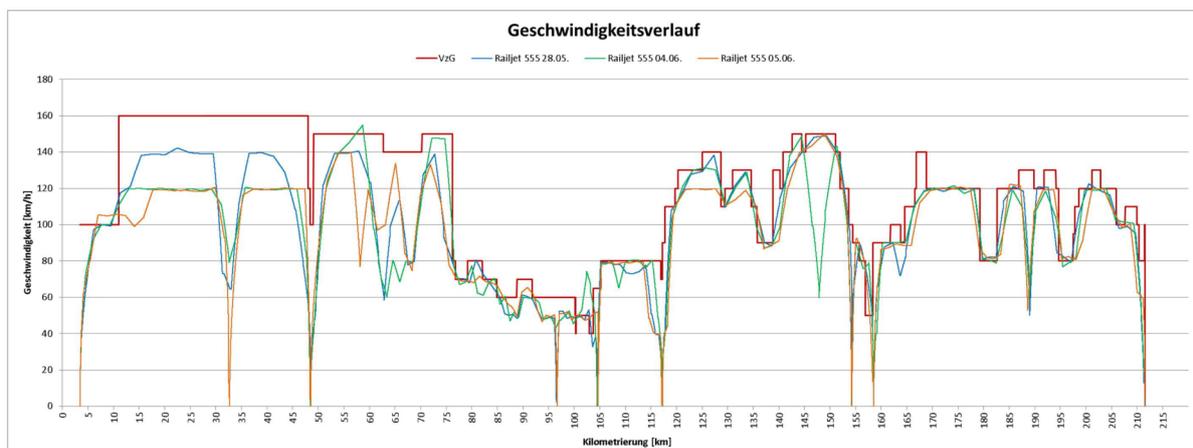


Abbildung 31: Geschwindigkeitsverlauf der drei Railjets (Messner 2014, S. 72)

Bei genauerer Betrachtung des Abschnitts zwischen Wien Meidling und Graz Hauptbahnhof ist ersichtlich, dass das VzG (Verzeichnis der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten) der drei Zugfahrten des Railjets 555 in den meisten Bereichen voll ausgenutzt wird. Auffällig ist allerdings, dass im ersten Abschnitt, zwischen Wien Meidling und Wiener Neustadt (vgl. Abbildung 32), keine derartige Ausnutzung des VzG ersichtlich ist. Weiters ist eine deutliche Geschwindigkeitsreduktion von zwei der Railjets ab km 30,0 erkennbar bzw. ein unplanmäßiger Halt des Railjet vom 05.06. bei km 32,6. Dieser Halt findet im Bereich des Bahnhofs Kottlingbrunn (km 32,434) statt. Die Ursache der Verzögerungen und des Halts sind womöglich ein auf „Halt erwarten“ stehendes Vorsignal bzw. ein auf „Halt“ gestelltes Hauptsignal aufgrund einer Belegung des nachfolgenden Blocks.

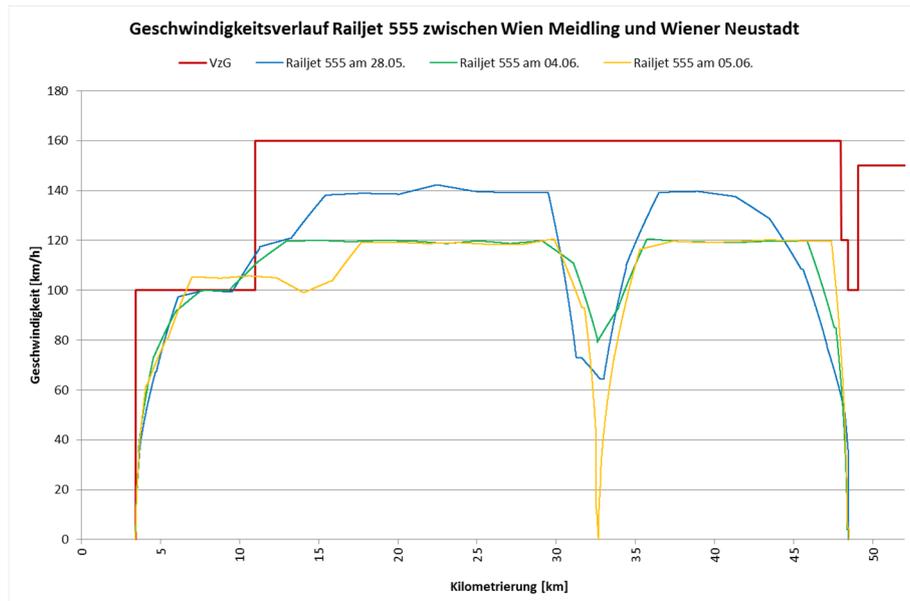


Abbildung 32: Geschwindigkeitsverlauf der drei Railjets im betrachteten Abschnitt

An manchen Stellen des mathematisch nachgebildeten Geschwindigkeitsverlaufs ist festzustellen, dass die Fahrtlinie die Höchstgeschwindigkeit überschreitet. „Das heißt aber nicht gezwungenermaßen, dass der Triebfahrzeugführer bei der tatsächlichen Fahrt schneller gefahren ist, als an diesen Stellen erlaubt war“ (Messner 2014, S. 59). Dies beruht auf der Tatsache, dass der mathematisch nachgebildete Geschwindigkeitsverlauf der Railjets mit konstanten Beschleunigungen je Minute angenommen wurde. Das Beschleunigungsverhalten innerhalb der Minute konnte nicht aus den Messdaten ausgelesen werden. Daher wurde angenommen, dass die gemessene Geschwindigkeit zu Beginn bzw. am Ende jeder Minute erreicht wird. Beschleunigungs- und Bremsvorgang treten daher direkt am Beginn dieser Minute auf und enden bei der nächsten. „Es liegen keine Informationen vor, ob der Zug den Bahnhof schon vor vollendeter Minute erreicht hat bzw. ob die gemessene Geschwindigkeit noch konstant gehalten wurde und dann stärker auf die darauffolgende Geschwindigkeit beschleunigt bzw. gebremst wurde“ (Messner 2014, S. 59). Angenommen, der Zug hätte die Geschwindigkeit früher erreicht, hätte er innerhalb dieser Zeit mehr beschleunigt und mehr Weg zurückgelegt. Diese Ungenauigkeit fließt beim mathematischen Modell daher auch in die Berechnung der Fahrzeit und der geschwindigkeitsabhängigen Widerstände ein. Dadurch begründet sich u.a. auch eine Abweichung zum realen, gemessenen Energieverbrauch. Weitere Abweichungen und Ursachen für Unterschiede im Energieverbrauch können in Messner (Messner 2014) entnommen werden. (Messner 2014)

In der vorliegenden Arbeit wird nun aufbauend auf den Daten der genannten Masterarbeit der Abschnitt zwischen Wien Meidling und Wiener Neustadt genauer beleuchtet und der Energieverbrauch für fünf Fälle, worin unterschiedliche Fahrweisen demonstriert wer-

den, untersucht. Anschließend werden diese mit den mathematisch nachgebildeten Messfahrten aus der Arbeit von Messner verglichen. Ein Vergleich zu den realen Messfahrten ist deshalb nicht möglich, da diese keine ausreichende Informationsgrundlage hinsichtlich des Energieverbrauchs der jeweiligen Widerstände bieten und nur der gesamte Energieverbrauch verglichen werden kann. Der Vollständigkeit wegen sind diese in Tabelle 5 abgebildet.

Tabelle 5: Vergleich zwischen Energieverbrauch der realen Messfahrten und den mathematisch abgebildeten Messfahrten

	Railjet 555 am 28.05.2013 [kWh]	Railjet 555 am 04.06.2013 [kWh]	Railjet 555 am 05.06.2013 [kWh]
Messfahrt ÖBB	482,08	464,22	497,28
Energieberechnungsprogramm	479,47	411,47	466,49
Unterschied	-0,54%	-11,36%	-6,19%

Die fünf Untersuchungsfälle bauen auf der Verwendung unterschiedlicher Strategien (vgl. Auflistung in 5.4.3), wie einer bestimmten definierte Beschleunigung, Geschwindigkeitsbegrenzung oder Roll-Optimierung, auf:

I Fall 1 - Straffe Fahrweise:

Volles Ausschöpfen des VzG und der maximal möglichen Zugkraft unter Berücksichtigung, dass Wiener Neustadt zu früh erreicht wird. Verspätungen aus Wien Meidling können so aber ausgebügelt werden.

I Fall 2 - Roll-Optimierung:

Jener Fall, wo mittels minimalen Energieverbrauchs Wiener Neustadt noch innerhalb der fahrplanmäßigen Fahrzeit abzüglich 10% Fahrzeitreserve (vgl. 5.4.4.2) erreicht wird. Dies mit Einschaltung eines Ausrollabschnitts und nur unter der Bedingung, dass der Halt in Kottlingbrunn durch effiziente Steuerung mittels TMS vermieden wird.

I Fall 3 - definierte Beschleunigung:

Jener Fall, wo mittels minimalen Energieverbrauchs Wiener Neustadt noch innerhalb der fahrplanmäßigen Fahrzeit abzüglich 10% Fahrzeitreserve (vgl. 5.4.4.2) erreicht wird. Die maximal mögliche Zugkraft wird für diesen Fall nicht vollständig ausgenützt. Auch Fall 3 ist nur unter der Bedingung möglich, dass der Halt in Kottlingbrunn durch effiziente Steuerung mittels TMS vermieden wird.

I Fall 4 – Geschwindigkeitsbegrenzung:

Jener Fall, wo mittels minimalen Energieverbrauchs Wiener Neustadt noch innerhalb der fahrplanmäßigen Fahrzeit abzüglich 10% Fahrzeitreserve (vgl. 5.4.4.2) erreicht wird. Die maximal erlaubte Geschwindigkeit wird jedoch nicht vollständig ausgenützt. Dieser Fall ist ebenfalls nur unter der Bedingung möglich, dass der Halt in Kottlingbrunn durch effiziente Steuerung mittels TMS vermieden wird.

I Fall 5 - Worst-Case-Szenario:

Dieser Fall beinhaltet zwei zusätzliche Halte zu je 30 Sekunden, wobei das VzG sowie die maximal mögliche Zugkraft voll ausgeschöpft werden.

5.4.4.1 Grundlagen zur Energieberechnung

Die Energieberechnung basiert auf der Umlegung der bei einer Zugfahrt auftretenden Widerstände auf die dafür aufzuwendende Energie, mit Hilfe der Gleichungen (1), (2) und (3).

$$\text{Energie [J]} = [N * m] = [kg * m^2 * s^{-2}] \quad (1)$$

$$\text{Widerstände [N]} = [kg * m * s^{-2}] \quad (2)$$

$$E = \sum (W_i * l_i) \quad (3)$$

In weiterer Folge lässt sich der Energieverbrauch durch Umrechnung von Joule auf Kilowattstunden ermitteln, nach (4), (5) und (6).

$$1MJ = 1.000.000 J \quad (4)$$

$$1 kWh = 3,6 MJ \quad (5)$$

$$\text{Energie [kWh]} = \frac{\sum (W_i * l_i)}{3,6 * 10^6} \quad (6)$$

Der gesamte Fahrwiderstand einer Zugfahrt setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen, vgl. Abbildung 33. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass der Tunnelwiderstand in der Energieberechnung nicht mitberücksichtigt wurde. Die übrigen Widerstände sind in weiterer Folge kurz nach Veit (Veit und Walter 2012a) erklärt.

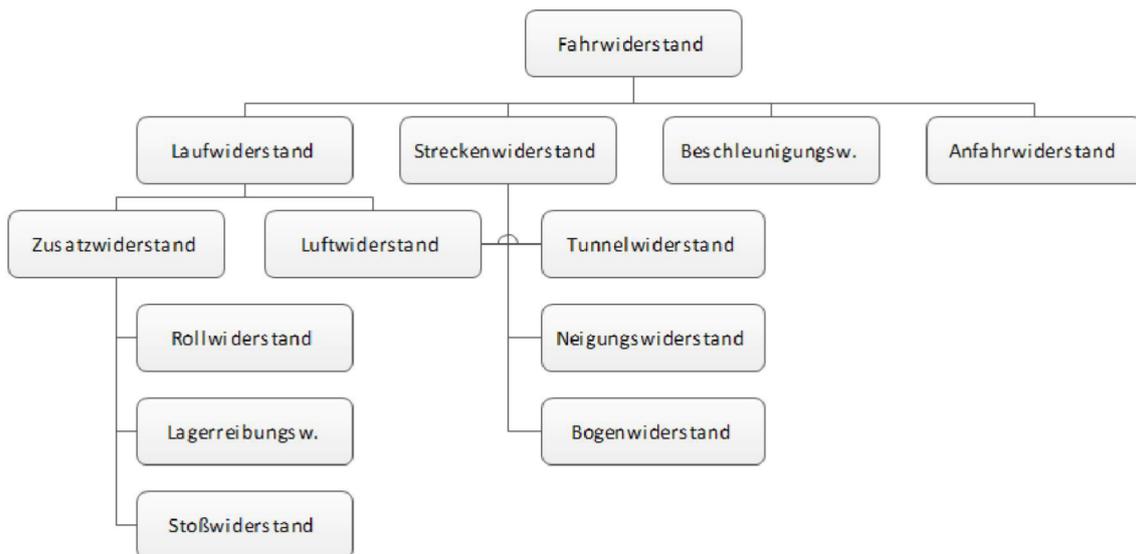


Abbildung 33: Zusammensetzung des Fahrwiderstands (Messner 2014, S. 11)

I Rollwiderstand W_R

Durch die Aufstandskraft P , die Radkraft, welche das Eigengewicht widerspiegelt, kommt es zu einer Zusammenpressung am Kontaktpunkt von Rad und Schiene. Entsteht eine zusätzliche Vorwärtsbewegung des Rades, geht der Kontaktpunkt in eine elliptische Kontaktfläche (Hertzsche Fläche) über. Der Angriffspunkt wird bei der „rollenden Reibung“ um den Hebelarm e versetzt. Bei Erhöhung der Aufstandskraft oder Geschwindigkeit, steigt auch der Rollwiderstand.

$$W_R = P * \frac{e}{r} \quad [N] \quad (7)$$

$$w_R = \frac{W_R}{P} = \frac{e}{r} \quad [N/kN] \text{ oder } [\%o] \quad (8)$$

P Aufstandskraft [kN]

e Hebelarm der Rollreibung [mm]

I Lagerreibungswiderstand W_{LA}

Dieser Widerstand entsteht aufgrund der Reibung, die bei der Leistungsübertragung innerhalb der unterschiedlichen Achslager der Fahrzeuge auftritt. Heutzutage sind Wälzlager Standard und Gleitlager werden kaum mehr eingesetzt.

$$W_{LA} * r_R = Q_L * \mu_L \frac{d}{2} \quad [N] \quad (9)$$

$$w_{LA} = \frac{W_{LA}}{Q} = \frac{Q_L}{Q} * \frac{d}{2 * r_R} * \mu_L = 0,120 * \mu_L * 1000 \quad [N/kN] \text{ oder } [\%o] \quad (10)$$

r_R Radhalbmesser [m]

Q_L Wagenkastengewicht [kN]

I Stoßwiderstand W_t

Ursachen für den Stoßwiderstand (Laufunruhewiderstand) sind Gleislage- bzw. Schienenfehler, wodurch das Fahrzeug in Abhängigkeit des Gestelltyps (zwei- und dreiachsige Wagen, Drehgestell-Wagen oder Starrrahmenlokomotiven) zum Schwingen anfängt.

$$W_t = t * Q * v \text{ [N]} \quad (11)$$

$$w_t = \frac{W_t}{Q} = t * v \text{ [N/kN] oder [\%o]} \quad (12)$$

t Stoßbeiwert [$h * N/kN * km$]

Q Radkraft [kN]

I Luftwiderstand W_L

Der Luftwiderstand ist abhängig von Fahrzeugform und -oberfläche, Luftgeschwindigkeit um das Fahrzeug sowie dem Anblaswinkel. Zwar ist die Größe des Widerstands lediglich von der Fahrgeschwindigkeit abhängig, wird jedoch durch folgende Annäherungsformel berechnet. Dadurch, dass die Geschwindigkeit quadratisch in den Widerstand eingeht, erhöht sich dieser bei steigender Geschwindigkeit um ein Vielfaches (Messner 2014, S. 78).

$$W_L = 3 * \left(\frac{v}{100}\right)^2 * G \text{ [N]} \quad (13)$$

$$w_L = 3 * \left(\frac{v}{100}\right)^2 \text{ [N/kN] oder [\%o]} \quad (14)$$

G Gewichtskraft [kN]

v Geschwindigkeit [m/s]

I Neigungswiderstand W_S

Der Neigungswiderstand ist abhängig von der Gewichtskraft des Zuges. Er nimmt in Abhängigkeit der Neigung linear zu (Messner 2014, S. 80). Die Gleichstellung des spezifischen Widerstands mit dem Neigungsverhältnis s ist aufgrund der geringen Neigungen im Eisenbahnwesen möglich. Bei einer maximalen Längsneigung von 12,5‰ sind Sinus und Tangens von Neigungswinkel α annähernd gleich.

$$W_S = G * \sin\alpha * 1000 \text{ [N]} \quad (15)$$

$$w_S = \sin\alpha * 1000 \approx \tan\alpha * 1000 = s \text{ [N/kN] oder [\%o]} \quad (16)$$

G Gewichtskraft [N/kN]

α Neigungswinkel [$^\circ$]

I Bogenwiderstand W_K

Der Bogenwiderstand begründet sich auf der Steifigkeit des Eisenbahnsystems (d.h. der Unlenkbarkeit der Fahrzeuge) und den Fliehkräften, die in einer Bogenfahrt auftreten. Dieser ist abhängig von geometrischen Bedingungen (wie Krümmungsradius oder Spurweite), Radstand und Kurvenbeweglichkeit der Räder sowie dem Gleiszustand (Spurkranz- bzw. Schienenabnutzung). Je größer der Bogen, desto geringer der Widerstand in der Bogenfahrt (Messner 2014, S. 81).

$$W_K = \frac{K}{r} * m * g \text{ [N]} \quad (17)$$

$$w_K = \frac{K}{r} \text{ [N/kN] oder [\%]} \quad (18)$$

K Bogenwiderstandskoeffizient [-]

r Radius [m]

I Beschleunigungswiderstand W_a

Zum Beschleunigen muss die Trägheitskraft (sprich der Beschleunigungswiderstand) des Zuges überwunden werden. Diese Kraft setzt sich aus der Translationsbeschleunigung des gesamten Zuges und der Rotationsbeschleunigung (aufgrund der einzelnen rotierenden Massen von Radansätze und Getriebe) zusammen. Der Massenfaktor beschreibt den Anteil der Rotationsenergie (Messner 2014, S. 24).

$$W_a = m * \xi * a \text{ [N]} \quad (19)$$

m Masse [kg]

ξ Massenfaktor [-]

I Anfahrwiderstand W_{Anf}

Der Anfahrwiderstand hat seinen Ursprung in der Drehbewegung des Lagers. Die Intensität ist von dem Lagertyp (Gleit- oder Wälzlager), der Temperatur und der Standzeit abhängig.

$$W_{Anf} = f_{W_{Anf}} * m * g \text{ [N]} \quad (20)$$

$f_{W_{Anf}}$ Anfahrwiderstandszahl [%]

m Masse [kg]

5.4.4.2 Eingangparameter der Energieberechnung der fünf Untersuchungsfälle

Im originalen Energieberechnungsprogramm wurde angenommen, dass der Zug immer am Geschwindigkeitslimit (VzG) fährt, sobald er dieses erreicht. Die Beschleunigung über die gesamte Zeit wurde als konstant angenommen, u.a. wegen des nicht voraussehbaren Verhaltens der Triebfahrzeugführer/innen. Auslaufphase wurde ebenfalls keine berücksichtigt. In der vorliegenden Arbeit wurden diese Parameter zur Ermittlung unterschiedlich energieeffizienterer Fahrweisen auf dem betrachteten Streckenabschnitt abgeändert.

I Beschleunigung in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit

Durch die Zuordnung eines bestimmten Beschleunigungswerts für definierte Geschwindigkeitsabschnitte geht die Beschleunigung abschnittsweise nach wie vor als konstanter Wert in die Berechnung ein. Es findet jedoch eine genauere Abbildung einer realen Beschleunigung statt. Diese lineare Annäherung soll zeigen, dass die Beschleunigung abhängig von der maximal möglichen Zugkraft und den Widerständen mit höheren Geschwindigkeiten abnimmt. Die Beschleunigung für folgende Geschwindigkeitsabschnitte ergeben sich zu:

Tabelle 6: Konstante Beschleunigung in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit

Geschwindigkeit V [km/h]	Zugehörige Beschleunigung a [m/s ²]
V bis 100 km/h	a = 0,4
V bis 140 km/h	a = 0,36
V bis 160 km/h	a = 0,27

Anmerkung: Diese Werte stammen aus einer am Institut für Eisenbahnwesen der TU Graz verwendeten Fahrzeitberechnung, wo die Beschleunigung geschwindigkeits- und widerstandsabhängig für eine Taurus 1016 berechnet wurde. Aus Sicht der Fahrzeugdaten können die Werte für das angewendete Berechnungsbeispiel, i.e. eine Taurus 1116, übernommen werden, da sich die zwei Ausführungen nur hinsichtlich von Strom-, Funk- und Zugbeeinflussungssystemen unterscheiden (ÖBB-Produktion GmbH). Die Beschleunigungswerte sind jedoch mit folgender Ungenauigkeit belastet: die Widerstände wurden, im Gegensatz zum Energieberechnungsprogramm, durch empirische Werte ermittelt.

I Einbeziehung einer Ausrollphase

Um das Ausrollen zu berücksichtigen, wurde ein konstanter negativer Beschleunigungswert für die gesamte Ausrollphase angenommen. Dies soll als vereinfachte Annäherung dienen und eine Abbildung der Ausrollphase ermöglichen. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass in der Realität keine konstante Verzögerung stattfindet, sondern diese von den Fahrwiderständen (und der Masse) abhängt und sich daher dynamisch mit der Geschwin-

digkeit ändert (Rao 2017). Als konstanter Richtwert wurde jener von Sivanagaraju (Sivanagaraju et al. 2010) herangezogen, welcher ca. $0,15 \text{ km/h/s}$ beträgt. Dies entspricht einer angenommenen Verzögerung für die Ausrollphase von $a_{\text{ausrollen}} = -0,042 \text{ m/s}^2$.

Für den tatsächlichen Bremsvorgang wurde weiterhin ein konstanter Wert von $-0,4 \text{ m/s}^2$ angenommen. Auch dieser ist nur ein Annäherungswert.

I Fahrplanmäßige Fahrzeit

Prinzipiell ist es im Beharrungsbereich möglich zu jedem Zeitpunkt auszurollen. Dies kann sich jedoch negativ auf die im Fahrplan vorgegebene Fahrzeit auswirken, die dann nicht mehr eingehalten werden kann. Im betrachteten Streckenabschnitt ist die fahrplanmäßige Fahrzeit mit 23 Minuten vorgegeben (ÖBB 2018a). Bei 10% Fahrzeitreserve stehen 20,7 Minuten zwischen Abfahrt in Wien Meidling und Ankunft in Wiener Neustadt zur Verfügung.

I Weitere Eingangsparameter

Äußere Einflüsse, wie Langsamfahrstellen bleiben in der vorliegenden Energieberechnung unberücksichtigt. Der Nebenverbrauch von 3 kWh pro Minute bleibt ebenso unverändert und wird weiterhin als konstant über den betrachteten Streckenabschnitt angenommen. Der Personenbesetzungsgrad geht ebenso mit 100% ein. Da bei einer Rückspeisrate von 0% die Abweichungen im Energieverbrauch zwischen realen Messdaten und mathematischer Abbildung am geringsten sind, geht die Rückspeisung bei den fünf Untersuchungsfällen ebenso mit 0% in die Berechnung ein.

5.4.4.3 Vorgehensweise der Energieberechnung der fünf Untersuchungsfälle

Um den Energiebedarf unterschiedlicher Fahrweisen zu demonstrieren, wurden die jeweiligen Parameter soweit darauf abgestimmt, dass der Zug innerhalb der fahrplanmäßigen Fahrzeit (inkl. 10% Fahrzeitreserve) mit geringstem Energieverbrauch sein Ziel erreicht. Für die einzelnen Fälle heißt dies:

- Fall 1: die Beschleunigungswerte sowie das VzG wurden zu 100% ausgenutzt, wodurch eine straffe Fahrweise widergespiegelt wird.
- Fall 2: Der Beginn der Ausrollphase wurde so früh wie möglich begonnen.
- Fall 3: Iterative Ermittlung zu welchem Prozentanteil die Beschleunigungswerte des jeweiligen Geschwindigkeitsabschnitts ausgenutzt werden können (d.h. zu wie viel Prozent die maximale Zugkraft ausgenutzt werden kann).
- Fall 4: Iterative Ermittlung zu welchem Prozentanteil das vorgegebene VzG in den bestimmten Bereichen ausgeschöpft werden soll.
- Fall 5: Worst-Case-Szenario: Zwei fiktive Halte bei km 16,0 und km 32,0 wurden eingefügt, die jeweils 30 Sekunden in Anspruch nehmen und einen unplanmäßige Halt

widerspiegeln sollen. Das VzG sowie die mögliche Beschleunigung wurden jedoch voll ausgenutzt.

5.4.4.4 Ergebnisse der Energieberechnung

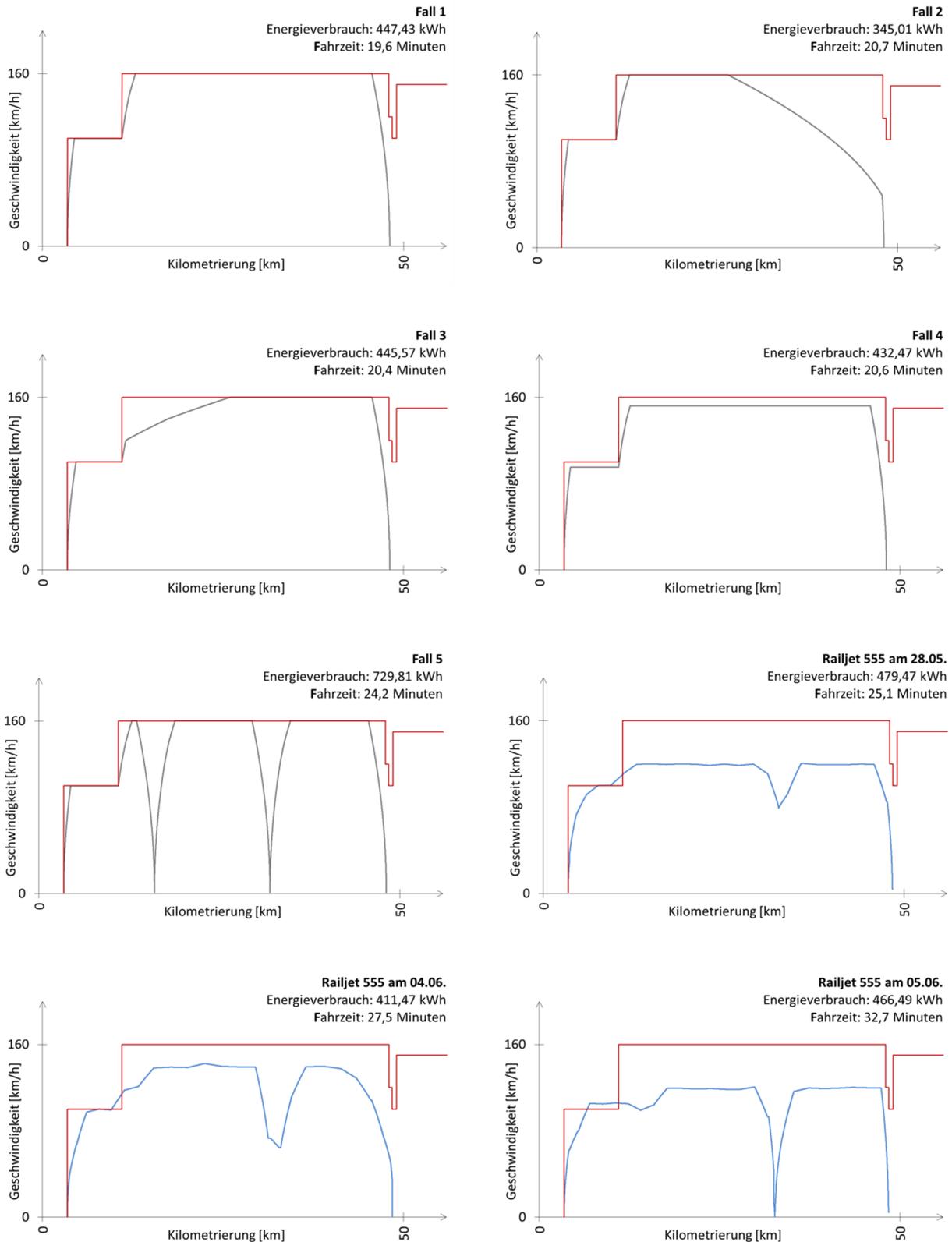
Abbildung 34 zeigt die Geschwindigkeitsverläufe der fünf Untersuchungsfälle sowie den drei mathematisch abgebildeten Messfahrten des Railjets 555 zwischen Wien Meidling und Wiener Neustadt. Der Energieverbrauch des ersten Falls (straffe Fahrweise) dient für weiterführende Vergleiche als Richtwert, siehe Tabelle 7. Jene Fälle, die eine energiesparsamere Fahrweise aufweisen als Fall 1 sind grün hinterlegt. Fälle, die mehr Energie benötigen als bei straffer Fahrweise, sind rot hinterlegt. Die Fahrweisen, die nicht innerhalb der fahrplanmäßigen Fahrzeit von 23 Minuten in Wiener Neustadt eintreffen, sind rot markiert.

Der Energieverbrauch für den Abschnitt zwischen Wien Meidling und Wiener Neustadt bezieht sich lediglich auf den Verbrauch ab dem Zeitpunkt des Losfahrens bis zum Halt in Wiener Neustadt. Während der Energieverbrauch aufgrund von einer Standzeit an Start- und Zielbahnhof unberücksichtigt blieben, fließt der Verbrauch bei Stopps auf der Strecke jedoch in die Berechnung mit ein.

Tabelle 7: Gegenüberstellung der fünf Untersuchungsfälle und den Messfahrten

Fall bzw. mathematisch abgebildete Messfahrt	Fahrzeit (inkl. Stehzeiten) [min]	Fahrzeit-zunahme im Vgl. zu Fall 1	Energieverbrauch [kWh]	Energieverbrauch im Vgl. zu Fall 1
1 – Straffe Fahrweise	19,6	-	447,43	-
2 – Roll-Optimierung	20,7	+6%	345,01	-22,89%
3 – definierte Beschleunigung	20,4	+4%	445,57	-0,42%
4 – Geschwindigkeitsbegrenzung	20,6	+5%	432,47	-3,34%
5 – Worst-Case-Szenario	24,2	+23%	729,81	+63,11%
Railjet 555 am 28.05.	25,1	+28%	479,47	+7,16%
Railjet 555 am 04.06.	27,5	+40%	411,47	-8,04%
Railjet 555 am 05.06	32,7	+67%	466,49	+4,26%

Potentiale und Wirkung von ATO

**Legende**

- Geschwindigkeitsverlauf Untersuchungsfall
- Geschwindigkeitsverlauf Messfahrt
- VzG

Abbildung 34: Geschwindigkeitsverläufe der fünf Untersuchungsfälle und der Messfahrten

Die Ergebnisse zeigen, dass durch Zunahme der Fahrzeit eine Reduktion des Energieverbrauchs erzielt werden kann, vgl. Marinov (Marinov 2018, S. 19). Je nach Strategie aus Kapitel 5.4.3 kann eine unterschiedlich hohe Energieeinsparung erzielt werden. Das Einführen einer Ausrollphase zeigt das größte Einsparungspotential mit etwa 23% bei nur 6% längerer Fahrzeit. Zu erwähnen ist, dass in diesem Fall auch die fahrplanmäßige Fahrzeit (inkl. 10% Fahrzeitreserve) eingehalten wird. Dies macht deutlich, dass ein Verfrühtes Ankommen in Wiener Neustadt nicht zielführend ist, da mit einer 6% höheren Fahrzeit das Ziel nach wie vor pünktlich erreicht und zusätzlich Energie eingespart werden kann.

Fall 3 zeigt, dass bei mäßiger Beschleunigung nur geringfügig weniger Energie verbraucht wird (weniger als 1%). Dies ist auf eine Ankunft innerhalb der fahrplanmäßigen Fahrzeit zurückzuführen. Einerseits muss der Zug zum pünktlichen Erreichen des Ziels auf eine gewisse Geschwindigkeit beschleunigen. Dadurch wird der Verbrauch aufgrund des Beschleunigungswiderstandes und der geschwindigkeitsabhängigen Widerstände (Luft- und Stoßwiderstand) nur minimal reduziert. Andererseits braucht der Zug aufgrund eines langsameren Beschleunigungsvorgangs länger nach Wiener Neustadt als in Fall 1, wodurch zusätzlicher Nebenverbrauch entsteht.

Ein geringerer Energieverbrauch kann durch eine Geschwindigkeitsbegrenzung erreicht werden. Im Untersuchungsfall 4 werden die unterschiedlichen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten zwischen 70-95% ausgenutzt, wodurch ein rechtzeitiges Ankommen in Wiener Neustadt (mit 10% Fahrzeitreserve) gewährleistet ist. Dies führt, vergleichsweise zu Fall 1, zwar zu einer Fahrzeiterhöhung von 5%, jedoch zu 3% weniger Energieverbrauch. Das Energieeinsparungspotential durch eine Geschwindigkeitsbegrenzung ist insbesondere auf den Einfluss des Luft- und Stoßwiderstands zurückzuführen (siehe weiter unten).

Hinsichtlich des fünften Berechnungsfalls ist zu erwähnen, dass bei zwei ungeplanten Stopps Wiener Neustadt, auch ohne Fahrzeitreserve, nicht rechtzeitig erreicht werden kann. Aufgrund der zusätzlichen Anfahr- und Bremsvorgänge ist der Energieverbrauch um 63% höher als bei Fall 1. Der Verbrauch aus der Beschleunigung beträgt mehr als das Doppelte als bei straffer Fahrweise. Zudem geht der Verbrauch aus dem Anfahrwiderstand zwei Mal mit ein. Hinsichtlich des Anfahrwiderstands sei an dieser Stelle erwähnt, dass der darauf umgelegte Verbrauch nur einen Anteil $\ll 1\%$ des gesamten Energieverbrauchs ausmacht. Hingegen erhöht der entstehende Verbrauch aus dem Beschleunigungswiderstand, welcher ebenso zwei Mal anfällt, den Gesamtverbrauch wesentlich mehr. Dies ist in Abbildung 35 ersichtlich, worin der jeweilige Verbrauch der Widerstände anteilig dargestellt wird. Die bei Fall 5 um ca. 23% längere Fahrzeit als bei Fall 1 führt auch zu einem starken Anstieg (ca. 23%) des Nebenverbrauchs. Das Worst-

Case-Szenario untermauert, dass ein effizientes Verkehrsmanagement eine zentrale Rolle spielen muss. Dadurch kann, neben energiesparender Fahrweise, erheblich Energie reduziert werden.

Bei den drei mathematisch abgebildeten Messfahrten fällt auf, dass Wiener Neustadt verspätet erreicht wird. Vergleichsweise zu Fall 1 – Straffe Fahrweise wird bei zwei Messfahrten bis zu fast 8% mehr Energie verbraucht. Der Energieverbrauch bei den realen Messfahrten (siehe Tabelle 5) fällt sogar noch höher aus (bis zu 11%), was auf die Ungenauigkeiten im mathematischen Modell zurückzuführen ist.

Der geringere Energieverbrauch des Railjets 555 am 04.06. beruht darauf, dass er im Vergleich zur Messfahrt am 05.06. nicht anhält. Dadurch fallen Nebenverbrauch sowie der Verbrauch aus der erneuten Beschleunigung weg. Verglichen mit der Messfahrt am 28.05. wird die Strecke der Fahrt am 04.06. auch mit einer geringeren Geschwindigkeit zurückgelegt, wodurch auch der Verbrauch aufgrund des Luftwiderstands verringert wird. Trotz allem ist der niedrigere Energieverbrauch beim Railjet 555 am 04.06. nicht als energiesparende Fahrweise zu werten, da ein wichtiger Aspekt – die Einhaltung des Fahrplans – nicht erfüllt wird. Wie bereits diskutiert, kann dies zu weiteren Folgeverspätungen führen und andere Züge zum Halt zwingen. Dies bewirkt einen Energieverbrauch an anderen Bereichen des Netzes. Zudem kommt, dass die mathematisch nachgebildete Messfahrt etwa 11% weniger Energie verbraucht, als tatsächlich gemessen wurde.

Wie bereits bei manchen Untersuchungsfällen erwähnt, kann aufgrund des Einflusses des Luftwiderstands Energie eingespart werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Luftwiderstand mit zunehmender Geschwindigkeit ins Quadrat ansteigt. Der Verbrauch aus dem Luftwiderstand ist daher in den betrachteten Untersuchungsfällen unterschiedlich. Bei den drei Messfahrten fällt auf, dass der Verbrauch aus dem Luftwiderstand bis zu 50% geringer ist als bei straffer Fahrweise. Der, aufgrund der längeren Fahrzeit, entstehende Nebenverbrauch gleicht Einsparungen aus dem Luftwiderstand jedoch wieder aus. Fall 2 und 4 zeigen ebenso bis zu 18% weniger Verbrauch aus dem Luftwiderstand aufgrund der geringeren gefahrenen Geschwindigkeit. Auffällig ist hier aber, dass der zusätzliche Nebenverbrauch deutlich geringer ist als der reduzierte Verbrauch aus dem Luftwiderstand. Es ist daher anzunehmen, dass ab einer gewissen Reduktion der Geschwindigkeit und damit erhöhten Fahrzeit keine Energieeinsparungen mehr möglich sind. Bei einer Reduktion des Nebenverbrauchs, der im Berechnungsmodell konstant mit 3 kWh pro Minute angenommen wird, könnten weitere Einsparungen auch bei niedrigeren Geschwindigkeiten erzielt werden.

Auch hinsichtlich des Energieverbrauchs aufgrund des Stoßwiderstands sind höhere Werte bei Fall 1 und 3 zu vermerken, da diese über die gesamte Strecke mit höheren Ge-

schwindigkeiten verkehren als die übrigen Fälle. Der Einfluss aufgrund des Stoßwiderstands ist jedoch deutlich geringer. Er ist zwar auch, wie der Luftwiderstand, abhängig von der Geschwindigkeit, jedoch geht er nur linear in die Berechnung ein.

Die wohl größte Einsparung liegt beim anfallenden Verbrauch aus dem Beschleunigungswiderstand, welcher mit der Beschleunigungs- sowie Verzögerungsphase in Zusammenhang gebracht werden kann. Wie bereits erklärt, sind Einsparungen bei definierter Beschleunigung aufgrund der einzuhaltenden Fahrzeit nur in geringem Ausmaß möglich. Bei genauerer Betrachtung der unterschiedlichen Untersuchungs- sowie Messfahrten zeigt sich aber der Einfluss der Verzögerung. Beispielweise kann aufgrund des Bremsverhaltens (Ausrollphase in Fall 2), Vermeidung unnötiger Stopps (Fall 5) oder beim Bremsen bei niedrigeren Ausgangsgeschwindigkeiten (Railjet am 04.06.) der Verbrauch des Beschleunigungswiderstands wesentlich reduziert werden, siehe auch Abbildung 35.

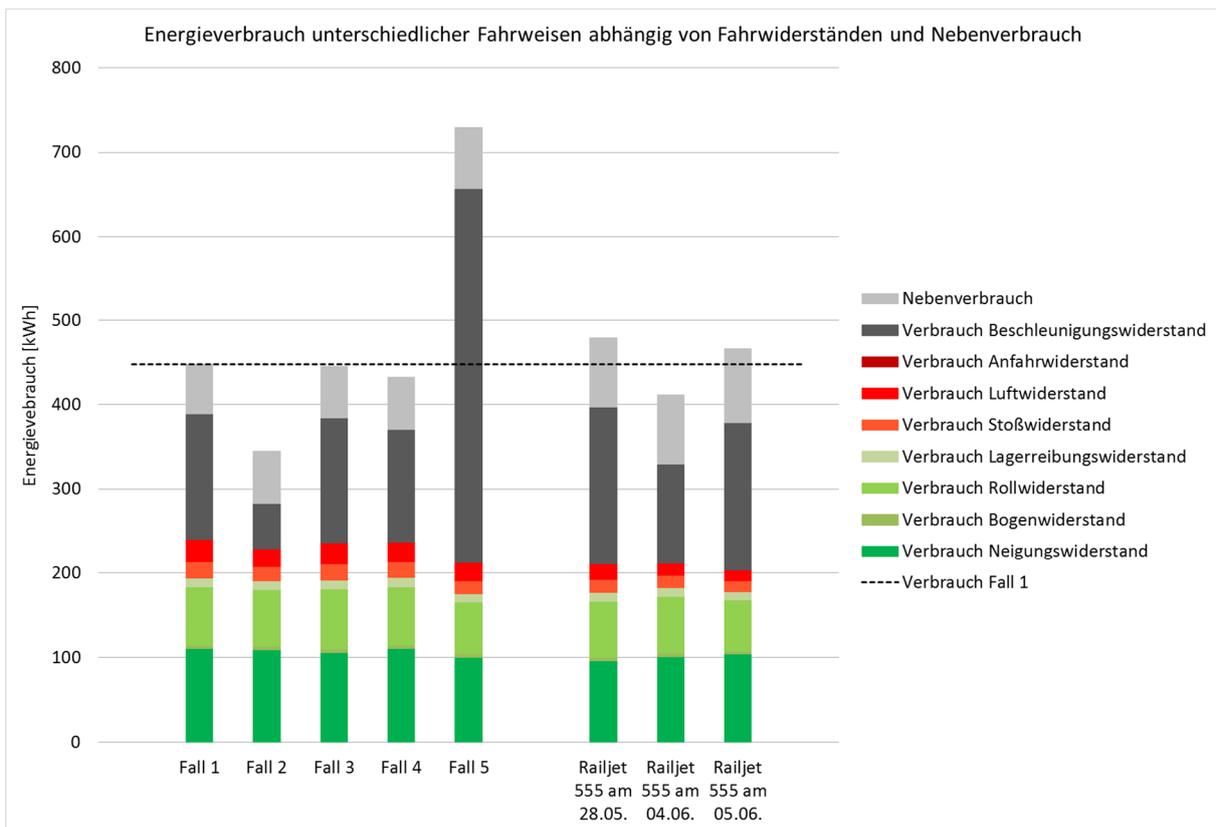


Abbildung 35: Energieverbrauch unterschiedlicher Fahrweisen abhängig von Fahrwiderständen und Nebenverbrauch

Wie rechnerisch gezeigt werden konnte, ist durch unterschiedliche Fahrweise eine Reduktion des Energieverbrauchs möglich. Eine positive Wirkung zur Energieeinsparung erzielen bereits Fahrerassistenzsysteme der GoA1, welche dem/der Fahrer/in optimierte Fahrprofile vorgeben können, wie z.B. jene aus Fall 2 oder 4. Die Verknüpfung an ein TMS ist aus dem Grund sinnvoll, da Verspätungen hinsichtlich unnötiger Stopps eliminiert bzw. verringert werden können und auch dies Einsparungen zur Folge hat. Die Einführung von GoA2 aufgrund der Antriebs- und Bremssteuerung des ATO Systems hätte den Vorteil, dass vorgegebene Geschwindigkeitsprofile präziser umgesetzt werden können als durch den/die Lokführer/in.

5.5 Kosten

Prinzipiell können durch ATO Kosten eingespart werden. Dies macht sich beispielsweise bei der Kosteneinsparung durch energieeffizientes Fahren bemerkbar. Die Energiekosten eines Zuges betragen 20-30% der Betriebskosten. Durch eine energieeffiziente Fahrweise, d.h. nicht schneller zu fahren als notwendig bzw. ohne unnötige Anfahr- und Beschleunigungsvorgänge, können durchschnittlich 10% an Energiekosten eingespart werden. Beispielsweise reduzieren Fahrerassistenzsysteme der GoA1 im Schienengüterverkehr die Kosten für Energie von 20% auf 5%, wodurch 3% der gesamten Betriebskosten eingespart werden können (Hunscha 2018, S. 45). Zudem führt energiesparende Fahrweise zu einer Verringerung des Verschleißes von fahrzeug- und streckenseitigen Komponenten (Barnard et al. 2012b, S. 3). Reduzierte Antriebs- und Bremsvorgänge führen auch zu einer Verringerung von Wartungsarbeiten und in weiterer Folge zu einer Kostenreduktion (Gralla 2016b, S. 15). (Winter et al. 2009, S. 7)

Aus Kapitel 4 geht jedoch hervor, dass die Nutzung von ATO eine gewisse strecken- und fahrzeugseitige Ausrüstung benötigt. Alleine die Umrüstung auf entsprechende Zugsicherungssysteme, welche als Grundvoraussetzung zu sehen ist führt, Kosten mit sich.³ Zudem kommen noch Aspekte wie Hinderniserkennung und Gefahrenraumsicherung, welche ebenfalls Mehrkosten verursachen. (Mächler 2017, S. 5)

Kostenreduktion durch Einsparung von Triebfahrzeugführer/innen ist mit Vorsicht zu genießen. Erstens hängt dies von der Automatisierungsstufe ab (Shift2Rail 2015, S. 192). Zweitens werden nicht alle Triebfahrzeugführer/innen mit einem Schlag durch vollautomatische Züge ersetzt, wodurch die Personaleinsparung sich nur schleppend bemerkbar machen wird. Drittens schaffen neue Bereiche, wie Cyber-Security, Betriebsfernsteue-

³ Lediglich in ETCS Level 3 (für Fahren im beweglichen Raumabstand) könnte durch Wegfall der streckenseitigen Ausrüstung eine Kosteneinsparung ermöglicht werden. Wobei hierfür alle auf der Strecke verkehrenden Fahrzeuge mit ETCS Level 3 ausgestattet sein müssen, damit Fahren im „Moving Block“ sicherheitstechnisch überhaupt möglich ist, wodurch wieder Kosten für die Fahrzeugausrüstung entstehen. (Randelhoff 2016)

rung oder Überwachung und Wartung der technischen Lösungen neue Arbeitsplätze. Außerdem muss bedacht werden, desto komplizierter ein System ist, umso mehr Schulung und Training sind gefragt, was ebenso Kosten verursachen kann (Schaafsma 2017). Der Nutzen durch die Einsparung von Triebfahrzeugführer/innen ist daher nur dann gegeben, wenn „die Kosten der dafür erforderlichen technischen Lösungen die Einsparungen an Personalkosten nicht übersteigen“ (Pachl 2017, S. 12). (Mächler 2017, S. 6)

Hinsichtlich des Verschubs ist eine Kostenreduktion bei erhöhter Automatisierung (automatische Kupplung sowie Bremsüberprüfung) insofern gegeben, dass das Verschiebepersonal wegfällt - ein wesentlicher Faktor in Anbetracht der Tatsache, dass der Verschub (in Österreich) überwiegend nachts stattfindet.

Abschließend sei zur Einsparung von Kosten angemerkt, dass dies direkten Einfluss auf die Attraktivität hat. Durch Einsparung kann zum einen in Verbesserungen investiert werden oder auch für Kunden/innen günstigere Angebote geschaffen werden. (Shift2Rail 2015, S. 193)

5.6 Systembezogene Potentiale und Strategien

Um abschließend beantworten zu können, welche Systeme welche Potentiale ausnützen können bzw. welche Automatisierungsstufen für welche eine Chance bieten, ist folgendes zu bedenken:

- I welches Betriebsziel verfolgt werden soll (vgl. Kapitel 4.2.3) und
- I welche Migrationsstrategie (vgl. Kapitel 4.2.4) sinnvoll ist.

Zudem sei angemerkt, dass gewisse Potentiale nicht alleine durch ATO ausgenutzt werden können. Die Einführung von technischen Einrichtungen, wie eine kontinuierliche Zug-sicherung, Hinderniserkennung oder die Verknüpfung zu einem TMS sind teils notwendig. Im Güter- und Personenverkehr stellt hier besonders das Thema der Interoperabilität eine große Herausforderung dar (Pelz 2016, S. 5).

In Anbetracht des Diskutierten kann durch energiesparende Fahrweise, bereits ab GoA1 mit DAS, Energie eingespart werden, wodurch die Kosten wesentlich gesenkt werden können. Dies hat auf alle Systeme bereits mit der Einführung von GoA1 positive Auswirkungen. Besonders aber der Güterverkehr kann davon profitieren, da eine Kostensenkung die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber dem Straßengüterverkehr wesentlich steigern kann. Ein energiesparender Fahrstil bietet besonders für Nebenbahnen die Chance Kosten

zu senken. Geprägt durch viele Haltestellen kann ein optimierter Beschleunigungs- und Bremsvorgang den Energieverbrauch senken (Spalvieri 2010).

Die Verknüpfung mit einem TMS (bestenfalls Disposition mit Echt-Zeit-Fahrplanerstellung) und der präzisen Fahrweise durch ein ATO System kann nicht nur die Kapazität erhöht werden. Verbesserte Pünktlichkeit und Fahrplanverlässlichkeit schaffen für Kunden/innen einen Mehrwert. Mehr Züge und weniger Wartezeit oder das schnellere Befördern von Gütern beeinflusst die Servicequalität. Dies betrifft Personen- und Güterverkehr, da durch bessere Disposition und Verkehrsabwicklung die Wettbewerbsfähigkeit gesteigert werden kann. Im Hochgeschwindigkeitspersonenverkehr spielt dies eine Rolle, da der Schienenverkehr gegenüber Flugzeug und PKW konkurrenzfähig bleiben muss (Nießen et al. 2017, S. 36). Mittels TMS kann der Verkehr nachfrageorientierter geplant werden, was besonders für kostspielige Nebenbahnen eine Alternative bietet. Eine weitere Möglichkeit wäre der Einsatz von kleinen vollautomatisch geführten Gefäßen auf Nebenbahnen mit satellitenbasierter Zugsicherung. Damit könnte auch die Anzahl der Züge ohne Personalerhöhung gesteigert und das Angebot somit attraktiviert werden. Ergebnisse aus einer Studie zeigen, dass mit vollautomatischen Zügen im Regionalverkehr die Wirtschaftlichkeit dieser erhöht werden kann (N.N. 2013).

Die niederländische Infrastruktur Manager Pro Rail sehen die Chancen von GoA2 besonders im Bereich des Personenverkehrs, da durch ATO in Verbindung mit einem TMS die Geschwindigkeitsprofile optimal berechnet werden können und so Kapazitätsprobleme reduziert werden könnten. Besonders betont wird, dass ein TMS bei dichtem Verkehr von großem Vorteil ist, da die Fahrprofile optimaler berechnet werden können und somit ein sinnvolles „Slot-Management“ betrieben werden kann. Momentan werden Anwendungsfälle untersucht, wie beispielsweise in Eindhoven und Amsterdam, wo 10 Personenzüge pro Stunde kaum Platz für Güterverkehr einräumen. Eine optimale Berechnung durch ATO und TMS könnten Slots für Güterzüge freimachen, wodurch Mischverkehrsstrecken optimaler genutzt werden können. Ein weiteres Beispiel ist Groningen, wo zusätzliche Infrastruktur zu kostspielig wäre, mit GoA2 die Kapazitätsprobleme aber gemeistert werden könnten. (Schaafsma 2017). Im Rahmen der Neukonzipierung des Thameslink in London wird durch ATO over ETCS die Kapazität für den im Zentrum liegenden und mit Kapazitätsproblemen behafteten Streckenabschnitt verbessert. Durch ETCS Level 2 lassen sich die Blockabstände im zentralen Abschnitt verringern und die Führung erfolgt aufgrund des ATO Systems präziser (Emery 2017, S. 7).

Potentiale ab GoA3 im Personenverkehr (ob auf Haupt- oder Nebenbahnen) sind mit Vorsicht zu genießen, da diese nur mit adäquater fahrzeug- und streckenseitiger Ausrüstung für Hinderniserkennung und Gefahrenraumsicherung genutzt werden können – wodurch Investitionen erforderlich sind. Nachdem im Personenverkehr (auf Hauptbahnen) Kapazi-

tätsengpässe auf der bestehenden Infrastruktur eine Herausforderung sind (Pelz 2016, S. 5), kann bereits GoA2 mit entsprechenden TMS-Lösungen Abhilfe schaffen. In der Schweiz wird GoA2 als Chance für den Personenverkehr gesehen (Schneider 2017). Es bleibt fraglich, ob weitere fahrzeug- und streckenseitige Investitionen zur Einführung von GoA3 oder GoA4 sinnvoll und notwendig sind.

Hinsichtlich des Fahrkomforts verspricht ATO bereits ab GoA2 Verbesserungen. Aggressive Fahrstile können durch das ATO System ausgeglichen und Zwangsbremungen größtenteils vermieden werden. Eine weitere Erhöhung der Automatisierungsstufe wäre daher für den Personenverkehr nicht zwingend nötig.

Im Güterverkehr zeichnen sich die Potentiale insbesondere im Verschubetrieb ab. ATO kann die Sicherheit und Effizienz steigern. Durch die Einführung von intelligenten Güterzügen, welche automatisch Kuppeln und die Bremsprüfung übernehmen, kann eine Personal- und damit auch Kosten- und Zeiteinsparung erreicht werden. Mehr Automatisierung führt daher zur Kosteneinsparung u.a. wegen weniger Nachtarbeit und Zeiteinsparung aufgrund beschleunigter Arbeitsabläufe. GoA4 bietet daher besonders für den Verschub eine große Chance, da eine Arbeitsreduktion von 30-40% möglich wäre (Schneider 2017). Schnellere Abläufe und eine Kostenreduktion haben Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber dem Straßengüterverkehr. Der Einsatz von modernen automatisierten Kupplungsvorgängen und die Reduktion von Personal, welches sich direkt im Gleisbereich befindet, tragen dazu bei, dass die Sicherheit im Verschub mit GoA4 gesteigert werden kann.

Die nachstehende Tabelle dient als Zusammenfassung der Potentiale, die unterschiedliche Systeme aufgrund von weiterer Automatisierung erreichen können.

Tabelle 8: Systembezogene Potentiale von ATO

	Hauptbahnen	Nebenbahnen
Misch- verkehr	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Besseres Slot Management aufgrund Verknüpfung mit TMS und präziser Fahrweise (ab GoA2) → Verbesserte Pünktlichkeit, Einhaltung der Fahrpläne → Kundenzufriedenheit ▪ Mehr Komfort für Personenverkehr ab GoA2 ▪ Erhöhte Sicherheit (ab GoA3 nur unter bestimmten Voraussetzungen) ▪ Energiesparende und präzise Fahrweise (ab GoA1) → Kosteneinsparung aufgrund Energieeinsparung ▪ Kostengünstigeres Angebot 	
Personen- verkehr	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kapazitätserhöhung aufgrund Verknüpfung mit TMS und präziser Fahrweise (ab GoA2) → Verbesserte Pünktlichkeit, Einhaltung der Fahrpläne → Kundenzufriedenheit ▪ Mehr Komfort ab GoA2 ▪ Erhöhte Sicherheit (ab GoA3 nur unter bestimmten Voraussetzungen) ▪ Energiesparende und präzise Fahrweise (ab GoA1) → Kosteneinsparung ▪ Kostengünstigeres Angebot 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nachfrageorientierte Verkehrsplanung mittels TMS ▪ Mehr Komfort ab GoA2 ▪ Erhöhte Sicherheit durch Automatisierung an Bahnübergängen ▪ Erhöhte Sicherheit durch automatische, satellitenbasierte Zugbeeinflussung (GoA1) ▪ Einsparung durch energiesparende Fahrweise (ab GoA1) → Kosteneinsparung ▪ Kleine vollautomatische Gefäße, die in kurzen Intervallen verkehren → Pünktlichkeit gewährleistet ▪ Kostengünstigeres bzw. attraktiveres Angebot
Güter- verkehr	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verknüpfung mit TMS und präziser Fahrweise (ab GoA2) → Verbesserte Pünktlichkeit, Einhaltung der Fahrpläne → Kundenzufriedenheit ▪ Energiesparende und präzise Fahrweise (ab GoA1) → Kosteneinsparung aufgrund Energieeinsparung ▪ Kostengünstigeres Angebot 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nachfrageorientierte Verkehrsplanung mittels TMS ▪ Einsparung durch energiesparende Fahrweise (ab GoA1) → Kosteneinsparung
	Verschub: Einsatz von intelligenten Zügen (GoA4) → Erhöhte Sicherheit, Personaleinsparung, weniger Nacharbeit, Kostensenkung	

6 Ausblick und Zusammenfassung

In Anbetracht der bereits vorhandenen Automatisierung auf der Vollbahn kann festgehalten werden, dass diese bereits zum derzeitigen Zeitpunkt fortgeschritten ist. Aus technischer Sicht ist es möglich, die Energieeffizienz weiter zu steigern, was bereits u.a. in Form von Fahrerassistenzsystemen (Driver Advisory Systems, DAS) umgesetzt wird. Im Hinblick auf die Entwicklungen der Schweiz ist durch die adaptive Zuglenkung sogar schon ein netzübergreifendes Traffic Management zur Energieverbrauchseinsparung möglich. Der derzeitige Einsatz von ATO over ETCS (Automatic Train Operation over European Train Control System) in London zeigt, dass auch Kapazitätsengpässe durch einen höheren Automatisierungsgrad technisch gemeistert werden können. Der Vergleich mit anderen Verkehrsträgern macht deutlich, dass die Bahn diesen hinsichtlich der Automatisierung nicht unterlegen ist. Sie ist jedoch gefordert, die Potentiale weiterer Automatisierung zu nutzen, um weiterhin ein attraktives Verkehrsangebot zu bieten. Diese Vorteile unterscheiden sich je nach System, liegen bei einer gesamtheitlichen Betrachtung aber in der Einsparung von Energie und Kosten, mehr Sicherheit (besonders im Verschubbetrieb) und einer Kapazitätserhöhung. Damit die Potentiale von ATO oder anders formuliert, der Erhöhung der Automatisierungsstufen (Grades of Automation, GoA), genutzt werden können, kann aufgrund der ausführlichen Recherche hinsichtlich rechtlicher, betrieblicher und technischer Anforderungen folgendes zusammengefasst werden:

Die Einführung von ERMTS (European Rail Traffic Management System) zum Erreichen eines einheitlichen europäischen Bahnnetzes geht schleppend voran. Bei der Einführung neuer Technologien, wie ATO Systeme für GoA2 und höher, sollte daher die Verwendung von einheitlichen Systemen von Beginn an umgesetzt werden, damit die Problematik von Schnittstellen und Interoperabilität nicht zum Hindernis wird. Hier ist auch die Zusammenarbeit unterschiedlicher Stakeholder gefordert. Einheitliche Vorgaben sind auch hinsichtlich rechtlicher Fragestellungen, wie Spezifikationen oder im Zertifizierungsprozess, notwendig.

Ein wichtiger Aspekt liegt bei der Findung einer Betriebs- und Migrationsstrategie. Es ist zu klären, ob beispielsweise fahrer- oder personallose Züge im Personenverkehr tatsächlich zum Erreichen der gesteckten Klimaziele oder zur Steigerung der Konkurrenzfähigkeit beitragen. Eventuell ist die Entwicklung und Verbesserung von TMS (Traffic Management Systemen) der sinnvollere und volkswirtschaftlich günstigere Lösungsweg. Im Hinblick auf Investitionen aufgrund von Hinderniserkennung oder Gefahrenraumerkennung muss ebenfalls abgewogen werden, ob Maßnahmen auf dispositiver Ebene in Verbindung mit den ersten zwei Automatisierungsstufen eine bessere Alternative darstellen. In dieser Hinsicht spielt auch die Verwendung von Satelliten zur Positionsbestimmung (vor allem

für Streckenabschnitte, wo die Einführung von ETCS Level 2 nicht leistbar ist) oder die Verwendung von hoch entwickelten TMS, die eine Fahrplanerstellung in Echt-Zeit ermöglichen können, eine zentrale Rolle.

Höhere Automatisierungsgrade bringen auch Herausforderungen mit sich. Beginnend bei einer notwendigen kontinuierlichen, bestenfalls einheitlichen, Zugbeeinflussung ab GoA2 über die Herausforderungen hinsichtlich der Datenübertagung und den damit im Zusammenhang stehenden Cyber-Security Problemen. Für die Datenübertragung bleibt offen, ob eine flächendeckende Einführung von GSM-R (Global System for Mobile Communications - Rail) sinnvoll ist, wenn zukünftig aufgrund von C-DAS (Connected DAS) oder TMS größere Datenvolumen den Einsatz von FRMCS/5G (Future Railway Mobile Communication System) erfordern.

Dass Energieeinsparungen durch energieeffiziente Fahrweise möglich sind, konnte durch das Energieberechnungsbeispiel demonstriert werden. Die Ergebnisse zeigen beispielsweise, dass durch Einschaltung einer Ausrollphase und fahrplanmäßiger Ankunft ca. 23% weniger Energieverbrauch anfällt als bei straffer Fahrweise. An dieser Stelle sei angemerkt, dass das Energieberechnungsprogramm nur als Annäherungsmodell zu sehen ist. Durch die Vereinfachung auf konstante Beschleunigungen in bestimmten Geschwindigkeitssegmenten und einer konstanten Verzögerung sind die Ergebnisse nur als eine Annäherung an die Praxis zu sehen. Ziel dieser Arbeit war es jedoch nicht, die Berechnung zu optimieren, sondern unterschiedliches Fahrverhalten vergleichbar zu machen, was auch erreicht werden konnte. In Anbetracht des geringen Einsatzes von DAS und den möglichen Energieeinsparungen durch Verwendung solcher Fahrerassistenzsysteme sollte in Zukunft die Verknüpfung mit einem Verkehrsmanagementsystem in den Vordergrund gerückt werden. Wie in der Energieberechnung gezeigt werden konnte, führen nicht notwendige Stopps neben zusätzlichem Energieverbrauch auch zu Verspätungen. Mittels netzübergreifendem TMS kann dem vorgebeugt werden. Durch die Vermeidung von Konflikten oder unnötigen Haltevorgängen ist zusätzlich auch eine Verbesserung der Kapazität und Pünktlichkeit möglich. Dies kann sich positiv auf die Kunden/innen auswirken und die Stellung der Vollbahn stärken.

7 Literaturverzeichnis

- Abdalla, Allie (2017): ATO - GB New Train Onboard Subsystem Requirements Specification. Hg. v. STE ETCS Team. Group Digital Railway. Online verfügbar unter https://www.rssb.co.uk/Library/improving-industry-performance/ATO%20-%20GB-New-Train-On-Board-Subsystems-Requirements-Specification-STE_ATO_REQ_001-Issue-1.pdf.
- autobild.de (Hg.) (2018): Autonomes Fahren: Crash eines Tesla Model S - Erneuter Tesla-Crash unter Autopilot. Online verfügbar unter <http://www.autobild.de/artikel/autonomes-fahren-crash-eines-tesla-model-s-10516973.html>, zuletzt aktualisiert am 01.03.2018, zuletzt geprüft am 01.03.2018.
- Barnard, Bob; Bienfait, Benoît; Zoetardt, Patrick (2012a): Automatic Train Operation. The mandatory improvement For ETCS application. Irse Aspect Conference. Institution of Railway Signal Engineers (IRSE). London, 2012. Online verfügbar unter http://www.irse.org/knowledge/publicdocuments/2.06_presentation%20Benfait.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Barnard, Bob; Bienfait, Benoît; Zoetardt, Patrick (2012b): AUTOMATIC TRAIN OPERATION: THE MANDATORY IMPROVEMENT FOR ETCS APPLICATIONS. Online verfügbar unter <http://www.irse.org/knowledge/publicdocuments/2.06%20Bienfait%20-%20Automatic%20Train%20Operation%20for%20ETCS.pdf>, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Barrow, Keith (2017): Calls to secure radio spectrum for next-generation railway telecoms system. Hg. v. International Railway Journal (IRJ). Online verfügbar unter <http://m.railjournal.com/index.php/telecoms/calls-to-secure-radio-spectrum-for-next-generation-telecoms-system.html>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2017, zuletzt geprüft am 11.02.2018.
- Bienfait, Benoît (2014): ATO over ETCS, 04.11.2014.
- Birger, Nicolai (2017): Autonomes Fahren: Die Geisterschiffe sind schon startklar. Hg. v. Welt. Online verfügbar unter <https://www.welt.de/wirtschaft/article170160411/Die-Geisterschiffe-sind-schon-startklar.html>, zuletzt aktualisiert am 01.01.2017, zuletzt geprüft am 01.03.2018.
- Braun, Nikolaus (2017): Antworten aus dem Cockpit - Was kann eigentlich der Autopilot? Online verfügbar unter <http://www.airliners.de/was-kann-eigentlich-der-autopilot/33438>, zuletzt aktualisiert am 06.04.2017, zuletzt geprüft am 28.02.2018.

- Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL): Satellitennavigation und neue Technologien für Flugverfahren. Online verfügbar unter <https://www.bazl.admin.ch/bazl/de/home/sicherheit/infrastruktur/flugsicherung-und-luftraum/satellitennavigation-und-neue-technologien-fuer-flugverfahren.html>, zuletzt geprüft am 01.03.2018.
- Bundestag, Deutscher: Subventionen an die Automobilindustrie. Deutscher Bundestag. Online verfügbar unter <http://dipbt.bundestag.de/doc/btd/18/123/1812370.pdf>, zuletzt geprüft am 28.02.2018.
- Ciami, Gabrio: Towards the automation of train operation and traffic management: modeling and optimization aspects. 06.10.2016. Online verfügbar unter <https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/events/2016/10/06/sbb-caimi-automation-train-operation.pdf>, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Communauté européenne du rail (CER) (2016): Operators' requirements for ATO development. Position Paper. Brüssel. Online verfügbar unter http://www.cer.be/sites/default/files/publication/161207_Operators%27%20requirements%20for%20ATO%20development.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Costa, Raúl; Villalba, Manuel: The application of the upcoming standard on ATO over ETCS. Ciudad Real. Online verfügbar unter http://eventos.uclm.es/file_manager/get_paper/15182, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Dannehl, Adolf (2008): Bahnbetrieb – Herausforderungen und Chancen für Wissenschaft und Praxis. In: *Der Eisenbahningenieur* (5).
- Davis, Jeff (2018): PTC Implementation: It Could Be Worse. (In Europe, it Is.). Hg. v. Eno Transportation Weekly. Online verfügbar unter <https://www.enotrans.org/article/ptc-implementation-worse-europe/>, zuletzt aktualisiert am 14.02.2018, zuletzt geprüft am 03.05.2018.
- Dong, Hairong; Ning, Bin; Cai, Baigen; Hou, Zhongsheng (2010): Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways. In: *IEEE Circuits Syst. Mag.* 10 (2), S. 6–18. DOI: 10.1109/MCAS.2010.936782.
- Donnelly, Bryan (2010): Panel 3. Refurbishment of Rolling Stock. Railenergy Final Conference. Railenergy. Brüssel, 25.11.2010.
- Emery, Daniel (2017): Towards automatic train operation in long distance service: State-of-the-art and challenges. Monte Verità/Ascona (17th Swiss Transport Research Conference). Online verfügbar unter

- https://infoscience.epfl.ch/record/230293/files/STRC17_ATO_Main_Lines_Emery.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Europäische Kommission (2010): MITTEILUNG DER KOMMISSION EUROPA 2020. Eine Strategie für intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum. Brüssel. Online verfügbar unter <http://ec.europa.eu/eu2020/pdf/COMPLET%20%20DE%20SG-2010-80021-06-00-DE-TRA-00.pdf>, zuletzt geprüft am 21.02.2018.
- Europäische Kommission (2011): Weißbuch zum Verkehr. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum, hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. Luxemburg: Amt für Veröff. der Europ. Union. Online verfügbar unter http://libero/Bibliothek/virtuell/2011/V2011_129752.pdf.
- Europäische Kommission (2016): ERTMS - European Rail Traffic Management System - Mobility and Transport. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/transport/modes/rail/ertms_de, zuletzt aktualisiert am 14.02.2018, zuletzt geprüft am 14.02.2018.
- Europäische Union (EU) (24.08.1991): RICHTLINIE DES RATES vom 29. Juli 1991 zur Entwicklung der Eisenbahnunternehmen der Gemeinschaft. 91/440/EWG. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 237), S. 25–28. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0440&from=DE>, zuletzt geprüft am 02.05.2018.
- Europäische Union (EU) (18.07.2008): RICHTLINIE 2008/57/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Juni 2008 über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Gemeinschaft (Neufassung). RL 2008/57/EG. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 191), S. 1–45. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0057&from=DE>, zuletzt geprüft am 02.05.2018.
- Europäische Union (EU) (26.05.2016a): RICHTLINIE (EU) 2016/797 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Mai 2016 über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union (Neufassung). RL (EU) 2016/797. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 138), S. 44–101. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L0797&from=DE>, zuletzt geprüft am 02.05.2018.
- Europäische Union (EU) (26.05.2016b): RICHTLINIE (EU) 2016/798 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Mai 2016 über Eisenbahnsicherheit (Neufassung). RL (EU) 2016/798. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 138), S. 102–149. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal->

content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L0798&from=DE, zuletzt geprüft am 02.05.2018.

Europäische Union (EU) (26.05.2016c): VERORDNUNG (EU) 2016/796 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Mai 2016 über die Eisenbahngagentur der Europäischen Union und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 881/2004. RL (EU) 2016/796. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 138), S. 1–43. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0796&from=DE>, zuletzt geprüft am 02.05.2018.

European Space Agency (ESA) (2016): Satellite - Automatic Identification System (SAT-AIS). Online verfügbar unter https://www.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_-_Automatic_Identification_System_SAT-AIS, zuletzt aktualisiert am 03.01.2016, zuletzt geprüft am 14.03.2018.

European Truck Platooning (Hg.): What is Truck Platooning? - EU Truck Platoon Challenge. Online verfügbar unter <https://www.eutruckplatooning.com/About/default.aspx>, zuletzt geprüft am 14.03.2018.

European Union Agency for Railways. Online verfügbar unter <http://www.era.europa.eu/Core-Activities/ERTMS/Pages/Current-Legal-Reference.aspx>, zuletzt geprüft am 27.02.2018.

European Union Agency for Railways (2017): Draft Programming Document 2019. Draft 2.1 - 31.01.2017. Online verfügbar unter <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/DECISION%20n168%20Annex%203%20Draft%20SPD%202019.pdf>, zuletzt geprüft am 08.02.2018.

Federal Aviation Administration (2016): Navigation Programs - Satellite Navigation. Online verfügbar unter https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/, zuletzt aktualisiert am 09.12.2016, zuletzt geprüft am 01.03.2018.

Fendrich, Lothar (Hg.) (2007): Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10158178>.

- Findansoy; Yigit; Wanjani, Sohejl (2017): Design Thinking bei der Anwendung der energiesparsamen Fahrweise. In: *Der Eisenbahningenieur* (02), S. 41. Online verfügbar unter 44, zuletzt geprüft am 05.05.2018.
- Flege, Dirk (2017): Fahrerloses Fahren - Die Schiene hat mehr als 30 Jahre Vorsprung. In: *Der Eisenbahningenieur* (07), S. 27–30. Online verfügbar unter https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2017/07/27_30_Flege.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Fletcher, Christian (2012): Shunter Safety: The industry's hidden concern. Hg. v. RailEngineer. Online verfügbar unter <https://www.railengineer.uk/2012/05/14/shunter-safety-the-industrys-hidden-concern/>, zuletzt aktualisiert am 14.05.2012, zuletzt geprüft am 14.04.2018.
- Franzen, Julian; Pinder, Udo; Schreiber, Walter; Kuhlenkötter, Bernd (2017): Erhöhung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Rangierens durch ein innovatives Assistenzsystem. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* (06), S. 43–46.
- Gantenbein, Thomas (2015): Technik - Wer bremst, verliert: Das Stromspar-Rezept der SBB. Hg. v. Schweizer Radio und Fernsehen (SRF). Online verfügbar unter <https://www.srf.ch/wissen/technik/wer-bremst-verliert-das-stromspar-rezept-der-sbb>, zuletzt aktualisiert am 30.03.2015, zuletzt geprüft am 09.05.2018.
- Gorner, Marine; Schuitmaker; Renske (2016): Railway Handbook 2016. Energy Consumption and CO2 Emissions. Focus on Sustainability Targets. International Energy Agency (IEA); International union of railways (UIC).
- Goulding, Lynne; Morrell, Marcus (2014): Future of Rail 2050. Hg. v. ARUP. London. Online verfügbar unter https://www.arup.com/-/media/arup/files/publications/f/arup_future_of_rail_2050.pdf, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- Goverde, Rob (2017): Challenges in ATO for mainline railways. Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 27.11.2017.
- Gralla, Christoph (2016a): Sind wir bereit für den fahrerlosen Verkehr im Nah- und Fernverkehr? In: *Signal + Draht* (4).
- Gralla, Christoph (2016b): Automatisches Fahren als Antwort auf Digitalisierung 4.0? 43. Schienenfahrzeugtagung. Technische Universität Graz. Graz, 06.04.2016. Online verfügbar unter http://www.schienenfahrzeugtagung.at/download/PDF2016/MiV05_Gralla.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2018.

- Gstettenbauer, Klaus (2017): Das "Vierte Eisenbahnpaket": Ist damit der einheitliche europäische Eisenbahnraum vollendet? In: *Österreichische Zeitschrift für Verkehrswissenschaft (ÖZV)* 65 (2), zuletzt geprüft am 02.03.2018.
- Hamburger Hafen und Logistik AG (Hg.): HHLA Hamburger Hafen und Logistik AG: So funktioniert CTA. Online verfügbar unter <https://hhla.de/de/container/altenwerder-cta/so-funktioniert-cta.html>, zuletzt geprüft am 20.02.2018.
- Hannemann, Olaf: OpenSeaMap - Schiffstracking. Online verfügbar unter <https://www.openseamap.org/index.php?id=schiffstracking>, zuletzt geprüft am 14.03.2018.
- Hirschler; Johannes; Tonndorf, Katirn (2017): Flughäfen: Fluglotsen. Hg. v. planetwissen.de. Online verfügbar unter <https://www.planetwissen.de/technik/luftfahrt/flughaefen/pwiefluglotsen100.html>, zuletzt aktualisiert am 01.01.2017, zuletzt geprüft am 01.03.2018.
- Hunscha, Ulrike (2018): Projekt „Fahr umweltbewusst!“ bringt Licht in den Markt der Fahrerassistenzsysteme. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* (03), S. 44–46.
- International Association of Public Transport (UITP): Press Kit Metro Automation Facts, Figures and Trends. Online verfügbar unter <http://www.uitp.org/sites/default/files/Metro%20automation%20-%20facts%20and%20figures.pdf>, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Kampík, Vladimír: ATO system type AVV in everyday operation at Czech railway network. Online verfügbar unter https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2013/07/S2R-JU-GB_Decision-N-15-2015-MAAP.pdf, zuletzt geprüft am 08.05.2018.
- Kaufmann, Andrea; Kerssenbrock, Franziskus; Ruhm, Friedrich (2016): Immer in Bewegung. NACHHALTIGKEITSBEREICHT 2016/2017. Hg. v. ÖBB-Holding AG. Wien. Online verfügbar unter https://presse.oebb.at/file_source/corporate/presse-site/Downloads/Publikationen/Nachhaltigkeit/Nachhaltigkeitsbericht2016_2017.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2018.
- Kessell, Clive (2017): Main Line ATO evaluated. Hg. v. Railenergy. Online verfügbar unter <https://www.railengineer.uk/2017/04/13/main-line-ato-evaluated/>, zuletzt aktualisiert am 13.04.2017, zuletzt geprüft am 15.02.2018.
- Knollmann, Volker (2017): On ATO Migration Strategies. Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 29.11.2017.
- Koch, Richard (2017): Certification of mainline ATO (Automatic Train Operation). Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 28.11.2017.

- König, Peter (2015): Autonomes Fahren - der Status Quo und was ist möglich? Verkehrssymposiums der VSVI. Mainz, 13.11.2015. Online verfügbar unter http://www.verkehrssymposium.de/mediapool/96/962323/data/Autonomes_Fahren_Ver_ffentlichung.pdf, zuletzt geprüft am 01.03.2018.
- Liebermann, Johannes; Rehl, Karl (2017): Entwicklungen im Personennahverkehr. ÖVG-Forum: Automatisierung im Verkehr Straße-Schiene-Multimodal. Österreichische Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft (ÖVG). Wien, 11.12.2017.
- Mächler, Edwin (2017): Rechtliche Aspekte des autonomen Fahrens am Beispiel Schiene - Ein Beitrag zum Safety Day 2017 von Edwin Mächler. Wien. Online verfügbar unter https://www.fh-wien.ac.at/fileadmin/redakteure/Forschung/VISSE/Safety_Day_2017/Rechtliche_Asp_ek-te_Autonomes_Fahren_Bsp_Schiene_Maechler_Griss_u_Partner_Rechtsanwaelte.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Manz, Hansjörg (2016): Zur Sicherheitsnachweisführung einer bordautonomen satellitenbasierten Ortungseinheit für den Schienenverkehr. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig. Online verfügbar unter http://www.shaker.eu/Online-Gesamtkatalog-Download/2017.12.01-13.32.42-129.27.72.20-rad21518.tmp/3-8440-4784-0_INH.PDF, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Manz, Hansjörg (2017): Anforderungsgemäße und konsistente Systementwicklung. In: *Internationales Verkehrswesen* 69 (4), S. 63–69.
- Marinov, Marin (Hg.) (2018): Sustainable Rail Transport. Proceedings of RailNewcastle Talks 2016. Cham, s.l.: Springer International Publishing (Lecture Notes in Mobility). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-58643-4>.
- Marschnig, Stefan (2018): LV 211.402 Eisenbahnbetrieb Sommersemester 2018. Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft. Graz, 2018.
- Marteaux, Oliver; Sobun, Noodhir (2017): Embracing the pace of automation: perspectives from other transport modes and countries. Hg. v. Rail Safety and Standards Board Ltd (RSSB). Online verfügbar unter <https://www.rssb.co.uk/pages/blog/embracing-the-pace-of-automation-perspectives-from-other-transport-modes-and-countries.aspx>, zuletzt aktualisiert am 03.11.2017, zuletzt geprüft am 15.02.2018.

- Martin, Ulrich; Neuberg, Niels; Molo, Carlo von; Ji, Kewen; Körner, Matthias (2015): Automatische Mittelpufferkupplung mit elektrischer Leitungsverbindung – Perspektiven für EIU und EVU. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* (11), S. 31–34.
- Messner, Melanie (2014): Berechnung des Energieverbrauchs für Triebfahrzeuge. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft.
- Meyer zu Hörste, Michael (2017): Fully automatic railway operation: Concept and Conditions. Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 28.11.2017.
- Morse, Greg (2017): Automating train operation: remembering the past before looking to the future. Hg. v. Rail Safety and Standards Board Ltd (RSSB). Online verfügbar unter <https://www.rssb.co.uk/pages/blog/automating-train-operation-remembering-the-past-before-looking-to-the-future.aspx>, zuletzt aktualisiert am 20.10.2017, zuletzt geprüft am 15.02.2018.
- Müller-Hildebrand, Bernhard (2017): Automatisierung und Digitalisierung im Schienengüterverkehr. In: *ZEVrail* (08), S. 301–303.
- N.N. (2013): Automatischer Zug macht Regionalbahnen attraktiver. Online verfügbar unter https://science.apa.at/dossier/Automatischer_Zug_macht_Regionalbahnen_attraktiv_er/SCI_20130322_SCI45791818612021142, zuletzt aktualisiert am 22.03.2013, zuletzt geprüft am 07.05.2018.
- N.N. (2016a): 2016 Synopsis. Hg. v. International union of railways (UIC). Online verfügbar unter https://uic.org/IMG/pdf/synopsis_2016.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2018.
- N.N. (2016b): DAS – a new roll-out opportunity. Hg. v. RailEngineer. Online verfügbar unter <https://www.railengineer.uk/2016/03/18/das-a-new-roll-out-opportunity/>, zuletzt aktualisiert am 18.03.2016, zuletzt geprüft am 23.02.2018.
- N.N. (2017a): Fact Sheet: Wie funktioniert eine fahrerlose U-Bahn? Hg. v. Siemens AG. München. Online verfügbar unter <https://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2012/infrastructure-cities/mobility-logistics/2012-04-metro-paris/factsheet-wie-funktioniert-eine-fahrerlose-u-bahn-de.pdf>.
- N.N. (2017b): Marktüberblick Fahrerassistenzsysteme. Hg. v. MRK Management Consultants GmbH. Dresden.
- N.N. (2017c): National Implementation Plan for ERTMS in Austria. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit). Wien. Online verfügbar unter

- https://www.bmvit.gv.at/en/service/publications/transport/downloads/nip_interoperability.pdf, zuletzt geprüft am 08.05.2018.
- N.N. (2017d): Schienennetz-Nutzungsbedingungen 2018 der ÖBB-Infrastruktur AG. Hg. v. ÖBB Infra. Online verfügbar unter http://www.oebb.at/infrastruktur/de/_p_3_0_fuer_Kunden_Partner/3_2_Schienennutzung/3_2_2_SNNB/Schienennetznutzung_Downloads_2018/02_DMS_Dateien/Schienennetznutzungsbedingungen2018.jsp, zuletzt geprüft am 09.05.2018.
- N.N. (2018a): Thameslink first with ATO over ETCS. Hg. v. Railway Gazette. Online verfügbar unter <http://www.railwaygazette.com/news/traction-rolling-stock/single-view/view/thameslink-first-with-ato-over-etcs.html>, zuletzt aktualisiert am 20.03.2018, zuletzt geprüft am 08.05.2018.
- N.N. (2018b): ÖBB bauen Mobilfunk entlang der Bahnstrecken aus. Tiroler Tageszeitung Online. 2018. Online verfügbar unter <http://www.tt.com/wirtschaft/14335366-91/%C3%B6bb-bauen-mobilfunk-entlang-der-bahnstrecken-aus.csp>, zuletzt aktualisiert am 08.05.2018, zuletzt geprüft am 09.05.2018.
- Nießen, Nils; Schindler, Christian; Vallée, Dirk (2017): Assistierter, automatischer oder autonomer Betrieb – Potentiale für den Schienenverkehr. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* (04), S. 32–37, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- ÖBB (Hg.) (2018a): Fahrplanauskunft. Online verfügbar unter <http://fahrplan.oebb.at/bin/query.exe/dn>, zuletzt geprüft am 02.05.2018.
- ÖBB (Hg.) (2018b): ÖBB-Konzern - Nachhaltigkeit. Online verfügbar unter <https://konzern.oebb.at/de/nachhaltigkeit>, zuletzt geprüft am 13.04.2018.
- ÖBB-Produktion GmbH (Hg.): Elektroloks. Online verfügbar unter <https://produktion.oebb.at/de/lokomotiven/elektroloks>, zuletzt geprüft am 02.05.2018.
- Ostermann, N.; Schöbel, A.; Oster, M.; Messauer, C. (2005): Anwendungen der Betriebssimulation im Eisenbahnwesen. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 122 (04), S. 124–130, zuletzt geprüft am 02.09.2018.
- Pachl, Jörn (2016): Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-12986-6>.
- Pachl, Jörn (2017): Betriebliche Randbedingungen für autonomes Fahren auf der Schiene. In: *Deine Bahn* (09), S. 11–19.
- Panzera, Nikolaus (2017): Vienna goes UTO. Challenges & Opportunitites of an Upgrade-Project. Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 28.11.2017.

- Pelz, Markus (2016): Automated driving by rail. Positive impact of rail market transformation. InnoTrans 2016. Berlin, 20.09.2016. Online verfügbar unter <https://www.siemens.com/press/pool/de/events/2016/mobility/2016-09-innotrans/presentation-automated-driving-e.pdf>, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Peter, Thomas (2017): Fiber Optic Sensing: So hört die Bahn Kabeldiebe oder Tiere. Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH. Online verfügbar unter <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/technik/fiber-optic-sensing-so-hoert-die-bahn-kabeldiebe-oder-tiere-15247562.html>, zuletzt aktualisiert am 22.10.2017, zuletzt geprüft am 01.04.2018.
- Philips, Mark (2017): What does a more automated railway look like? Hg. v. Rail Safety and Standards Board Ltd (RSSB). Online verfügbar unter <https://www.rssb.co.uk/pages/blog/what-does-a-more-automated-railway-look-like.aspx>, zuletzt aktualisiert am 26.09.2017, zuletzt geprüft am 15.02.2018.
- Pluta, Werner (2017): Autonomes Fahren. Wenn die Strecke dem Zug ein Telegramm schickt. Online verfügbar unter <https://www.golem.de/news/autonomesfahren-wenn-die-strecke-dem-zug-ein-telegramm-schickt-1701-125419.html>, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- Poré, Jacques (2010): ATO for Suburban and Main Lines. Institution of Railway Signal Engineers (IRSE). Online verfügbar unter http://www.irse.org/knowledge/publicdocuments/2010_04_30_ATO_for_Suburban_and_Main_Lines.pdf, zuletzt geprüft am 14.02.2018.
- Poré, Jacques (2017): The value of ATO for the future operations of Suburban and Regional rail lines with dense traffic. Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 28.11.2017.
- Pucher, W.; Schausberger, W. (2017): Easing legal and administrative obstacles in EU border regions. Case Study No. 5 Rail transport. Technical interoperability and investment coordination between national railway systems. Europäische Kommission. Brüssel. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/studies/pdf/obstacle_border/8_policy_cooperation_germany-poland.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Puri, Vaibhav (2017): Autonomous systems - facing up to the regulatory challenges. Hg. v. Rail Safety and Standards Board Ltd (RSSB). Online verfügbar unter <https://www.rssb.co.uk/pages/blog/autonomous-systems-facing-up-to-the-regulatory-challenges.aspx>, zuletzt aktualisiert am 10.11.2017, zuletzt geprüft am 15.02.2018.

- Püttmann, Aaron (2017): Der Autopilot - Fliegen Flugzeuge heute von allein? - Pilotstories. Online verfügbar unter <https://pilotstories.de/der-autopilot-fliegen-flugzeuge-heute-von-allein/>, zuletzt aktualisiert am 23.10.2017, zuletzt geprüft am 28.02.2018.
- Randelhoff, Martin (2016): Automatisierter Bahnbetrieb und führerlose Züge: Eine Einführung (Technik, Vorteile, Hürden, Umsetzungszeitraum). Online verfügbar unter <https://www.zukunft-mobilitaet.net/90799/schienenverkehr/eisenbahn/fuehrerlose-zuege-technik-zulassung-vorteile-nachteile-streik/>, zuletzt aktualisiert am 27.06.2016, zuletzt geprüft am 14.02.2018.
- Randelhoff, Martin (2018): DB Cargo plant ab 2018 die Erprobung von Güterzug-Autopiloten auf der Betuweroute. Online verfügbar unter <https://www.zukunft-mobilitaet.net/163187/schienenverkehr/eisenbahn/betuweroute-automatisiertes-fahren-gueterzug-prorail-deutsche-bahn/>, zuletzt aktualisiert am 07.01.2018, zuletzt geprüft am 14.02.2018.
- Rao, Xiaolu (2017): Architectures of Automatic Train Operation for the mainline railway. Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 28.11.2017.
- Republik Österreich: Gesamte Rechtsvorschrift für Eisenbahnverordnung 2003, vom 02.05.2018. In: *Bundesgesetzblatt* (209). Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/20002669/EisbVO%20003%2c%20Fassung%20vom%2002.05.2018.pdf>, zuletzt geprüft am 02.05.2018.
- Sagmeister, Christian (2017): Protecting Railway Systems against Cyber Attacks. Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 27.11.2017.
- Saner, Luc (2014): Studium generale. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Schaafsma, Alfons (2017): Automated Train Operation. an important building block for modern railway industry. Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 28.11.2017.
- Schenk, Volker (2017): Wie behauptet die Bahn im digitalen Zeitalter ihre Stellung im Markt? - Aus der Sicht der Bahnindustrie in Deutschland*. In: *ZEVrail* (1-2), S. 14-17.
- Schneider, Jack (2017): SBB's view on ATO. Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 29.11.2017.
- Schnieder, Eckehard; Becker, Uwe (Hg.) (2007): Verkehrsleittechnik. Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10203831>.

- Schöbel, Andreas (2017): The challenges of ATO for Scientific Research. Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 28.11.2017.
- Selecton Systems AG (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.railway-technology.com/contractors/project-management-and-consultancy/selectron/>, zuletzt geprüft am 17.05.2018.
- Shift2Rail: SHIFT2RAIL AUF EINEN BLICK. ERHÖHTE KAPAZITÄT UND ZUVERLÄSSIGKEIT FÜR EINEN EFFIZIENTEN UND NACHHALTIGEN EISENBAHNVERKEHR UND EINE WETTBEWERBSFÄHIGE EUROPÄISCHE BAHNINDUSTRIE. Union des Industries Ferroviaires Européennes (UNIFE). Online verfügbar unter http://www.shift2rail.org/wp-content/uploads/2013/07/S2R_Factsheet_DE_A5_Web.pdf, zuletzt geprüft am 10.02.2018.
- Shift2Rail (2015): Multi-Annual Action Plan. Brüssel. Online verfügbar unter http://www.shift2rail.org/wp-content/uploads/2013/07/MAAP-final_final.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Sivanagaraju, S.; Srilatha, D.; Reddy, M. Balasubba (2010): Generation and utilization of electrical energy. Noida, India: Pearson. Online verfügbar unter <http://proquest.tech.safaribooksonline.de/9789332515673>.
- Spalvieri, Claudio (2010): Panel 2. Overview about the market segment "Electric Regional Rail Services". Railenergy Final Conference. Railenergy. Brüssel, 25.11.2010.
- Stadlmann, Burkhard; Penkner, Thomas; Grünberger, Stefan; Dumberger, Stefan; Weichselbaum, Johann; Kadiofsky, Thomas et al. (2018): Autonomous driving on freely accessible railway tracks. Fachhochschule Wels; Austrian Institute of Technology (AIT).
- Stadlmann, Burkkard: Zugleitsystem für Regionalstrecken. Hg. v. Fachhochschule Wels. Wels. Online verfügbar unter https://www.tib.eu/de/suchen/id/tema%3ATEMA20031200776/Zugleitsystem-f%C3%BCr-Regionalstrecken/?tx_tibsearch_search%5Bsearchspace%5D=tn.
- Steinebach, Mario (2018): Annaberg-Buchholz und TU Chemnitz wollen Forschungscampus für automatisiertes Zugfahren aufbauen. Online verfügbar unter <https://www.tu-chemnitz.de/tu/pressestelle/aktuell/8560>, zuletzt aktualisiert am 25.01.2018, zuletzt geprüft am 08.05.2018.
- Stuhr, Helge Johannes (2013): Untersuchung von Einsatzszenarien einer automatischen Mittelpufferkupplung. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. Verkehrs- und Maschinensysteme. Online verfügbar unter https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/3833/1/Dokument_4.pdf, zuletzt geprüft am 11.04.2018.

- Süddeutsche.de GmbH (Hg.) (2017): Flugsicherung stellt auf Satelliten um. Online verfügbar unter <http://www.sueddeutsche.de/news/wirtschaft/luftverkehr-flugsicherung-stellt-auf-satelliten-um-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-170921-99-145775>, zuletzt aktualisiert am 21.09.2017, zuletzt geprüft am 01.03.2018.
- Terleth, Dick; Lochem, Sandervan (2017): What could ATO learn from Aviation? Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 28.11.2017.
- Tesla Inc. (Hg.): Autopilot. Online verfügbar unter https://www.tesla.com/de_AT/autopilot, zuletzt geprüft am 01.03.2018.
- Treydel, Roman (2016): ATO over ETCS Operational Requirements. Hg. v. ERMTS Users Group. Online verfügbar unter http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/ATO_Ops_Requirements_v1_7.pdf, zuletzt geprüft am 02.05.2018.
- Treydel, Roman (2017): Development of the harmonised European specifications for mainline ATO. Intelligent Rail Summit. RailTech. Wien, 28.11.2017.
- Trinckauf, Jochen (2010): ETCS - das einheitliche Zugbeeinflussungssystem für Europa. Zugbeeinflussung - ETCS. Technische Universität Dresden. Dresden, 2010. Online verfügbar unter https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ibv/vst/ressourcen/dateien/download/stud_generale/ETCS-Studium-Generale.pdf?lang=de, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Trinckauf, Jochen (2017): Der Bahnbetrieb auf dem Weg zur Digitalisierung und Automatisierung. In: *Deine Bahn* (09), S. 7–9. Online verfügbar unter http://www.deinebahn.de/system/files/archiv-artikel/deine-bahn_2017-09-006.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Union des Industries Ferroviaires Européennes (UNIFE): UNIFE Position Paper on Digitalisation of Railways. Online verfügbar unter <http://www.unife.org/component/attachments/attachments.html?id=737&task=download>, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Veit, Peter; Walter, Stefan (2012a): Eisenbahnwesen. Vorlesungsskriptum LV 211.351 2012/2013. Hg. v. Technische Universität Graz.
- Veit, Peter; Walter, Stefan (2012b): Güterverkehr. Vorlesungsskriptum 211.461 WS 2012/2013. Hg. v. Technische Universität Graz. Graz.
- Watanabe, Shoichiro; Koseki, Takafumi; Isobe, Eisuke (2018): Evaluation of Automatic Train Operation Design for Energy Saving Based on the Measured Efficiency of a Linear-Motor Train. In: *Electr Eng Jpn* 202 (4), S. 50–61. DOI: 10.1002/eej.23059.

- Weidmann, Ulrich; Laumanns, Marco; Montigel, Markus; Rao, Xiaolu (2014): Dynamische Kapazitätsoptimierung durch Automatisierung des Bahnbetriebs. In: *Eisenbahn-Revue* (12), 606-611, zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- Winter, Joachim; Lindemann, Marcus; Schlegel, Stefan; Kloos, Holger (2009): Fahrerassistenz-System. In: *Signal + Draht* (10), S. 6–14.
- Yoo, Tony (2017): Ich habe den Tesla-Autopiloten für eine vierstündige Autobahnfahrt benutzt — es war angenehm und beängstigend zugleich. Hg. v. businessinsider.de. Online verfügbar unter <http://www.businessinsider.de/ich-habe-teslas-autopiloten-vier-stunden-lang-verwendet-es-war-erschreckend-2017-9>, zuletzt aktualisiert am 19.09.2017, zuletzt geprüft am 01.03.2018.

WISSEN ▪ TECHNIK ▪ LEIDENSCHAFT



Institut für Eisenbahnwesen
und Verkehrswirtschaft
Technische Universität Graz
Rechbauerstrasse 12/II
8010 Graz
+43 316 873 6216
office.ebw@tugraz.at
▶ www.ebw.tugraz.at