

Verbesserung von Kapazität und Betriebsqualität durch reduzierte Streuung der Bremswege

Knappe Ressourcen und Green Deal erfordern eine Transportverlagerung auf die Schiene. Viele Untersuchungen zur nötigen Erhöhung von Kapazität und Betriebsqualität fokussieren auf Modernisierung/Digitalisierung der Infrastruktur. Schlagworte sind DSTW, ETCS, ATO und Moving Block. Das fahrzeugseitige Potential zur Erhöhung der Kapazität durch weniger streuende Bremswege wird nachfolgend beschrieben.



1. Reproducible Braking Distance als Basis weniger streuender Bremswege

Bremswege von Schienenfahrzeugen unterliegen einer Streuung durch akzeptierte Toleranzen fahrzeugseitiger technischer Eigenschaften (z.B. der Belagreibwerte, Raddurchmesser und Wirkungsgrade) sowie durch Umwelteinflüsse (z.B. Niederschläge, Laubfall), die auf den Kraftschluss zwischen Rad und Schiene wirken. Gelingt es, diese Einflüsse zu minimieren oder zu kompensieren, werden die Bremswege statistisch gesehen punktgenau. Mit diesem

Ziel hat Knorr-Bremse das Programm RBD (Reproducible Braking Distance) ins Leben gerufen. Dieses soll, neben anderweitig durchgeführten Infrastrukturseitigen Optimierungen (z.B. Digitale Stellwerke, Automatisierung des Bahnbetriebs (ATO)), einen fahrzeugseitigen Beitrag zur Erhöhung der Kapazität sowie der Betriebsqualität des Schienenverkehrs leisten. Der RBD-Ansatz verbindet eine neuartige Verzögerungsregelung mit einem zugweit optimierten Kraftschlussmanagement, auch unter Verwendung eines verbesserten Gleitschutzalgorithmus (Bild 1). Der Einsatz



Dipl.-Ing. Kerstin Bükler

Ingenieurin bei quattron management consulting GmbH / VIA Consulting & Development GmbH
k.bueker@via-con.de



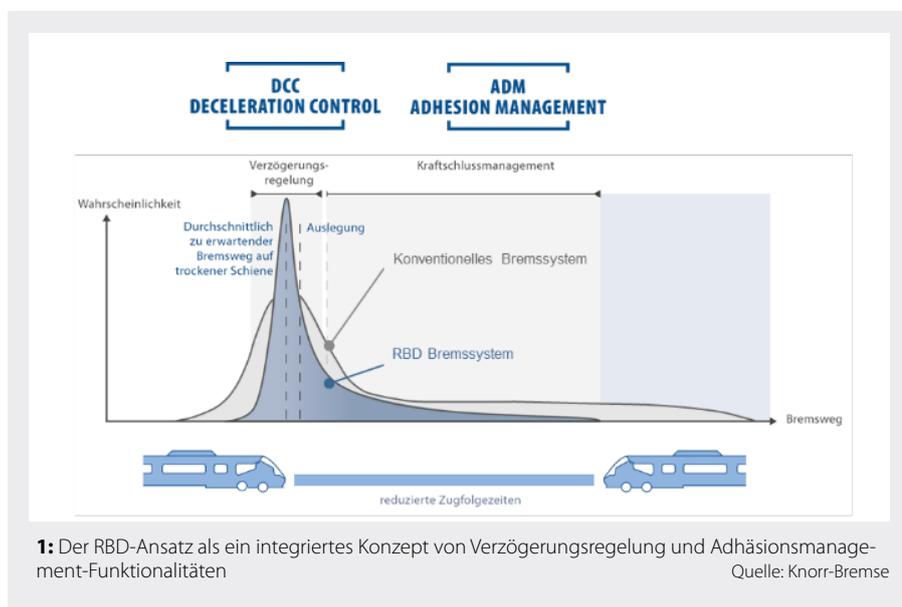
Dr. Marcus Fischer

Referent Standardisation, Partnerships & Spec. Projects bei Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH
Marcus.Fischer@knorr-bremse.com



Dipl.-Ing. Johannes Gräber

Leiter Modernisierungs- und Zulassungsstrategie (weltweit) bei Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH
Johannes.Graeber@knorr-bremse.com



dieser Systeme führt zu einer verbesserten Berechenbarkeit sowie Beherrschung von Bremswegstreuungen und damit zu reproduzierbaren Bremswegen.

Ziel des ersten Bausteins des RBD-Ansatzes, der Verzögerungsregelung („Deceleration Control, DCC“), ist eine möglichst gute Reproduzierbarkeit der Bremsvorgänge/ Anhaltewege auf trockener Schiene. Dabei werden durch die Regelung/ das Nachstellen der Bremskräfte über den

gesamten Zug die tatsächliche erreichte Verzögerung des Zuges von variablen Betriebszuständen und den Toleranzen der Bremsausrüstung entkoppelt. So werden beispielsweise etwaige Schwankungen des Reibwerts zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe ausgeregelt. Hierdurch ist bei ausreichendem Kraftschluss zwischen Rad und Schiene ein stabileres, weniger streuendes Bremsverhalten und damit ein reproduzierbarer Anhalteweg aus allen Geschwindigkeiten und in allen Bremsarten erzielbar [5].

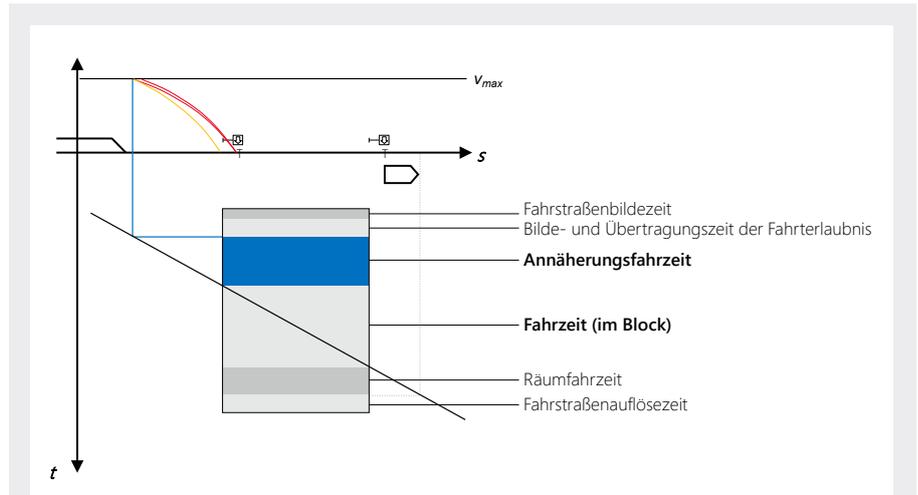
Den zweiten RBD-Baustein stellt das Adhesion Management (ADM) zur Verbesserung des Rad-/ Schienekontakts, insbesondere bei schlechten Kraftschlussverhältnissen, dar. Dieses neuartige situationsangepasste Kraftschlussmanagement, basierend auf umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten [4], umfasst derzeit eine mehrfache, intelligent gesteuerte Sandung sowie einen adaptiven Gleitschutz. Insbesondere durch die funktionale Verknüpfung der beiden Systeme können bei Erkennen eines unzureichenden Kraftschlusses aktiv Maßnahmen eingeleitet werden, um dennoch zuverlässig hohe Verzögerungen zu erreichen.

2. Verkürzung der Mindestzugfolgezeit durch RBD

Die Beschreibung des Kapazitätsverbrauchs durch Sperrzeiten steht im Einklang zum gängigen Regelwerk. Das Sperrzeitenmodell ist zu adaptieren, wenn eine Zugfahrt anstelle der konventionellen Zugsicherungstechnik mit Haupt- und Vorsignalen durch ETCS mit Führerraumsignalisierung überwacht wird. Neben anderen Größen trifft dies insbesondere auf die Sperrzeitenkomponente der Annäherungsfahrzeit zu, die auch maßgeblich für die Abbildung des Nutzens von RBD ist.

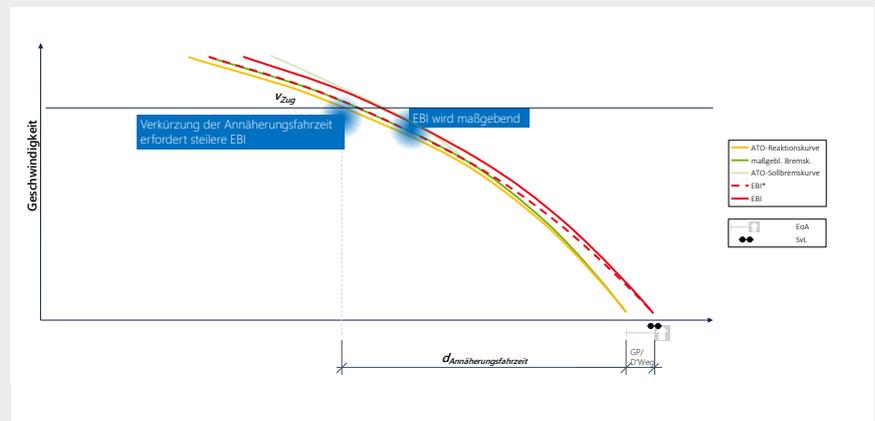
Bei der konventionellen Signalisierung entspricht die Annäherungsfahrzeit der

RBD ist in der Lage, die Kapazität zu erhöhen und Pünktlichkeitseinbrüche bei ungünstigen Kraftschlussbedingungen zu verhindern.



2: Adaptiertes Sperrzeitmodell

Quelle: Eigene Darstellung



3: Ermittlung der Vorbelegung im Fall von ATO-over-ETCS

Quelle: Eigene Darstellung

Fahrzeit zwischen dem Vor- und Hauptsignal ohne Beeinflussung durch andere Trassen, sodass der Triebfahrzeugführer in der Sichtdistanz ein „Fahr erwarten“ zeigendes Vorsignal antrifft. Bei einer mit ETCS-überwachten Fahrt mit Führerraumsignalisierung entspricht der Wechsel des DMI in die Indication-Kurve („gelbes Display“) dem ungewollten Erkennen eines Vorsignals mit Ankündigung eines restriktiven Signalbegriffs. Entsprechend determiniert jener Farbwechsel im DMI bei ETCS Level 2 den Beginn der Annäherungsfahrzeit (Bild 2).

„ATO over ETCS“ sieht vor, dass die Darstellung verschiedener Zustände im DMI reduziert werden und dass das Fahrzeug unmittelbar vor der Emergency Brake Intervention (EBI, Schnellbremskurve) verkehren darf. Die Ermittlung der „ATO-Reaktionskurve“ als Pendant zur Indication-Kurve erfolgt vereinfacht durch eine Minimumsbildung der Schnellbremskurve und der Betriebsbremskurve. Beim Betrieb mit ATO muss die Betriebsbremskurve nicht

zwangsläufig aus der ETCS-Kurvenschar abgeleitet werden, sondern kann explizit als ATO-Sollbremskurve definiert werden, sodass die in Bild 2 gezeigte Situation entsteht.

Die EBI-Kurve fußt auf den tatsächlichen Gefahrpunkt und wird durch das davor liegende Signal geschützt. Der Gefahrpunkt, auch Supervised Location (SVL) genannt, wird durch einen symbolisierten Achszähler dargestellt. Zur Vermeidung von Zwangsbremssungen reizt ATO die EBI-Kurve nicht aus, sondern nutzt eine EBI*-Kurve, die zeitlich vor der EBI-Kurve liegt und somit auch auf den Gefahrpunkt fußt. Innerhalb einer freien Bremsung folgt ATO der ATO-Sollbremskurve, die auf das Signal fußt oder im Fall eines Haltes auf den Halteplatz. Das Hauptsignal, oder auch End of Authority (EoA) genannt, wird in der Grafik durch ETCS-Stop Marker dargestellt.

Die maßgebliche Bremskurve beruht auf der Minimumsbildung der EBI*-Kurve und der ATO-Sollbremskurve. Zur Be-

Szenarien MBU S-Bahn Hamburg			Szenarien RBD-Untersuchung														
1	Nullfall (BR 474/BR 490) trocken	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Konventionelle Sv-/Ks-Signalisierung ▪ 8 Linien-Fahrplan ▪ Triebfahrzeugführer fährt Zug ▪ BR 474 und BR 490 	2	ETCS L2 mit ATO (BR 474/BR 490) trocken	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ETCS Level 2 ▪ Gezielte Verkürzung der maßgebenden Blöcke auf 50 m entlang aller Bahnsteige ▪ 8 Linien-Fahrplan ▪ ATO fährt Zug (SBD -10%) ▪ BR 474 und BR 490 	3	ETCS L2 mit ATO (BR 490) trocken	Wie vorheriges Szenario, aber Betrieb aller Linien mit BR 490	4	ETCS L2 mit ATO (BR 490) trocken und RBD	Wie vorheriges Szenario Zusätzlich 2. Optimierungsstufe: <ul style="list-style-type: none"> ▪ ATO = SBD ▪ Optimierte nominelle Verzögerungen ▪ Optimierte Kdry-Werte 	5	ETCS L2 mit ATO (BR 490) nass	Wie Szenario 3 Abweichend: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nasse Schiene – modelliert durch angepasste ATO-Sollbremskurve ▪ ATO = (SBD -10 %) · 0,59 	6	ETCS L2 mit ATO (BR 490) nass und RBD	Wie vorheriges Szenario Abweichend: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimierung durch zweifache Sandung ▪ ATO = (SBD -10 %) · 0,88

4: Übersicht der simulierten Szenarien und deren Eigenschaften

Quelle: Knorr-Bremse

rücksichtigung einer ATO-Reaktionszeit/Verarbeitungszeit leitet sich die ATO-Reaktionskurve aus der maßgeblichen Bremskurve ab und liegt zeitlich vor dieser. Der Schnittpunkt der ATO-Reaktionskurve mit der Trajektorie des Zuges definiert den Zeitpunkt, zu dem die Fahrerlaubnis, oder auch Movement Authority, spätestens auf dem Fahrzeug vorliegen muss, damit keine Bremsung eingeleitet wird.

Soll nun mit dem Ziel einer Kapazitätserhöhung die Vorbelegung verkürzt werden, ist zu ermitteln, welche Bremskurve die Annäherungsfahrzeit determiniert. Dabei können drei Fälle unterschieden werden:

- Fall 1: Die EBI*-Bremskurve ist durchgehend maßgebend für die ATO-Reaktionskurve. Dies kann der Fall sein, wenn die SvL in geringer Distanz zur EoA liegt oder auch die EBI-Kurve wesentlich flacher als die ATO-Sollbremskurve ist. Eine Verkürzung der Vorbelegung erfordert in diesem Fall eine steilere EBI-Sollbremskurve.
- Fall 2: Die EBI*-Bremskurve ist partiell maßgebend für die ATO-Reaktionskurve. In Abbildung 2 ist der Fall dargestellt in dem sich die ATO-Sollbremskurve und EBI* schneiden. Im niedrigen Geschwindigkeitsbereich ist weiter die ATO-Sollbremskurve maßgebend. Im höheren Geschwindigkeitsbereich und insbesondere dort, wo die Trajektorie des Zuges die ATO-Reaktionskurve schneidet, ist die EBI*-Bremskurve restriktiver als die

ATO-Sollbremskurve und ist damit für die Vorbelegung maßgebend. Eine Verkürzung der Vorbelegung erfordert hier eine steilere EBI-Sollbremskurve.

- Fall 3: Die ATO-Sollbremskurve ist durchgehend maßgebend für die ATO-Reaktionskurve. Eine Verkürzung der Vorbelegung kann hier nur durch einen steileren ATO-Sollbremskurve erzielt werden.

Wichtig zu beachten ist, dass es nicht nur von den Bremseigenschaften des Fahrzeugs abhängt, welcher der drei Fälle vorliegt, sondern auch von den Eigenschaften der Infrastruktur. Insbesondere große negative Neigungen (Gefälle) haben Einfluss auf die Berechnung der EBI-Kurve im Bremsmodell und flachen diese auf Gefällestrecken zur Erzielung einer höheren Sicherheit stark ab.

Um die EBI-Bremskurve gezielt und in der Konsequenz auch die ATO-Bremskurve beeinflussen zu können, sind die Bremseigenschaften der Fahrzeuge mithilfe des Gamma-Modells zu beschreiben. Während beim Lambda-Modell die Bremseigenschaften anhand der Bremsleistung, der Bremsstellung und dem Zugtyp mithilfe des Conversion Modells in für ETCS benötigte Bremsverzögerungen und Bremsaufbauzeiten gewandelt werden, können beim Gamma-Modell die Bremsverzögerungen direkt im Zusammenhang mit einem Vertrauensintervall (Confidence Level) definiert werden.

Dabei wirken sich die RBD-Funktionen in unterschiedlicher Weise auf die Verzögerungskurve nach [6, Kapitel 3.13.6.2.1.4] aus. So können mit Hilfe der Verzögerungsregelung DCC die fahrzeugseitigen Parameter der Bremskurvendefinition A_brake_emergency und Kdry beeinflusst werden. DCC ermöglicht ein Ausregeln zu geringer/ zu hoher Verzögerungen aufgrund z. B. Belagreibwert-Streuungen oder Verschleiß und wirkt sich damit insbesondere auf den Trockenbremsweg aus. Die Einhaltung des Trockenbremsweges kann so besser garantiert werden. Insbesondere die Erhöhung von Kdry führt zu einer höheren Bremsverzögerung A_brake_safe, welche näher an der nominellen Verzögerung liegt. Die Funktionen des Adhesion Management hingegen zielen auf eine Verbesserung des Bremsweges bei schlechten Kraftschlussbedingungen und somit den Bremskurvenparameter Kwet ab. Unter der Voraussetzung einer zukünftigen Berücksichtigung dieser Funktionen in der Bildung der sicheren Bremsverzögerung resultieren geringere Bremswegverlängerungen, welche sich dann wiederum erhöhend auf Kwet auswirken.

Zur Erhöhung der Kapazität kann mithilfe von ETCS Level 2 die maximale Blocklänge in hoch belasteten Knotenbereichen sehr stark verkürzt werden. Weitergehende Blockverkürzungen, theoretisch bis hin zum Moving Block, weisen kapazitiv gesehen nur noch wenig Zusatznutzen auf.

Die Fahrzeit im Block selbst wird zwar kürzer, aber der Effekt auf die Belegungszeit ist nur noch sehr gering, da alle übrigen Sperrzeitkomponenten in ihrer Zeitdauer unverändert bleiben. Im Vergleich zur reinen Fahrzeit innerhalb eines kurzen Blocks weist die Sperrzeitkomponente der Annäherungsfahrzeit (insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten) meist einen sehr viel höheren Zeitanteil auf. Entsprechend kann die gezielte Verbesserung der Bremsseigenschaften mithilfe des RBD-Ansatzes zur Verkürzung der Annäherungsfahrzeit insbesondere auf einem bereits hoch optimierten Blocklayout beitragen.

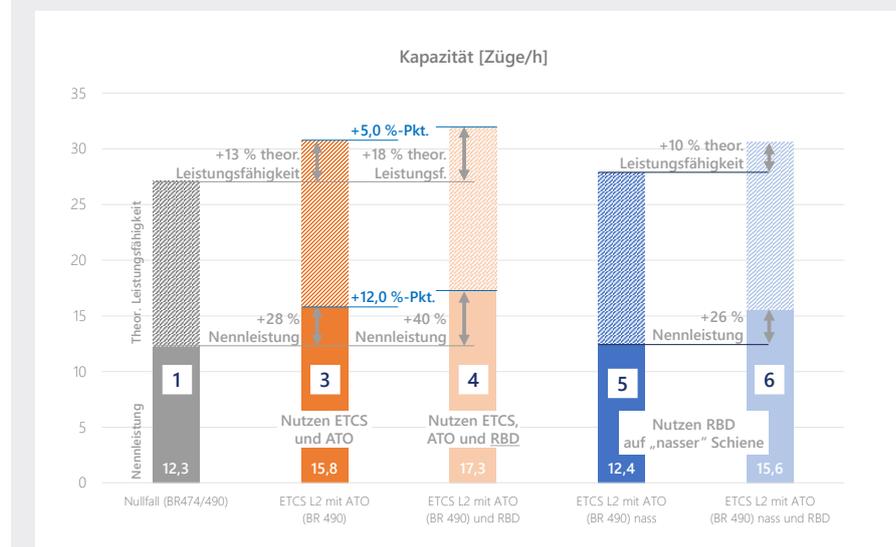
3. Quantifizierung des Nutzens von RBD am Beispiel eines geschlossenen S-Bahn-Netzes

Durch die Verkürzung der Annäherungsfahrzeit wird eine Reduzierung der Mindestzugfolgezeit und damit des Kapazitätsverbrauchs der Trasse erzielt. Diese Reduzierung kann entweder in zusätzliche Trassen umgelegt werden oder als zusätzliche Pufferzeit zur Erhöhung der Robustheit im Betrieb (z.B. ausgedrückt als Pünktlichkeit) genutzt werden [3]. Dies wurde bereits in einer Untersuchung für verschiedene generische Infrastrukturen und Fahrzeuggattungen gezeigt [1]. In einer nun kürzlich abgeschlossenen Untersuchung wurde das Potential der verkürzten Zugfolgezeiten durch den Einsatz der RBD-Funktionen von Knorr-Bremse nun am konkreten Beispiel der S-Bahn Hamburg nachgewiesen. Die Untersuchung baut logisch auf der „Technischen Machbarkeitsuntersuchung (MBU) Rollout Digitale S-Bahn Hamburg“ [2] auf und erlaubt so eine klare Quantifizierung unterschiedlicher Einflussgrößen auf die Kapazität und die Stabilität des Betriebs.

Zu diesem Zweck erfolgten eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen (EBWU) basierend auf dem mikroskopischen Infrastrukturmodell und dem geplanten zukünftigen 8-Linien-Fahrplan der S-Bahn Hamburg. Die Bewertung des RBD-Ansatzes hinsichtlich der Kapazität und der Betriebsqualität erfolgt jeweils getrennt für die trockene Schiene und die Schiene mit vermindertem Kraftschluss (im folgenden „nasse“ Schiene genannt), welche beispielsweise im Herbstbetrieb zu berücksichtigen ist. Der Einfluss der verbesserten Bremsleistung auf die Vorbelegung wird anhand von Zugfolgezeiten ermittelt. Zur Untersuchung der Wirkung der verbesserten ATO- und ETCS-Bremskurven auf die



5: Mittlere Zugfolgezeiten getrennt nach Netzsegmenten und Fahrrichtungen (FR) und „Gesamt“ in den untersuchten Szenarien
Quelle: Eigene Darstellung



6: Vergleich der Nennleistung und der theoretischen Leistungsfähigkeit im City-Bereich über die betrachteten Szenarien
Quelle: Eigene Darstellung

Betriebsqualität erfolgen Simulationen des Betriebs auf dem Gesamtnetz. Basierend auf den Ergebnissen der Zugfolgezeitermittlung und der Simulation erfolgt abschließend eine Bestimmung von Kapazitätskennzahlen.

Bild 3 zeigt eine Übersicht der simulierten Szenarien und deren Eigenschaften. Die ersten zwei Szenarien sind aus [2] übernommen und helfen, die übrigen Szenarien und ihre Eigenschaften in Relation zueinander zu setzen. Das erste Szenario bzw. der Nullfall beschreibt den technischen Status Quo mit konventioneller Außensignalisierung und einem 8-Linien-Fahrplan. Szenario 2 bildet die Abprungbasis für die Untersuchung des RBD-Ansatzes, da es dem in der Machbarkeitsstudie entwi-

ckelten technischen Zielbild entspricht. Szenario 2 enthält folglich ein für ETCS Level 2 optimiertes Blockdesign und ATO GoA 2. Die Szenarien drei bis sechs dienen vorrangig der Untersuchung von RBD auf trockener und „nasser“ Schiene. Szenario 3 ist eine Abwandlung des zweiten Szenarios und unterscheidet sich von diesem nur durch einen einheitlichen Fahrzeugeinsatz der BR 490 statt einem Mix aus den BR 474 und 490 (vereinfachte, zukunftsorientierte Betrachtung). Das Szenario 4 ist das Pendant zu Szenario 3 (Vergleichsfall trocken) mit RBD-Ausrüstung aller Züge. Die Szenarien 5 (Vergleichsfall „nass“) und 6 widmen sich der „nassen“ Schiene und bilden zum einen den Referenzfall ohne RBD sowie

eine Variante mit vollständiger Ausrüstung aller Fahrzeuge mit RBD.

Bild 4 zeigt die über die beiden Netzsegmente „City“ (beide Strecken zwischen Altona und Hbf) und „Neugraben“ (Streckenast zwischen Hbf und Neugraben) gemittelten Zugfolgezeiten der einzelnen Szenarien getrennt nach Fahrtrichtungen sowie die gesamthaften Mittelwerte.

Im Mittel über beide Fahrtrichtungen und beide Netzsegmente, bewirkt die Einführung von ETCS und ATO eine Reduzierung der Zugfolgezeit um neun Prozent. Durch die vollständige RBD-Ausrüstung der Flotte kann die Zugfolgezeit im Mittel um weitere drei Prozent reduziert werden. Auf der nassen Schiene kann durch die RBD-Ausrüstung eine mittlere Reduzierung um zusätzliche neun Prozent erzielt werden.

Eine durch die Reduzierung der Zugfolgezeit ermöglichte dichtere Zugfolge führt in der auf dem Gesamtnetz durchgeführten Betriebssimulation auf der trockenen Schiene zu einer Reduzierung der unkompensierten Verspätungen um 18 % und zu einer Steigerung der 3-Minuten-Pünktlichkeit um einen Prozentpunkt. Beide Aussagen beziehen sich dabei auf einen Vergleich zweier Szenarien mit ETCS Level 2 und ATO bei ausschließlichem Betrieb mit Vollzügen der BR 490 mit bzw. ohne den Einsatz von RBD.

Auf der „nassen“ Schiene führt eine entsprechende Betrachtung zu einer Reduzierung der unkompensierten Verspätungen um 57 %, also um mehr als die Hälfte. Die 3-Minuten-Pünktlichkeit kann durch RBD im Vergleich zum Betrieb ohne RBD auf der „nassen“ Schiene um sieben Prozentpunkte auf ein der trockenen Schiene ähnliches Niveau gesteigert werden. RBD ist somit in der Lage, Pünktlichkeitseinbrüche bei ungünstigen Kraftschlussbedingungen („nasse“ Schiene) zu verhindern.

Bild 5 zeigt in einer kombinierten Darstellung die Nennleistung sowie die theoretische Leistungsfähigkeit. Die theoretische Leistungsfähigkeit errechnet sich direkt aus den ermittelten Zugfolgezeiten und stellt die technisch maximal mögliche, jedoch betrieblich nicht fahrbare Kapazität dar. Nichtsdestotrotz ist der Kennwert für einen qualitativen Vergleich der Szenarien dienlich. Die Ermittlung der Nennleistung erfolgt gem. Ril 405 [7] und berücksichtigt neben der Zugfolgezeit auch das Verspätungsniveau (abgeleitet aus der Betriebssimulation) sowie zulässige Folgeverspätungen bei wirtschaftlich optimaler Betriebsqualität.

Mittels ETCS und ATO bei ausschließlicher Nutzung der BR 490 kann die mittlere theoretische Leistungsfähigkeit um 13 % gegenüber dem Nullfall (Szenario 1) gesteigert werden. Mittels RBD ist es möglich, die mittlere theoretische Leistungsfähigkeit um weitere fünf Prozentpunkte und die Nennleistung um zwölf Prozentpunkte gegenüber Szenario 3 zu steigern. Erfolgt die Bewertung von RBD nicht gegenüber dem Nullfall, sondern gegenüber dem ETCS- und ATO-Szenario ohne RBD (neuer Vergleichsfall Szenario 3), beträgt die Steigerung der theoretischen Leistungsfähigkeit 4,2 % und die Steigerung der Nennleistung 9,5 %. Die Nennleistung steigt wie zuvor bereits beschrieben überproportional zur theoretischen Leistungsfähigkeit, da die Verbesserung der Betriebsqualität durch RBD zusätzlich kapazitätssteigernd wirkt.

Da es bei der „nassen“ Schiene keinen entsprechenden Nullfall gibt, wird zum Vergleich das Szenario „ATO und ETCS ohne RBD“ (Szenario 5) herangezogen. Mittels RBD kann auf der „nassen“ Schiene die mittlere theoretische Leistungsfähigkeit um zehn Prozent und die Nennleistung um 26 Prozent gegenüber dem Falls ohne RBD gesteigert werden. Der große Nutzen von RBD zeigt sich darin, dass die Kapazität auf „nasser“ Schiene praktisch identisch zur trockenen Schiene ist, sodass der Betrieb wetterunabhängiger werden könnte, wenn die gesteckten Ziele hinsichtlich RBD technisch umgesetzt werden können.

4. Fazit

Vor dem Hintergrund einer steigenden Kapazitätsnachfrage bietet die Einführung von Führerraumsignalisierung (z. B. als ETCS Level 2) die Möglichkeit, mittels Blockverdichtungen die Zugfolgezeit signifikant zu senken. Mit dem Erreichen einer gewissen „Grenzbloklänge“ kann der positive Effekt auf die Zugfolgezeit jedoch nicht durch weitergehende Blockverkürzungen, im Extremfall bis hin zum Moving Block, gesteigert werden. Um Zugfolgezeiten trotz des Erreichens gewisser „Grenzbloklängen“ weiter reduzieren zu können, eignet sich der im Rahmen dieser Studie untersuchte fahrzeugseitige RDB-Ansatz zur Reduzierung der Bremswegstreuungen und dem zuverlässigen Erzielen reproduzierbarer Bremswege. Bei Berücksichtigung dieses RDB-Ansatzes zur Optimierung der EBI- und ATO-Bremskurven, könnte ein unmittelbarer positiver Effekt auf die Annäherungsfahrzeit und damit die Mindestzugfolgezeit erzielt werden.

und damit die Mindestzugfolgezeit erzielt werden.

Literatur

- [1] E. Hohmann, M. Englbrecht, H. Gremmel, T. Linke, „Höhere Transportkapazitäten auf der Schiene: Simulation zeigt Potenziale für optimierte Auslastung bestehender Infrastruktur“, ZEV Rail, 2020 (Jahrgang 144), Ausgabe 08.
- [2] Ingenieurgesellschaft „Technische Machbarkeitsuntersuchung Rollout Digitale S-Bahn Hamburg“, Abschlussbericht. 21. November 2021. [Online]. Available: <https://suche.transparenz.hamburg.de/dataset/abschlussbericht-technische-machbarkeitsuntersuchung-mbu-rollout-digitale-s-bahn-hamburg?forceWeb=true>. [Zugriff am 05.08.2022]
- [3] P. Bührsch, T. Büker, S. Schotten und S. Hardel, „Vorteile und Nutzen von ETCS L2oS und DSTW im Schienenverkehr“, Eisenbahn Ingenieur Kompendium. Jahrbuch für Schienenverkehr & Technik 2022, pp. 223-238.
- [4] M. Fischer, K. Haselsteiner, F. Szekely, S. Heinz, F. Kröger, „Mehr Mobilität auf der Schiene: Erhöhung der Transportkapazität durch Optimierung des Kraftschlusses“, ZEV Rail, 2020 (Jahrgang 144) Ausgabe 10.
- [5] N. Kreisel, U. Friesen, R. Furtwängler, J. Braeseke, D. Ciesielski, „Verzögerungsgeregeltes Fahrzeug ermöglicht ein stabileres Bremsverhalten in allen Geschwindigkeiten“, ZEV Rail, 2020 (Jahrgang 144) Ausgabe 01/02
- [6] UNISIG SUBSET-026-3, System Requirements Specification, Chapter 3, Principles, Issue 3.6.0, 10.05.2016.
- [7] Richtlinie 405: Fahrwegkapazität. Gültig ab 13.02.2009.

Summary

Verbesserung von Kapazität und Betriebsqualität durch reduzierte Streuung der Bremswege

Knappe Ressourcen und Green Deal erfordern eine Transportverlagerung auf die Schiene. Viele Untersuchungen zur nötigen Erhöhung von Kapazität und Betriebsqualität fokussieren auf Modernisierung/Digitalisierung der Infrastruktur (DSTW, ETCS, ATO und Moving Block). Insbesondere auf einem bereits hoch optimierten Blocklayout kann die gezielte Verbesserung der Bremseseigenschaften mithilfe des RDB-Ansatzes zu einer Verkürzung der Annäherungsfahrzeit beitragen und so weitere Potentiale heben.