

Vorteile und Nutzen von ETCS L2oS und DSTW im Schienenverkehr

Philipp Bührsch, Thorsten Büker, Simon Schotten und Sascha Hardel

1 Ziele der Sektorinitiative Digitale Schiene Deutschland

Das System Bahn steht heute vor einem der größten Technologiesprünge in seiner Geschichte. Was einst die Dampfmaschine für die erste industrielle Revolution war, sind heute die Digitalisierung und Vernetzung von Maschinen für die Industrie 4.0. Aufgabe der Digitalen Schiene Deutschland (DSD) ist es, die Chancen der Digitalisierung für die Eisenbahn konsequent zu nutzen. DSD bringt digitale Zukunftstechnologien in das System Bahn. Das hört sich einfach an. Für die Bahn ist das eine Revolution – das Bahnsystem wird quasi digital neu erfunden.

Mehr Kapazität, höhere Zuverlässigkeit, höhere Effizienz – das sind die angestrebten Effekte der Digitalisierung der Schiene. Die Vernetzung hochpräziser Daten von Infrastruktur und Fahrzeugen ermöglicht eine völlig neue Steuerung des Bahnbetriebs und ist ein Schlüssel für eine höhere Kapazität des bestehenden Schienennetzes – ohne Neubau von Gleisen. Doch nicht nur die Kapazität nimmt zu. Auch Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit im System Bahn werden steigen. Damit nutzt der Innovationsschub dem Klima, den Kunden und dem Wirtschaftsstandort Deutschland und Europa.

Das Fundament dafür wird mit der grundlegenden Modernisierung und Digitalisierung der Infrastruktur gelegt. Der „Startschuss“ dafür wurde 2020 mit dem sogenannten „Starterpaket“ gegeben. Dort arbeitet DSD an der Einführung des European Train Control Systems Level 2 ohne Signale (ETCS L2oS) und Digitaler Stellwerke (DSTW) im Kontext des Digitalen Knotens Stuttgart (DKS), der Schnellfahrstrecke Köln – Rhein/Main und des transeuropäischen Korridors „Skandinavien – Mittelmeer“ (Abb. 1).

Im Anschluss folgt der flächendeckende industrielle Roll-out, sodass in den 2030er Jahren eine grundlegende Erneuerung der Leit- und Sicherungstechnik (LST) erfolgt sein wird. Die Roll-out-Strategie zur Ausrüstung des Netzes mit ETCS L2oS und DSTW inkl. der entsprechenden Roll-out-Sequenz für die Definition der topologischen Reihenfolge befindet sich derzeit in Erarbeitung durch die DB Netz AG (DB Netz).

Das Digitale Bahnsystem (DBS) als zweite Stufe von DSD geht über die Digitalisierung der LST hinaus. Mit der zweiten Stufe soll die Digitalisierung der Eisenbahn dann ihr volles Potenzial entfalten: Züge, die voll automatisiert in optimalen Abständen fahren, in Echtzeit intelligent und automatisiert gesteuert werden, ihre Umwelt und Position

durch Sensorik erkennen. Dabei wird auch eine Weiterentwicklung der digitalen Leit- und Sicherungstechnik (DLST) hin zu einem sogenannten ETCS-Level 3-Moving-Block-Ansatz angestrebt. Die damit zu erwartenden weiteren Kapazitätssteigerungen werden in der hier dargestellten Studie jedoch noch nicht erfasst. In einer Systemarchitektur wird für die zweite Stufe von DSD detailliert, was einzelne Komponenten des Bahnsystems leisten müssen und wie sie zusammenarbeiten sollen. Auf dieser Grundlage sollen dann zahlreiche digitale Technologien ebenso wie die dafür erforderlichen Konnektivitäts- und IT-Plattformtechnologien erprobt und für den Einsatz im System Bahn weiterentwickelt werden.

Der nachfolgende Beitrag fokussiert auf die erste Stufe der Digitalisierung, der Einführung von ETCS L2oS und DSTW, sowie die damit verbundenen Auswirkungen auf Kapazität und Betriebsqualität im Schienenverkehr.

2 Der Technologiewandel zu ETCS und DSTW

Die Einführung der DLST ist in vielfacher Hinsicht ein großer Sprung in eine neue digitale Zukunft. Die alte Stellwerkstechnik wird Schritt für Schritt netzweit durch ETCS L2oS und die neuen DSTW ersetzt, welche künftig mit einem einheitlichen integrierten Leit- und Bediensystem (iLBS) bedient werden. Die Einführung der DLST hat viele Vorteile für die Infrastruktur: Die Bedienung, die Instandhaltung und auch die Qualifizierung werden so verbessert und vereinfacht.

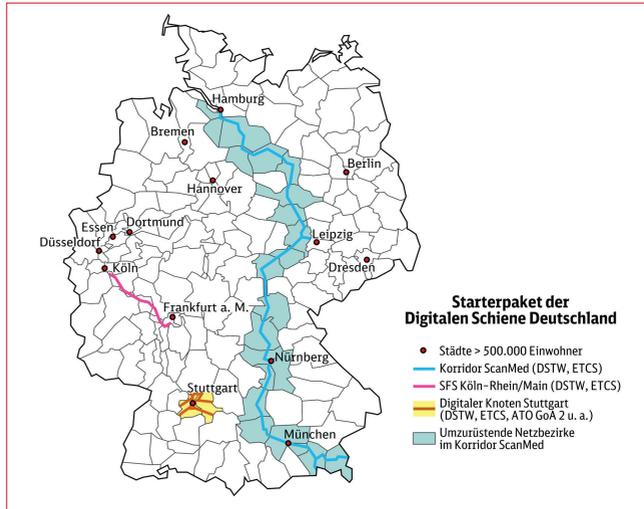


Abb. 1: Übersicht zu den Starterpaket-Maßnahmen

Quelle: DB Netz AG

2.1 ETCS Level 2 ohne Signale

Die Digitale Schiene umfasst mehrere Technologien, die zum Teil bereits im Einsatz sind, jedoch noch nicht in der geplanten Kombination und dem Mehrwert generierenden Zusammenspiel. Basis ist das europäisch standardisierte Zugbeeinflussungssystem ETCS L2oS, das u. a. konventionelle Signale zur Übertragung von Fahrtbegriffen durch Funktechnologie ersetzt.

Mit ETCS und einem Funksystem (heute GSM-R, zukünftig das 5G-basierte FRMCS) können Züge ohne Lichtsignale an der Strecke sicher geführt werden. Die Daten werden zwischen Zug, ETCS-Streckenzentrale (Radio Block Centre – RBC) und Balisen im Gleis übermittelt. Fahrweginformationen werden direkt auf das Display im Zugführerstand übertragen. Der volle Nutzen von ETCS ergibt sich in Deutschland aus der Verbindung mit der Digitalen Stellwerkstechnik (DSTW), welche zusammen optimierte Planungsregeln, kosteneffiziente Blockverdichtungen und den Verzicht auf streckenseitige Signalisierung ermöglichen.

2.2 Das Digitale Stellwerk (DSTW) – eine neue Stellwerksgeneration

Das DSTW ist eine Weiterentwicklung des Elektronischen Stellwerks (ESTW) und wird im Rahmen der DLST über ein neues Bediensystem gesteuert. DSTW ersetzen mit DLST die vielen verschiedenen Stellwerkstypen diverser Bauarten und Generationen. Im Gegensatz zum ESTW übermittelt ein DSTW die Stellbefehle digital über standardisierte Datenschnittstellen per Glasfaserkabel an Weichen und Signale. Die Vorteile:

- Größere Stellentfernung
- Standardisierte Schnittstellen
- Zustandsbasierte Instandhaltung
- Trennung von Energie und Daten
- Verbesserte Diagnosefähigkeit

Da die standardisierten Schnittstellen des DSTW offen und IP-basiert sind, können Komponenten unterschiedlicher Hersteller zu einem Gesamtsystem zusammengeschaltet werden. Die DB Netz ermöglicht so auch einen Wettbewerb für diverse technische Lösungen einzelner Hersteller, um Komponenten zu realisieren. Dies führt zu mehr Qualität und Wirtschaftlichkeit der LST – ein wesentlicher und wichtiger Beitrag zur DSD.

2.3 Doppelausrüstung bei Fahrzeugen als Grundvoraussetzung

Der DSD-Roll-out sieht vor, auf eine Doppelausrüstung der Infrastruktur mit alten (Punktförmige Zugbeeinflussung – PZB, Linienförmige Zugbeeinflussung –LZB) und neuen (ETCS) Zugbeeinflussungssystemen sowie konventioneller Signalanlage zu verzichten. Um auch während des Migrationszeitraums Einschränkungen des Verkehrs zu minimieren, ist eine sukzessive und dem flächendeckenden Infrastruktur-

Roll-out vorlaufende Ausrüstung aller Fahrzeuge mit ETCS-Technik erforderlich. Denn beim Systemwechsel zur Zugbeeinflussung über ETCS wird für die digitale Kommunikation zwischen Strecke und Fahrzeug ein Teil der bisher in der Infrastruktur verorteten Funktionalität nun in „intelligenteren“, komplexeren Fahrzeuggeräten (On-Board-Units – OBU) benötigt. Eine übergangsweise Doppelausrüstung der Fahrzeuge anstelle der Doppelausrüstung der Infrastruktur folgt den Empfehlungen des Gutachters des Bundes [1], der diesem Ansatz eine gesamtwirtschaftlich deutlich höhere Kosteneffizienz bescheinigt.

3 Wirkungen auf Kapazität und Betriebsqualität

Die Ziele und Komponenten von DSD sind also definiert, Spielraum besteht jedoch noch im Detail. ETCS ist nicht gleich ETCS, Digitalisierung kein Automatismus zur Kapazitätssteigerung. Stattdessen sind bei der Ausgestaltung der Digitalisierung die Ziele der Digitalen Schiene konsequent zu verfolgen, um die ambitionierten Kapazitätsgewinne zu erreichen. Doch welche Komponente hat welchen Effekt auf Kapazität und Pünktlichkeit, wie müssen Stellwerk (Stw) und ETCS konkret geplant und projiziert werden und wo gibt es Freiheitsgrade beim Roll-out? Um diese Fragestellungen zu beantworten, wurde eine Untersuchung zur Quantifizierung der netzweiten Effekte insbesondere von ETCS L2oS in Kooperation von DB Netz und VIA Consulting & Development GmbH durchgeführt.

3.1 Ziel der Untersuchung

Um Anhaltspunkte für ebendiese Fragestellungen zu geben, werden verschiedene Varianten netzweiter ETCS-Umrüstungen im Folgenden beschrieben und die resultierenden Effekte quantifiziert.

Für die Fahrgäste kaum wahrzunehmen, bedeutet die Umstellung von konventioneller Zugsicherungstechnik mit Vor- und Hauptsignalen auf ETCS mit Führerraumsignalisierung erhebliche Änderungen für die Zugfahrt und für den Prozess der Fahrplanung. Der „Kapazitätsverbrauch“ einer Trasse hängt maßgeblich vom genutzten Zugbeeinflussungssystem ab, zudem werden Systemzeiten wie bspw. Übertragungszeiten von der ETCS-Strecken-zentrale zum Zug und Fahrstraßenbildezeiten im Stw zukünftig durch neue Technologien beeinflusst, die aktuell noch in der Entwicklung sind. Zum jetzigen Zeitpunkt ist vor allem die Wirkung durch ETCS, bedingt durch die Änderung der Mindestzugfolgezeit, also der Zeit, in der sich zwei Züge im kürzest möglichen Abstand behinderungsfrei folgen können, quantifizierbar (Abb. 2). Der Fokus der durchgeführten Untersuchung liegt deshalb auf diesem Aspekt. Durch ETCS können bei richtiger Projektierung ebendiese Mindestzugfolgezeiten reduziert werden. Die Reduktion kann dann wiederum entweder in zusätzliche Trassen umgelegt werden – oder aber sie wirkt als zusätzliche Pufferzeit und wird somit zur

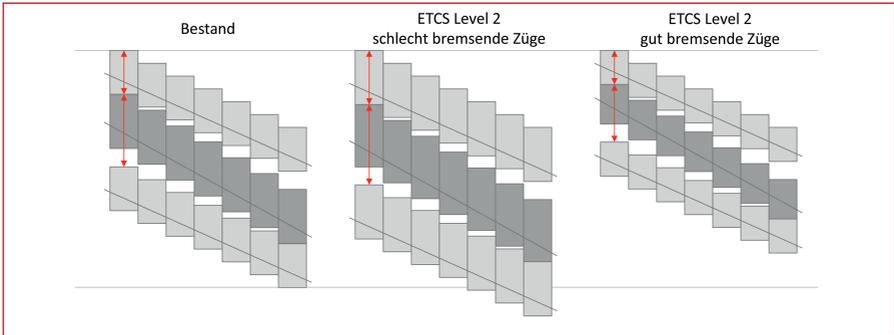


Abb. 2: Vergleich Kapazitätsverbrauch Bestand/ETCS bei unveränderter Blockteilung und auf freier Strecke – schematische Darstellung, Sperrzeiten nicht berechnet

Quelle: VIA Consulting & Development GmbH

Erhöhung der Robustheit des Systems genutzt. In diesem Fall resultiert aus der reduzierten Mindestzugfolgezeit ein Pünktlichkeitsgewinn, da Folgeverspätungen reduziert werden.

In der durchgeführten Untersuchung werden ausschließlich netzweite Roll-out-Szenarien untersucht. Untersuchungen verschiedener Migrationsstrategien sind möglich, wurden zum aktuellen Zeitpunkt jedoch noch nicht durchgeführt. Darüber hinaus wird der Fahrplan zwischen den einzelnen Szenarien nicht variiert, sondern bleibt zur besseren Vergleichbarkeit immer konstant. Die untersuchten Effekte werden also nicht in Kapazitäts- und Pünktlichkeitseffekte aufgeteilt, sondern die gesamte Mindestzugfolgezeitreduzierung wirkt entweder als erhöhte Kapazität oder als erhöhte Pünktlichkeit. Die dabei theoretisch entstehende zusätzliche Kapazität entspricht jedoch nicht immer und überall der tatsächlichen Nachfrage, die Zunahme der möglichen vermarktbareren Trassen wird also geringer ausfallen als die ausgewiesenen Kapazitätseffekte.

3.2 Gewählte Untersuchungsmethodik

Zur Bewertung der Auswirkungen sind eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen (EBWU) netzweit durchzuführen. Während auf kleinräumigen Infrastrukturen dazu standardmäßig mikroskopische Simulationsrechnungen unter Anwendung des Monte-Carlo-Verfahrens oder analytische Verfahren der Leistungsfähigkeitsberechnung durchgeführt werden, sind für große Netzbereiche alternative Methoden sinnvoller. Dies ist zum einen in nicht zu leistendem Modellierungsaufwand (netzweite Anpassung von Infrastruktur bei Blockverdichtungen) begründet, zum anderen kann mit alternativen Methoden die auszuwertende Datenmenge reduziert und können Rechenzeiten verkürzt werden. Die Quantifizierung der Effekte auf Kapazität und Betriebsqualität erfolgt in drei Schritten:

Basis der Untersuchung sind netzweite Berechnungen der Leistungsfähigkeit und der Pünktlichkeit für die Bestandsinfrastruktur. Leistungsfähigkeit und Pünktlichkeit werden mit eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Softwaretools ermittelt, die bei der DB Netz standardmäßig eingesetzt werden. Die Eingangsdaten werden gemäß DB-Richtlinie (Ril) 405 Fahrwegkapazität angenommen bzw. auf den Jahresfahrplan kalibriert.

Im ersten Schritt werden dann die zu untersuchenden infrastrukturellen sowie technologischen Anpassungen in kleinräumigen Bereichen mikroskopisch modelliert. Dabei werden verschiedene charakteristische Strecken abgebildet, um die Auswirkungen umfassend zu berücksichtigen. Aus diesen kleinräumigen EBWU werden Übertragungsfunktionen abgeleitet, um die Veränderung von Mindestzugfolgezeiten (im Sinne der Bedientheorie sowie der netzweiten Pünktlichkeitsprognose) beschreiben zu können.

Die im ersten Schritt ermittelten Übertragungsfunktionen werden dann im zweiten Schritt auf die Eingangsparameter der Bestandsrechnungen angewendet. Die Bestandsdaten werden abgewandelt, um die Effekte der kleinräumigen Modellierung auf das Gesamtnetz zu übertragen. Dabei werden je Zugfolgefall auch die Charakteristik der Halte sowie das Bestands-Zugbeeinflussungssystem und die Geschwindigkeit berücksichtigt. Anpassungen des Betriebsprogramms (Leistungsfähigkeitsbetrachtung) bzw. des Fahrplans (Betriebsqualitätsanalyse) im Sinne einer Verkehrsmehrung/Neukonstruktion durch geänderte Fahrzeitrechnung werden nicht durchgeführt.

Im letzten Schritt werden Leistungsfähigkeit und Betriebsqualität der erzeugten Varianten berechnet. Die Ergebnisse werden mit den Bestandsergebnissen verglichen, um Auswirkungen der verschiedenen Technologien aufzuzeigen.

3.3 Varianten und Ergebnisse

Der netzweite Roll-out, wie angestrebt, soll bis 2035 abgeschlossen sein. Dazu wurden und werden betrieblich-technische Zielbilder entwickelt, welche die verschiedenen Technologien zu Entwicklungszeitscheiben zuordnen (für weitere Details der betrieblich-technischen Zielbilder siehe [2]). Aus den betrieblich-technischen Zielbildern werden dann Lastenhefte entwickelt, welche die detaillierte Ausgestaltung und Anforderungen an die verschiedenen Technologien beschreiben. Die Systemzeiten in den verschiedenen Varianten sind an die verschiedenen Versionen des betrieblich-technischen Zielbildes angelehnt. Darüber hinaus werden unterschiedliche Blockverdichtungen in den verschiedenen Varianten angenommen:

- ETCS Level 2 1:1-Ersatz: Das bestehende Signallayout wird beibehalten, ETCS Level 2 ersetzt die bestehenden Zugbeeinflussungssysteme im reinen Overlay. Aufgrund des zusätzlichen Zeitbedarfs durch RBC und Funkübertragung steigt die Fahrstraßenbildzeit gegenüber dem Bestand leicht an.

- ETCS Level 2 optimiert: Die bestehende Blockteilung wird nur moderat durch zusätzliche Blockkennzeichen verdichtet. Insgesamt steigt die Blockanzahl um ca. 10–15 %. Außerdem werden Geschwindigkeitswechsel nicht mehr am vorherigen Signal, sondern elementscharf projektiert. Annahme in diesem Szenario ist neben einer netzweiten ETCS-Ausrüstung zudem eine neue, leistungsfähigere Stellwerks-generation. Daher werden bestehende Fahrstraßenbildezeiten reduziert.
- ETCS Level 2 Zielbild: Wie Szenario ETCS Level 2 optimiert, allerdings werden umfassende Blockoptimierungen durchgeführt. Die Abteilung Fahrwegkapazität und EBWU der DB Netz hat dazu grundsätzliche Zielblockteilungen für DSD entwickelt, welche in Abhängigkeit von der verkehrlichen Relevanz je Streckenabschnitt prinzipiell zu verfolgen sind. Die maximale Blocklänge variiert je nach verkehrlicher Auslastung des Streckenabschnitts zwischen 1000 m und bis zu 70 m in hoch belasteten Knotenbereichen. Gegenüber heute wird somit die Anzahl der Blockstellen (in Bahnhofs- und Streckenbereichen) mehr als verdoppelt. Weitere Verdichtungen zugunsten einzelner Zugfolgefälle an Bahnhöfen, Abzweigstellen oder Geschwindigkeitswechseln sind darüber hinaus möglich.

Abb. 3 zeigt die Ergebnisse der Leistungsfähigkeitsberechnung und Quantifizierung der Betriebsqualität der verschiedenen Szenarien. Die Leistungsfähigkeit wird hier als nach Trassenkilometern gewichteter Nutzungsgrad ausgegeben, wobei der Nutzungsgrad der tatsächlich verkehrenden Anzahl Züge, bezogen auf die gemäß Leistungsfähigkeitsberechnung ermittelte Nennleistung, entspricht. Eine Verbesserung der Leistungs-

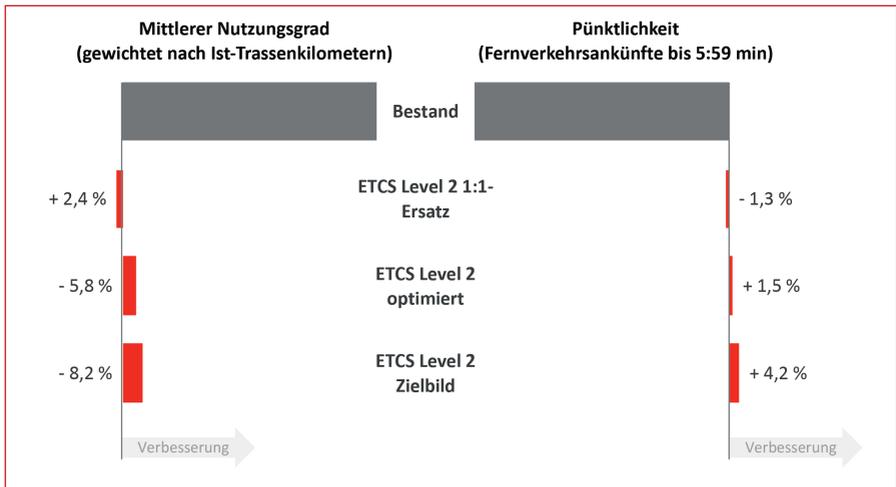


Abb. 3: Netzweite Entwicklung der Leistungsfähigkeit (links) oder der Pünktlichkeit (rechts) in Prozent relativ zum Bestand (Effekte sind nicht additiv zu betrachten)

Quelle: VIA Consulting & Development GmbH

fähigkeit entspricht also der Reduzierung des Nutzungsgrades. Die Betriebsqualität wird durch die Ankunftspünktlichkeit (5:59 Minuten) im Fernverkehr (alle Halte) ausgedrückt.

Die dargestellten Auswirkungen sind nicht additiv bzw. kombinierbar, d.h. in den Größenordnungen kann entweder die Leistungsfähigkeit erhöht oder die Betriebsqualität gesteigert werden. Bei vollständiger Ausnutzung der entstehenden Leistungsfähigkeit durch zusätzliche Zugfahrten kann also nicht mehr mit einer Pünktlichkeitssteigerung gerechnet werden. Darüber hinaus entsprechen die ermittelten Steigerungen der rechnerischen Leistungsfähigkeiten den Mittelwerten über das gesamte Netz, unabhängig vom tatsächlich vorhandenen Bedarf an zusätzlichen Zugfahrten. Große Kapazitätserhöhungen auf Nebenstrecken stehen also nur geringen Verbesserungen auf hoch ausgelasteten Strecken gegenüber, die tatsächlich in kommerziell nutzbare Trassen umsetzbare Kapazitätssteigerung ist geringer als die rechnerisch im Gesamtnetz ermittelte.

Aus den ermittelten Kennwerten lassen sich verschiedene Schlüsse ziehen:

1. Der reine 1:1-Ersatz der bestehenden Zugbeeinflussungssysteme mit ETCS führt nicht zu einer Kapazitäts- oder Qualitätssteigerung, sondern kann betriebliche Nachteile auslösen. Die Auswirkungen von ETCS auf die Kapazität hängen dabei maßgeblich von strecken- sowie fahrzeugspezifischen Eigenschaften ab. Im Einzelfall sind daher kleinere Kapazitäts- und Qualitätseffekte in beide Richtungen möglich. Insgesamt ist jedoch bei einem reinen 1:1-Ersatz der Bestandsinfrastruktur ohne zusätzliche Blockverdichtungen nicht mit einer Verbesserung des Bahnbetriebes im Sinne der Kapazität und Betriebsqualität zu rechnen. Ein 1:1-Ersatz kann als betriebliches Ziel allein die Herstellung der Interoperabilität/Durchfahrbarkeit und ggf. der technischen Verfügbarkeit verfolgen, jedoch keine Kapazitäts- oder Qualitätseffekte.
2. Schon durch geringe Blockoptimierungen (Szenario ETCS Level 2 optimiert) kann aus der ETCS-Umrüstung der im 1:1-Ersatz nicht zu erzielende Kapazitäts- und Pünktlichkeitseffekt erreicht werden. Dabei ist neben zusätzlichen Blockstellen in kritischen Netzbereichen insbesondere die ETCS-spezifische Projektierung des Gesamtsystems notwendig und wirksam. Neben den untersuchten Aspekten (z.B. Projektierung von Geschwindigkeitswechseln direkt an die Weichen inkl. Dunkel-schaltung evtl. noch vorhandener Signale, kurze System- und Übertragungszeiten) umfasst dies u.a. die Verkürzung von Durchrutschwegen und die optimierte Projektierung von Geschwindigkeitswechseln auf der Strecke. Die hierzu notwendige Technik und Regelwerke sind größtenteils bereits verfügbar und sollten bei allen zukünftigen Projekten vorausgesetzt werden.
3. Um einen umfassenden Kapazitätsnutzen aus den für einen netzweiten Roll-out notwendigen Investitionen ziehen zu können, ist die Umsetzung der entwickelten Zielblockteilung sowie deren weitere Optimierung notwendig. So entstehen signi-

fikante betriebliche Vorteile der ETCS-Ausrüstung (siehe Szenario ETCS Level 2 Zielbild), es sind jedoch im Vergleich zum Bestandsnetz umfangreiche Blockoptimierungen notwendig. Über die in der Untersuchung berücksichtigten Optimierungen hinaus ist die Optimierung charakteristischer, die Kapazität determinierender Infrastrukturbereiche (Geschwindigkeitswechsel, Überholbahnhof, Abzweigstelle, Bahnhofseinfahrt) sinnvoll, um zum einen die Zugfolgen und somit die Kapazität in diesen Bereichen bestmöglich zu gestalten, zum anderen jedoch auch, um die Abwägung zwischen erzielbaren Verbesserungen und notwendigem Investitionsvolumen möglichst effektiv zu treffen. Zur Umsetzung dieser Optimierungen sind die technischen Voraussetzungen zu schaffen.

3.4 Einordnung der Ergebnisse

Die ermittelten Effekte bieten einen Anhaltspunkt zur Einordnung der untersuchten Varianten und basieren auf dem aktuellen Stand der Technik. Bei der Interpretation der Ergebnisse sind die Randbedingungen der Berechnung zu beachten:

- Die unterstellten Blockverdichtungen berücksichtigen keine Restriktionen aus Schaltabschnittsgrenzen der Oberleitung, Grenzlast für wiederanfahrende Züge und ähnlichen Aspekten. Um die ermittelten Effekte praktisch nutzen zu können, sind diesbezüglich technische Weiterentwicklungen erforderlich.
- Sowohl Kapazitäts- als auch Qualitätsberechnung basieren auf dem Stand der Fahrplanung, also auf Fahrzeit- und Belegungsrechnung und somit auf Fahrt mit „grüner Welle“. Der Fahrplan wird mit kleineren Störungen an die Realität angenähert; Großstörungen-Ereignisse stehen jedoch nicht im Fokus der Untersuchung.
- Wie oben beschrieben, ist die ermittelte zusätzliche Kapazität nicht vollständig in tatsächlich nutzbare Trassen umsetzbar, da sie nicht immer dort entsteht, wo sie benötigt wird. Zudem liegt der Fokus der Untersuchung auf der Streckenleistungsfähigkeit, nicht untersucht wurde der Einfluss der Bahnhöfe, d.h. die Fragestellung, ob die streckenseitig möglichen zusätzlichen Trassen in den Gleisen der Knotenbahnhöfe auch tatsächlich aufgenommen werden können. Dabei sind umfassende infrastrukturelle Bahnhofsneubauten oftmals wegen begrenzter Flächen bzw. bautechnisch nicht möglich, stattdessen sind Verfahren und Technologien zu entwickeln, um die Haltezeiten so zu reduzieren, dass diese nicht zum „Flaschenhals“ werden.
- Sämtliche Berechnungen basieren auf einem Bestandsnetzfahrplan. Künftige Fahrplanentwicklungen sind folglich nicht unterstellt, stattdessen werden Leistungsfähigkeitseffekte angegeben.
- Die ermittelten Effekte hängen auch vom Bestandsniveau der Pünktlichkeit/Leistungsfähigkeit ab. Sensitivitätsanalysen zeigen, dass der Nutzen mit steigendem Bestandsniveau abnimmt. Darüber hinaus steigt der Nutzen mit sinkendem Be-

standsniveau jedoch nicht linear, stattdessen flacht der Nutzenanstieg mit sinkendem Bestandsniveau ab.

- Nicht alle Effekte des Programmes DSD sind bereits qualifiziert zu quantifizieren. Der Fokus der Untersuchung liegt daher zum einen auf den unterschiedlichen Belegungsrechnungen der verschiedenen Technologien, zum anderen auf der Blockteilung und den technikbedingten Zeitkomponenten, nicht jedoch bspw. auf der veränderten Verfügbarkeit oder den Effekten durch automatisierte Konflikterkennung/-lösung. Darüber hinaus wurden keine Großstörungsereignisse bewertet, sondern lediglich der (tagesaktuelle) Fahrplan, d.h. umfangreiche Dispositionsentscheidungen (z.B. vorzeitige Wende, Zugausfall) werden nicht berücksichtigt.

Grundsätzlich bewegt sich die Fahrwegkapazität immer im Dreieck aus Betriebsqualität, Anzahl / Struktur der Trassen und Störungsniveau (Abb. 4). Eine hohe Betriebsqualität bei gleichzeitig hoher Anzahl der Trassen ist damit nur bei geringem Störungsniveau möglich; je größer das Störungsniveau ist, desto geringer ist die resultierende Betriebsqualität, bzw. desto weniger Trassen können bei konstanter Betriebsqualität verkehren. In der Untersuchung werden die infrastrukturellen Effekte jeweils vollständig in eine der Ecken, entweder Betriebsqualität oder Anzahl Trassen umgesetzt. Durch die Reduzierung des Störungsniveaus aus den nicht untersuchten Aspekten Konflikterkennung / Konfliktlösung bzw. erhöhte Verfügbarkeit können weitere Effekte erzielt werden oder aber der Nutzen sowohl auf Betriebsqualität als auch auf die Anzahl der Trassen geteilt werden.

Zur Erreichung der beschriebenen Effekte sind umfangreiche technologische Neuerungen notwendig.

Teils sind diese schon heute verfügbar, teilweise muss bis zum geplanten Beginn des netzweiten Roll-outs Ende der 2020er Jahre noch Entwicklungsarbeit geleistet werden. Die wesentlichen Parameter und Einflussfaktoren werden im nächsten Kapitel daher zusammengefasst.

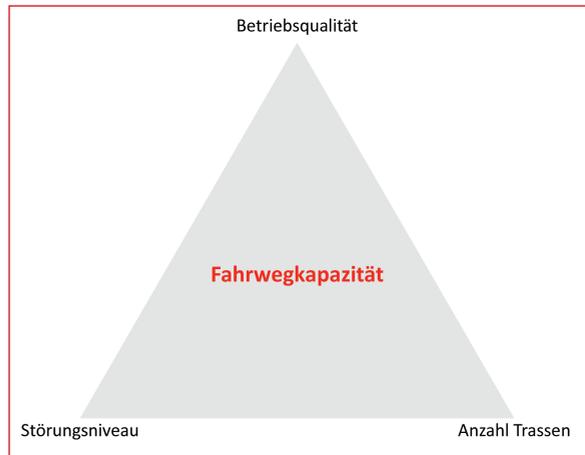


Abb. 4: Einflussgrößen Fahrwegkapazität

Quelle: VIA

Consulting & Development GmbH

4 Wesentliche Einflussfaktoren zur Zielerreichung

Um die oben vorgestellten Ziele des Programms DSD zu erreichen, muss die Aufmerksamkeit zahlreichen Einflüssen und Parametern bei Technik, Planung und Betrieb gewidmet werden. Häufig von Relevanz ist dabei die Wechselwirkung zwischen Infrastruktur und Fahrzeug. Im Vordergrund nachfolgender Betrachtungen stehen dabei direkte und indirekte Maßnahmen zur Verkürzung der Zugfolgezeit zwecks Kapazitätserhöhung. Die Komplexität des Themas bedingt, dass diese Zusammenstellung eine Auswahl darstellt und keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt (siehe auch [3]).

4.1 Eisenbahnsicherungstechnik: Stellwerk und ETCS

Die grundlegenden Funktionen für Kapazitätssteigerungen müssen durch die Eisenbahnsicherungstechnik, d. h. besonders DSTW und ETCS L2oS, bereitgestellt werden. Dabei muss die Fahrstraßenbildezeit auch unter ETCS-Bedingungen (mit zusätzlichen Verarbeitungs- und Übertragungszeiten der beteiligten Systeme, Abb. 5) möglichst kurz gehalten werden, um die Verlängerungen gegenüber bewährter Alttechnik zu begrenzen. Bisher konzentrieren sich zeitliche Anforderungen an die Sicherungstechnik auf Sicherheitsreaktionen. Zukünftig müssen auch verkehrlicher und betrieblicher Nutzen mehr in den Fokus der Technikentwicklung rücken, v. a. die kapazitätsbestimmenden Prozesse des Regelbetriebs. Vergabeerfahrungen aus dem DKS zeigen, dass erhebliche Verkürzungen technischer Zeiten möglich scheinen, die in der Praxis zu validieren sind [4]. Beiträge in diesem Sinne können zudem der Verzicht auf Außensignale (und die damit entfallende Dunkelschaltung) und kürzere Funklaufzeiten unter FRMCS (künftiger 5G-Bahnfunk) leisten. Entsprechend sollte letzteres System zur Anwendungsreife gebracht und flächendeckend ausgerollt werden.

Die netzweite Anwendung von DSTW und ETCS setzt zudem voraus, dass seitens der Industrie der volle in den Lastenheften definierte Funktionsumfang realisiert wird. Basis ist der bekannte, um ETCS-Spezifika ergänzte Funktionsumfang der LZB CIR-ELKE II mit Hochleistungsblock. Darüber hinaus müssen bestehende Restriktionen und Planungsausschlüsse beseitigt oder geeignete Alternativen

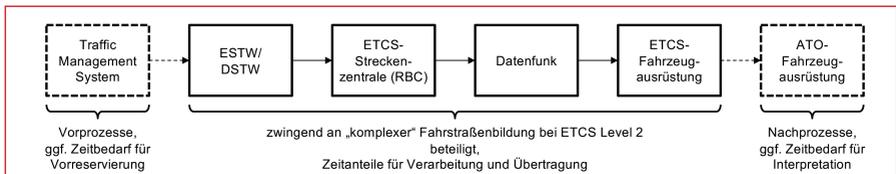


Abb 5: Vereinfachte Übersicht der Systeme für Fahrstraßenbildung bei ETCS Level 2

Quelle: DB Netz AG

geschaffen werden, z. B. bei Durchrutschwegen oder Nahbedienbereichen. Vielfältige Betriebssituationen müssen zeitlich effizient beherrscht werden, wie z. B. Flügeln/Vereinigen und Mehrfachbelegungen. Gegenüber heutigen Anlagen müssen Bauzustände und Umschaltungen deutlich schneller und flexibler gehandhabt werden können.

Erfahrungen mit heutigen Stellwerks- und ETCS-Projekten zeigen, dass den verkehrlichen und betrieblichen Anforderungen mehr Aufmerksamkeit im Planungsprozess gewidmet werden sollte. Beispielsweise sollte die Energieversorgung der Stellwerksaußenanlage auch unter betrieblichen Gesichtspunkten dimensioniert werden, d. h. typische Konstellationen für gleichzeitig benötigte Weichenumläufe beachtet werden (siehe auch [5]). Auch die Anforderungszeit für die nächste ETCS-Fahrterlaubnis (T_{MAR}) sollte nicht mit einem Standardwert projektiert werden, sondern örtliche Besonderheiten wie Stellwerksgrenzen oder Bahnübergänge berücksichtigen. Dadurch sollen gleichzeitig zu frühe Infrastrukturreservierungen und zu späte Verlängerungen der Fahrterlaubnis vermieden werden.

Über einen integrierten Planungsprozess für Stw und Zugbeeinflussung muss sichergestellt sein, dass die Möglichkeiten von ETCS L2oS ausgenutzt werden. Durchrutschwege und Gefahrpunktabstände sollten systematisch minimiert werden und 70 m nicht überschreiten, um keine Kapazitätsbeeinträchtigungen ohne Gegenwert zu verursachen. Bereits heute sollte die Planung der „harten“ Infrastruktur daher aufwärtskompatibel erfolgen.

Das Geschwindigkeitsprofil darf nicht den Status quo übernehmen, sondern sollte sich an fahrdynamischen Möglichkeiten orientieren. Weichen, Gleisbögen und andere Elemente müssen entsprechend ihrer Kilometrierung „elementfein“ im Geschwindigkeitsband berücksichtigt werden, dies ist in Schritten von 5 km/h möglich. Beschränkungen der zulässigen Einfahrgeschwindigkeiten wegen kurzer Durchrutschwege sind nicht mehr erforderlich. Die Geschwindigkeitsprofile für höhere Überhöhungsfehlbeträge und Neigetechnik sollen ebenfalls projektiert werden (weitere Hintergründe z. B. in [6]). Vergleichsweise häufige Geschwindigkeitswechsel können erwogen werden, wenn sie durch automatisiertes Fahren mit Technologien der Automatic Train Operation (ATO) umgesetzt werden.

Um die Kompatibilität zwischen Infrastruktur und Fahrzeugen sicherzustellen, müssen einerseits die bestehenden Vorgaben zu ETCS-Systemversionen etabliert werden. Andererseits deuten die bisherigen Erfahrungen darauf hin, dass auf europäischer Ebene das Versionsmanagement verbesserungsbedürftig ist, um Investitionssicherheit zu bieten. Zudem müssen praktikable Migrationspfade geschaffen werden, um künftige Entwicklungen übernehmen zu können.

4.2 Weitere Infrastruktur

Die besonders auf den Strecken wirkenden kapazitätssteigernden Maßnahmen lassen erwarten, dass künftig die Knoten noch stärker die Gesamtkapazität bestimmen. Maßgebend werden regelmäßig die topologischen Erreichbarkeiten und betrieblichen Verfügbarkeiten der Bahnsteig- und Zugbehandlungsgleise, insbesondere die dort auftretenden Haltezeiten. Im Personenverkehr wirken dabei die Fahrgastwechselzeiten und technischen Zeiten der Fahrzeuge limitierend, solange keine Korrespondenzen und Taktknoten zu beachten sind. Entsprechend sind begleitende Maßnahmen zur Fahrgastlenkung und Fahrzeuggestaltung erstrebenswert, um die Haltezeiten auch bei angestrebtem erhöhtem Fahrgastaufkommen zu verkürzen. Bei relevanten niveaugleichen Einfädelungs- und Kreuzungsprozessen in den Knotenbereichen sind zudem die kapazitätssteigernden Effekte aus ETCS über die umfassende Blockverdichtung hinaus begrenzt.

Die Bahnenergieversorgung nimmt wegen der überwiegend mit elektrischer Traktion erbrachten Verkehrsleistung eine wichtige Rolle ein. Die Dimensionierung der Anlagen muss die Verkehrsmehrungen und insb. Spitzenleistungen abdecken können, dies betrifft z. B. die Anschlussleistungen der Unterwerke und die Stromtragfähigkeit der Oberleitungen.

WIRE DRAGON



SCHIENENFAHRZEUG FÜR DIE FAHRLEITUNGSINSTANDHALTUNG

Veröffentlichung unbefristet genehmigt für Digitale Schiene Deutschland /
Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
genehmigt / © DW Media Group GmbH



Geismar Deutschland | deutschland@geismar.com
 Geismar Schweiz | schweiz@geismar.com



Explizite Restriktionen für die Blockteilung ergeben sich aus den Schaltabschnittsgrenzen der Oberleitung. Sie sind üblicherweise u. a. in Bahnhofsköpfen angeordnet und dürfen nicht mit einem zu langsam fahrenden oder gar stehenden Stromabnehmer belastet werden, weil dadurch unerwünschte und ggf. schädliche Transitströme über die Schleifleiste fließen können. Daraus resultieren Signalanordnungsverbote nach DB-Ril 997.0301, die vorrangig von typischen Zuglängen abhängig sind. Kurzfristig sollte dieser Wert sinnvoll ausgelegt werden, d. h. nicht sämtliche Eventualitäten, sondern verkehrlich relevante Fälle abdecken. Zugunsten flexiblerer Blockteilung sind langfristig Weiterentwicklungen bei der Oberleitungs- und / oder Sicherungstechnik bezüglich der Standorte der Schaltabschnittsgrenzen bzw. tatsächlicher Zuglängen und Stromabnehmerpositionen vorzusehen.

Auf Bestandsstrecken ist die Trassierung vorgegeben, doch muss bei der Planung neuer Signalstandorte die Grenzlast bedacht werden, damit allen Zügen nach einem Halt wieder die Anfahrt möglich ist bzw. marktgerechte Anhängelasten bestehen bleiben. Mit den für die beabsichtigten Kapazitätssteigerungen erforderlichen umfangreichen Blockverdichtungen gewinnt diese Thematik an Bedeutung. Mindestens für Neubaustrecken sollte die Gradienten nicht zu steil gewählt werden, da nahezu überall Signalstandorte denkbar sind.

4.3 Fahrzeuge

Grundsätzlich sollte bei der Fahrzeugausrüstung darauf geachtet werden, dass künftig zu erwartende Anforderungen bereits frühzeitig mitgedacht werden. Dies betrifft v. a. die Fahrzeugautomatisierung, Zugvollständigkeitsüberwachung und FRMCS, um den späteren Anpassungsaufwand für die zweite Stufe von DSD klein zu halten.

Vergleichbar mit der Infrastruktur müssen die technischen und betrieblichen Systemzeiten der ETCS-Ausrüstung auch in den Fahrzeugen möglichst kurz ausfallen. Das gilt besonders für Aufrüsten, Ändern der Zugkonfiguration und Fahrtrichtungswechsel. Zudem sind bei Reisezügen die Prozesszeiten für den Fahrgastwechsel (z. B. Türöffnung und -schließung) wieder zu reduzieren.

Zentrale Bedeutung bei ETCS haben die in den Zügen verwendeten Bremsmodelle. Einerseits sollten die Möglichkeiten des Gamma-Bremsmodells bereits während der Fahrzeugprojektierung bedacht werden, andererseits sollte eine kapazitätszehrende Parametrierung der Guidance-Kurve vermieden werden.

Nur über Weiterentwicklungen der europäischen ETCS-Spezifikation können präzisere Streckengradienten und Annahmen zur tatsächlichen Bremsaufbauzeit berücksichtigt werden. Das gilt in ähnlicher Weise für die Fahrzeugodometrie, die statt mit spezifizierter, künftig mit realer Messungengenauigkeit arbeiten könnte. Zugehörige Ansätze auf europäischer Ebene sollten unterstützt werden.

4.4 Fahrplan und Betrieb

Um die neue Technik in der Fahrplanung und später im Betrieb angemessen berücksichtigen zu können, muss der Datenaustausch zwischen Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) intensiviert werden. Zu diesem Zweck müssen bestehende Schnittstellen erweitert bzw. neue geschaffen werden. Begleitend müssen die erforderlichen Datengrundlagen in die Systeme eingearbeitet werden.

Das betriebliche Regelwerk sollte im Hinblick auf die neue Technik adaptiert und vereinfacht werden. Im Einklang mit der verfügbaren Technik soll es klare Vorgaben treffen, wie z.B. Rangieren, Flügeln/Vereinigen, Fahrtrichtungswechsel und Mehrfachbelegungen von Bahnsteiggleisen umzusetzen sind.

Um möglichst selten auf Rückfallebenen zurückgreifen zu müssen, ist eine sehr hohe Gesamtverfügbarkeit aller beteiligten Systeme erforderlich. Dennoch müssen die Rückfallebenen unter den Randbedingungen DSTW und ETCS L2oS gänzlich neu gedacht werden, um Teilausfälle einzelner Systeme oder Totalausfälle verkehrlich-betrieblich akzeptabel abwickeln sowie schnell zum Regelbetrieb zurückkehren zu können. Vor allem bei der Hochrüstung bestehender Stellwerke ist zu prüfen, inwiefern z.B. Redundanzstandards bei Kabelanlagen den höheren Anforderungen für L2oS-Betrieb gerecht werden.

5 Fazit

Die Ziele eines netzweiten Roll-outs der Technologien der DSD sind gesteckt und die politischen Weichen gestellt. Nun sind die technischen Entwicklungen voranzutreiben, um schnellstmöglich einen Nutzen für das System Bahn zu erzielen. Kapazitätssteigerungen mithilfe von ETCS und DSTW sind möglich, bedürfen aber konsequenter Umsetzung, geschickter Projektierung und gezielter Weiterentwicklungen. ETCS L2oS ist Werkzeug und Voraussetzung zur effizienten Kapazitätssteigerung, nicht alleinige Lösung. Um das Programm DSD zum Erfolg zu führen, müssen zahlreiche Einflüsse und Randbedingungen im Detail beachtet werden. Neben grundsätzlicher Systementwicklung spielt die planerische und betriebliche Ausnutzung der technischen Möglichkeiten eine wichtige Rolle, dafür sind neben den notwendigen Technologien vor allem die nötigen Kompetenzen bei allen Beteiligten aufzubauen. Angesichts der tiefgreifenden Änderungen muss stets das gesamte Bahnsystem betrachtet werden, d. h. die Einbeziehung und Mitwirkung der Branche und der EU-Gremien ist zwingend.

Wirken die beschriebenen Akteure und Parameter zusammen, kann mittels Digitalisierung ein spürbarer Qualitäts- und Kapazitätsnutzen erzielt werden. Im Zusammenspiel mit Neu- sowie Ausbauten von Strecken, Bahnhöfen und weiteren Anlagen kann somit der Schienenverkehr nachhaltig gestärkt werden.

Quellen

- [1] Machbarkeitsstudie zum Rollout von ETCS/DSTW, McKinsey&Company im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Dezember 2018
- [2] Fries, N.: Betrieblich-Technisches Zielbild für die „Digitale Schiene“, Deine Bahn, 03/2021, S. 6 – 10
- [3] Becker, M.; Bükler, T.: Digitalisierung im Gesamtsystem Bahn denken – ZEV Rail, 10/2020
- [4] Behrens, M. et al.: Schnelle Leit- und Sicherungstechnik für mehr Fahrwegkapazität, DER EISENBAHNINGENIEUR, 6/2021, S. 50–55
- [5] Scherer, P.; Bükler, T.; Schotten, S.: Ermittlung betrieblicher Anforderungen an die Weichenstromversorgung, in: Proc. of the 3rd International Railway Symposium Aachen. IRSA2021, Aachen, 21.–23.11.2021
- [6] Staffel, A.: Ausweitung der Nutzung des Überhöhungsfehlbetrags von 150 mm, DER EISENBAHNINGENIEUR, 6/2020, S. 55–59



Dipl.-Ing. Philipp Bührsch

Geschäftsführer DSD Digitale Schiene Deutschland GmbH
DB Netz AG, Berlin
philipp.buehersch@deutschebahn.com



Dr.-Ing. Thorsten Bükler

Geschäftsführer
VIA Consulting & Development GmbH / quattron management consulting GmbH, Aachen
th.bueker@via-con.de



Simon Schotten, M. Sc.

Projektingenieur
VIA Consulting & Development GmbH, Aachen
s.schotten@via-con.de



Dipl.-Ing. Sascha Hardel

Fahrwegkapazität und EBWU
DB Netz AG, Dresden
sascha.hardel@deutschebahn.com