

Verzögerungsgeregeltes Fahrzeug ermöglicht ein stabileres Bremsverhalten in allen Geschwindigkeiten

Deceleration-controlled vehicle enables a more stable braking behavior in all speeds

Ulf Friesen, Ralf Furtwängler, Norman Kreisel, Jörg Braeseke, München (Deutschland),
Dariusz Ciesielski, Kraków (Polen)

Zusammenfassung:

Bei der Auslegung von modernen Bremssystemen ist eine möglichst gute Reproduzierbarkeit der Bremsvorgänge ein zentrales Ziel. Mit der Funktion Deceleration Control (DCC) ist ein wichtiger Schritt dorthin gelungen – sie entkoppelt die tatsächlich erreichte Verzögerung des Zuges zunehmend von variablen Betriebszuständen und den Toleranzen der Brems- und Drehgestellausrüstung. Die Folge ist ein stabileres Bremsverhalten und damit punktgenaues Anhalten aus allen Geschwindigkeiten und in allen Bremsarten auch bei schwankendem Reibwert zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe. Nach mehr als zweijähriger Entwicklung sowie umfangreichen Versuchen in Fahrzeugen der „Impuls“-Plattform haben Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge (SfS) und der polnische Hersteller NEWAG S.A. (NEWAG) vom polnischen Amt für Eisenbahnverkehr, Urząd Transportu Kolejowego (UTK), die Zulassung für einen dreiteiligen Regionaltriebzug mit der neuen Regelung erhalten. Als nächstes folgt der einjährige Feldversuch im regulären Passagierbetrieb.

Abstract (EN):

The best possible reproducibility of the braking processes is a key objective in designing a modern braking system. The new Deceleration Control (DCC) function has taken an important step in this direction - it increasingly decouples the actually achieved deceleration of the train from variable operating conditions and the tolerances of the brake and bogie equipment. The result is a stable braking behavior and thus stop precisely in all speed ranges and brake types even with fluctuating coefficient of friction between brake pad and brake disc. After more than two years of development and extensive test trials in vehicles of the "Impuls" platform, Knorr-Bremse Rail Vehicle Systems (SfS) and the Polish manufacturer NEWAG have received the approval from the Polish railway authority Urząd Transportu Kolejowego (UTK) for the three-part commuter train with the new control function. Next step is the one-year field test in regular passenger service operation.

1 Einführung

Wird in einem Schienenfahrzeug eine Not- oder Schnellbremsung ausgelöst, erzeugt das Bremssystem pro Radsatz einen konstanten lastabhängigen Notbremsdruck. Bei idealen Bedingungen würde dieser konstante Druck immer auch äquivalente Verzögerungen und damit immer dieselben Bremswege erreichen – weil am Rad stets die gleiche Bremskraft wirkt.

Im realen Fahrzeugbetrieb liegen solche idealen Bedingungen jedoch nicht vor. Die erreichten Verzögerungswerte und die daraus resultierenden Bremswege sind auch bei ausreichenden Kraftschlussbedingungen starken Toleranzen unterworfen. Diese resultieren vor allem aus dem schwankenden Reibwert der eingesetzten Belag-Scheibe-Reibpaarung. Dieser Reibwert ist meist abhängig von der sich ändernden Temperatur der Bremsscheibe und dadurch auch von der Vorgeschichte im gegebenen Fahrprofil. Die Scheibentemperatur wird durch den Energieeintrag bestimmt, der maßgeblich durch die Ausgangsgeschwindigkeit der Bremsung beeinflusst wird. Zusätzlich treten auch Konditionierungseffekte auf, die sich auf nachfolgende Bremsungen auswirken können. Auch externe Größen, wie z.B. Temperatur und Luftfeuchtigkeit haben Einfluss auf den Reibwert.

Darüber hinaus haben weitere Toleranzen des Bremssystems, wie beispielsweise der Wirkungsgrad der Bremsaktuatoren und auch die nicht exakt berücksichtigten Durchmesser von abgefahrenen Rädern, direkt Auswirkung auf die resultierende Bremskraft an den Radsätzen. Diese zahlreichen Variablen schlagen sich in einem nicht zu vernachlässigenden Streubereich der Bremswege wieder.

Damit der Zug auch unter ungünstigsten Bedingungen stets in den Vorgaben des maximal erlaubten Notbremswegs zum Stehen kommt, werden bei der Auslegung der Bremssysteme gewisse Toleranzen einkalkuliert. Gleiches gilt für Fehlerfälle, etwa dem Ausfall eines kompletten Drehgestelles. Die Bremssysteme sind meist leistungsfähiger ausgelegt, als es selbst für den Einsatz in potenziell ungünstigsten Szenarien notwendig wäre.

Der Einfluss der beschriebenen Systemtoleranzen lässt sich mit einer Verzögerungsregelung des Zuges reduzieren, welche unmittelbar auf eine Abweichung der aktuellen Verzögerung vom gewünschten Anforderungswert reagiert (Bild 1). Die Streuung der Bremswege verringert sich deutlich. Potenzielle Bremswegüberfahrten aufgrund der Toleranzen der Bremsausrüstung und Abweichungen der Raddurchmesser werden vermieden (Bild 2). Die geforderten Bremswege sind damit weitgehend unabhängig vom Reibverhalten des Belages.

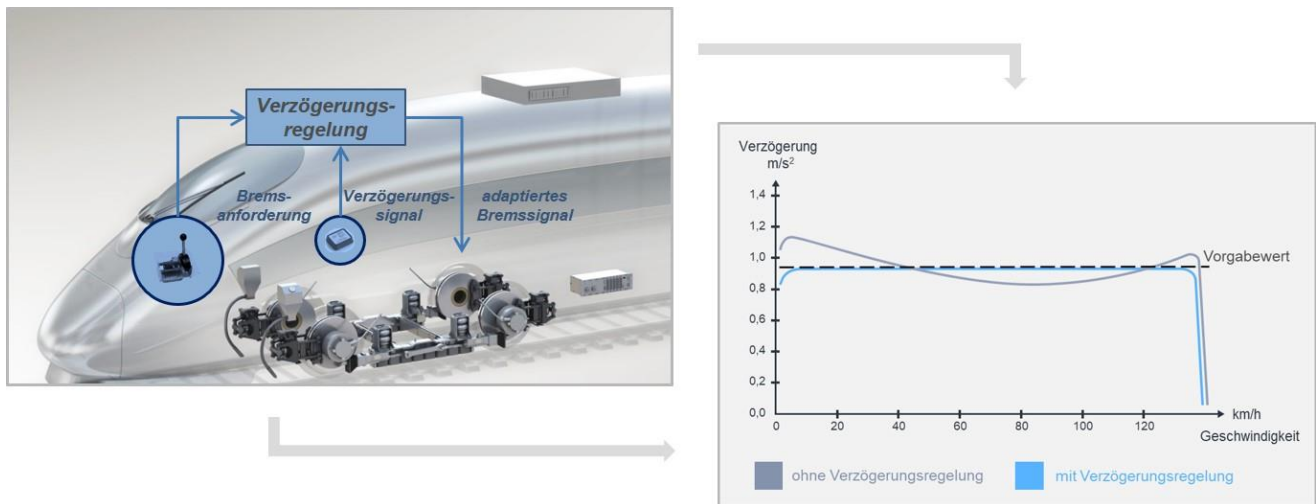


Bild 1: Grundprinzip und Wirkungsweise einer Verzögerungsregelung

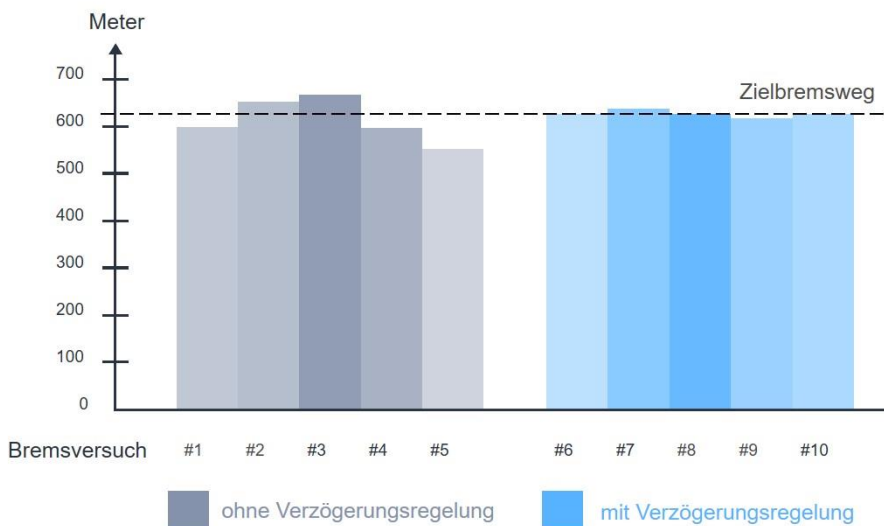


Bild 2: Bremsweggenauigkeit ohne und mit Verzögerungsregelung unter verschiedenen Bedingungen

2 Funktion Deceleration Control (DCC)

Ausgangspunkt der Funktionalität ist ein in jedem Wagen des Zugverbands verbauter Verzögerungssensor, der permanent die reale Beschleunigung in Längsrichtung des Zuges misst. Diese Werte werden über den Zugbus an die zentrale Bremssteuerung übermittelt und liefern der im Bremssteuerungspfad integrierten Verzögerungsregelung (DCC) in Echtzeit die Information über die tatsächliche Wirkung der eingesetzten Bremskraft (Bild 3). DCC minimiert dabei permanent die Differenz der gemessenen Zugverzögerung zum Sollwert der angeforderten Verzögerungskraft des Zuges.

Die Verzögerungsregelung ist in allen Bremsarten aktiv – nicht nur in der Servicebremse, sondern auch in der Notbremse und beeinflusst alle in der jeweiligen Bremsart wirksamen pneumatischen wie auch elektrodynamischen Bremsen. Die Steuerung erzeugt den Bremsdruck dabei drehgestell- oder achsselektiv, ausgerichtet an die jeweilige optimale Zielverzögerung und abhängig von aktueller Geschwindigkeit, Umgebungsbedingungen,

Streckengefälle, von Fahrzeug- und Wagenparametern wie etwa Ladungszustand sowie dem Verhalten des Reibmaterials. Die tatsächlich erreichte Verzögerung ist dadurch zunehmend entkoppelt von den variablen Rahmenbedingungen und Toleranzen des Fahrzeugbetriebs. Der Streubereich der maximalen Bremswege wird auch in der Notbremsfunktion signifikant reduziert.

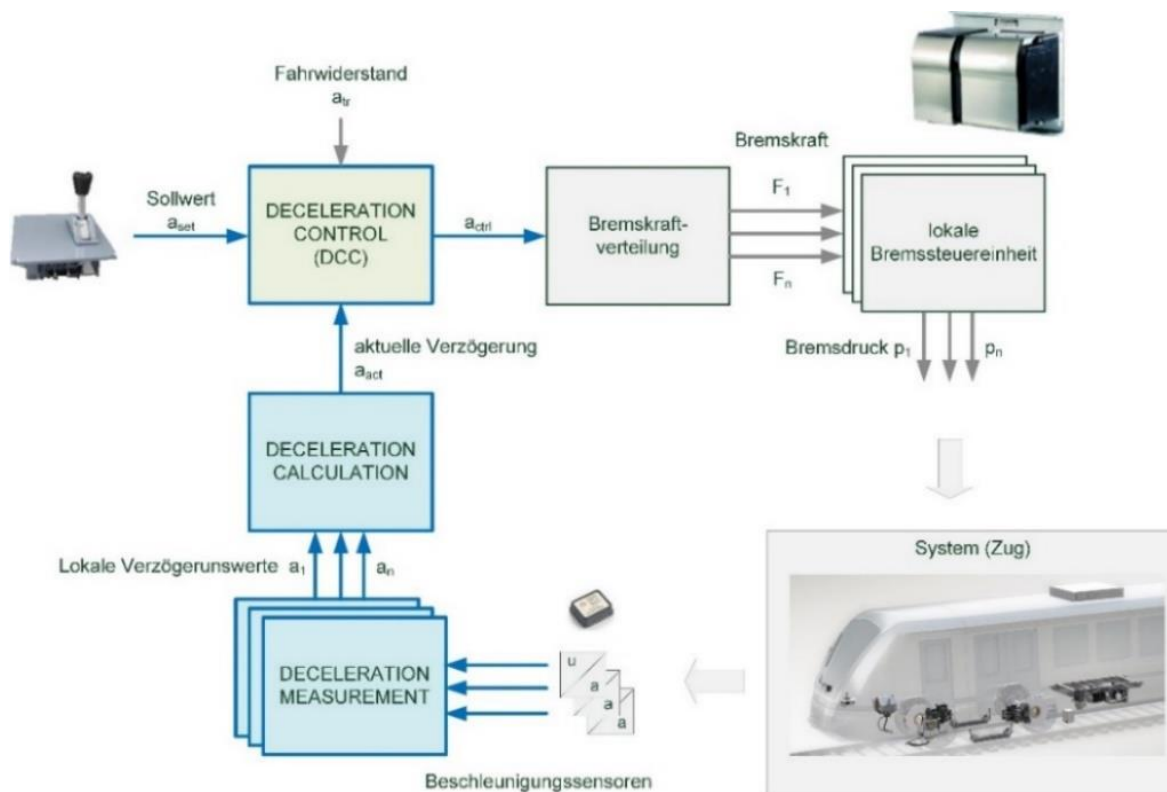


Bild 3: Prinzipielles Funktionsschaltbild Deceleration Control

3 Ausrüstung eines Testzuges mit einer Verzögerungsregelung in der Servicebremse

Der nächste Schritt der Entwicklungsarbeit bestand darin, die bis dahin am Computer entworfene und simulierte Funktion am realen Fahrzeug zu testen. Die Möglichkeit dazu bot der polnische Hersteller NEWAG, und zwar an einem praktisch werksneuen elektrischen Triebzug vom Typ Impuls 31WE. Dabei handelte es sich um einen Regionalverkehrs-Vierteiler (Bo' 2' 2' 2' Bo') mit einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h (Bild 4). Jedes Drehgestell verfügt über eine halbzugsweise elektronisch angesteuerte pneumatische Bremssteuerung vom Typ EP Compact.

Im Sommer 2016 ergab sich die Gelegenheit, den Zug für Testfahrten mit der neuen Funktion Deceleration Control zu modifizieren. In Ergänzung zu den vorhandenen elektronischen Bremssteuerungen wurde für die testweise Implementierung eine zusätzliche Prototypensteuerung für die Verzögerungsregelung integriert. An dieser Elektronikeinheit waren vier über den Zug verteilte Beschleunigungssensoren zur Messung der Längsverzögerung des Zuges angeschlossen. Der Bremssollwert vom Triebfahrzeugführer wurde entsprechend der aktuell ermittelten Verzögerung geregelt und an die Bremssteuerungen weitergegeben.

Der Aufbau sah den Betrieb sowohl mit als auch ohne Verzögerungsregelung vor, um im späteren Testbetrieb einen direkten Vergleich zwischen dem Bremsverhalten ohne und mit

aktivierter DCC zu ermöglichen. Da die vorhandene Pneumatik nicht modifiziert werden durfte, wurde die Verzögerungsregelung in diesem ersten Testzug nur in der Servicebremse umgesetzt. Ergänzt wurde die Testinstallation des Zuges mit weiteren Geschwindigkeits- und Beschleunigungssensoren zur Referenzmessung während des Versuchs.



Bild 4: Vierteiliger Testzug NEWAG Impuls 31WE

4 Erste Testfahrten auf dem IK Testring nahe Żmigród

Die Tests begannen Ende August 2016 auf der Teststrecke des Instytut Kolejnictwa (IK) nahe Żmigród. Das Eisenbahninstitut ist dem polnischen Ministerium für Verkehr, Bau und Seewirtschaft unterstellt und unter anderem für die Interoperabilitätsangelegenheiten des polnischen Schienenverkehrs zuständig. Die durchgeführten Testfahrten beinhalteten Bremsungen mit unterschiedlichen Beladungszuständen sowie verschiedenen Reibmaterialien (Originalbelag JURID 878 und Alternativbelag Propad P16).

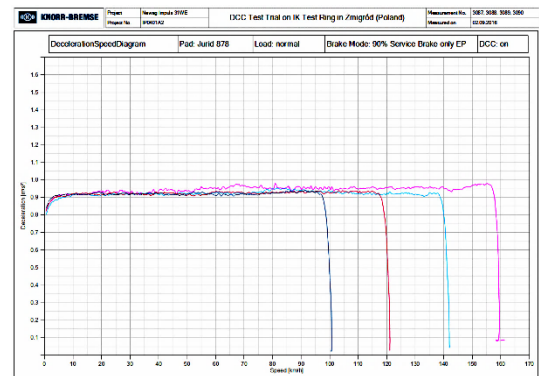
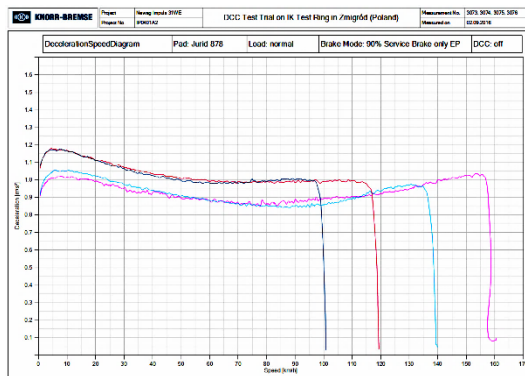
Zur besseren Vergleichbarkeit wurde der Zug mit der gleichen Bremsanforderung aus verschiedenen Geschwindigkeiten bis zum Stillstand abgebremst. Dabei wurde jeweils zwischen ein- und ausgeschalteter Verzögerungsregelung differenziert sowie zwischen alleiniger elektropneumatischer Bremsung und in den Blendingbetrieb mit einer elektrodynamischen Bremse umgeschaltet. Anschließend folgten Bremsungen mit unterschiedlichen Reglerparametern sowie Bremstests unter bestimmten Ausfallszenarien.

Nach rund 2200 Kilometern auf 280 Testrunden sowie 203 gemessenen Bremsvorgängen zeigten sich eindeutige Ergebnisse: Die charakteristische „Delle“ in der Verzögerungskurve der Bremsvorgänge, auch „Schweinebauch“ genannt, wurde vollständig ausgeregelt und die Schwankungen im Bremsweg bei gleicher Ausgangsgeschwindigkeit reduzierten sich drastisch. Die dargestellten Messdiagramme (Bild 5) zeigen beispielhaft den Einfluss der DCC-Funktionalität während einer Betriebsbremsung im reinen elektropneumatischen Betrieb bei 90% Bremsanforderung. Ohne Verzögerungsregelung sind die erzielten Verzögerungsverläufe und damit die Anhaltewege stark abhängig von der Ausgangsgeschwindigkeit und dem Reibwertverhalten. Mit DCC wird der vorgegebene Sollwert hinreichend genau ausgeregelt und es ergibt sich eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Bremswege. Zusätzlich ergibt sich damit auch eine in allen Bereichen und Geschwindigkeiten ausgeglichene Kraftschlussausnutzung. Insbesondere wird der bei vielen Reibmaterialien typische Anstieg bei geringen Geschwindigkeiten sehr gut ausgeglichen und beeinflusst damit das Bremsverhalten positiv.

ohne Verzögerungsregelung

mit Verzögerungsregelung

Jurid 878



Propad P16

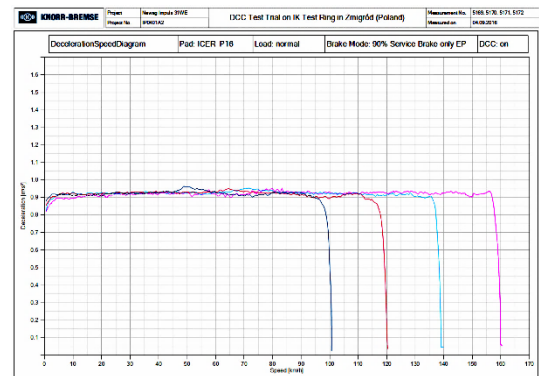
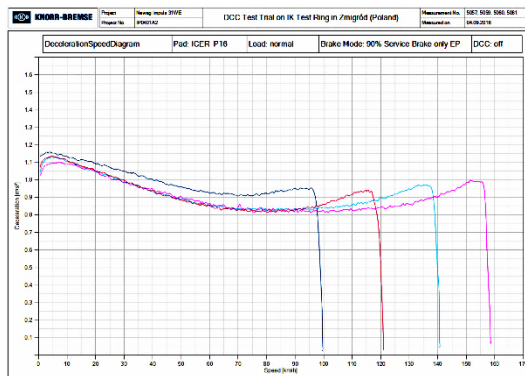


Bild 5: Ergebnisse des Prototypentests der Funktion Deceleration Control in der Betriebsbremse bei 90% Bremsanforderung mit dem Triebzug NEWAG Impuls 31WE

5 Ausrüstung und Zulassung eines Triebzuges mit DCC für den Betriebseinsatz

Die positiven Testergebnisse des Prototypentests zogen den logischen nächsten Entwicklungsschritt nach sich, die Funktionalität auch in der Notbremse einzusetzen und das System auch im regulären Einsatz eines Betreibers zu testen. Dies beinhaltete aber einen wesentlich umfangreicheren Umbau der pneumatischen und elektronischen Bremssteuerung. Für die neue tiefgreifende Modifikation des gesamten Bremssystems fiel die Wahl ebenfalls auf einen NEWAG Triebzug, diesmal ein Dreiteiler vom Typ Impuls 36WEa (Bild 6) mit einer maximalen Geschwindigkeit von 160km/h.

Neben der direkten Integration der Verzögerungsregelung in die originale Bremssteuerelektronik des Zuges wurden auch alle pneumatischen EP Compact-Einheiten durch neue modifizierte ersetzt, die ebenfalls eine Verzögerungsregelung auch während einer Notbremsung erlauben. NEWAG unterstützte den im Produktionswerk in Nowy Sącz erfolgten Umbau tatkräftig und zeichnete sich auch für die Zulassung des Fahrzeuges verantwortlich.



Bild 6: Dreiteiliger Testzug NEWAG Impuls 36WEa auf dem IK Testring nahe Żmigród

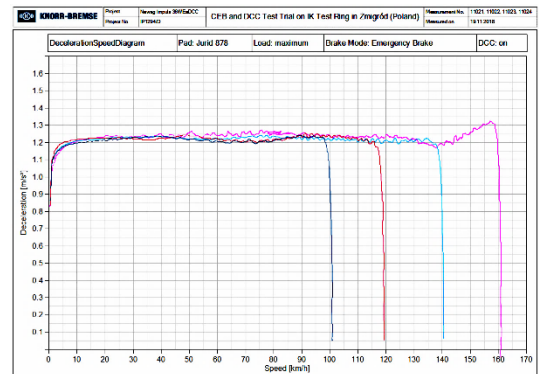
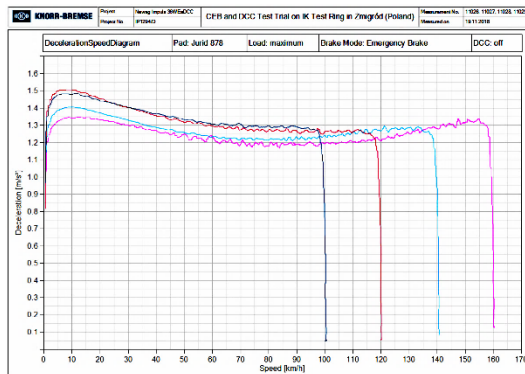
Um das Fahrzeug hierauf optimal vorzubereiten wurde im November 2018 ein umfangreiches Testprogramm gestartet. Neben den Fahrten zur Inbetriebsetzung und Optimierung der neuen Regelfunktion beinhaltete dies auch Testfahrten ähnlich der UIC/TSI-Homologation.

Das Versuchsprogramm umfasste 826 Testrunden (6210km) und differenzierte zwischen leerem, normal und maximal beladenen Fahrzeug sowie erneut zwischen JURID 878 und Propad P16-Bremsbelägen. Es wurden Messungen sowohl in der Betriebs- als auch in der Notbremse unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt und zusätzlich Ausfallzustände simuliert. Bild 7 zeigt in Analogie zu den Versuchen von 2016 exemplarisch die Verzögerungsverläufe des beladenen Fahrzeugs diesmal in der Notbremse bei verschiedenen Ausgangsgeschwindigkeiten und ebenfalls bei zwei unterschiedlichen Reibmaterialien. Der Trend aus den vorangegangenen Testfahrten bestätigte sich auch hier: Mit eingeschalteter elektronischer Verzögerungsregelung reduzierte sich die Bremswegstreuung auch in der Notbremse um bis zu 85%.

ohne Verzögerungsregelung

mit Verzögerungsregelung

Jurid 878



Propad P16

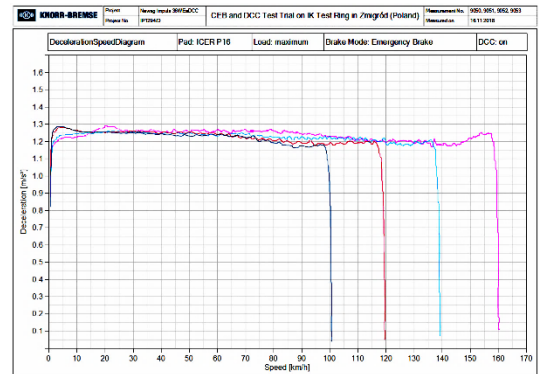
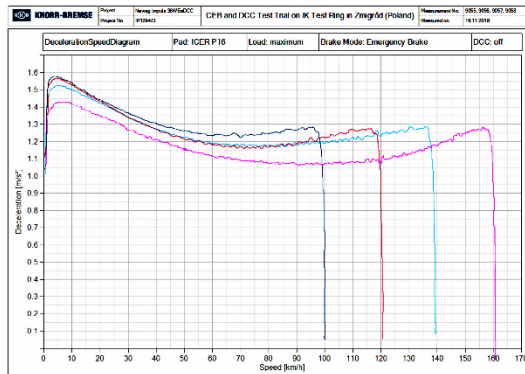


Bild 7: Ergebnisse der Notbrems tests mit dem Triebzug NEWAG Impuls 36WEa ohne und mit DCC

Zur Bewertung der Effizienz von DCC wurde die Standardabweichung der Messreihen herangezogen. Betrug die Standardabweichung vom Durchschnittswert beispielsweise bei einer Notbremsung aus 120 km/h im „DCC off“-Modus noch 16,4 Meter (3,6%), konnten bei eingeschalteter DCC nunmehr 3,3 Meter oder 0,7% erreicht werden. Die Messungen aus anderen Geschwindigkeiten und Ladezuständen ergeben vergleichbare Verhältnisse. Selbst bei kombinierter elektropneumatischer und elektrodynamischer Bremsung lag die Standardabweichung bei gleicher Geschwindigkeit bei 12,8 Metern (2,3%) im „DCC off“-Modus respektive 1,6 Metern (0,3%) im „DCC on“-Modus – und damit bei einer noch immer um rund 70% reduzierten Bremswegstreuung (Bild 8 und Bild 9).

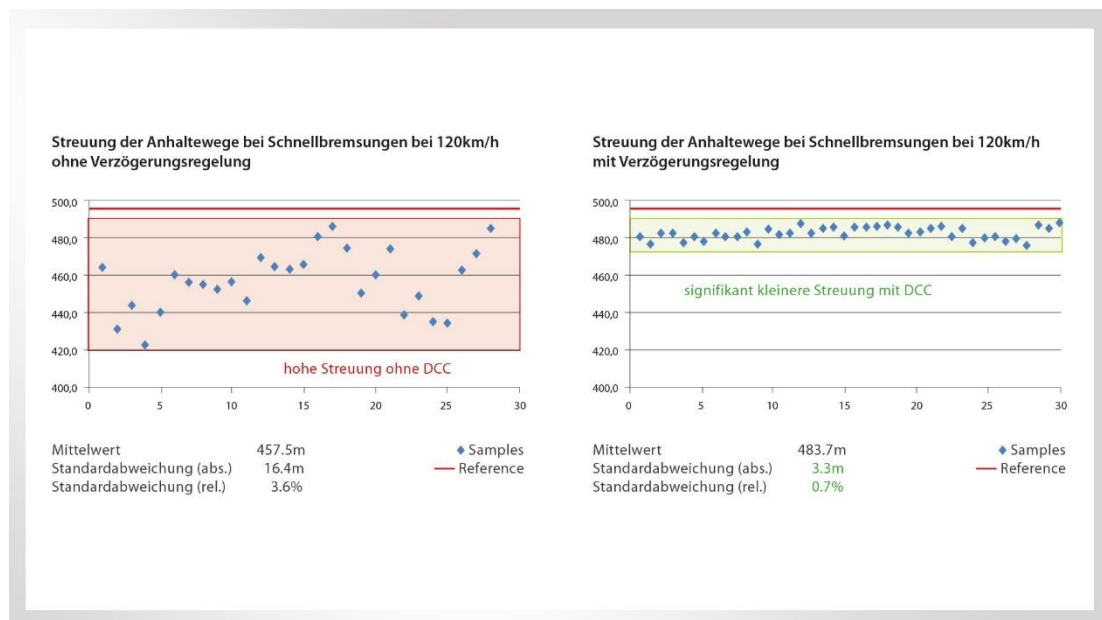


Bild 8: Streuung der Anhaltewege ohne und mit Verzögerungsregelung bei Schnellbremsungen

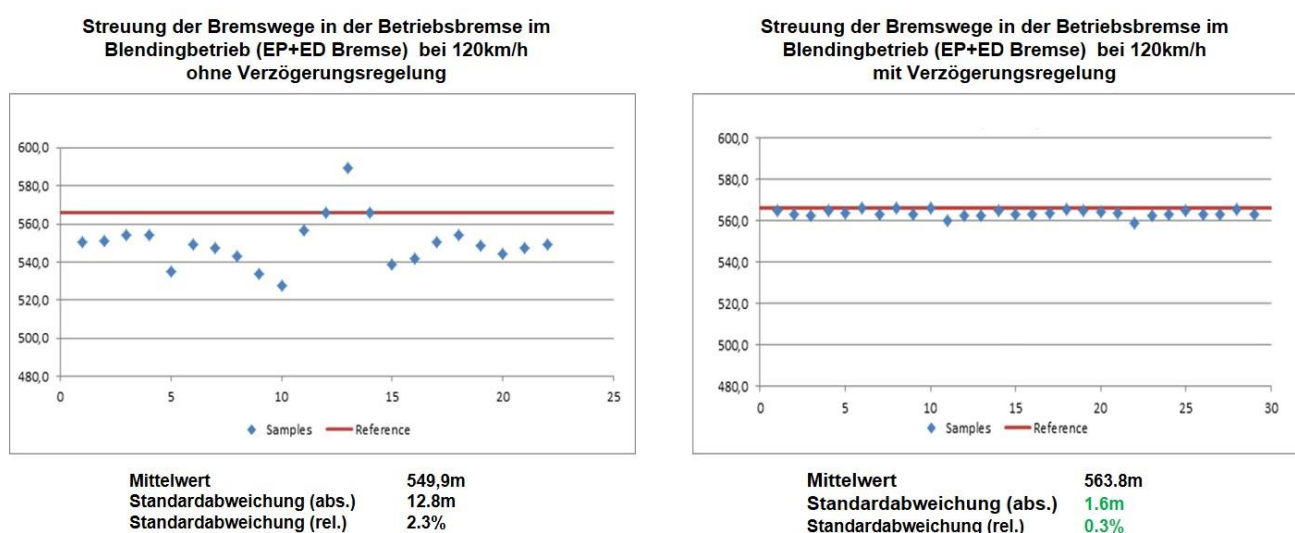


Bild 9: Streuung der Bremswege ohne und mit Verzögerungsregelung in der Betriebsbremse im Blendingbetrieb (elektropneumatische und elektrodynamische Bremse aktiv)

Die Messergebnisse belegen, dass sich der Bremsweg auch im Notbremsfall verlässlich reproduzieren lässt. Der Nominalbremsweg bzw. der mittlere Bremsweg wird als Design-Parameter im Rahmen der Auslegung festgelegt und kann bei Bedarf leicht verändert werden.

Im Anschluss an die beschriebenen Fahrzeugtests wurde der Zulassungsprozess gestartet und die dazu erforderlichen Versuchsfahrten gemäß UIC/TSI durchgeführt. Die notwendigen Nachweise entsprechend den Anforderungen der polnische Zulassungsbehörde Urząd Transportu Kolejowego (UTK) wurden erbracht. Im November

2019 erteilte die UTK die Zulassung für den Impuls 36WEa von NEWAG mit Einsatz von DCC. Als nächstes folgt der einjährige Feldversuch im Passagierbetrieb.

Die Erfahrungen im Feldversuch mit dem Triebzug Impuls 36WEa mit aktiver Verzögerungsregelung dienen auch als Grundlage für die Anwendung von DCC in den neuen Generationen von Knorr-Bremse Bremssystemen. Deceleration Control und auch die dafür benötigte Sensorik wird in diesen neuen Plattformen direkt integriert sein und bietet damit eine interessante Erweiterung und Verbesserung des Funktionsumfangs der Bremssysteme ohne zusätzliche Zusatzkomponenten bzw. Installationsaufwand.

6 Fazit:

Die Zulassung des Triebzugs Impuls 36WEa mit DCC ist auch als erstes Referenzprojekt zu sehen, welches das Potenzial einer deutlich vereinfachten Nachweisführung in der Homologation aufzeigt. Durch die Verzögerungsregelung wird die Streuung der Bremswege und die Haftwertausnutzung des Zuges signifikant verbessert und sollte künftig die Aufwände bei den Testfahrten spürbar verringern.

Heute wird die pneumatische Bremse rein druckgeregelt ausgeführt und in der Auslegung für einen bestimmten vordefinierten Belagtyp projektiert. Deceleration Control entkoppelt die Bremsweggenauigkeit weitestgehend von den Toleranzen des Bremssystems und der Drehgestellausrüstung. Dies ermöglicht es in Zukunft, bei der Auswahl der Reibmaterialien besser die passenden Auslegungsoptionen anzubieten, z.B. Beläge zu finden die einerseits das geforderte Reibverhalten einhalten und gleichzeitig ein optimales Verschleißverhalten für niedrige Lebenszykluslasten (LCC), besseres thermisches Verhalten oder optimale Lärminderung aufweisen.

Einsatzszenarien mit Mehrwert öffnen sich auch im automatisierten Fahrbetrieb (Automatic Train Operation, ATO) bis hin zu komplett führerlosen Systemen in der Endausbaustufe oder auf Strecken mit Bahnsteigtürsystemen. Wo immer Fahrzeuge möglichst punktgenau und spät abgebremst werden müssen, bietet ein Fahrzeug mit einer Verzögerungsregelung einen signifikanten Vorteil, um vorhandene Bremswegstreuungen zu reduzieren.

Vitae

Ulf Friesen (53) Dipl.-Ing.: Elektrotechnikstudium an der TU Dresden; 1992 bis 1998 Entwicklungsingenieur Leistungselektronik bei der Magnet-Motor GmbH in Starnberg; ab 1998 Projektierung und Entwicklung neuer Bremssysteme bei der Knorr-Bremse SfS; von 2006 bis 2017 Entwicklungsprojektleiter und Fachreferent Brems- und Diagnosesysteme im Center of Competence für Bremssteuerungen; seit 2018 Fachreferent Systementwicklung im Bereich Global Brake Systems. E-Mail: ulf.friesen@knorr-bremse.com



Ralf Furtwängler (49) Dipl.-Ing.: Elektrotechnikstudium mit Schwerpunkt Steuerungs- und Regelungstechnik an der TU Karlsruhe; 1998 bis 2000 Entwicklungsingenieur Applikationssoftware Bremse; 2001 bis 2009 SW- Projektleitung in diversen Entwicklungsprojekten; 2010 bis 2013 SW-Architekt und Teilprojektleitung für eine neue Elektronikplattform; seit 2013 Funktionsentwicklung im Center of Competence für Bremssteuerungen und später im Bereich Global Brake Systems. E-Mail: ralf.furtwaengler@knorr-bremse.com



Norman Kreisel (35) Dipl.-Ing.: Mechatronikstudium an der TU Dresden. Seit 2011 bei der Knorr-Bremse SfS tätig als Feldmessingenieur, Projektleiter und Systemingenieur für Drehgestell diagnose im Center of Competence für Bremssteuerungen; seit 2018 im Bereich Global Brake Systems tätig. E-Mail: norman.kreisel@knorr-bremse.com



Jörg Braeseke (53) Dipl.-Ing.: Elektrotechnikstudium an der TU Dresden, 1992 bis 2007 Projektierung und Inbetriebsetzung von Antriebssteuerungen für Bahnfahrzeuge, Inbetriebsetzungs- und Projektleiter für Bahnfahrzeugprojekte sowie Systemintegration bei Metro-Turn-Key-Projekten bei der Siemens AG, 2007 bis 2012 stellv. Leiter des Knorr-Bremse-Standortes in Japan, 2013 bis 2017 Manager Rail Service Technology und seit 2018 Fachreferent Sales Strategy im Bereich Rail Services der Knorr-Bremse SfS GmbH. E-Mail: joerg.braeseke@knorr-bremse.com



Anschrift: Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH, Moosacher Straße 80, 80809 München

Dariusz Ciesielski (44): Dipl.-Ing.: Schienenverkehrstudium an der Schlesischen TU Katowice, 2001 bis 2006 FEM Ingenieur bei der Avio Polska, danach bis 2008 CAD Ingenieur bei der TI Automotive. 2008 bis 2010 Systemingenieur bei der Knorr-Bremse Polska; Seit 2011 Abteilungsleiter System Engineering und seit 2015 System Koordinator Bremssysteme für polnische Projekten. E-Mail: dariusz.ciesielski@knorr-bremse.com



Anschrift: Knorr-Bremse Systemy Kolejowe Polska Sp. z o.o. ul. Sz. Szymonowica 85, 30-396 Kraków