Untersuchung der Realisierbarkeit der virtuellen Kupplung unter Berücksichtigung der Bremssysteme der aktuellen Hochgeschwindigkeitszüge

Tavakolinik, Hamidreza[1]; Salander, Corinna[2]; König, Jens[1]

[1]Universität Stuttgart - Institut für Maschinenelemente (IMA)
[2]Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt (DZSF)

Zusammenfassung

Der Einsatz der virtuellen Kupplung im Bahnbereich eröffnet verschiedene neue Perspektiven, die den Schienenverkehr in seiner Flexibilität und Effizienz signifikant stärken können. Bei der virtuellen Kupplung muss das Auffahren des nachfolgenden Zuges unter allen Umständen verhindert werden, weshalb der Betrachtung des Bremsvorgangs und des Bremsvermögens der einzelnen virtuell gekuppelten Züge eine signifikante Bedeutung zukommt. Daher werden hier die Einflüsse relevanter Parameter wie z. B. Streuung des Bremswegs, Bremsstörungen usw. hinsichtlich der Auswirkungen auf den Zwischenabstand bei der virtuellen Kupplung untersucht. Um solche Einflüsse zu berücksichtigen und einen sicheren Betrieb der virtuell gekuppelten Triebfahrzeugen zu gewährleisten, wird ein Sicherheitszuschlag für den Zwischenabstand entwickelt. Zudem werden weitere Vorschläge zur Verkürzung des Zwischenabstands unter Berücksichtigung eines sicheren Bremsvorgangs dargestellt.

Keywords: Virtuelle Kupplung, Hochgeschwindigkeitszug, Zwischenabstand, relativer Bremswegabstand, Bremsmanagement, Zwangsbremsung

1 Einleitung

Im Projekt „*Virtuelle Kupplung für Hochgeschwindigkeitszüge in Folgefahrt und Interaktion mit der Aerodynamik*“ untersuchen das Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) und das Institut für Maschinenelemente (IMA) der Fakultät 7 der Universität Stuttgart die Realisierbarkeit der virtuellen Kupplung von Hochgeschwindigkeitszügen (HGZ). Dabei werden sowohl die virtuelle Kupplung erforscht als auch das aerodynamische Optimierungspotenzial der daraus resultierenden Zugabstände und Zugkonfigurationen untersucht.

Aktuell sind Strecken und Knoten in Deutschland teilweise an ihre Kapazitätsgrenzen gestoßen [1]. Ein Grund für diese Kapazitätsengpässe sind die historisch gewachsenen Betriebsverfahren (auf Basis des Blockprinzips) zur Sicherung des Zugfolgeabstandes, welche große Abstände zwischen den Zügen erfordern. Durch diese Betriebsverfahren kann der Streckendurchsatz nicht ohne weiteres erhöht werden, sodass eine Verlagerung des Straßen- und Luftverkehrs auf die umweltfreundliche Schiene hier nicht möglich ist.

Für das Erreichen der Klimaschutzziele leistet der Schienenverkehr der Zukunft einen wesentlichen Beitrag. Das vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) prognostizierte hohe Verkehrswachstum [2] wird den Schienenverkehr in Deutschland zukünftig vor große Herausforderungen stellen. Bleiben das Eisenbahnnetz sowie die Betriebsverfahren unverändert, wird das derzeitige Problem mit den Kapazitätsengpässen zukünftig um weitere Strecken und Knoten erweitert.

Bei dem ETCS Level 3 sollen die Züge nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft im absoluten Bremswegabstand fahren können [3]. Die Kapazitätsvorteile sind jedoch bei Schnellfahrstrecken begrenzt, wo der absolute Bremsweg bei Geschwindigkeiten um 300 km/h bis zu ca. 5 km betragen kann. Die „Virtuelle Kupplung“ ist ein innovativer Lösungsansatz im Bahnbereich, analog zum Platooning im Straßenverkehr [4]. Erst unter Einsatz der virtuellen Kupplung kann das Fahren im relativen Bremswegabstand realisiert und die Streckenkapazität möglichst optimal genutzt werden.

2 Virtuelle Kupplung

Die virtuelle Kupplung ist eine Schnittstelle, die zur kontaktlosen Verbindung einzelner Triebwagen bzw. Triebzüge zur Bildung eines größeren „virtuellen Zugverbands“ dient. Damit werden die Triebfahrzeuge so miteinander gekuppelt, dass es zwischen ihnen keinen physischen Kontakt gibt. Alle notwendigen Befehle bzw. Steuerungsdaten werden dabei über drahtlose Datenübertragungsverfahren ausgetauscht [5].

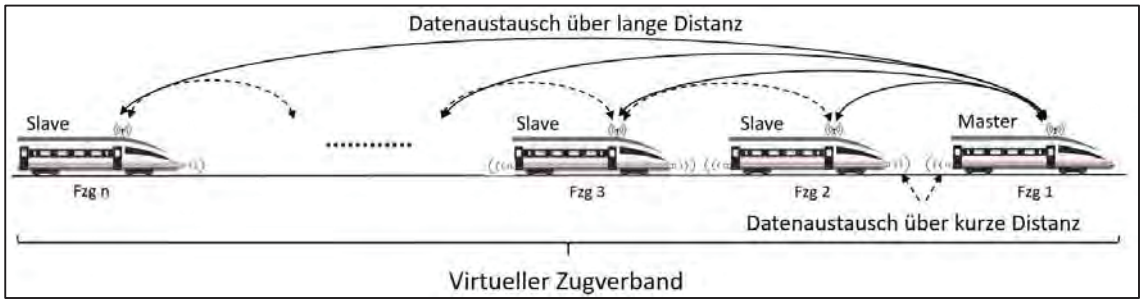

Abbildung 1: Virtueller Zugverband bestehend aus einer beliebigen Anzahl von Zügen

Dieser Beitrag adressiert den möglichen Einsatz der virtuellen Kupplung in Zügen, die sich aktuell im Betrieb befinden. Die virtuelle Kupplung basiert auf drei Grundsteinen.

Erstens muss ein technisches System (Abstandsregelung) einen sicheren Abstand zwischen den virtuell gekuppelten Triebzügen garantieren. Es gibt verschiedene Parameter (wie z. B. Streuung der Bremswege, Bremsstörungen, usw.), die den Zwischenabstand beeinflussen. Die Einflüsse dieser Parameter müssen gründlich untersucht werden, um Aussagen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse treffen zu können und dementsprechend die Zulassungskriterien zu definieren. Die Abstandregelung muss den Anforderungen eines SI-Levels 4 genügen. Die Umsetzung der Abstandregelung in Zügen ist kein Gegenstand dieser Forschungsaktivität. Dies muss spezifisch je nach Konstellation der zu virtuell kuppelnden Züge entwickelt werden.

Zweitens ist ein zuverlässiges drahtloses Kommunikationssystem zur Datenübertragung zwischen virtuell gekuppelten Triebzügen nötig. Unter Einsatz vom GSM-R können Funkfading oder Empfangsstörungen auftreten, die stets zu einer Zwangsbremsung und folglich zu einem unflexiblen Betrieb führen können. In diesem Beitrag wird ein Lösungsansatz vorgestellt, mit welchem der Betrieb unter einer bestimmten Unterbrechungsdauer der Datenübertragung möglich ist.

Drittens ermöglicht die virtuelle Kupplung das dynamische Flügeln von Zugteilen, wobei hier der Weiche eine große Rolle für den sicheren Betrieb zukommt. Sie kann den Wirkungsgerad der virtuellen Kupplung aufgrund ihrer physikalischen Randbedingung begrenzen. Dabei ist es von großer Bedeutung, dass die Weiche nach der Überfahrt des vorausfahrenden Zugs sicher bewegt und verschlossen wird, bevor der nachfolgende Zug die Abzweigung befährt. Passive Weichen ermöglichen den Zügen, ihren Weg selbst zu wählen, wobei hier die Überfahrtsgeschwindigkeit begrenzt ist. Bis jetzt gibt es jedoch keine praktischen Lösungen für passive Weichen für den HGV. Vor diesem Hintergrund sollen rechtliche Fragestellungen in anderen Forschungsaktivitäten diskutiert und notwendige technische Weiterentwicklungen aufgezeigt werden.

2.1 Abstandsregelung

Der Moment, in dem das nachfolgende Fahrzeug (Slave) auf die Bremsanforderung des vorausfahrenden Fahrzeugs (Master) reagiert, beinhaltet bei der virtuellen Kupplung prinzipbedingt eine Verzögerung, die unter Umständen einige Sekunden betragen kann. Während dieser Latenzzeit fährt das nachfolgende Fahrzeug ungebremst weiter vorwärts. Deswegen muss ein Mindestabstand zwischen den virtuell gekuppelten Fahrzeugen eingehalten werden, sodass ein Auffahren ausgeschlossen ist (Abbildung 2) [5].

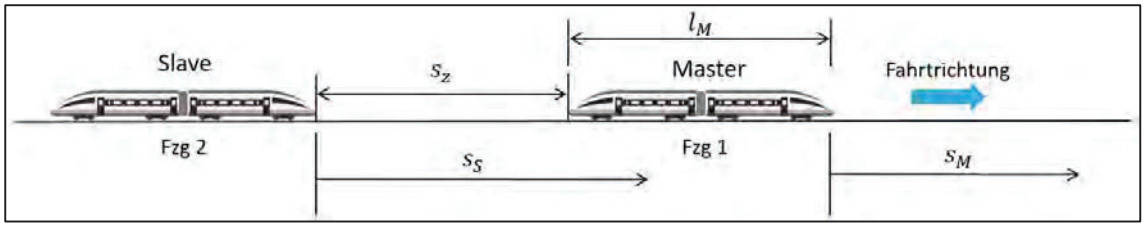

Abbildung 2: Zugfolge beim Fahren unter Einsatz der virtuellen Kupplung

Der Abstand zwischen Triebfahrzeugen kann wie folgt berechnet werden:

$$s_Z(t) = s_M(t) - s_S(t) - l_M$$

l_M ist die Länge des Masters, s_M der Bremsweg des Masters, s_S der Bremsweg des Slaves.

2.2 Basis-Ansatz 1 (Minimum-Zwischenabstand)

In [5] wurden zwei Basis-Ansätze zur Auswahl eines Zwischenabstands vorgestellt. Beim ersten Ansatz wird angenommen, dass eine trotz aller Vorkehrungen nicht vermeidbare Kollision mit einer geringen Geschwindigkeit von weniger als 5 km/h erfolgt, sodass die Aufprallenergie keine plastische Deformation hervorruft. Da bei dem hier vorgestellten Ansatz die Konzentration auf den Einsatz der virtuellen Kupplung in den aktuellen Schienenfahrzeugen und auf den aktuellen Strecken liegt, wird dieser Ansatz als ungeeignet eingestuft.

2.3 Basis-Ansatz 2 (Maximum-Zwischenabstand)

Bei der virtuellen Kupplung tauschen die virtuell gekuppelten Triebfahrzeuge die Informationen kontinuierlich drahtlos aus. Dieser drahtlose Datenübertragungskanal ersetzt die durchgehende Bremsleitung, die in den konventionellen Zügen vorhanden ist. Das GSM-R ist seit Mitte der 1990er Jahre als Bahnstandard im Einsatz. Hierbei sind einige Schwächen wie z. B. geringe Bandbreite und Datenübertragungsrate zu erkennen. Ferner können Funkfading oder Empfangsstörungen auftreten. Zudem sind die

Mobilfunkanbieter lediglich dazu verpflichtet, GSM-R bis 2030 anzubieten [6]. Daher ist eine Weiternutzung von GSM-R für die Umsetzung der virtuellen Kupplung fragwürdig.

Aktuell weist der Mobilfunkstandard 5G ein größeres Potenzial auf. Geplant ist, dass die 5G-Funktechnologie zusammen mit dem IP-basierten FRMCS, dem zukünftigen Nachfolger von GSM-R, umgesetzt wird [7].

Da die virtuell gekuppelten Züge prinzipiell unterschiedliche Relativposition während der Fahrt zu einander aufweisen können und die Güte der Datenübertragung (QoS) je nach befahrenem Gebiet (Bergen, Tunnel, Ballungsraum) oder Wetterverhältnis veränderlich ist, kann eine Unterbrechung der Datenübertragung prinzipiell vorkommen. In diesem ggf. häufig auftretenden Fall müsste der nachfolgende Teilzug eine Zwangsbremsung (analog zur Unterbrechung der durchgehenden Bremsleitung in konventionellen Zügen) auslösen, wenn die Verbindung auch nur für sehr kurze Zeit unterbrochen wird.

Um mit den Unterbrechungen bei der drahtlosen Datenübertragung umgehen zu können und Zwangsbremsungen aufgrund kurzer Verbindungsunterbrechungen zu vermeiden, wird hier in Abhängigkeit des Telekommunikationsverfahrens und des Streckenprofils eine obere Grenze für die Unterbrechungsdauer der Datenübertragung ($t_{la,max}$) definiert.

Wenn diese definierte Unterbrechungszeit (z. B. fünf Sekunden) überschritten wird und der nachfolgende Zug noch keine Nachricht vom vorausfahrenden Zug empfangen hat, wird davon ausgegangen, dass die Datenübertragung unterbrochen ist. Der Slave löst folglich eine Zwangsbremsung aus. Bei einem definierten, ausreichenden Abstand kommt der Slave sicher ohne Kollision zum Stehen. Hierbei sind Unterbrechungen, die kürzer als diese maximal definierte Unterbrechungszeit andauern, akzeptabel. Folglich muss beim zweiten Ansatz der Zwischenabstand größer als obere Grenze der Kollision $s_{Z,max}$ gewählt werden.

3 Einflüsse des Bremsvorgangs auf den Zwischenabstand

Für die Gewährleistung eines sicheren Betriebs bei der virtuellen Kupplung kommt der Betrachtung des Bremsvorgangs der einzelnen virtuell gekuppelten Züge eine signifikante Bedeutung zu.

Für weitere Betrachtungen wird von einem kritischen Szenario ausgegangen, bei dem eine Schnellbremsung durchgeführt wird. Unter Schnellbremsung wird der Einsatz der maximalen Bremskraft bei schnellstmöglicher Wirkung verstanden.

3.1 Bremssysteme eines konventionellen Hochgeschwindigkeitszugs

Nach [8] ist der Einsatz folgender Bremssysteme in einem HGZ zulässig:

- Reibungsbremse (Rad- und Wellenscheibenbremse)
- Elektrodynamische Bremse
- Schienenbremse (Magnetschienenbremse oder Wirbelstrombremse)

Das Bremssteuerungssystem greift bei einer Schnellbremsung geschwindigkeitsabhängig auf verschiedene Bremssysteme zu, deswegen sind die Bremsvermögenskurven der Triebzüge von verschiedenen Herstellern und Baureihen sehr unterschiedlich ausgeführt. Daher werden für die weiteren Betrachtungen exemplarisch der ICE 3 und dessen Bremsvermögenskurve bei einer Schnellbremsung (Abbildung 3) betrachtet, um die systematische Vorgehensweise zu verdeutlichen.

Die gesamte Bremsverzögerung eines Zuges (a_{Br}) wird wie folgt berechnet:

$$a_{Br} = a_{rad} + a_{welle} + a_{el} + a_{sch}$$

a_{rad} ist die Bremsverzögerung der Radscheibenbremse, a_{welle} der Wellenscheibenbremse, a_{el} der elektrodynamischen Bremse und a_{sch} der Schienenbremse.

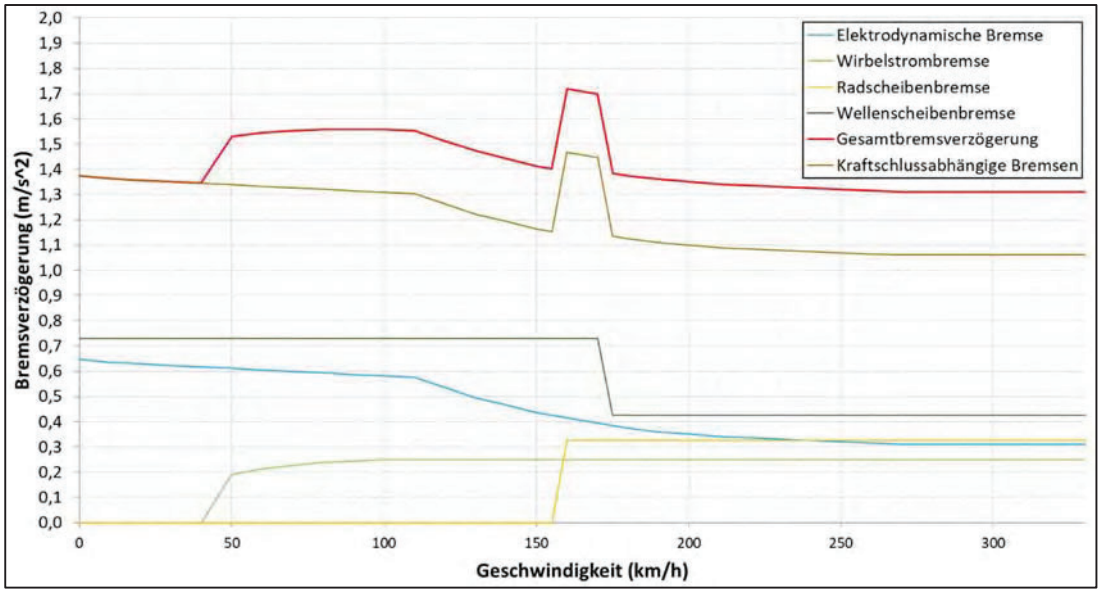

Abbildung 3: Bremskraftverteilung der einzelnen Bremssysteme bei einer Schnellbremsung am Beispiel des ICE 3 (Darstellung in Anlehnung an [9])

3.2 Berücksichtigung der Fehlfunktionen der Bremssysteme

Es existieren verschiedene Parameter, die den Bremsweg und folglich den Zwischenabstand beeinflussen. Wird davon ausgegangen, dass die Kraftanteile der

einzelnen Bremseinheiten eines Bremssystems gleichmäßig erzeugt werden, können die Fehlfunktionen der Bremssysteme durch Bremsfaktoren dargestellt werden. Zur Berücksichtigung der Fehlfunktionen können diese Bremsfaktoren je nach Störungsgrad unterschiedliche Werte ($0 \leq f_x \leq 1$) zugeordnet bekommen. Wenn keine Störung vorhanden ist, sind alle Bremsfaktoren gleich eins. In diesem Fall sind die komplette Bremskraft und somit maximale Verzögerung vorhanden. Falls es beispielhaft einen Totalausfall eines Bremssystems gibt, ist der jeweilige Bremsfaktor gleich null.

Im Folgenden werden zwei Gruppen der Fehlfunktionen der Bremssysteme berücksichtigt. Zunächst werden die Einflüsse der Bremswegstreuung auf die Abstandsregelung ermittelt (Kapitel 4). Hier liegt der Fokus auf dem Verzögerungsanteil der kraftschlussabhängigen Bremssysteme, der sich wie folgt berechnen lässt:

$$a_{Br,H} = a_{rad} + a_{welle} + a_{el}$$

Die Gesamtbremskraft unter Berücksichtigung der Einflüsse der Bremswegstreuung kann wie folgt ermittelt werden:

$$a_{Br,Streu} = f_{Br,H} \cdot a_{Br,H} + f_{sch} \cdot a_{sch}$$

$f_{Br,H}$ ist der Bremsfaktor der kraftschlussabhängigen Bremsen und f_{sch} der Schienenbremse.

Außerdem werden die Einflüsse der Bremsstörungen beim nachfolgenden Triebzug auf die Abstandsregelung ermittelt (Kapitel 5). Die Gesamtbremskraft unter Berücksichtigung der Störungen der Bremssysteme lässt sich wie folgt berechnen:

$$a_{Br,Stör} = f_{a,rad} \cdot a_{rad} + f_{a,welle} \cdot a_{welle} + f_{a,el} \cdot a_{el} + f_{a,sch} \cdot a_{sch}$$

$f_{a,rad}$, $f_{a,welle}$, $f_{a,el}$ und $f_{a,sch}$ sind die Bremsfaktoren der Radscheibenbremse, der Wellenscheibenbremse, der elektrodynamischen Bremse und Schienenbremse.

Die Einflüsse ausgewählter, relevanter Parameter, die auf den Zwischenabstand auswirken, werden nachfolgend untersucht, um zunächst Aussagen zur Zuverlässigkeit und dann in einem weiteren Schritt Aussagen hinsichtlich der Zulassungskriterien zu treffen.

4 Einflüsse der Bremswegstreuung auf die Abstandsregelung

Es gibt zahlreiche Parametern, die einen Einfluss auf die Bremswegstreuung haben, wie z. B. unterschiedliche Witterungseinflüsse oder der Verschleißzustand. Exemplarisch werden hier die Einflüsse von zwei ausgewählten Parametern für den Fall einer Schnellbremsung betrachtet. Diese sind zum einen die Konditionierung des Reibwerts zwischen Rad und Schiene und zum anderen der Einfluss von abgenutzten Rädern.

4.1 Konditionierung des Reibbeiwertes

Das Verhältnis zwischen der Verzögerungskraft der kraftschlussabhängigen Bremssysteme F_V, dem Kraftschlussbeiwert μ und der Gewichtskraft Q wird nach Coulomb durch folgende Gleichung beschrieben:

$$F_V = Q \cdot \mu$$

Die Verzögerungskraft, die durch die kraftschlussabhängigen Bremssysteme auf die Schiene ausgelöst wird, hängt nach obiger Gleichung proportional vom Kraftschlussbeiwert ab.

Die kraftschlussabhängigen Bremssysteme dürfen den Kraftschlussbeiwert zw. Rad und Schiene nur so hoch ausnutzen, dass die Räder nicht ins Gleiten geraten. Um dies auch unter ungünstigen Witterungsverhältnissen umzusetzen, darf bei einer Schnellbremsung der maximal ausgenutzte Kraftschlussbeiwert den Wert 0,15 nicht überschreiten [8].

Bei mit Zwischenmedien kontaminierten Schienen wurde bereits beobachtet, dass sich die Kraftschlussverhältnisse nach der Überrollung von einzelnen Radsätzen bei den nachfolgenden Radsätzen verbessern [10]. Dieser sog. Konditionierungseffekt soll bei virtuell gekuppelten Zügen ausgenutzt werden. Wenn der verfügbare Kraftschlusswert geringer als 0,15 ist, bewirkt der bremsende, vorausfahrende Teilzug so, dass die Schiene durch den zur Kraftübertragung notwendigen Schlupf im Rad-Schiene-Kontakt gesäubert wird. Der nachfolgende Teilzug findet dann bessere Kraftschlussbedingungen vor, weswegen dessen Bremsleistung, also die Ausnutzung des maximal möglichen Kraftschlusses, erhöht werden kann, was den Bremsweg verkürzt.

Der effektiv verfügbare Kraftschluss kann durch den Bremsfaktor $f_{Br,H}$ der kraftschlussabhängigen Bremssysteme dargestellt werden.

$$f_{Br,H} = \frac{\mu_{Ist}}{\mu_{Soll}}$$

$\mu_{Soll} = 0{,}15$ (maximal zulässiger Kraftschlussbeiwert) und $\mu_{Ist} \leq 0{,}15$ (aktueller Kraftschlussbeiwert).

Um den Einfluss des Konditionierungseffekts bei aktuell im Betrieb befindlichen Zügen zu untersuchen, werden beispielhaft zwei ICE 3-Teilzüge ausgewählt. Hierbei wird angenommen, dass das Kraftschlussverhältnis zwischen Rad und Schiene schlecht und geringer als 0,15 ist, deswegen wird der Reibbeiwert des vorausfahrenden Zugteils um 20% reduziert. Zudem wird vorausgesetzt, dass der Reibbeiwert des nachfolgenden Zugteils durch die Überfahrt des vorausfahrenden Zugs um 10% erhöht wird. In diesem Fall betragen die Bremsfaktoren $f_{Br,H,Fzg1} = 0{,}8$ und $f_{Br,H,Fzg2} = 0{,}9$.

Der Einfluss dieses Aspekts auf den Zwischenabstand wird mittels eines Programms, das für die Simulation des Fahrens mit virtueller Kupplung entwickelt wurde, bewertet. Hierbei wird von einem Zwischenabstand von ca. 417 m ausgegangen, der sich aus den Ausgangsgeschwindigkeiten der Teilzüge und Latenzzeit des Slaves ergibt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Teilzüge die gleiche Ausgangsgeschwindigkeit von 300 km/h aufweisen. Der vorausfahrende Teilzug führt eine Schnellbremsung aus und der hintere Teilzug reagiert mit einer angenommenen Latenzzeit von $t_{la} = 5$ s darauf.

Gemäß den Ergebnissen der Simulation ist der Bremsweg des nachfolgenden Zugs um ca. 250 m geringer als der Bremsweg des vorausfahrenden Zugs, sodass der Konditionierungseffekt des Reibbeiwertes seine Wirkung zeigt. Die beiden Züge kommen somit mit einem Zwischenabstand von ca. 250 m sicher zum Stehen.

4.2 Abnutzungsgrad der Räder

Die Abnutzung der Räder führt zwar zur Streuung der Bremswege der konventionellen HGZ, verursacht aber im täglichen Betrieb keine Probleme. In Abhängigkeit des Folgeabstands virtuell gekuppelter Züge haben die unterschiedlich abgenutzten Räder jedoch unter Umständen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den erforderlichen Zwischenabstand bei einem Bremsvorgang.

Der Zusammenhang zwischen der Bremskraft der kraftschlussabhängigen Bremssysteme $F_{Br,H}$, dem Bremsmoment M_{Br} und dem Raddurchmesser r_R wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$F_{Br,H} = \frac{M_{Br}}{r_R}$$

Der Bremsverzögerungsanteil der kraftschlussabhängigen Bremssysteme $a_{Br,H}$ kann wie folgt berechnet werden:

$$a_{Br,H} = \frac{F_{Br,H}}{m \cdot \rho} = \frac{M_{Br}}{m \cdot \rho} \cdot \frac{1}{r_R}$$

ρ ist der Rotationsfaktor und m die Fahrzeugmasse.

Diese Gleichungen zeigen, dass die Bremskraftanteile der Reibungsbremse und elektrodynamischen Bremse antiproportional vom Raddurchmesser abhängen. In diesem Fall wird der Bremsfaktor wie folgt ermittelt: $f_{Br,H} = \frac{r_{R,abg}}{r_{R,Ist}}$

$r_{R,abg}$ ist der Radradius im maximal abgenutzten Zustand und $r_{R,Ist}$ der aktuelle Radradius vom Fahrzeug.

Bei den hier betrachteten zwei virtuell gekuppelten ICE 3-Teilzügen wird der Einfluss der unterschiedlichen Raddurchmesser auf den Zwischenabstand im Extremfall

berechnet. Es wird angenommen, dass das vorausfahrende Fahrzeug über maximal zulässig abgenutzte Räder mit einem Durchmesser von 858 mm und das hintere über neue Räder mit einem Durchmesser von 920 mm verfügt [11]. Die Bremsfaktoren der Teilzüge betragen somit $f_{Br,H,Fzg} = \frac{858\,mm}{858\,mm} = 1$ und $f_{Br,H,Fzg2} = \frac{858\,mm}{920\,mm} = 0{,}93$.

Wird davon ausgegangen, dass die Kraft, die von dem Bremszangen aufgebracht wird, bei beiden Teilzügen identisch ist und der ausgenutzte Kraftschlussbeiwert den maximal zulässigen Wert von 0,15 nicht überschreitet, verfügt der vorausfahrende Zug über ein größeres Bremsvermögen, als der nachfahrende.

Der daraus resultierende Einfluss auf den Zwischenabstand wird mittels des entwickelten Simulationsprogramms bewertet (Abbildung 4). Hierbei wird von einem Ausgangszwischenabstand von ca. 417 m ausgegangen, der sich aus der Ausgangsgeschwindigkeit und Latenzzeit des Slaves ergibt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die beiden Teilzüge die gleiche Ausgangsgeschwindigkeit von 300 km/h aufweisen. Der vorausfahrende Teilzug führt eine Schnellbremsung aus und der hintere Teilzug reagiert mit einer angenommenen Latenzzeit von $t_{la} = 5$ s darauf.

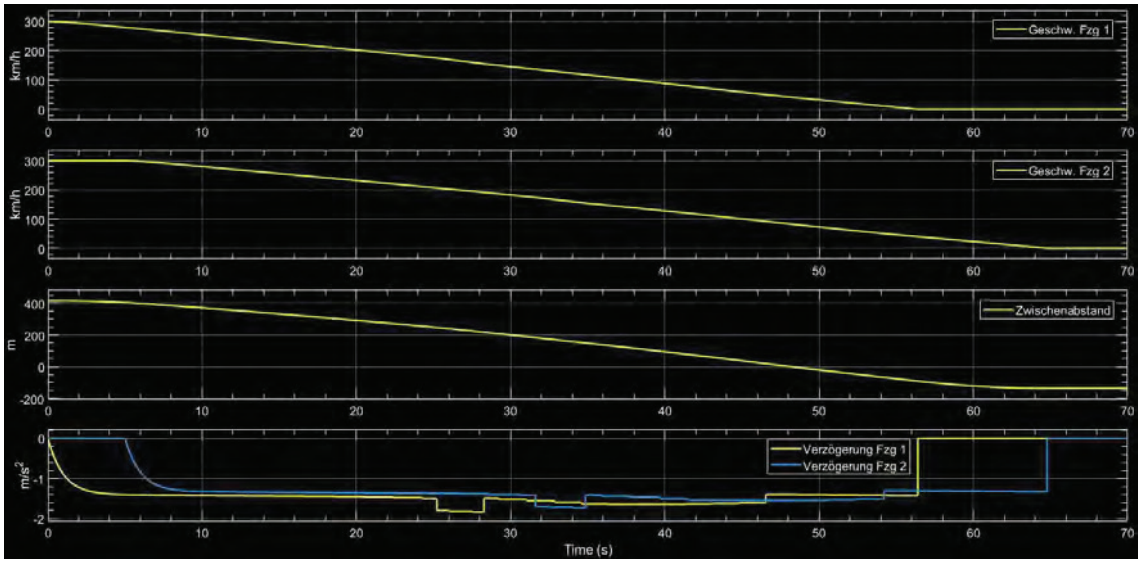

Abbildung 4: Einfluss der unterschiedlichen Raddurchmesser auf den Zwischenabstand

Gemäß den Ergebnissen der Simulation würden die Fahrzeuge in diesem Szenario aufgrund unterschiedlicher Raddurchmesser mit einer Geschwindigkeit von ca. 40 km/h miteinander kollidieren. Um den Einfluss der unterschiedlichen Raddurchmesser auf den Bewegungszustand der Teilzüge auszugleichen und eine mögliche Kollision zu vermeiden, muss der Zwischenabstand um einen Wert von ca. 140 m vergrößert werden.

5 Einflüsse der Bremsstörungen auf die Abstandsregelung

Wenn eine Bremsstörung innerhalb des vorausfahrenden Triebzugs stattfindet, verursacht diese kein Sicherheitsproblem für den virtuellen Zugverband, da nur der Bremsweg des vorausfahrenden Zugs sich verlängert. Dieses Thema wird erst sicherheitsrelevant, wenn diese Störung beim nachfolgenden Triebzugs auftritt.

Wird bei der Bestimmung des Zwischenabstands davon ausgegangen, dass Teilzüge das gleiche, volle Bremsvermögen aufweisen, würde eine Bremsstörung des nachfolgenden Teilzugs zu einer Kollision zwischen den virtuell gekuppelten Teilzügen führen. Deswegen wird hier untersucht, wie groß der Einfluss der Bremsstörungen auf den Zwischenabstand sein könnte.

Unter diesem Aspekt werden folgende ausgewählte hochrelevante Szenarien möglicher Bremsstörungen innerhalb des nachfolgenden Zugs betrachtet.

- Ausfall der pneumatischen Bremse (z. B. infolge Ausfalls eines Bremssteuerventils in einem Wagen)
- Ausfall der Wirbelstrombremse (z. B. infolge Ausfalls der Bremseinheiten der Wirbelstrombremse in einem Drehgestell)

5.1 Ausfall der pneumatischen Bremse in einem Wagen

Das pneumatische Bremssystem weist eine hohe Ausfallsicherheit auf, sodass der Totalausfall dieses Bremssystems ein höchst unwahrscheinliches Szenario darstellt. Deswegen umfassen die weiteren Betrachtungen nur Teilausfälle. Die Wellenscheibenbremse des ICE 3 erzeugt eine größere Bremskraft als die Radscheibenbremse dieses Zugs (siehe Abbildung 3). Daher wird davon ausgegangen, dass beispielweise das Steuerventil in einem mit der Wellenscheibenbremse ausgerüsteten Wagen ausfällt.

Der beispielhafte Ausfall der Wellenscheibenbremse in einem Wagen hat eine Reduzierung der Gesamtkraft der Wellenscheibenbremse um 1/4 zur Folge. Aktuelles Bremskonzept des ICE 3 sieht keine Bremsreserve vor, durch welche dieser Ausfall kompensiert werden könnte. Dieser Ausfall wird durch $f_{a,welle}$ dargestellt ($f_{a,welle} = \frac{3}{4}$).

Somit ergibt sich die Gesamtbremsverzögerung a_{Br} zu:

$$a_{Br,Stör} = a_{rad} + \frac{3}{4} \cdot a_{welle} + a_{el} + a_{sc}$$

Der Einfluss des Ausfalls der kompletten Wellenbremsscheiben-Anlage in einem Wagen auf den Zwischenabstand wird mittels des Programms, das für die Simulation des Fahrens mit virtueller Kupplung entwickelt wurde, bewertet (Abbildung 5). Dabei wird davon ausgegangen, dass die beiden Teilzüge die gleiche Ausgangsgeschwindigkeit von 300 km/h aufweisen. Der vorausfahrende Teilzug führt eine Schnellbremsung aus und der hintere Teilzug reagiert mit einer angenommenen Latenzzeit von $t_{la} = 5$ s darauf. Deswegen beträgt der Ausgangszwischenabstand ca. 417 m.

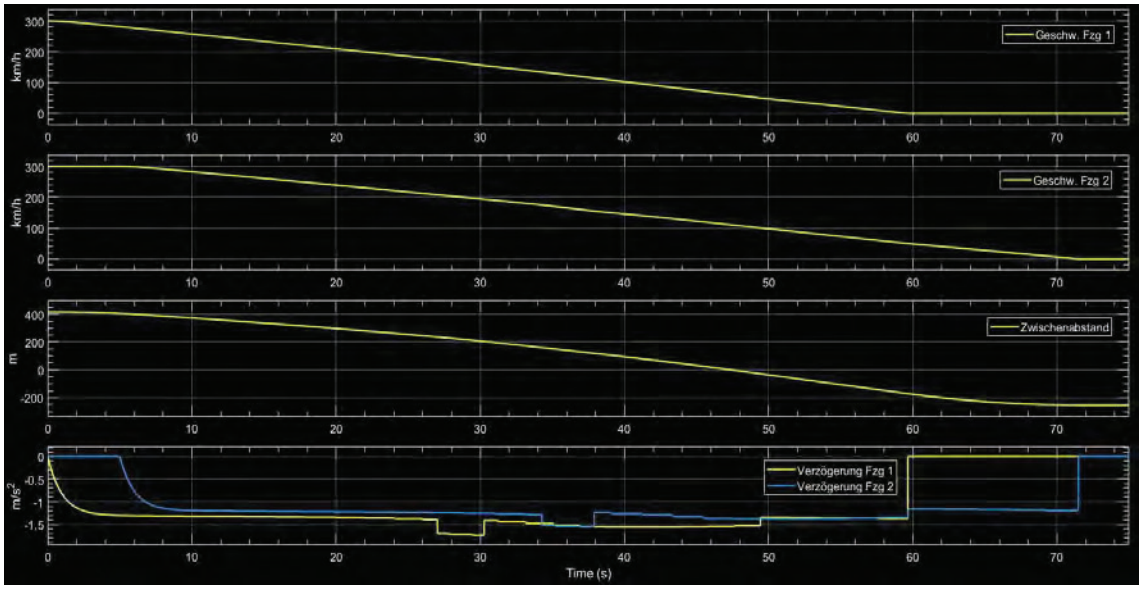

Abbildung 5: Ausfalls der pneumatischen Bremse in einem Wagen

Gemäß den Ergebnissen der Simulation kollidieren die Fahrzeuge mit einer Aufprallgeschwindigkeit von ca. 50 km/h miteinander. Um den Einfluss des Ausfalls der pneumatischen Bremse auf den Bewegungszustand der virtuell gekuppelten Triebzüge in diesem Beispiel auszugleichen und eine mögliche Kollision zu vermieden, muss der Zwischenabstand um einen Wert von ca. 250 m vergrößert werden.

5.2 Ausfall der Wirbelstrombremse in einem Drehgestell

Das gesamte System der Wirbelstrombremse wird auf mehrere Einheiten aufgeteilt, die vollkommen unabhängig voneinander arbeiten, sodass der Ausfall einer einzelnen Einheit keine nachfolgenden Ausfälle anderer Einheiten mit sich bringt [8]. Es ist für eine einwandfreie Funktion der Wirbelstrombremse erforderlich, dass die Magnetspulen sicher in einen vorgegebenen Abstand über die Schienenkopfoberfläche gebracht und gehalten werden.

Der Ausfall der Bremseinheiten der Wirbelstrombremse in einem Drehgestell ist ein vorstellbares Szenario, da die Wirkung der Elektromagnete und des induzierten Feldes nur bei möglichst exaktem Abstand der Magnetspule von der Schiene voll zur Geltung kommen kann, die ggf. nicht immer gewährleistet werden könnte.

Das System der Wirbelstrombremse des ICE 3 sieht 16 voneinander unabhängige Bremseinheiten vor. Der beispielhafte Ausfall der Wirbelstrombremse in einem Drehgestell hat eine Reduzierung der Gesamtkraft dieses Bremssystems um 1/8 zur Folge. Dieser Ausfall wird durch $f_{a,sch}$ dargestellt. Der Bremsfaktor beträgt $f_{a,sch} = \frac{7}{8}$.

$$a_{Br,Stör} = a_{rad} + a_{welle} + a_{el} + \frac{7}{8} \cdot a_{sch}$$

Der Einfluss des Ausfalls der Wirbelstrombremse auf den Zwischenabstand wurde mittels des Simulationsprogramms bewertet. Gemäß den Ergebnissen der Simulation kollidieren die Fahrzeuge mit einer Aufprallgeschwindigkeit von ca. 30 km/h miteinander. Um den Einfluss des Ausfalls der Wirbelstrombremse auf den Bewegungszustand der virtuell gekuppelten Triebfahrzeuge auszugleichen und eine mögliche Kollision zu vermeiden, muss der Zwischenabstand um einen Wert von ca. 60 m vergrößert werden.

6 Fazit und Ausblick

Die Abstandregelung muss den Anforderungen eines SI-Levels 4 genügen. Hierbei kommt die Betrachtung des Bremsvorgangs und des Bremsvermögens der einzelnen virtuell gekuppelten Züge eine herausragende Bedeutung zu. Dieser Beitrag adressiert den möglichen Einsatz der virtuellen Kupplung in aktuell im Betrieb befindlichen Zügen. Daher werden aktuelle Bremssysteme weiterhin verwendet. Dies hat den Vorteil, dass nur ein Nachweis gleicher Sicherheit, zu führen, ist.

Aktuell wird bei einer Schnellbremsung der Einsatz der maximalen Bremskraft bei schnellstmöglicher Wirkung verstanden. Nach diesem Grundprinzip führt jede hier betrachtete Fehlfunktion während der Schnellbremsung – abgesehen vom Vorteil der Konditionierung des Reibbeiwertes vom vorausfahrenden Fahrzeugs – zu einem Aufprall zwischen virtuell gekuppelten Triebzügen. Um einen Aufprall zu verhindern, muss ein relativ großer Sicherheitszuschlag für den Zwischenabstand berücksichtigt werden. Dies reduziert wiederum die Leistungsfähigkeit der virtuellen Kupplung und lässt nicht zu, der Streckendurchsatz durch die dichte Folgefahrt optimal erhöht zu werden.

Um den Zwischenabstand trotzdem klein zu halten, werden folgende Vorkehrungen vorgeschlagen, die beim Zulassungsprozess berücksichtigt werden sollten:

- Es muss eine ausreichende Reserve von möglichst kraftschlussunabhängigen Bremsen bei virtuell gekuppelten Zügen aufgebaut werden, auf welche bei Fehlfunktionen der Bremssysteme zugegriffen werden kann. Dies ist je nach Ausmaß erforderlicher Reserve mit weiterem monetärem Aufwand verbunden.
- Das in aktuellen Hochgeschwindigkeitszügen befindliche Diagnosesystem muss für die virtuell gekuppelten Züge weiterentwickelt werden, indem es die maßgebenden Fehlfunktionen der Bremssysteme detektiert und entsprechende Maßnahmen ergreift. Damit unterliegt die Diagnose auch einem Sicherheitsanspruch, der je nach Konstellation der zu virtuell kuppelnden Züge zu erforschen und zu entwickeln ist. Dies muss in anderen Forschungsaktivitäten betrachtet und notwendige technische Weiterentwicklungen aufgezeigt werden.
- Die Schnelligkeit und die Reichweite der Detektion der Fehlfunktionen durch das Diagnosesystem ist ein weiterer wichtiger Faktor. Je schneller eine Fehlfunktion detektiert wird, desto weniger Bremsreserve ist erforderlich, um deren Auswirkungen zu kompensieren.
- Zudem kann die Grenze des maximal zulässigen Kraftschlussbeiwerts für die kraftschlussabhängigen Bremssysteme des nachfolgenden Zugs erhöht werden. Hierbei müssen allerdings Regelwerke im Eisenbahnrecht des Bundes und der Europäischen Union angepasst werden.

Außerdem müssen die Störungsmöglichkeiten und deren Zusammenwirkungen je nach Kombination der Teilzüge weiter analysiert und deren Ausfallwahrscheinlichkeiten untersucht werden. Dementsprechend können die Höhe der Bremsreserve und das Konzept des Diagnosesystems objektspezifisch bestimmt werden.

Darüber hinaus können durch die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren die Ist-Verzögerungswerte der Teilzüge in gewissen Grenzen gemessen, aneinander angepasst und übertragen werden. Dementsprechend kann die Bremskraft bei einer Betriebsbremsung durch einen aktiven Eingriff im Bremssystem geregelt werden. Dies muss jedoch bei einer gestörten Datenübertragung gründlich untersucht werden. Es ist zu erwähnen, dass aktuell bei einer Schnellbremsung kein aktiver Eingriff im Bremskreis zur Regelung des Bremsvermögens gestattet ist. Zielorientierte Diskussionen, Analysen und Anpassungen des geltenden gesetzlichen Rahmens auf nationaler und internationaler Ebene können die Etablierung der virtuellen Kupplung beschleunigen.

Literatur

[1] DB Netz AG: *Übersicht der überlasteten Schienenwege,* 2020; URL: https://fahrweg.dbnetze.com/resource/blob/1354970/e4712a52ebc451ac44ac91ca4f8bebfa/snb_2019_anlage_4-3-2-data.pdf, Zugriff: 07.04.2021.

[2] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bundesverkehrswege-plan 2030*, Juni 2020; URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/masterplan-schienenverkehr.pdf?__blob=publicationFile, Zugriff: 23.12.2020.

[3] Bartholomeus, Maarten; Arenas, Laura; Treydel, Roman; Hausmann, Francois: *ERTMS Hybrid Level 3.* In: SIGNAL+DRAHT, Nr. 1+2, S. 15 – 22, Feb. 2018.

[4] Smith, Stanley; Kim, Yeojun; Guanetti, Jacopo; Li, Ruolin; Firoozi, Roya; Wootton, Bruce; A. Kurzhanskiy, Alexander; Borrelli, Francesco; Horowitz, Roberto; Arcak, Murat: *Improving Urban Traffic Throughput With Vehicle Platooning: Theory and Experiments*, In: IEEE Access, Journal Article, vol. 8, pp. 1208 – 1223, Aug. 2020.

[5] Tavakolinik, Hamidreza; Salander, Corinna; König, Jens: *Methoden zur Bestimmung eines sicheren Zwischenabstands bei der Virtuellen Kupplung*. In Tagungsband der 18. Internationalen Schienenfahrzeugtagung Dresden, 22-24. Sep. 2021.

[6] Michler, Oliver; Richter, Robert; Wolf, Alexander: *Interoperabilitätsuntersuchungen zwischen LTE und GSM-R für Bahnbetriebsanwendungen auf Basis von NI-basierten SDR-Komponenten*; In Tagungsband vom 21. VIP-Kongress 2016, URL: http://www.etz.de/files/048_richter-michler-wolf.pdf, Zugriff: 02.09.2019.

[7] Kraft, Christine: *Testanlagen für die Digitalisierung im Bahnsektor, Teil 2.* In: ZEVrail, Jahrgang 144, Ausgabe 01/02, 2020.

[8] DIN EN 15734-1: *Bahnanwendungen – Bremssysteme für Hochgeschwindigkeitszüge – Teil 1: Anforderungen und Definitionen*, Sep. 2013.

[9] Gräber, Johannes; Kunz, Michael: *Integration der linearen Wirbelstrombremse des ICE3 in die Infrastruktur – technische Aspekte und Betriebserfahrungen.* In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Nr. 07-08, S. 480 – 488, 2004.

[10] Bosso, N.; Magelli, M.; Zampieri, N.: *Investigation of adhesion recovery phenomenon using a scaled roller-rig*. In: Vehicle System Dynamics, pp. 295 – 312, Oct. 2019.

[11] DB AG: *Fahrzeuglexikon - Open-Data-Portal, 2020*; URL: https://download-data.deutschebahn.com/static/datasets/Fahrzeuglexikon_2020.pdf, Zugriff: 30.12.2020.

Autoren

Tavakolinik, Hamidreza

M. Sc. (35), 2009 bis 2011 Masterstudium der Telekommunikation, 2006 bis 2008 Bachelorstudium der Elektronik an der Teheran-Süd Universität. Durchführung diverser Projekte in den Bereichen Elektronik, Digitalisierung des Bahnbetriebs, Messdatenübertragung der Schienenfahrzeuge, Fahrerassistenzsysteme zur Hinderniserkennung, Softwaresysteme für Bahnsektor sowie Gleisgeometriemessfahrzeug u. a. bei Mokarrar Industrial Group und seit Januar 2017 als Akademischer Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart. E-Mail: hamid.tavakoli@ima.uni-stuttgart.de

Salander, Corinna

Prof. Dr.-Ing., Direktorin des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung (DZSF), Dresden. Studium der Physik an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Promotion in Elektrotechnik an der Technischen Universität Clausthal, verschiedene Stationen bei der Deutschen Bahn AG, der Europäischen Eisenbahnagentur und der Bombardier Transportation GmbH, von 2014 bis 2019 Inhaberin der Professur für Schienenfahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart, seit 2020 Direktorin des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung (DZSF) in Dresden. E-Mail: SalanderC@dzsf.bund.de

König, Jens

Dr.-Ing. (41), Studium des Maschinenwesens an der Universität Stuttgart, anschließend Promotion im Themenfeld der Schienenfahrzeuge an der Universität Stuttgart. Ab 2008 am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Fahrzeugkonzepte. Ab 2014 Leiter der Gruppe Leichtbaukonzepte und Methoden Schienenfahrzeuge und ab 2019 Leiter des Projektknotens Personenfernverkehr im Next Generation Train Projekt des DLR. Seit Mai 2020 Professurvertreter an der Universität Stuttgart und Leiter der Professur für Schienenfahrzeugtechnik am Institut für Maschinenelemente. E-Mail: jens.koenig@ima.uni-stuttgart.de