

Erweiterung der Monte Carlo Analyse um Bremssystemregelkreise zur Verbesserung von Bremskurven

Extension of Monte Carlo Analysis to Include Braking System Control Loops for the Improvement of Braking Curves

Dipl.-Ing. Ernst Hohmann, München (Deutschland)

Zusammenfassung

Die von der European Union Agency for Railways (ERA) seit dem Jahr 2010 grundsätzlich als Möglichkeit zur Berechnung von ETCS-Notbremskurven akzeptierte, stochastische Monte-Carlo-Methode birgt auch beachtliche Potenziale zur Modellierung der wechselseitigen Zusammenhänge innerhalb von Bremssystemen. Erweitert durch deren Regelkreise könnte sie im nächsten Schritt eine präzisere Berechnung der Bremskurven ermöglichen, so dass für ein gleiches Emergency Brake Confidence Level weniger Puffer in Form eines höheren K_{dry_rst} -Werts hinterlegt werden müsste. Dies würde – ohne Kompromisse bei der Sicherheit einzugehen – Potenziale für kürzere Zugfolgezeiten und in der Folge höhere Streckendurchsätze bieten. Um den potenziellen Nutzwert gerade vor dem zukünftigen ATO-Betrieb „auf die Schienen“ zu bringen ist allerdings eine Klärung der Integration der über die Monte-Carlo-Methode berechneten K-Werte in die geltenden Sicherheitsnachweise nötig.

Abstract

Since 2010, the European Union Agency for Railways (ERA) has accepted the stochastic Monte Carlo method in principle as a viable option for calculating ETCS emergency braking curves. However, the method also offers considerable potential for modeling the mutual relationships within braking systems. If control loops of a system are integrated into the method, it can allow more precise calculation of braking curves, which means that the same level of emergency braking safety could be achieved by applying a lower margin in the form of a higher K_{dry_rst} value. This would provide opportunities for reducing train headways and thus increasing on-track throughput – without in any way compromising safety. But to bring this potential real-world benefit “to the track” before the impending launch of ATO, it is important to clarify how best to integrate K (correction factor) values computed using the Monte Carlo method into the prevailing safety certification.

1 Quo Vadis, Monte-Carlo-Methode

Große Jachten, ein spektakuläres Formel-1-Rennen und Casinos – mindestens eins der drei dürften die meisten vor dem inneren Auge haben, wenn die Worte Monte Carlo fallen. In der Wahrscheinlichkeitsrechnung Bewanderte denken womöglich an ein nach dem Stadtstaat benann-

tes stochastisches Verfahren. Eines, das sehr häufig hintereinander Zufallsexperimente beschreibt. Theoretisch ließen sich diese Zufallsexperimente real durch Würfeln durchführen, was natürlich viel zu lange bräuhete. Deshalb werden die Zufallszahlen gemeinhin von Computerprozessoren generiert. Die Methode eignet sich sehr gut zur Berechnung statistischer Mittelwerte und

Abweichungen. Im Jahr 2006 wurde sie von der UIC zur Berechnung von ETCS-Notbremskurven vorgeschlagen [1] und vier Jahre später von der European Union Agency for Railways (ERA) als Möglichkeit akzeptiert [2]. Darüber hinaus bietet sich die Methode jedoch auch an, um nicht mehr nur entlang einer Hierarchieebene im Bremssystem Aussagen zu dessen Ausfallwahrscheinlichkeiten und

Leistungsstreuung zu geben, sondern sie bereits bei der Auslegung von Bremssystemen in deren Regelkreis einzusetzen. Somit ließen sich einerseits schon zu diesem sehr frühen Zeitpunkt in der Entwicklung Aussagen über die im Betrieb notwendigen ETCS-Bremskurven treffen – andererseits auch die Bremskurven selbst präziser berechnen.

2 Bisheriger Einsatz der Methodik

Angewendet auf Bremssysteme von Schienenfahrzeugen ist die Monte-Carlo-Methode in der Lage, die statistische Verteilung bremsrelevanter Eigenschaften sowie deren Einfluss auf die Bremsperformance zu beschreiben. Dabei berücksich-

systems. Für Letzteres steht etwa die sogenannte Hoch-Niedrig-Abbremsung im Hochgeschwindigkeitsbereich.

Da das Modell die bremsrelevanten Eigenschaften mit ihren statistisch auftretenden Wahrscheinlichkeiten verknüpft, öffnet es auch die Option einer zusätzlichen Anwendung: Das Einfügen beliebiger zufälliger Werte der Eigenschaften zur Simulation des zufälligen Verhaltens des Bremssystems [3].

3 Integration von Brems-systemregelkreisen in die Monte-Carlo-Methode

Das gleiche Prinzip lässt sich nun auch für die wechselseitigen Zusammenhänge innerhalb des Bremssystems durchfüh-

baren Komponentenausfälle (sowie deren Kombination untereinander) den fahrzeug- oder zugverbandsspezifischen Korrekturfaktor K_{dry_rst} berechnen. Dieser wird für die verschiedenen betriebsseitig geforderten EBCLs (Emergency Brake Confidence Level, dt.: Vertrauensniveaus) geschwindigkeitsabhängig festgelegt und setzt die Verzögerung eines Bremssystems in einem bestimmten Zustand ins Verhältnis zur nominalen Verzögerung. Wie in der Vergangenheit liefern die K_{dry_rst} -Werte auch weiterhin die Datenbasis an die ETCS Onboard Unit zur Bestimmung der betrieblichen Bremskurven – allerdings basieren die Werte nicht auf formal definierten Toleranzen. Stattdessen werden sie mithilfe der Monte-Carlo-Methode entlang der Eintrittswahr-

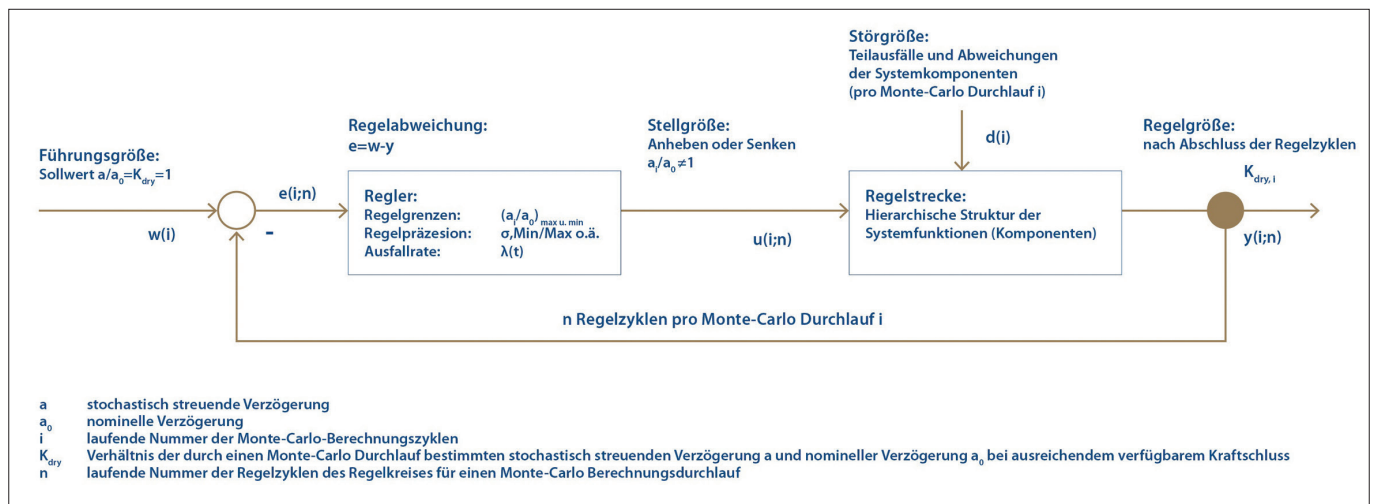


Bild 1: Regelkreis im Monte-Carlo-Simulationskontext, beispielsweise zur Bestimmung von K_{dry}

tigt sie Ausfall- und Abweichungswahrscheinlichkeiten von Parametern mit Einfluss auf die Bremsperformance. Ausgangspunkt hierfür ist bislang ein Hierarchiemodell, dass die Auswirkungen einer Reihe von Parametern mathematisch modelliert. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um solche zur Architektur des Bremssystems bestimmenden Parameter. Beispielsweise zu nennen sind Wagen oder Drehgestell selektive Bremsansteuerung, die Streuung der Kennwerte einzelner Bremssystemkomponenten (Zylinderdrücke, Gestängewirkungsgrade, Reibwerte), die Zuverlässigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit der einzelnen Systemkomponenten, die Abhängigkeiten der Systemkomponenten untereinander sowie einzelne Funktionen des Brems-

ren. Etwa, ob sich die Parameter-Abweichung oder gar der Ausfall einer Komponente funktional auf weitere Komponenten überträgt.

Den Ausgangspunkt hierfür generiert das Monte Carlo-Modell selbst: Es „würfelt“ einen beliebigen vom gewünschten Zustand abweichenden Zustand. Dieser Zustand wird daraufhin wie im konkreten Bremssystem ausgeregelt. Gespeichert wird abschließend der sich einstellende ausgeregelte Endzustand. Dieser „Würfel“/Regelzyklus (Bild 1) wiederholt sich in der Größenordnung von 10 bis 100 Milliarden Rechenzyklen – solange, bis die Korrekturfaktoren aller gewünschten Vertrauensbereiche (EBCL) ermittelt wurden. Auf gleiche Weise kann die Monte-Carlo-Simulation nun für praktisch alle denk-

scheinlichkeiten der konkreten Bremssystemzustände ermittelt.

Wichtig zum Verständnis des Gesamtzusammenhangs: Im Sinne des UIC-Vorschlags aus dem Jahr 2006 bewertet „Monte Carlo“ Ausfallwahrscheinlichkeiten von Bremssystemkomponenten in Beziehung zur erwartbaren Bremsleistung, wenngleich es keine Bewertung über die formal erreichbare Sicherheitsintegrität abgibt. Wohl aber quantifizieren die Ergebnisse nun schon im Designprozess des Bremssystems die Bremsperformance, sodass ein Zug mit gut begründeten Sicherheitsmargen beaufschlagt werden könnte. Werden konventionell gesteuerte Bremssysteme durch Regelzyklen erweitert – und diese auch in der Monte Carlo Simulation mit berücksich-

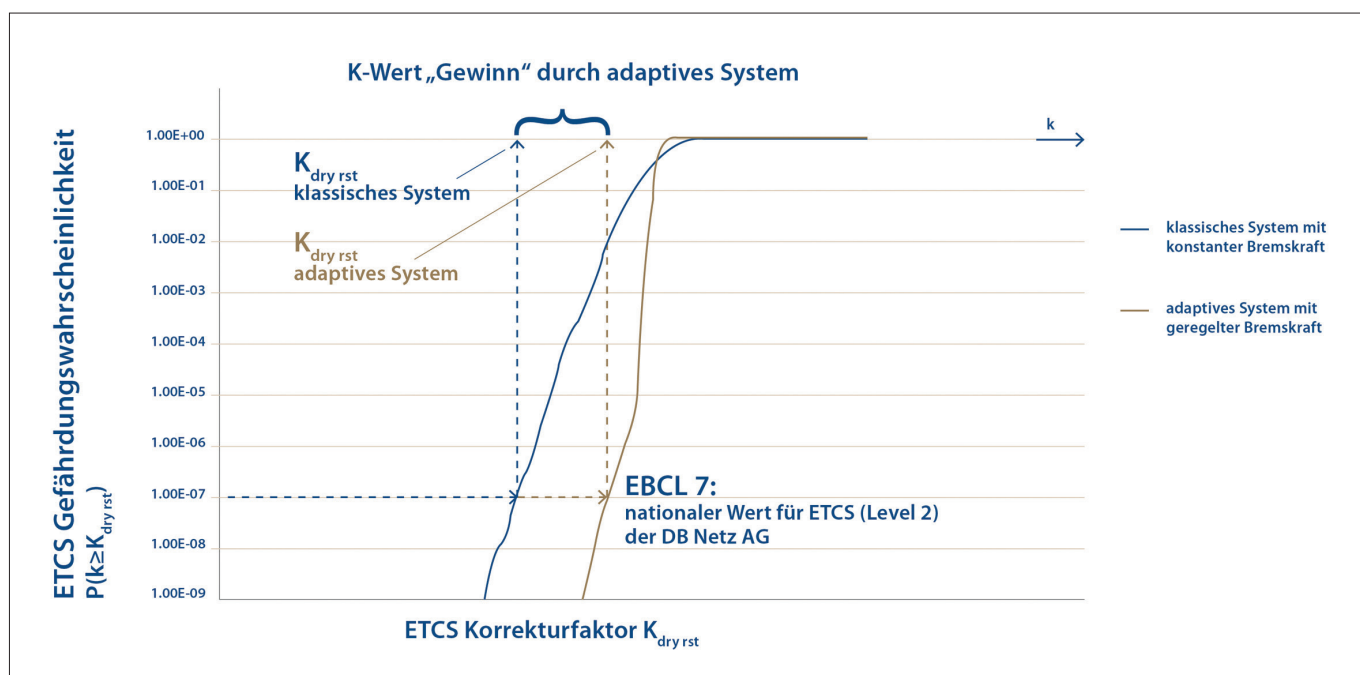


Bild 2: K_{dry_rst} -„Gewinn“ durch adaptive Systeme und Integration der Bremskraftregelkreise in die Monte-Carlo-K-Wert-Bestimmung

tigt – sind geringere, notwendige Sicherheitsmargen respektive „bessere“ EBCL-Kurven für die Möglichkeit einer Verdichtung des Schienenverkehrs zu erwarten (Bild 2).

4 Gewinnbringender Einsatz der Methode bei der Auslegung von Bremssystemen

Dieser nun auch die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bremssystemkomponenten berücksichtigende Weg generiert in mehreren Punkten attraktiven Mehrwert: Zum einen wäre Entwickeln mit den Monte-Carlo-generierten K_{dry_rst} -Werten eine modulare Auslegungunterstützung zur Hand gegeben, wo sie bislang noch auf eine bestimmte definierte Bremssystemarchitektur be-

schränkt waren. Zum anderen könnte die Monte-Carlo-Methode sie bei der Berechnung des dynamischen Bremsverhaltens unterstützen – und damit auch konkret beziffern, inwieweit sich der angenommene Ausfall einer beliebigen Systemkomponente von einer anderen im Zug verfügbaren Bremsfunktion belastbar kompensieren ließe.

Im Umkehrschluss führen die präziser berechneten Bremskurven dazu, dass für gleiches Emergency Brake Confidence Level nunmehr weniger „Puffer“ in Form eines höheren K_{dry_rst} -Werts hinterlegt werden müsste. Die Belastbarkeit der Herangehensweise in Form von Sicherheitsnachweisen entsprechend validiert, könnten Züge ohne Abstriche bei der Sicherheit enger getaktet fahren und damit den Durchsatz eines bestimmten Streckenabschnitts steigern.

5 Gesamtzusammenhang und Ausblick

An diesem Punkt spielt die Methode direkt in die Ziele einer Reproducible Braking Distance (RBD) hinein. Diese betrachtet Verzögerungsregelung, Gleitschutz und Kraftschluss-Management innerhalb eines Bremssystems aus integrierter Perspektive und zielt darauf ab, Varianz und Streuung von Bremswegen auch unter ungünstigen Bedingungen deutlich zu reduzieren. Bei trockenen Schienen – und allen voran aufgrund der geringeren Bremswegstreuung – hatten Simulationsrechnungen teils signifikante Spannen für verkürzte theoretische Zugfolgezeiten ergeben: 9 bis 19% bei U-Bahnen, 9 bis 16% bei S-Bahnen, 1,5 bis 4% im Regionalverkehr mit Triebzügen sowie bis zu 20% im (chinesischen) Hochgeschwindigkeitsverkehr (Tabelle 1) [4].

Auch den K_{wet} -Wert als ETCS-Korrekturfaktor unter nassen Schienenbedingungen reduziert der Ansatz deutlich. Muss für einen sicheren Betrieb mit konventionellen Bremssystemen die Verzögerung unter nassen Schienenbedingungen um bis zur Hälfte reduziert werden, reicht mit einem RBD-erhöhten Faktor K_{wet} eine Reduzierung um lediglich ein Drittel aus [4]. An dieser Stelle könnte die Monte Carlo-Methode den sprichwörtlichen Kreis schließen – indem sie einzelnen

Bremsverzögerung der Betriebsbremse altes System → neues System	alt → neu Vorwärtsfahrt	alt → neu Rückwärtsfahrt	Δ_{max} [s]
fester Blockabstand			
0.8 m/s ² → 1.0 m/s ²	76 → 69	75 → 72	4
0.8 m/s ² → 1.2 m/s ²	76 → 68	75 → 71	5
0.8 m/s ² → 1.5 m/s ²	76 → 67	75 → 69	7
bewegter Blockabstand			
0.8 m/s ² → 1.0 m/s ²	68 → 63	66 → 61	5
0.8 m/s ² → 1.2 m/s ²	68 → 59	66 → 57	9
0.8 m/s ² → 1.5 m/s ²	68 → 59	66 → 54	12

Tabelle 1: Beispielhafter Zeitgewinn in Sekunden in einer U-Bahn-Simulationssequenz

Bremsfunktionalitäten und ihre Zuverlässigkeit in den RBD-Kontext einbindet. Allein: Um den potenziellen Nutzwert dieser Herangehensweise gerade vor dem zukünftigen ATO-Betrieb „auf die Schienen“ zu bringen ist eine Klärung der Integration der über die Monte-Carlo-Methode berechneten K-Werte in die geltenden Sicherheitsnachweise nötig.

#765_A5

(Bildnachweis: 1 und 2, Verfasser)

(Tabellennachweis: 1, Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH, Englbrecht, M.; Gremmel, H.; Verfasser; Linke, T.)

Literatur

- [1] UIC B 126/DT414: Braking Questions – Methodology for the safety margin calculation of the emergency brake intervention curve for trains operated by ETCS/ERTMS, June 2006.
- [2] Calcul de facteurs de correction pour utilisation comme données d'entrée ERTMS Référence affaire : n° 09-0164, Référence : P/CIM ESF2/2010-0885, Version 2 du 28/04/2010.
- [3] Horn, S.; Pavlović, O.: Chancen und Möglichkeiten der Monte-Carlo-Methode bei der Bestimmung der ETCS-Bremskurven. ETR September 2017.
- [4] Englbrecht, M.; Gremmel, H.; Hohmann, E.; Linke, T.: Höhere Transportkapazitäten auf der Schiene: Simulation zeigt Potenziale für optimierte Auslastung bestehender Infrastruktur. ZEVrail 144 (2020) 8, S. 276-281.



Dipl.-Ing. Ernst Hohmann (58). Studium Maschinenbau, Energietechnik und Fluidenergiermaschinen an der Ruhr-Universität Bochum. Ab 1999 bei Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge in verschiedenen Funktionen im System- und

Projektmanagement sowie Normgremien des CEN tätig. Seit 2018 im Bereich System Domain Engineering mit der Entwicklung neuer Methodiken zur Bestimmung und Beeinflussung des Bremsvermögens von Schienenfahrzeugen unter ungünstigen Umgebungsbedingungen betraut.

Anschrift: Knorr-Bremse SFS GmbH, Moosacher Str. 80, 80809 München, Deutschland.

E-Mail: ernst.hohmann@knorr-bremse.com

Expertise aus mehr als
130 JAHREN ERFAHRUNG
für die elektrische Traktion.

RPS
Rail Power Systems



PLANEN. BERATEN. LIEFERN. REALISIEREN. INSTANDHALTEN.

Rail Power Systems GmbH | Garmischer Straße 35 | 81373 München | info@rail-ps.com | www.rail-ps.com