

Validierung der Simulationsmodelle für die fahrtechnische Zulassung

Validation of the simulation models for the acceptance of running characteristics

Prof. Dr.-Ing. habil. Oldrich Polach, Winterthur (Schweiz)

Zusammenfassung

Die aktuelle Revision der Norm für die fahrtechnische Zulassung der Eisenbahnfahrzeuge EN 14363:2016 lässt unter bestimmten Bedingungen zu, die fahrtechnische Beurteilung mittels Simulationen durchzuführen. Das Vertrauen in die Simulationsergebnisse muss allerdings durch die Validierung des Simulationsmodells untermauert werden.

Eine Validierung mag einfach erscheinen: Liefert die Simulation die gleichen Resultate wie die Messung, so ist das Modell validiert. Bei einer genaueren Betrachtung zeigt sich jedoch, dass die Modellvalidierung eindeutiger zu definieren ist. Nach einer Literaturübersicht werden verschiedene Möglichkeiten der Validierung dargestellt und deren Vor- und Nachteile betrachtet. Anschließend werden die Anwendung der Simulationen und die Methoden der Validierung in der EN 14363:2016 präsentiert und die Hintergründe ihrer Entwicklung erläutert.

Abstract

The current revision of the standard for the acceptance of running characteristics of railway vehicles EN 14363:2016 permits under specific conditions to conduct the assessment of running dynamics by simulations. The confidence in the simulation results, however, must be fortified by the validation of the simulation model.

A validation may seem to be simple: Are the results provided by simulation identical to the measurement, then the model is validated. On closer examination, however, it becomes apparent that the model validation has to be defined more precisely. After a literature review, various possibilities of the validation are shown and their pros and cons discussed. Afterwards, the application of simulations and the validation methods according to EN 14363:2016 are presented and the background of their development explained.

1 Einleitung

Computersimulationen sind zum mächtigen Werkzeug verschiedener Industriezweige geworden. In der Schienenfahrzeugindustrie ermöglichen die Mehrkörpersimulationen der Fahrzeugdynamik seit Jahren das Beurteilen und Optimieren der fahrtechnischen Eigenschaften während der Entwicklung und Konstruktion der Fahrzeuge. Es ist somit nicht überraschend, dass Computersimulationen zunehmend als Ersatz von physischen Tests zur Anwendung gelangen.

Die vor kurzem erschienene Revision der Norm EN 14363:2016 [1] berücksichtigt diesen Trend. Neben den inhaltlichen Änderungen war auch eine Anpassung des Titels notwendig, um die Simulationen zu berücksichtigen: „Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahr-

zeugen – Fahrverhalten und stationäre Versuche“.

Die Beurteilung durch Simulation erfolgt naturgemäß lediglich virtuell. Das Vertrauen in deren Resultate muss deshalb entsprechend bekräftigt werden. Es ist nachzuweisen, dass das Simulationsmodell die untersuchten physikalischen Tests ausreichend genau nachbildet. Dieser Prozess wird als Modellvalidierung bezeichnet. Die Definition der Validierung mag einfach erscheinen: Wenn die Simulation die gleichen Resultate wie die Messung liefert, dann ist das Modell validiert. Eine genauere und eindeutige Definition der Validierung ist jedoch schwieriger. Dieser Artikel geht dieser Thematik nach. Nach einem Literaturüberblick werden die Möglichkeiten der Validierung der Modelle zur Simulation der fahrtechnischen Streckenfahrversuche und deren Vor- und Nachteile diskutiert. Danach werden die

Anwendungsbereiche der Simulation im Rahmen der fahrtechnischen Zulassung gemäß EN 14363:2016 sowie die dort spezifizierten Validierungsverfahren vorgestellt und die Hintergründe der Festlegung dieser Verfahren erläutert.

2 Literaturübersicht

Mit dem Aufkommen von Computersimulationen der Schienenfahrzeugdynamik vor einigen Jahrzehnten erschienen diverse Publikationen über die Verifikation der neu entwickelten Mehrkörper-Simulationsprogramme. Nachdem sich die Simulationen mittlerweile als wesentlicher Bestandteil der Produktentwicklung der Rollmaterialindustrie etabliert haben, gelangten in den letzten Jahren die Entwicklung und Standardisierung der Verfahren zur Validierung der Simulationsmodelle in den Vordergrund. Allgemeine

Hinweise bezüglich der Validierung des Modells finden wir in Publikationen über das Modellieren und Anwenden der Simulationen der Schienenfahrzeuge [2, 3]. Neueste Veröffentlichungen präsentieren praktische Erfahrungen mit der Validierung durch Vergleiche mit stationären Versuchen [4], Erkenntnisse über Wiederholbarkeit der Fahrversuche [5, 6], über Anwendung messbarer Größen zur Bewertung der Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation der Fahrversuche [5, 6] sowie Vorschläge für das Vorgehen bei der Validierung [6].

Langjährige Erfahrung mit der Anwendung von Simulationen für die fahrtechnische Zulassung liegt in Großbritannien vor; sie wurde in die Group Standard Guidance Note GM/RC2641 [7] eingearbeitet. Die UIC hat diese Erfahrung bei der Einführung der Simulationen für die Fahrzeugzulassung im Kodex UIC 518:2009 [8] berücksichtigt. Im Rahmen der Entwicklung dieses Dokuments wurden außerdem zwei Probeläufe durchgeführt: Simulationen der fahrtechnischen Versuche einer Lokomotive [9] und eines Kesselwagens. Ausgehend von der UIC 518:2009 wurde die Anwendung von Simulationen in die EN 15827:2011 [10] aufgenommen, als Übergangslösung bis zum Erscheinen der aktuellen Revision der EN 14363.

Umfangreiche Untersuchungen zur Modellvalidierung wurden als Teil des EU-Forschungsprojekts DynoTRAIN [11]

durchgeführt, welches zwischen 2009 und 2013 von einem Team aus 22 Partnern unter der Leitung von UNIFE realisiert wurde. Für die Evaluation der Validierungsmethodik wurden Resultate einer in der Geschichte der Eisenbahntechnik einzigartigen Messkampagne verwendet [12]. Der Versuchszug bestehend aus einer Lokomotive, einem Reisezugwagen, zwei Güterwagen mit Drehgestellen Y25, einer aus zwei zweiachsigen Güterwagen bestehenden Wageneinheit und mehreren Messwagen, führte während eines Monats Testfahrten in Deutschland, Frankreich, Italien und der Schweiz durch. Die Versuchsfahrzeuge wurden mit insgesamt zehn Messradsätzen und über 300 Messsensoren ausgestattet. Gleichzeitig erfolgten kontinuierliche Messungen von Gleistrassierung, Gleislageabweichungen und Schienenprofilen.

Die Vergleiche von Simulation und Messung wurden in ausgewählten Abschnitten dieser Messkampagne mit mehreren Modellen durchgeführt, welche von verschiedenen Projektpartnern in zwei unterschiedlichen Simulationstools entwickelt wurden [13, 14]. Die Übereinstimmung von Simulation und Messung wurde einerseits durch Projektpartner beurteilt, und andererseits durch Vergleiche der in Anlehnung an die EN 14363:2005 [15] ausgewerteten Größen sowie anderen messbaren Größen zur Beurteilung der Übereinstimmung von Simulation

und Messung, die hier in Anlehnung an englischsprachige Literatur [16] als Metriken zur Validierung bezeichnet werden. Die Vergleiche beinhalteten diverse Modellkonfigurationen (Bild 1), um den Einfluss der Berücksichtigung der gemessenen Schienenprofile, der gemessenen Gleislagestörung und der Anpassung der Modellparameter aufgrund der Vergleiche mit stationären Versuchen zu beurteilen [13]. Die insgesamt über 1 000 betrachteten Simulationsläufe führten zu über 60 000 Vergleichen von EN 14363 basierten Größen sowie zu einer großen Anzahl von Zeit- und Wegdiagrammen. Von diesen wurden etwa 6 800 durch zehn Projektpartner auf Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung digital (ja/nein) bewertet. Als Resultat dieser Ermittlungen entstand ein Entwurf des Validierungsverfahrens [13, 14], welcher in die Revision der EN 14363:2016 integriert wurde und später in diesem Artikel näher erläutert wird.

3 Validierung der Modelle der Schienenfahrzeugdynamik

3.1 Was ist Validierung?

Die Validierung wird angewendet um nachzuweisen, dass das Simulationsmodell das reale System ausreichend genau in Bezug auf die beabsichtigte Anwen-

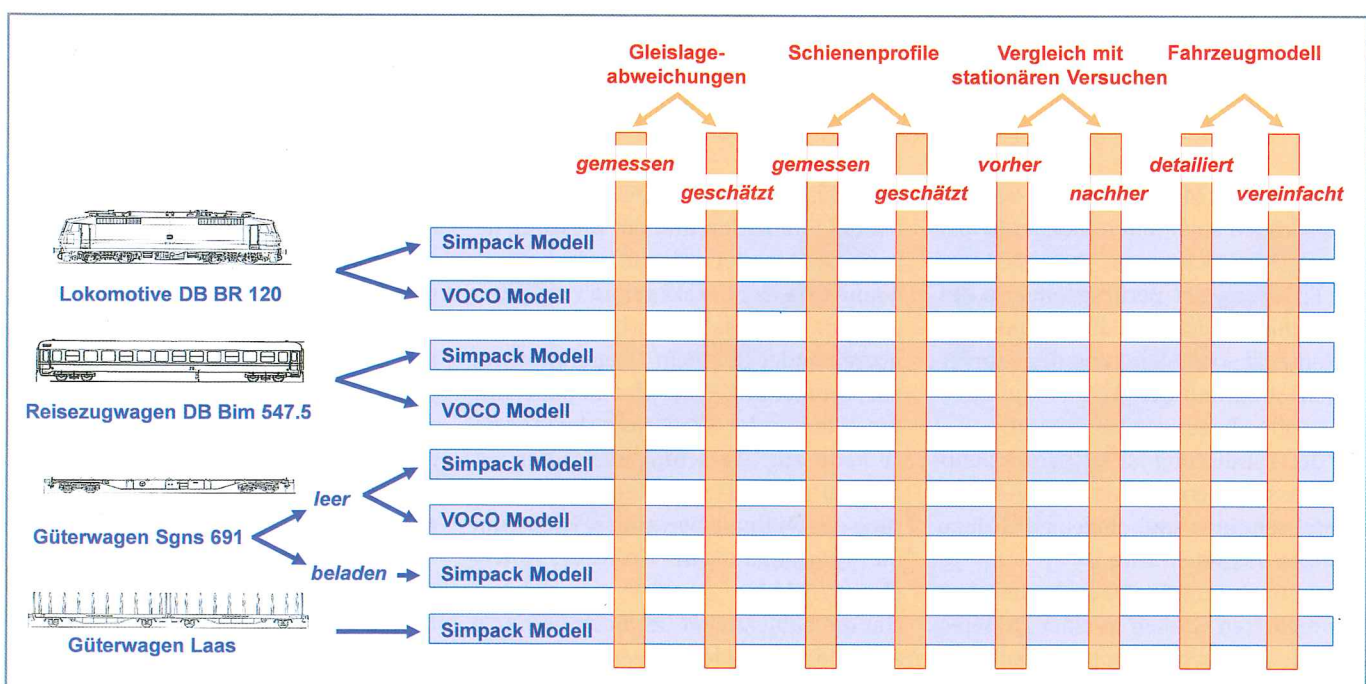


Bild 1: Matrix der Bildung von Modellkonfigurationen im Projekt DynoTRAIN (Simpack und VOCO sind die verwendeten Simulationsprogramme)

dung repräsentiert. Sie wird vorzugsweise durch Vergleich mit einem Experiment durchgeführt. Hier stellen sich zunächst die Fragen bezüglich des Verhaltens des realen Objekts: Wie genau kann dieses Verhalten erfasst werden? Wie gut ist das Experiment wiederholbar?

Das Verhalten des Objekts – in unserem Fall das fahrtechnische Verhalten eines Schienenfahrzeugs – wird im Rahmen der fahrtechnischen Zulassung durch stationäre Tests und Streckenfahrversuche beurteilt. Diese Tests werden durch verschiedene Parameter beeinflusst, die oft nicht genau identifiziert werden können. Die Normen definieren zwar die Bedingungen, welche die zur Auswertung verwendeten Sektionen erfüllen sollen, doch ist die genaue Messung z. B. beim Reibwert Rad/Schiene nicht möglich. Die Differenz zwischen Simulation und Messung entspricht somit nicht direkt der Differenz zwischen Simulation und Realität. Die Messung kann nicht nur durch Messfehler der untersuchten Größe von der Realität abweichen. Die fahrtechnischen Größen

stellen jeder Größe bildet einen Bestandteil der Validierungsmethodik. Weiterhin sind die Kriterien für den Vergleich von Simulation und Messung sowie die Validierungsgrenzwerte für diese Kriterien zu definieren. Werden die Validierungsgrenzwerte auf jeden einzelnen Vergleich von Simulation und Messung bezogen, ist noch festzulegen, wie viele der untersuchten Größen und der einzelnen Vergleiche die spezifizierten Grenzwerte enthalten müssen, bzw. ob die Bedingungen der positiven Validierung anderweitig zu definieren sind.

Die typischen Bausteine der Validierung der Simulationsmodelle der Schienenfahrzeugdynamik werden in den folgenden Kapiteln diskutiert.

3.2 Validierung im Zeitbereich

Der Vergleich der Zeit- und Wegdiagramme von Simulation und Messung bildet die häufigste Basis der Validierung. Die Beurteilung kann allerdings durch die Darstellung des Vergleichs maßgeblich

– in Übereinstimmung mit der technischen Erfahrung zu bewerten, siehe die Übersicht diverser Metriken in [16]. Eine oft verwendete Metrik ist die von Sprague und Geers, welche auf Vergleichen der Integrale beider Funktionen basiert. Kleine Werte der Metrik repräsentieren somit bessere Übereinstimmung. Gemäß der Untersuchungen über die Anwendung dieser Metrik zur Validierung der Schienenfahrzeugmodelle in den USA [5] kann die Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung als gut bezeichnet werden, wenn die absoluten Werte des Betrags- und Phasenfehlers nicht größer als 0,3 sind, und als nicht akzeptabel bei Werten von 0,5 und größer. Ähnliche Analysen im Projekt DynoTRAIN [13, 14] identifizierten Schwachstellen dieser Validierungsmetrik. Ausgewählte Beispiele aus diesem Projekt in Bild 3 zeigen jeweils den Betragsfehler M_{SG} und den Phasenfehler P_{SG} der Validierungsmetrik nach Sprague und Geers sowie den Prozentanteil der Projektbeteiligten, welche die Übereinstimmung zwischen

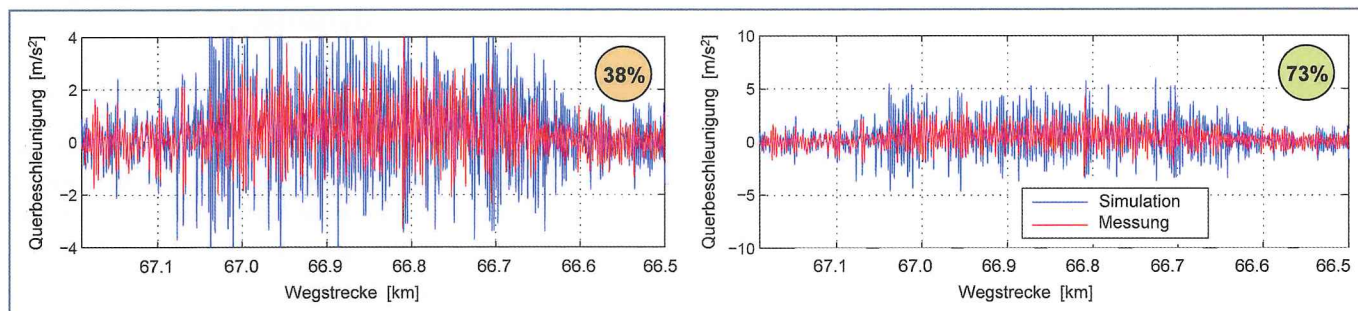


Bild 2: Einfluss der Wahrnehmung der Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung für unterschiedliche Darstellungen von identischen Daten: Prozentanteile der positiven Beurteilung der Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung im Experten-Workshop des Projekts DynoTRAIN

werden neben Messfehlern der betrachteten Größen auch durch Messfehler der Gleislageabweichungen, Vereinfachung der Erfassung der Berührgeometrie des Rad/Schiene-Kontaktes durch äquivalente Konizität sowie Streuung des Fahrverhaltens aufgrund der Wetter- und anderen Randbedingungen beeinflusst. Bei der Validierung ist zu berücksichtigen, dass die Betrachtung von einzelnen Messabschnitten und einzelnen Größen weniger aussagekräftig ist als eine Gesamtbetrachtung der Übereinstimmung von mehreren Größen in einer größeren Anzahl von Messabschnitten. Die Festlegung der zu vergleichenden Messgrößen sowie der minimalen Anforderungen bezüglich der Anzahl der einzelnen Mess-

beeinflusst werden: Werden die Diagramme der Simulation und der Messung nebeneinander oder untereinander gezeigt, können sie nicht exakt genug verglichen werden. Die Darstellung beider Signale übereinander in einem Diagramm kann zur Verdeckung eines der Signale führen. Eine grobe Skalierung der Abszisse kann zur „Verschmelzung“ der Signale zu einer Fläche führen; die Skalierung der Ordinate beeinflusst wiederum die Wahrnehmung der Größe der Abweichung (Bild 2).

Um die Subjektivität der Beurteilung zu vermeiden, wurden von verschiedenen Autoren quantitative Größen (Metriken) vorgeschlagen mit dem Ziel, zwei Funktionsverläufe – hier Simulation und Mes-

Simulation und Messung im jeweiligen Diagramm als gut beurteilt haben. Während im Diagramm in Bild 3a die objektive Beurteilung mittels M_{SG} und P_{SG} mit der subjektiven Beurteilung durch Projektpartner übereinstimmt, führen objektive und subjektive Beurteilung in den anderen Diagrammen in Bild 3 zu unterschiedlichen Ergebnissen. Das Diagramm in Bild 3b bewertet die Validierungsmetrik als ungenügende Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung trotz positiver subjektiver Beurteilung. Die Metrik nach Sprague und Geers zeigt hier hohe Werte, weil sie die relative Abweichung beurteilt. Die Werte der gemessenen und berechneten Größen sind aber sehr niedrig und deshalb unbedeutend. In Bild 3c

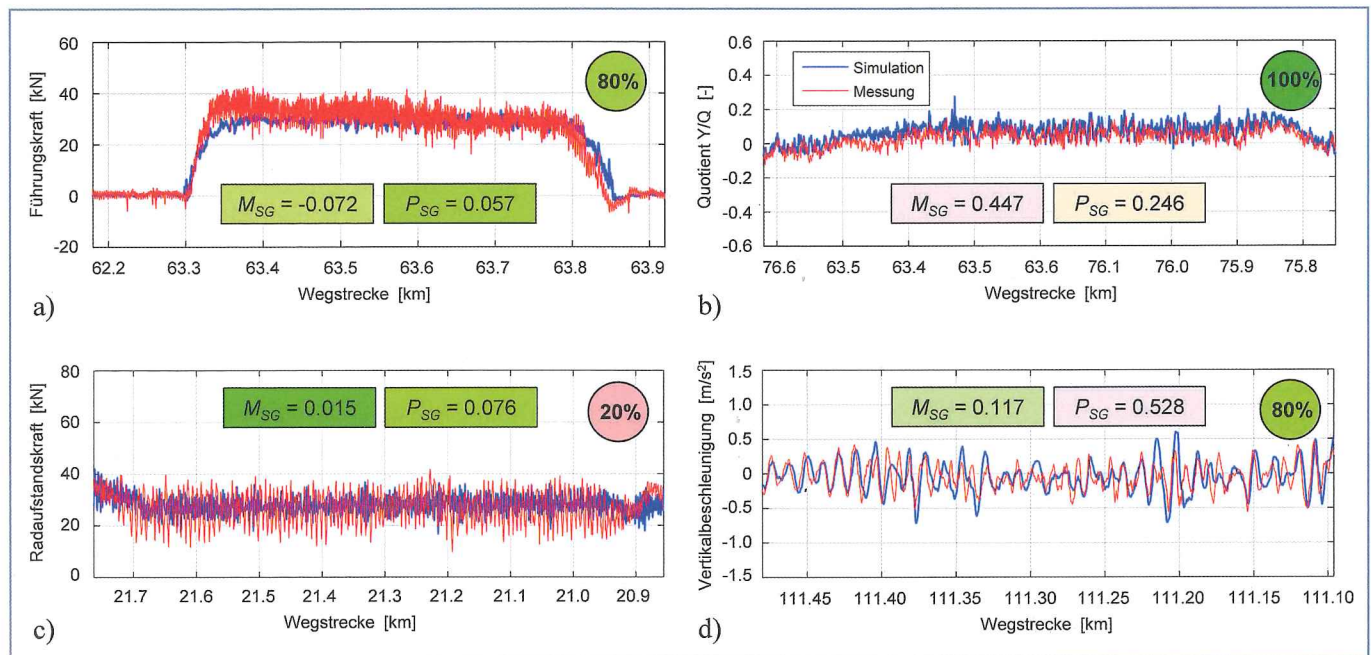


Bild 3: Beispiele zum Vergleich der Validierungsmetrik nach Sprague und Geers mit der subjektiven Beurteilung durch Projektpartner in DynoTRAIN (Erläuterung siehe Text)

sehen wir niedrige Resultate der Metrik, welche einer guten Übereinstimmung entsprechen, obwohl die subjektive Beurteilung ungenügend ausfällt. Die quasistatistischen Werte stimmen überein, die ungenügende Übereinstimmung der Dynamik des Signals wird in der Metrik jedoch nicht wiedergegeben. *Bild 3d* zeigt zu hohe Werte des Phasenfehlers trotz positiver subjektiver Beurteilung. Die Überlagerung des gemessenen Signals mit einer höheren Frequenz – subjektiv kaum bedeutend – führt hier zu einer ungenügenden Übereinstimmung der Metrik und der subjektiven Beurteilung. Die grundsätzliche Frage bei der Anwendung der Validierungsmetriken ist, wie

die zulässige Abweichung zwischen Simulation und Messung definiert werden soll: als relative oder als absolute Größe? Die Validierungsgrenzwerte werden meistens – ähnlich wie bei den Messfehlern – als relative Größen in % angegeben. Solch eine Definition verlangt allerdings eine sehr hohe Genauigkeit dort, wo nur sehr kleine Kräfte oder Beschleunigungen auftreten, lässt aber erhebliche Abweichungen bei großen Kräften und Beschleunigungen zu (*Bild 4a*). Im Hinblick auf die Einhaltung der Grenzwerte während der fahrtechnischen Zulassung interessiert aber gerade die Genauigkeit der Aussage bezüglich der großen Kräfte und Beschleunigungen! Aus diesem

Grund wäre eher eine andere Definition zu bevorzugen, welche eine genaue Bestimmung der nah zum Grenzwert liegenden Größen verlangt (*Bild 4b*). Eine solche, nur auf bestimmte Größen zielende Definition, könnte aber dazu führen, dass die physikalischen Zusammenhänge im Modell nicht vollständig wiedergegeben würden. Im Hinblick auf diese Widersprüche scheint ein Kompromiss, nämlich die Definition der zulässigen Abweichung zwischen Simulation und Messung als fester Betrag (*Bild 4c*), am besten geeignet zu sein. Dabei ist es sinnvoll, den Validierungsgrenzwert in einem geeigneten Verhältnis zum fahrtechnischen Grenzwert zu wählen, so dass die Simu-

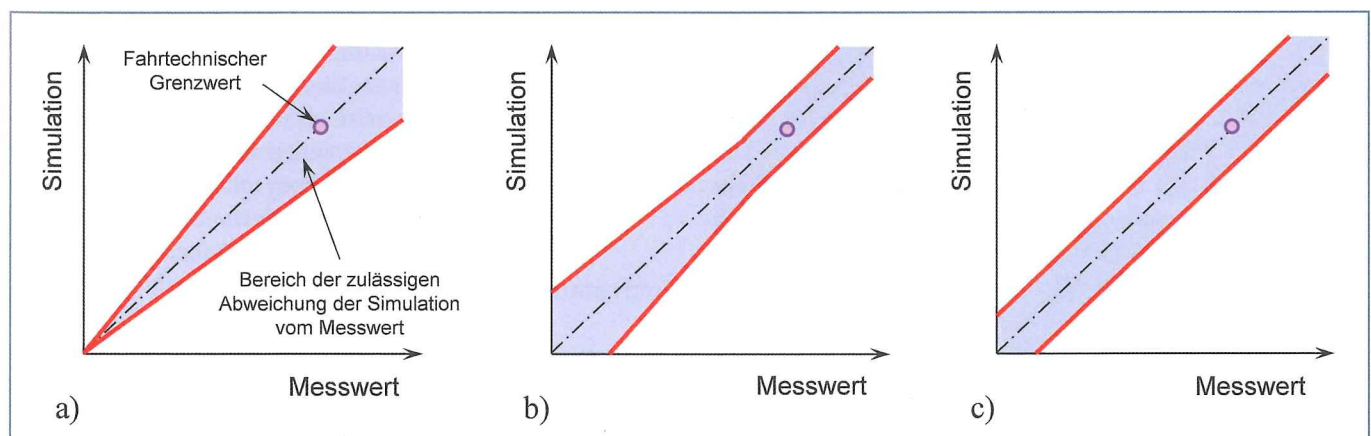


Bild 4: Bereiche der zulässigen Abweichungen zwischen Simulation und Messung für unterschiedliche Definitionen der Validierungsgrenzwerte:
a) als Prozentwert des Messwerts
b) relativ, indirekt proportional zum Messwert; bei Messwerten oberhalb des fahrtechnischen Grenzwertes konstant
c) konstant, vom Messwert unabhängig

lationsresultate, welche im Bereich des fahrtechnischen Grenzwerts liegen, nicht mehr als um einen bestimmten prozentualen Betrag von den Messwerten abweichen können.

3.3 Validierung im Frequenzbereich

Vergleiche im Frequenzbereich wie Fourier Transformation (FFT) oder spektrale Leistungsdichte bieten die Möglichkeit, die Übereinstimmung der Hauptfrequenzen des Modells und des realen Fahrzeugs und somit die Gleichheit des dynamischen Verhaltens von Modell und realem Objekt zu prüfen. Dieser Vergleich hat außerdem den Vorteil, dass im Unterschied zum Zeitbereich die Synchronisierung von Simulation und Messung nicht entscheidend ist. Die Länge des ausgewerteten Abschnitts und die Anzahl der betrachteten Werte beeinflussen jedoch die Streuung der Punkte des Diagramms.

positiv beurteilt wurde, liefert die Auswertung der dominierenden Frequenz in Simulation und Messung stark unterschiedliche Werte. Der Grund liegt darin, dass die Kurven im Unterschied zum linken Diagramm nicht glatt verlaufen und mehrere Spitzen zeigen.

Die Festlegung der Grenzen zwischen der positiven und negativen Beurteilung der Validierung im Frequenzbereich hängt von der Form der Auswertung und Darstellung ab. Sie kann als FFT oder als spektrale Leistungsdichte realisiert und in einem Diagramm mit entweder linearer oder logarithmischer Skalierung der Ordinate präsentiert werden. Fries, Walker und Wilson [5] empfehlen für die Validierung im Frequenzbereich folgende Grenzwerte der Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung:

- Resonanzfrequenz: 10 % bis 15 %
- Amplitude: 10 % bis 15 % bei linearen Spektren, 20 % bis 30 % bei spektralen Leistungsdichten.

Parameters des Fahrzeugmodells hinweisen können.

Diese Art der Validierung hat jedoch auch Nachteile. Das dynamische Verhalten des Fahrzeugs während der Streckenfahrversuche kann nämlich vom quasistatischen Verhalten in stationären Versuchen abweichen, z. B. durch die Abhängigkeit der Steifigkeit von Frequenz und Amplitude wie sie z. B. bei Gummi-Metalteilen auftritt. Für die Simulationen der Fahrversuche kann eine Ergänzung der Modellierung durch die Frequenz- und/oder Amplitudenabhängigkeit notwendig sein, welche nur durch Vergleiche von Simulationen mit Streckenversuchen geprüft werden kann.

Die Validierung durch stationäre Versuche birgt auch andere potenzielle Schwächen [4]. So zeigt die Messung der Radaufstandskräfte oft eine unzureichende Wiederholungsgenauigkeit [17, 4] und führt vor allem bei Fahrzeugen mit Reibdämpfung zu einer großen Streuung der Mess-

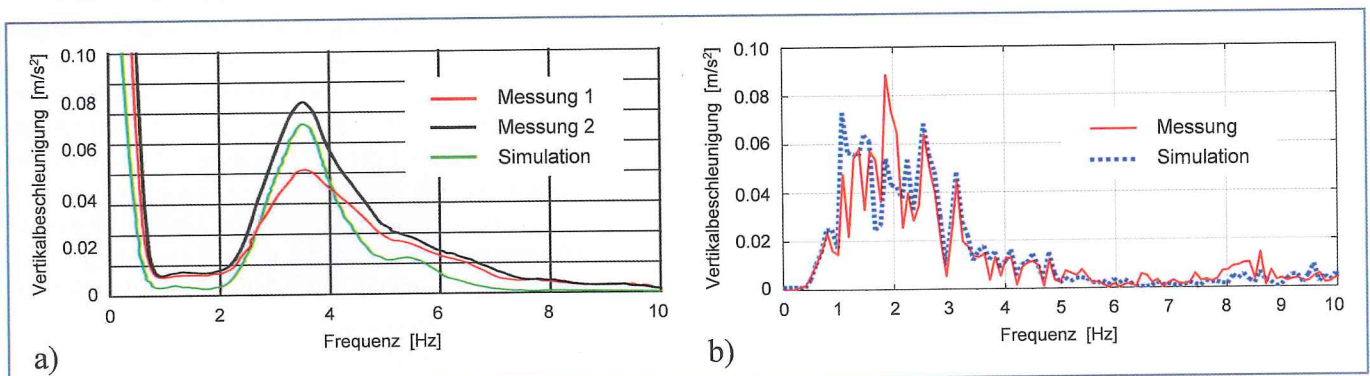


Bild 5: Beispiele der Validierungsvergleiche im Frequenzbereich (Erläuterung siehe Text)

Bild 5 illustriert diese Effekte an zwei Beispielen. Das linke Diagramm aus der EN 14363:2016 [1] zeigt einen Vergleich von FFT-Analysen zur Querbeschleunigung eines Fahrzeugkastens. Die dominante Frequenz aus Simulation und Messung stimmt gut überein. Zwei Prüfergebnisse werden mit einigen Abweichungen voneinander dargestellt und die Simulation ist näher an dem einen als an dem anderen. Gemäß [1] wäre es in solchem Fall hilfreich, im Validierungsbericht die Gründe für die unterschiedlichen Prüfergebnisse anzugeben. Das rechte Diagramm in Bild 5 zeigt einen Vergleich von FFT-Analysen zur Vertikalbeschleunigung eines Fahrzeugkastens aus dem Projekt DynoTRAIN. Obwohl die Übereinstimmung gut ist und diese im Experten-Workshop von 72 % der Befragten

Die Untersuchungen in DynoTRAIN haben keine Empfehlungen für den Vergleich im Frequenzbereich identifizieren können. Obwohl die Übereinstimmung der Frequenzen der Fahrzeuge und Drehgestelle als gut beurteilt werden konnte, zeigten die Diagramme eine zu große Streuung infolge relativ kurz gewählter Auswertabschnitte.

3.4 Validierung durch stationäre Versuche

Validierung durch Vergleiche der Simulationen von stationären Versuchen mit Messresultaten stellt eine naheliegende Möglichkeit dar, weil die stationären Versuche einerseits einen Bestandteil der fahrtechnischen Zulassung darstellen, andererseits auf Ungenauigkeit bestimmter

resultate. Als anderes Beispiel kann die Messung des Ausdrehwiderstands des Drehgestells genannt werden. Die meist unbekannte Reibung des Prüfstands beeinflusst die Resultate und kann fälschlicherweise als Ungenauigkeit der Simulation interpretiert werden [4].

Die Erfahrungen mit der Anwendung der stationären Versuche zur Modellvalidierung bestätigen die Nützlichkeit der Vergleiche der Simulationen mit stationären Tests vor allem dann, wenn die Parameter des Fahrzeugs ungenügend bekannt oder unsicher sind. Die stationären Versuche können somit als Bestandteil der Parameteridentifikation dienen. Sind die Parameter des Fahrzeugs ausreichend bekannt, wie es z. B. während der Entwicklung von neuen Fahrzeugen der Fall ist, und ist das Modell zur Simulation der

Streckenfahrversuche bestimmt, so führt die Anpassung des Modells im Rahmen der Validierung durch den Vergleich mit stationären Tests nicht nachweisbar zu einer Verbesserung der Übereinstimmung von Simulation und Messung der Streckenfahrversuche [13].

4 Simulation von Streckenfahrversuchen nach EN 14363:2016

Die Simulationen können gemäß EN 14363:2016 [1] dann angewendet werden, wenn ein Modell des zugelassenen Fahrzeugs desselben Konstruktionskonzepts oder das Modell des vor der Modifikation in fahrtechnischen Versuchen getesteten Fahrzeugs erfolgreich validiert wurde. Das in den Simulationen untersuchte Fahrzeug muss die gleiche Konstruktion und Art der Federung aufweisen. Zum Beispiel darf ein validiertes Modell des Fahrzeugs mit Luftfederung im intakten Zustand nur für die Simulationen dieses Fahrzeugzustands verwendet werden, jedoch nicht für den Fahrzeugzustand ohne Druckluft in der Luftfederung (Notlauf). Die Notfederung weist eine andere Konstruktion auf, sodass das Fahrzeug im Notlauf im Hinblick auf die Validierung als separates Modell zu betrachten ist.

Die Anwendung der Simulationen für Streckenfahrversuche ist zulässig für das:

- Erweitern des Bereichs der Prüfbedingungen, wenn die Prüfung nicht vollständig abgeschlossen werden konnte, weil die Prüfbedingungen nicht vollständig erfüllt wurden,
- Zulassen von Fahrzeugen nach Änderungen,
- Zulassen neuer Fahrzeuge durch Vergleich mit einem bereits zugelassenen Referenzfahrzeug gleichen Konstruktionskonzepts, zum Beispiel bei einer Anzahl verschiedener Fahrzeugtypen innerhalb der Flotte sowie
- Untersuchen des dynamischen Fahrverhaltens im Falle von Ausfallzuständen.

Im Unterschied zur UIC 518:2009 [8] ist das Anwenden der Simulation nicht auf bestimmte Bereiche von Parameteränderungen beschränkt. Die Simulation kann bei beliebiger Änderung eines Fahrzeugparameters angewendet werden, solange der Einfluss der Modifikation das fahrtechnische Verhalten verbessert, oder die betrachteten Größen die spezifizierte



InnoTrans 2016

20. – 23. SEPTEMBER · BERLIN

Internationale Fachmesse für Verkehrstechnik
Innovative Komponenten · Fahrzeuge · Systeme

innotrans.de



THE FUTURE OF MOBILITY

Kontakt

Messe Berlin GmbH
Messedamm 22 · 14055 Berlin
T +49 30 3038 2376
F +49 30 3038 2190
innotrans@messe-berlin.de

Messe Berlin

Marge zum Grenzwert einhalten bzw. die Verschlechterung innerhalb eines limitierten Bereichs der bestehenden Marge zum Grenzwert liegt. Die genauen Bedingungen für die Akzeptanz der Simulation an Stelle des Versuchs gemäß EN 14363:2016 unterscheiden sich bei den einzelnen Anwendungsbereichen und sind der Norm zu entnehmen.

5 Modellvalidierung nach EN 14363:2016

Der Anhang T der EN 14363:2016 [1] beinhaltet zwei Varianten zur Validierung der Simulationsmodelle. Beide beziehen sich ausschließlich auf die Simulationen der Fahrversuche und betreffen nicht die Berechnungen bzw. Simulationen der stationären Tests.

5.1 Validierungsverfahren 1

Das Verfahren 1 repräsentiert eine Weiterentwicklung der in der UIC 518:2009 und der EN 15827:2011 dargestellten Methodik. Dieses Verfahren listet mögliche Vergleiche von statischen Versuchen und Streckenversuchen mit Simulationsergebnissen auf, welche zur Validierung ver-

wendet werden können, und illustriert die Beurteilung an Beispielen. Der Umfang und die zu erfüllenden Kriterien sind im Hinblick auf die Anwendung des Simulationsmodells und die verfügbaren Prüfergebnisse vom Modellentwickler festzulegen. Das Validierungsergebnis ist von einem unabhängigen Prüfer zu beurteilen, welcher nach Einschätzung der Modellqualität den Anwendungsbereich einschränken oder die Validierung ablehnen kann. Diese Methodik ist für die Simulationen bei spezifischen Fahrzeugmodifikationen gut geeignet, deren Auswirkung abgeschätzt werden kann, so dass die Anwendung der Simulationen sowie die Modellvalidierung auf diese Auswirkungen begrenzt sind (z. B. Fahrwegbeanspruchung in Bögen).

5.2 Validierungsverfahren 2

Das Verfahren 2 stellt eine neue, im Rahmen des Projektes DynoTRAIN entwickelte Validierungsmethode dar und soll hier ausführlicher vorgestellt werden. Dieses Verfahren verwendet Versuchsdaten des normalen Messverfahrens mit Messradsätzen. Die zu vergleichenden Größen, die Mindestanzahl der Auswertungsab-

schnitte, die Filterung und die Verarbeitung der Signale sind definiert und lehnen sich an die Auswertung der Messdaten der Streckenfahrversuche an. Die Differenzen zwischen Simulation und Messung werden pro Größe ausgewertet und die Mittelwerte und Standardabweichungen dieser Differenzen mit definierten Validierungsgrenzwerten verglichen.

Für die Mindestanzahl der benötigten Auswerteabschnitte wurde in DynoTRAIN ein pragmatischer Ansatz gewählt, ohne diesen tiefer zu untersuchen: mindestens 3 Abschnitte je Prüfbereich. Simulations- und Messergebnisse der festgelegten Größen sind somit für wenigstens 12 Auswerteabschnitte (3 Abschnitte für jeden der 4 Versuchsgebiete) zu vergleichen. Diese Auswerteabschnitte sollen aus Vollbögen und Geraden stammen und bezüglich der Länge mindestens den für die Fahrversuche spezifizierten Auswerteabschnitten entsprechen. Nach oben sind die Länge und die Anzahl der Auswerteabschnitte für die Validierungsaufgaben offen. Das mag auf den ersten Blick als eine zu ungenaue Spezifikation erscheinen. Neue Untersuchungen [18] in Bezug auf die Länge, Anzahl und Auswahl der Auswerteabschnitte zeigen jedoch, dass

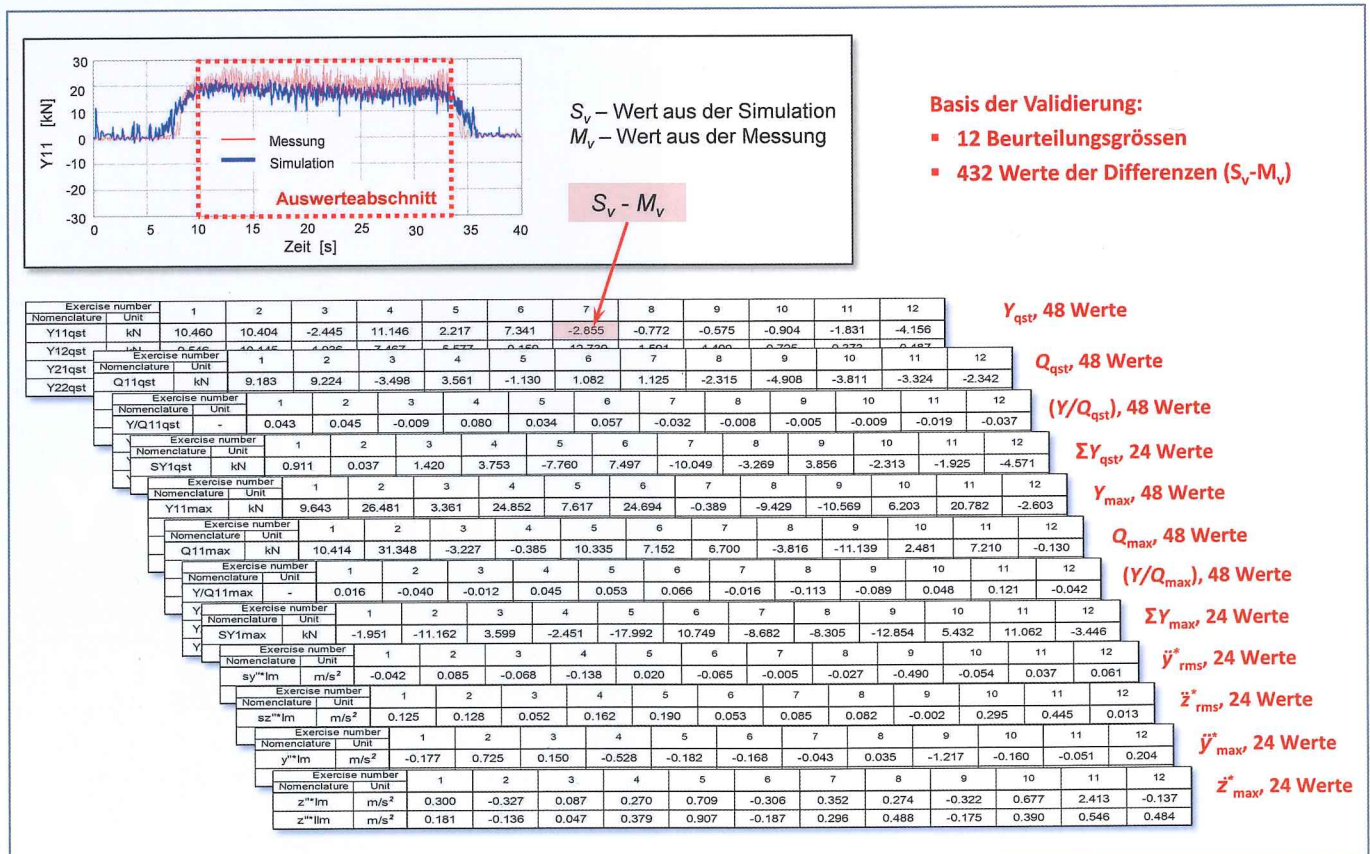


Bild 6: Beispiel der verglichenen Wertepaare Simulation – Messung für die Modellvalidierung gemäß Verfahren 2 nach EN 14363:2016

dieses Validierungsverfahren diesbezüglich sehr wenig empfindlich ist. Die Länge und Anzahl der Auswerteabschnitte zeigen kaum Einfluss auf das Gesamtergebn der Validierung.

Die Beurteilung der Validierung benötigt insgesamt 12 Größen (*Bild 6*), die aus folgenden Gruppen bestehen:

- Kräfte zwischen Rad und Schiene in Lateral- (Führungskraft Y) und Vertikalrichtung (Radkraft Q),
- Berechnete Größen des Rad/Schiene-Kontakts: Quotient Y/Q pro Rad und Summe der Führungskräfte ΣY pro Radsatz sowie
- Beschleunigungen am Fußboden des Fahrzeugkastens über den Fahrwerken in Richtung waagrecht quer (lateral) und vertikal.

Als Beispiel wird die Führungskraft Y_{11} betrachtet (Diagramm oben in *Bild 6*). Das Diagramm stellt einen Auswerteabschnitt dar und liefert Vergleiche Messung-Rechnung für zwei Größen: Quasistatischer Wert (Median) und Maximum (definiert als 99.85 %-Wert) der Führungskraft zwischen Rad und Schiene Y_{11} . Analog werden die anderen Rad/Schiene-Größen ausgewertet. Bei Beschleunigungen werden der RMS-Wert und das Maximum (99.85 %-Wert) verwendet. Bei einem Versuchsfahrzeug mit zwei Messradsätzen erhält man somit 432 Werte der Differenzen von Simulation und Messung (siehe die Übersicht in *Bild 6*).

Die Rad/Schiene-Größen prüfen die Genauigkeit des Modells in Bezug auf die Fahrsicherheit und die Fahrwegbeanspruchung. Die Beschleunigungen im Wagenkasten runden das Bild über das dynamische Verhalten des Modells ab.

Man könnte einwenden, dass die Validierung durch Vergleiche mit Beschleunigungen am Drehgestellrahmen fehle. Die Drehgestellbeschleunigungen dienen wie auch die Rad/Schiene-Größen der Beurteilung der Fahrsicherheit, wobei die Rad/Schiene-Kräfte direkt, die Beschleunigungen aber nur indirekt mit Risiken wie Entgleisung oder Gleisverwerfung im Zusammenhang stehen. Die Untersuchungen in DynoTRAIN zeigten, dass Beschleunigungen des Drehgestellrahmens im Hinblick auf unterschiedliche Ausführungen der Federung große Streuung aufweisen, so dass die zulässigen Abweichungen für die Validierung eher großzügig gewählt werden müssten, und die Auswertung der Beschleunigungen am Drehgestell ergän-

zend zu den Rad/Schiene-Kräften somit keine deutliche Verbesserung der Validierungsmethodik bringen würde.

Das Vorgehen bei der Durchführung der Validierungsvergleiche wird in *Bild 7* illustriert. Zunächst werden die Differenzen zwischen Simulation und Messung für alle Signale einer Auswertegröße, z. B. für sämtliche Werte der quasistatischen Summe der Führungskräfte ΣY_{qst} , gebildet (Diagramme (1) und (2) oben in *Bild 7*). Die quasistatischen Größen werden mit dem Vorzeichen ausgewertet, welches die Richtung (links/rechts) beschreibt, um zu vermeiden, dass Werte mit dem gleichen Betrag aber unterschiedlicher Richtung als identisch betrachtet werden. Das Vorzeichen der so berechneten Differenzen Simulation-Messung zeigt zwar die Richtung der Differenz (links/rechts), nicht jedoch, ob die Simulation bezüglich des Betrags zu hohe oder zu niedrige Werte liefert. Deshalb sind diese Differenzen so umzurechnen, dass das Verhältnis eindeutig wird (Diagramm (3) in *Bild 7*): Das positive Vorzeichen der Differenz heißt, dass die Beträge der Simulationsresultate von quasistatischen Größen größer sind als die Messung und umgekehrt.

Anders gestaltet sich die Situation bei Maximalwerten. Hier könnte die Betrachtung inklusive Vorzeichen des Peaks dazu führen, dass zwei vom Betrag her ähnliche Werte mit gegensätzlichen Vorzeichen eine Differenz von etwa 200 % bilden würden. Bei den Maximalwerten der stochastischen Signale von Simulation und Messung ist jedoch nicht die Übereinstimmung der Richtung und der genauen Position, sondern die Übereinstimmung des Betrags von Bedeutung, weil die Position durch ungenügende Synchronisation von Simulation und Messung stark beeinflusst werden kann. Aus diesen Gründen werden nur die Beträge (absolute Werte) der Maximalwerte aus Simulation und Messung verglichen.

Für die Gesamtmenge der Differenzen zwischen der Simulation und der Messung jeder Größe werden dann die folgenden Werte berechnet:

- Mittelwert der Differenzen zwischen dem Simulationswert und dem Messwert sowie
- Standardabweichung für dieselbe Menge an Differenzen.

Das Diagramm (4) in *Bild 7* zeigt dies für die Summe der Führungskräfte ΣY_{qst} . Durch Normierung, d. h. die Division der

so errechneten Werte durch die zugehörigen Validierungsgrenzwerte (siehe Tabelle T.2 in EN 14363:2016 [1]), gelangt man zum Diagramm (5) in *Bild 7*. Die normierten Darstellungen der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Differenzen zwischen Simulation und Messung für alle 12 Größen (Diagramme (6) in *Bild 7*) erleichtern die visuelle Beurteilung der Validierung: Das Fahrzeugmodell ist validiert, wenn keiner der Beträge der normierten Werte größer als 1 ist (*Bild 8*). Gleichzeitig werden die Schwächen des Modells einfach ersichtlich. Im Modell 1 in *Bild 8* sind es die Mittelwerte der Differenzen der Maximal- und der rms-Werte der Querbeschleunigung des Fahrzeugkastens, was eine Unstimmigkeit der Modellierung der Querverfederung zwischen Fahrzeugkasten und Drehgestell als Ursache vermuten lässt.

Die Definition der Grenzwerte für eine erfolgreiche Validierung hat im Projekt DynoTRAIN für große Diskussionen gesorgt. Bevor der Betrag eines Validierungsgrenzwerts diskutiert wird, muss man entscheiden, ob dieser Grenzwert als relative oder absolute Größe betrachtet werden und zudem allenfalls von den Fahrzeugparametern abhängig sein sollte. Jede dieser unterschiedlichen Varianten hat ihre gut nachvollziehbaren Begründungen und ihre Befürworter. Letztendlich wurde die Definition der Validierungsgrenzwerte als feste Beträge gewählt. Dabei wurde auch die Relation der Validierungsgrenzwerte einzelner Größen zu den fahrtechnischen Grenzwerten in Betracht gezogen. Obwohl manche fahrtechnische Grenzwerte in Abhängigkeit der Fahrzeugparameter definiert sind, wurden diese Zusammenhänge im Hinblick auf die relativ kleinen Auswirkungen auf die Validierung nicht betrachtet. Einzig die Validierungsgrenzwerte für die vertikalen Kräfte Rad/Schiene (Q_{qst} , Q_{max}) wurden in Funktion der statischen Radaufstandskraft definiert, um der großen Bandbreite der stationären Radaufstandskräfte gerecht zu werden. Ein nach diesem Verfahren erfolgreich validiertes Modell kann für Simulationen der vollständigen Streckenversuche verwendet werden. Diese Validierung ist somit insbesondere dort von Vorteil, wo ein Referenzfahrzeug einer Flotte oder einer Fahrzeugplattform mit Messradsätzen getestet und das Modell dieses Fahrzeugs validiert wird. Weitere Modifikationen der Fahrzeuge gleicher Plattform

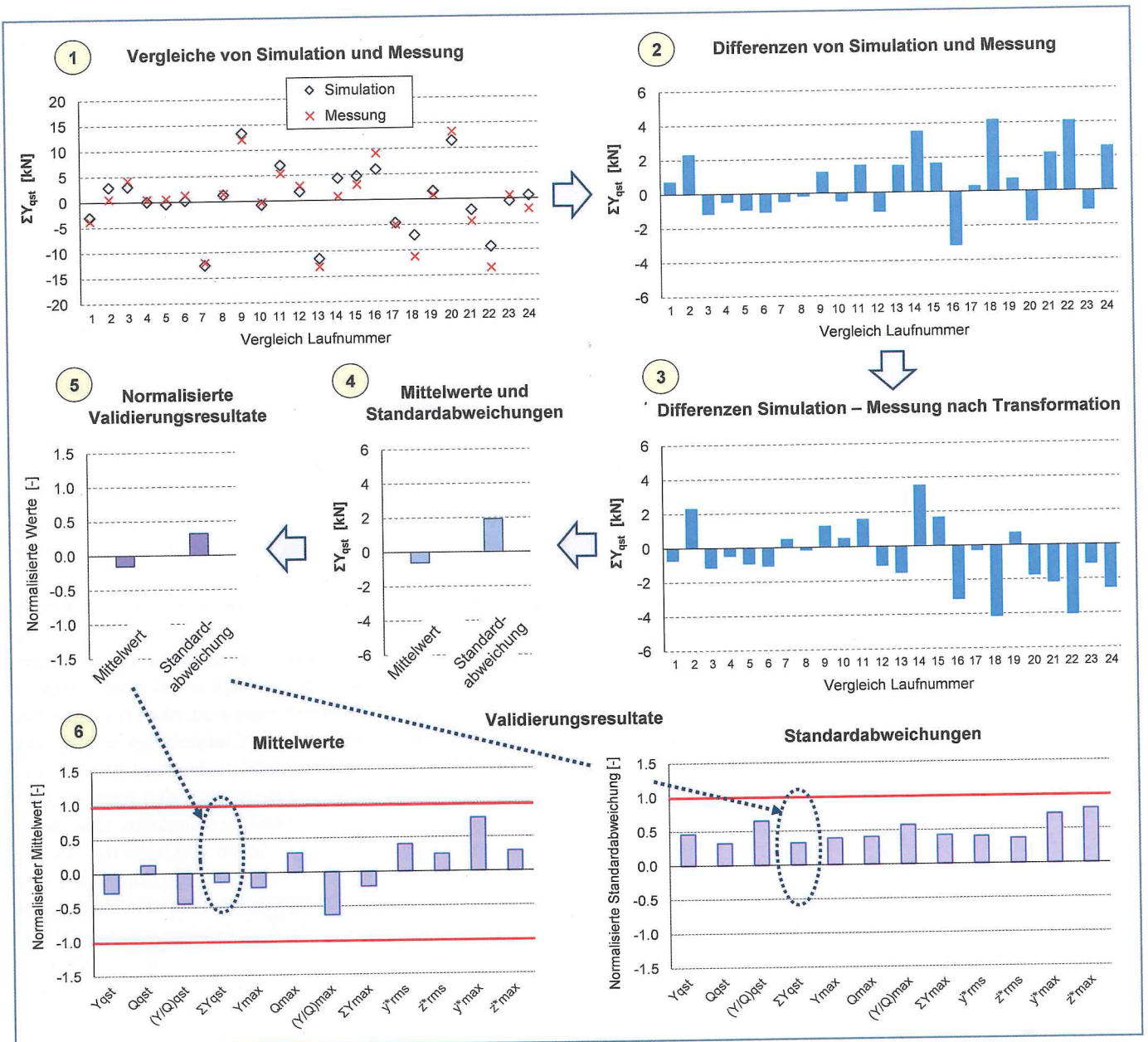


Bild 7: Vorgehen zur Bestimmung der Validierungsergebnisse bei Anwendung des Verfahrens 2 nach EN 14363:2016 am Beispiel der quasi-statischen Summe der Führungskräfte ΣY_{qst}

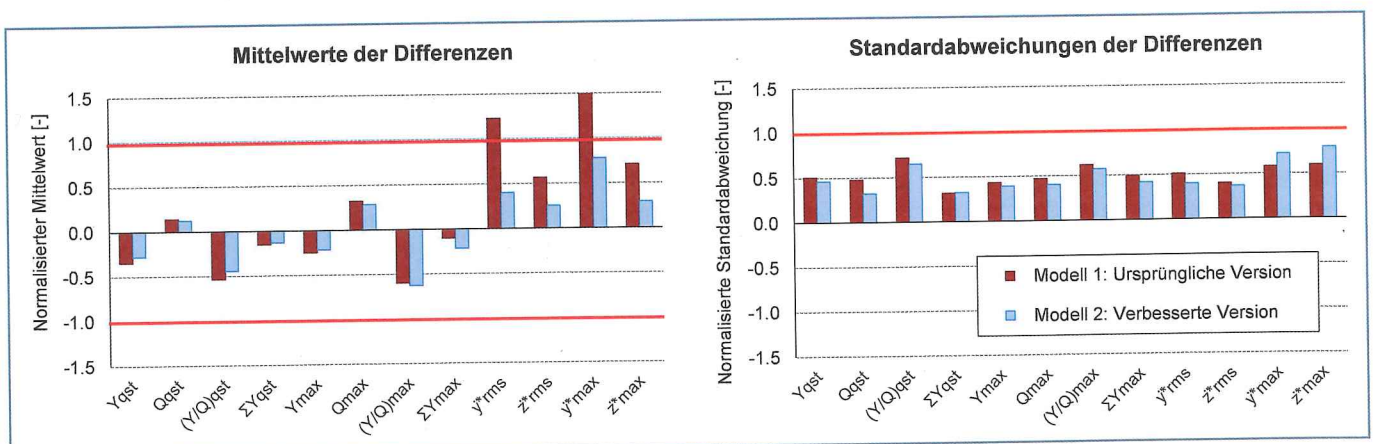


Bild 8: Normalisierte Darstellung der Validierungsergebnisse: Das verbesserte Modell im Vergleich zur ursprünglichen, nicht validierten Modellversion

können später mittels Simulationen beurteilt werden.

Diese als Verfahren 2 genannte Methode stellt einen neuen, systematischen Ansatz dar, bei welchem:

- der Modellentwickler durch den Vergleich mit den Grenzwerten direkt beurteilen kann, ob das Modell validiert ist,
- jene Beurteilungsgrößen identifiziert werden, welche von der Messung stark abweichen und somit die Schwäche des Modells darstellen,
- die Qualität verschiedener Fahrzeugmodelle untereinander durch Vergleich der normierten Validierungsergebnisse verglichen werden kann.

6 Zusammenfassung

Die aktuelle Revision der Norm für fahrtechnische Zulassung der Eisenbahnfahrzeuge EN 14363:2016 lässt unter bestimmten Bedingungen zu, die fahrtechnische Beurteilung mittels Simulationen durchzuführen. Die Anwendungsbereiche der Simulationen sind in der Norm klar definiert und betreffen hauptsächlich die Modifikationen der Fahrzeugbauteile während oder nach den Zulassungsversuchen sowie später im Betrieb und die Zulassung der Fahrzeuge durch Vergleich mit einem bereits zugelassenen Fahrzeug gleichen Konstruktionskonzepts. Das Anwenden der Simulation ist nicht auf bestimmte Bereiche von Parameteränderungen beschränkt, sondern kann bei beliebiger Änderung eines Fahrzeugparameters angewendet werden, solange der Einfluss der Modifikation das fahrtechnische Verhalten verbessert oder die Veränderungen der fahrtechnischen Größen die in der Norm definierten Margen zu den fahrtechnischen Grenzwerten nicht überschreiten.

Notwendige Bedingung beim Anwenden der Simulation ist die erfolgreiche Validierung des Simulationsmodells durch Vergleiche zwischen Simulation und Messung. Hierzu definiert die EN 14363:2016 zwei Validierungsverfahren: Verfahren 1 als Weiterentwicklung der in der UIC 518:2009 dargestellten Methodik und Verfahren 2, welches im Rahmen des Projekts DynoTRAIN entwickelt wurde. Das letztgenannte Verfahren beinhaltet eindeutig definierte Auswertegrößen und spezifiziert das Vorgehen bei der Bestimmung der Abweichungen zwischen Simu-

lation und Messung sowie die einzuhaltenden Validierungsgrenzwerte. Das Verfahren stellt einen systematischen Ansatz dar, bei welchem der Modellentwickler das Validierungsergebnis, die Qualität sowie die Schwächen des Modells direkt und eindeutig beurteilen kann. – A 205 –

(Indexstichworte: Forschung, Versuchswesen)

(Bildnachweis: 1–8, Autor)

Literatur

- [1] EN 14363:2016 Railway applications – Testing and simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles – Running behaviour and stationary tests. CEN, Brüssel, 2016.
- [2] Bruin, S.; Vinolas, J.; Berg, M.; Polach, O.; Stichel, S.: Modelling of suspension components in rail vehicle dynamics context. *Vehicle System Dynamics* 49 (2011), S. 1021–1072.
- [3] Polach, O.; Evans, J.: Simulations of running dynamics for vehicle acceptance: Application and validation. *International Journal of Railway Technology* 2 (2013); S. 59–84.
- [4] Evans, J.: Validation of vehicle dynamic modelling – some practical experience. In: 23rd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, August 19–23, 2013, Qingdao, China, Paper 2.3, ID483.
- [5] Fries, R.; Walker, R.; Wilson, N.: Validation of dynamic rail vehicle models. In: 23rd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, August 19–23, 2013, Qingdao, China. Paper 10.1, ID416.
- [6] Kraft, S.; Causse, J.; Coudert, F.: An approach for the validation of railway vehicle models based on on-track measurements. *Vehicle System Dynamics* 53 (2015), S. 1480–1499.
- [7] GM/RC2641, Issue Two. Recommendations for vehicle static testing. RSSB, London, 2009.
- [8] UIC 518:2009 Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – Safety – Track fatigue – Running behaviour. International Union of Railways, 2009.
- [9] Jönsson, L. O.; Nilstam, N.; Persson, I.: Using simulations for approval of railway vehicles: a comparison between measured and simulated track forces. *Vehicle System Dynamics*, Suppl. 46 (2008) S. 869–881.
- [10] EN 15827:2011 Bahnanwendungen – Anforderungen für Drehgestelle und Fahrwerke. CEN, Brüssel, 2011.
- [11] Web: www.triortrain.eu
- [12] Zacher, M.; Kratochwill, R.: Stationary and on-track tests using various vehicles. *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit* 229 (2015), S. 668–690.
- [13] Polach, O.; Böttcher, A.; Vannucci, D.; Sima, J.; Schelle, H.; Chollet, H.; Götz, G.; Garcia Prada, M.; Nicklisch, D.; Mazzola, L.; Berg, M.; Osman, M.: Validation of simulation models in context of railway vehicle acceptance. *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit* 229 (2015), S. 729–754.
- [14] Polach, O.; Böttcher, A.: A new approach to define criteria for rail vehicle model validation. *Vehicle System Dynamics*, Suppl. 1 52 (2014), S. 125–141.
- [15] EN 14363:2005 Bahnanwendungen – Fahrtechnische Prüfung für die fahrtechnische Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen – Prü-

fung des Fahrverhaltens und stationäre Versuche. CEN, Brüssel, 2005.

- [16] Mongiardini, M.; Ray, M. H.; Anghileri, M.: Development of software for the comparison of curves during the verification and validation of numerical models. In: 7th European LS-DYNA Conference, Salzburg, Austria, 14th–15th May, 2009. DYNAmore GmbH, 2009 (Web: <https://www.dynamore.de/en/downloads/papers/09-conference/papers/K-I-03.pdf>).
- [17] Stradtman, H.; Groll, P.; Vanzenberg, J.-M.: Sicherheit gegen Entgleisen in Gleisverwindungen und Radaufstandkraftverteilung – eine moderne Versuchsanlage in Valencienne. ZEVrail 135 (2011) Tagungsband SFT Graz 2011, S. 46–53.
- [18] Götz, G.; Polach, O.: Influence of varying input parameters on model validation results. The Stephenson Conference – Research for Railways, London, 21–23 April, 2015, S. 623–636.



Prof. Dr.-Ing. habil. Oldrich Polach (60). Studium des Maschinenbaus an der Hochschule für Verkehrs- und Nachrichtenwesen in Žilina, Tschechoslowakei, bis 1979; Promotion im Jahr 1984. Nachdiplomstudium an der RWTH Aachen bis 1985. An-

schließend von 1985 bis 1993 Lehrauftrag und Habilitation an der Hochschule für Verkehrs- und Nachrichtenwesen in Žilina. Seit 1993 in der FIAT-SIG Schienenfahrzeuge AG, Neuhausen am Rheinfall, Schweiz, tätig, seit 1996 Leiter Fahrzeugdynamik bei der SLM Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik, später Adtranz, Winterthur. Seit 2001 Chief Engineer Dynamics, seit 2007 Senior Engineer Dynamics im Bereich Drehgestelle bei Bombardier Transportation. Seit 2001 Lehrbeauftragter, später Privatdozent der ETH Zürich; seit 2005 Lehrbeauftragter und seit 2010 Honorarprofessor der TU Berlin für das Fach Fahrzeugdynamische Simulation im Eisenbahnwesen. Leiter des Arbeitspakets „Model building and validation“ des EU-Forschungsprogramms DynoTRAIN (2009–2013).

Anschrift: Bombardier Transportation, Zürcherstraße 39, 8401 Winterthur, Schweiz.
E-Mail: oldrich.polach@rail.bombardier.com