

Crashsimulation in der Schienenfahrzeugindustrie

Adrian Piassetzki

Bombardier Transportation GmbH

1 Einführung – Sicherheit im Schienenverkehr

Im Schienenverkehr treten aufgrund von aktiven Sicherheitseinrichtungen, wie zum Beispiel Signaltechnik, Zugbeeinflussung und die Spurgebundenheit der Fahrzeuge, Kollisionen relativ zum Straßenverkehr nur sehr selten auf [1]. Kommt es dennoch zu Unfällen, sollen passive Sicherheitseinrichtungen die Unfallfolgen verringern. Seit den 1990er Jahren gab es vermehrt Forschungsprojekte und Untersuchungen zur Kollisionssicherheit im Schienenverkehr. So wurden zum Beispiel im europäischen Forschungsprojekt „Safetrain“ Unfallstatistiken ausgewertet und Crashtests mit Lokomotivstrukturen durchgeführt [2]. Diese Bestrebungen führten zu der Entstehung eines europäischen Standards zur Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugkästen (EN 15227) [3] im Jahr 2008. In diesem Standard werden je nach Einsatzprofil des Fahrzeuges unterschiedliche Kollisionssicherheits-Auslegungskategorien eingeführt. In Table 1 ist eine Übersicht dieser Kategorien dargestellt. Durch die Einteilung der Fahrzeuge in verschiedene Gruppen wird das unterschiedliche Gefahrenpotential für einzelne Kollisionsarten berücksichtigt. Beispielsweise weichen die möglichen Unfallarten eines Fernverkehrszuges, wie zum Beispiel des ICEs, stark von denen einer Untergrund- oder Straßenbahn ab.

Table 1: Kollisionssicherheits-Auslegungskategorien von Schienenfahrzeugen nach [3]

Kategorie	Definition	Beispiele der Fahrzeugtypen
C-I	Fahrzeuge, die für den Betrieb auf TEN-Strecken, internationalen, nationalen und regionalen Strecken (mit Bahnübergängen) ausgelegt sind	Lokomotiven, Reisezugwagen und Triebzüge
C-II	Städtische Fahrzeuge, die ausschließlich für ein geschlossenes Netz ohne Schnittstellen mit dem Straßenverkehr ausgelegt sind	U-Bahn-Fahrzeuge
C-III	Leichte Nahverkehrsfahrzeuge, die für städtische und/oder regionale Netze ausgelegt sind mit gemeinsamer Gleisbenutzung von Vollbahnstrecken und mit Schnittstellen zum Straßenverkehr	Leichttriebwagen, Regio-Stadtbahnen
C-IV	Leichte Nahverkehrsfahrzeuge, die ausschließlich für Stadtnetze ausgelegt sind, mit Schnittstellen zum Straßenverkehr	Innerstädtische Straßenbahnfahrzeuge

Basierend auf Unfallstatistiken wurden die Kollisionen mit einem gleichartigen Fahrzeug, einem unterschiedlichen Fahrzeugtyp, mit einem großen Straßenfahrzeug sowie mit einem kleinen Hindernis als Nachweisszenarien in die Norm aufgenommen. Abhängig vom Einsatzprofil (zum Beispiel Vollbahnfahrzeug, U-Bahn oder Straßenbahn) werden die Szenario-Parameter vorgegeben. Eine Übersicht, welche Nachweise bei welcher Kollisionsgeschwindigkeit für die jeweilige Kategorie geführt werden müssen, ist in Table 2 gegeben. Die Definition der Hindernisparameter befindet sich im Anhang der EN 15227. Dort sind Beschreibungen für den Güterwagen, Regionalzug und die Straßenfahrzeuge beschrieben. Ist das Einsatzprofil eines Fahrzeuges nicht eindeutig einer Kategorie zuzuordnen oder besteht ein erhöhtes Risiko für abweichende Kollisionsszenarien, kann vom Betreiber oder Hersteller eine detaillierte Analyse durchgeführt werden, um davon abweichende Szenarien zu rechtfertigen.

Table 2: Kollisionsszenarien und Hindernisse nach [3]

Kollisions-szenario	Kollisions-hindernis	Betriebs-charakteristik	Kollisionsgeschwindigkeit km/h				Kollisions-partner
			C-I	C-II	C-III	C-IV	
1	Identische Zugeinheit	Alle Systeme	36	25	25	15	Identische Zugeinheit
2	80 t Güterwagen	Gemischter Verkehr mit Fahrzeugen, die mit Seitenpuffern ausgerüstet sind	36	n.a.	25	n.a.	Definierter Güterwagen
	129 t Regionalzug	Gemischter Verkehr mit Fahrzeugen mit Mittelkupplung	n.a.	n.a.	10	n.a.	Definierter Referenz-Regionalzug
3	15 t deformierbares Hindernis	Betrieb mit Bahnübergängen	$V_{lc} - 50 \leq 110$	n.a.	25	n.a.	Definiertes großes Hindernis
	3 t starres Hindernis	Straßenbahn, nicht getrennt vom Straßenverkehr	n.a.	n.a.	n.a.	25	Definiertes Hindernis
4	Hindernis, schmal, klein	Zu erfüllende Anforderungen an den Bahnräumer	Statische und Überlast Lastfälle	n.a.	Statische und Überlast Lastfälle	n.a.	Unrat

Im Folgenden wird näher auf die Auslegung und den Nachweis eines Vollbahnfahrzeuges (Kategorie C-I), das auf transeuropäischen Netzen fahren kann, eingegangen.

2 Auslegung und Nachweis der Crashesicherheit eines Schienenfahrzeuges

2.1 Konzepterstellung

Zu Beginn der Auslegung und Entwicklung eines kollisions sicheren Fahrzeuges erfolgt die Untersuchung der Kinetik und Kinematik des gesamten Zugverbandes in Fahrtrichtung im Falle einer Kollision. Ziel dabei ist es, die Parameter der energieabsorbierenden Bauteile und Bereiche so zu wählen, dass Verzögerungen und Belastungen der Wagenkastenstruktur minimiert werden. Dafür muss zu Beginn des Projektes klar sein, welches Einsatzprofil das Fahrzeug besitzt, um die Kollisions-sicherheits-Kategorie nach Table 2 zu wählen. Für die Konzepterstellung werden Informationen zu möglichen Zusammenstellungen des Zugverbandes und die Massen der einzelnen Wagentypen benötigt. Des Weiteren müssen Bauräume, die für Energieabsorption genutzt werden können, definiert werden. Beispielsweise begrenzt der Abstand zwischen den einzelnen Wagen den möglichen Deformationsweg an dieser Stelle.

Die Simulation und Optimierung des Verhaltens des Fahrzeugverbandes im Falle einer Kollision wird mit einfachen Feder-Masse-Systemen durchgeführt (siehe Figur 1), wobei für die energieabsorbierenden Bauteile discrete beams (*SECTION_BEAM, ELFORM=6) mit Kraft-Verformungs-Kennlinien (*MAT_GENERAL_NONLINEAR_6DOF_DISCRETE_BEAM) für die Freiheitsgrade verwendet werden (siehe Figur 2). Diese eindimensionalen Simulationen werden nur für die Szenarien 1 und 2 durchgeführt, da für die Simulation von Szenario 3 (Unfall mit großem Straßenfahrzeug) und Szenario 4 (Lastfälle für den Bahnräumer) Geometriemodelle der zu bewertenden Strukturen vorhanden sein müssen.

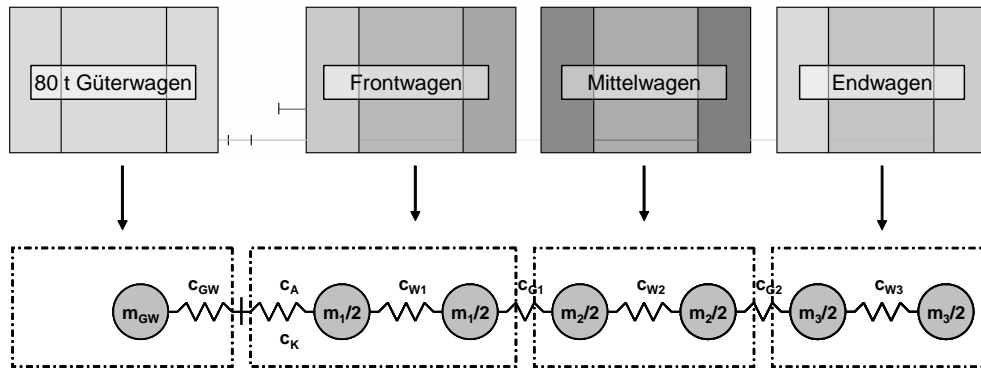


Fig.1: Schematische Darstellung eines Simulationsmodells für die Konzepterstellung

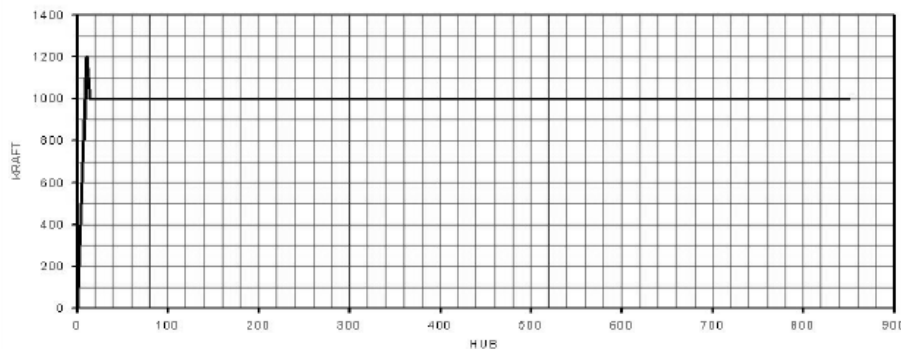


Fig.2: Beispielhafte nominale Kraft (in kN) – Hub (in mm) - Kennlinie eines Crashabsorbers

Neben den Kennwerten der energieabsorbierenden Bauteile werden in der Anfangsphase des Projektes unter anderem Überlebensräume, Befestigungskonzepte für Frontscheiben und Validierungskonzepte festgelegt. Die Validierung der Crashesicherheit und der Nachweis nach EN 15227 beruht auf folgenden Grundpfeilern:

- Die Modelle der Wagenkästen werden auch für die Simulation der statischen Nachweislastfälle nach EN 12663 [4] verwendet. Diese Modelle werden mittels Tests der Wagenkastenstruktur validiert, sodass das globale Verhalten der Struktur für linear-elastische Verformungen ausreichend plausibilisiert ist.
- Für die Crashsimulation der Wagenkastenstruktur mit LS-DYNA werden die linear-elastischen Materialmodelle der Statik mit Materialmodelle für plastische Verformungen, Dehnraten und Versagen ersetzt, sodass auch größere Deformationen beschrieben werden können. Zum Einsatz kommen dabei zum Beispiel ***MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY** teilweise mit ***MAT_ADD_EROSION** (GISSMO Schädigungsmodell) oder ***MAT_GURSON_JC** die durch Versuche an Kleinproben erstellt wurden.
- Bauteile, die im Falle einer Kollision kontrolliert Energie absorbieren, werden dynamisch getestet. Dabei werden vor allem Versuche mit einzelnen Komponenten durchgeführt. Bei Projekten, in denen zum Beispiel der Bauraum für externe Komponenten begrenzt ist, werden auch Teile der Wagenkastenstruktur für die kontrollierte Energieaufnahme genutzt und auch in Versuchen validiert.

Dieses Validierungskonzept wird gewählt, da im Vergleich zum Automobilbereich aus wirtschaftlichen Gründen keine ganzen Wagen oder Züge gecrasht werden und daher die EN 15227 es zulässt, nur die kontrolliert energieabsorbierenden Komponenten zu testen. Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Schritte des Nachweises eingegangen.

2.2 Nachweis nach EN 15227

2.2.1 FE-Modellierung

Der Nachweis der Kollisionssicherheit nach EN 15227 wird mit dreidimensionalen Vollmodellen der Wagenkästen geführt. Die Wagenkastenstruktur besteht bei Stahlwagenkästen aus einer in Differentialbauweise gefertigten Blechstruktur. Umlaufende Ringspannten und Langträger bilden das tragende Gerippe, welches außen mit dünnen Blechen beplankt ist. Bei Aluminiumwagenkästen wird meist eine Integralbauweise aus Strangpressprofilen gewählt. Größere Anbauteile und Gerätecontainer werden über eingepresste C-Schienen integriert.

Im FE-Modell wird der Wagenkasten mit Schalenelementen modelliert. Die Zielelementkantenlänge beträgt 20 mm. Guss- und Schmiedeteile wie zum Beispiel Konsolen werden mit Volumenelementen abgebildet. Ein Wagenkasten kann je nach Bauart und Modellierungsgenauigkeit zwischen 0,5 und 2 Millionen Elemente aufweisen. Im Allgemeinen werden die ersten beiden Wagenkästen des Zugverbandes dreidimensional modelliert, da sie die höchsten Belastungen erfahren und somit sich kritische Bereiche mit hoher Wahrscheinlichkeit dort befinden. Die restlichen Wagen und Energieabsorptionseinrichtungen des Zugverbandes werden als Feder-Masse-System belassen.

Für energieabsorbierende Bauteile werden mithilfe von Crashtests validierte Modelle verwendet. Dabei kommen in einigen Fällen vereinfachte Modelle mit Discrete-Beam-Elementen mit Kraft-Verformungs-Kennlinien (***MAT_GENERAL_NONLINEAR_6DOF_DISCRETE_BEAM**) zum Einsatz. Der Vorteil dieser Modellierung besteht darin, dass zum einen die Modellerstellung einfach gehalten wird und keine aufwändigen Vergleichsrechnungen angestellt werden müssen. Zum anderen kann im Postprocessing die Auslastung der energieaufnehmenden Komponenten ohne großen Aufwand dargestellt werden. Da beispielsweise die Geometrie der Schnittstellen für die Belastung der Wagenkästen oder die Wirkweise der Aufkletterschutzeinrichtungen relevant sind, werden gemischte Modelle eingesetzt. In diesen Modellen werden nur bestimmte Eigenschaften mit Discrete-Beam-Elementen abgebildet und andere hingegen über detaillierte Modellierung mit Schalen und Volumenelementen. In Figur 3 ist ein Crashabsorber dargestellt, bei dem die Aufkletterschutzplatte, das Rohr und die Flanschplatte mit Volumen- und Schalenelementen modelliert wurden. Die axiale Kraft-Verformungs-Kennlinie ist mit Discrete-Beam-Elementen umgesetzt. Mit dieser gemischten Modellierung können die unterschiedlichen Eigenschaften des Absorbers gut umgesetzt werden. Für wiederum andere energieabsorbierende Bauteile wird eine reine Schalen- und Volumenmodellierung verwendet. Das ist beispielsweise für Crashboxen (Faltabsorber) möglich.

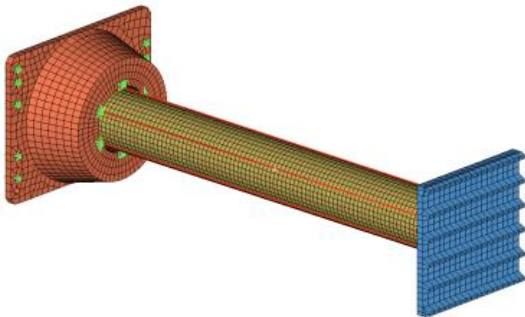


Fig.3: FE-Modell eines Crashabsorbers

FE-Modelle der Drehgestelle werden vereinfacht durch ***PART_INERTIA** simuliert und unter Verwendung von Federelementen mit dem Wagenkasten gekoppelt. Um das Abheben und Aufklettern des Wagenkastens simulieren zu können, wird das Gleisbett vereinfacht modelliert und ein Kontakt mit den Radsätzen definiert. Wichtig sind die Federkennlinien der Drehgestelle, da sie das Verhalten im Crash stark beeinflussen, vor allem Abheben und Aufklettern. Neben dem Rad-Schiene-Kontakt werden auch Kontakte (***CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE**) an den Kollisionsinterfacen zwischen den Wagen und Fahrzeugen definiert. Die Definition dient vor allem der notwendigen Auswertung der Kontaktkräfte an diesen Schnittstellen. Für die Struktur der einzelnen Wagenkästen wird Selbstkontakt berücksichtigt.

2.2.2 Übersicht der unterschiedlichen Kollisionsszenarien für die Wagenkastenstruktur

Die Kollision zweier gleichartiger Fahrzeuge (Szenario 1) ist für einen Großteil der Anwendungsfälle dimensionierend für die strukturelle Integrität der Wagenkastenstruktur und die Auslegung der energieabsorbierenden Bauteile, da in diesem Szenario die Konstruktion die größte Deformationsenergie aufnehmen muss. Für Vollbahnfahrzeuge ist eine Relativgeschwindigkeit von 36 km/h vorgegeben. Das stehende Fahrzeug liegt um 40 mm tiefer, um Effekte wie zum Beispiel Verschleiß der Radsätze abzubilden. In Figur 4 ist ein Modellausschnitt gezeigt. Eine Herausforderung bei der Simulation ist die Modellgröße (bis zu 10 Millionen Elemente) und Simulationsendzeit (bis zu 2.0 s) langer Fahrzeugverbände.

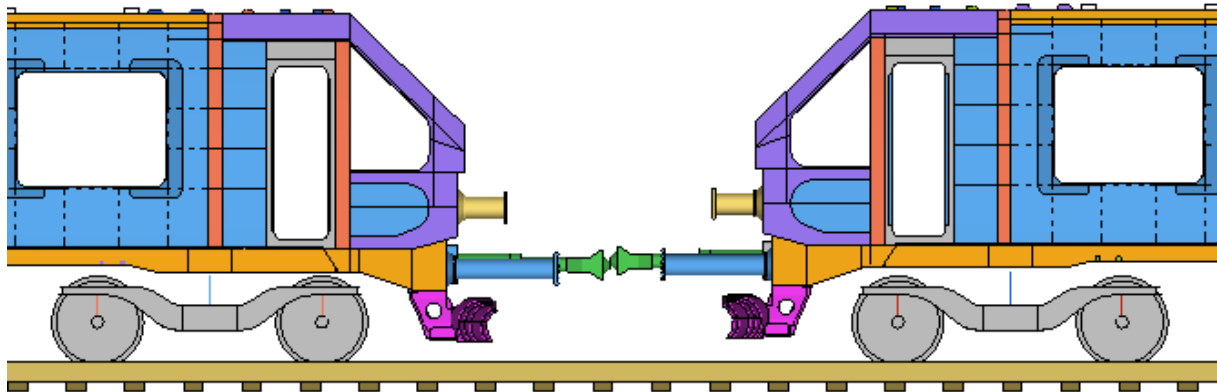


Fig.4: Modell für die Kollision gleichartiger Fahrzeuge (Szenario 1)

Das zweite Szenario, die Kollision mit einem andersartigen Fahrzeug (Pufferfahrzeug), dient der Überprüfung der Kompatibilität mit Güterverkehr und sorgt des Weiteren auch für Kompatibilität unter nach EN 15227 ausgelegten Fahrzeugen (siehe Figur 5). Die Geschwindigkeit beträgt ebenfalls 36 km/h.

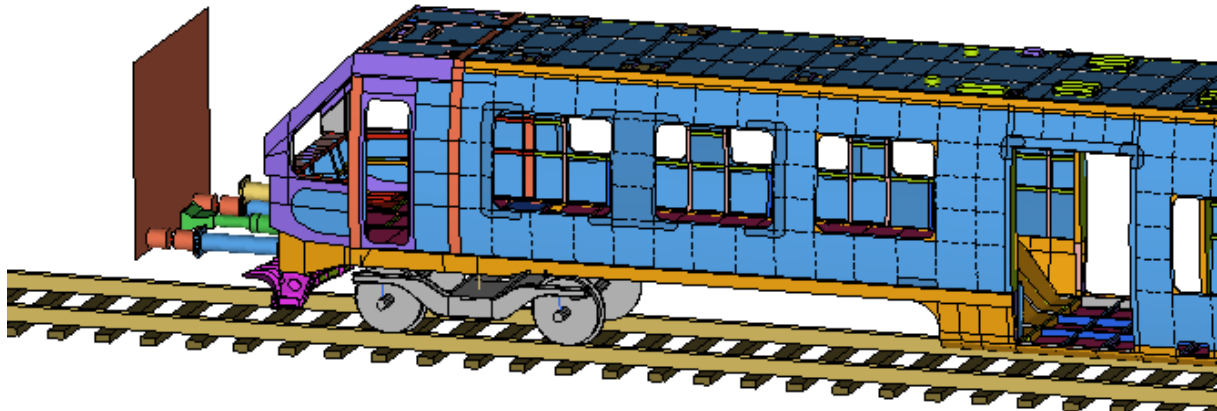


Fig.5: Modell für die Kollision mit Pufferfahrzeug (Szenario 2)

Um die Sicherheit des Fahrzeugführers bei Unfällen an Bahnübergängen zu erhöhen, wird in der EN ein repräsentatives LKW-Hindernis eingeführt (siehe Figur 6). Die Kollisionsgeschwindigkeit für dieses Szenario richtet sich nach der Höchstgeschwindigkeit an Bahnübergängen und beträgt maximal 110 km/h. Die Einführung dieses Szenarios führte zu wesentlich stabileren Frontstrukturen.

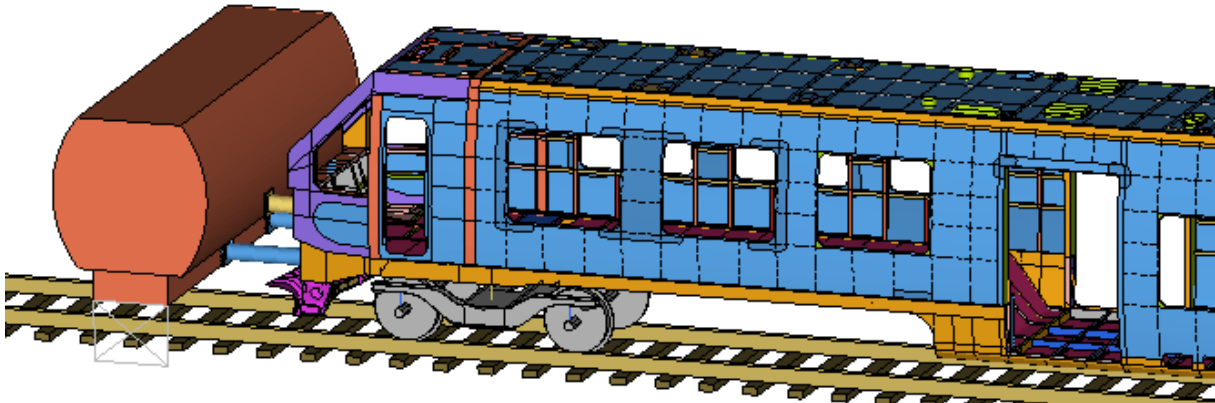


Fig.6: Modell für die Kollision mit LKW-Hindernis (Szenario 3)

2.2.3 Nachweiskriterien nach EN 15227

Für die Szenarien 1 bis 3 müssen die auf die Passagiere wirkenden Verzögerungen begrenzt, die Lebensräume erhalten und das Risiko von Aufklettern und Entgleisen minimiert werden.

Zur Bestimmung der Verzögerungen wird die Netto-Kontaktkraft, d.h. die Summe der auf den Wagen wirkenden Kräfte, verwendet. Die daraus abgeleiteten Beschleunigungen werden im Bereich bis zum ersten Nulldurchgang gemittelt. Nach Norm ist eine Begrenzung auf 5 g für Szenario 1 und 2 und auf 7,5 g in Szenario 3 vorgeschrieben.

Für den Nachweis des Erhalts der Überlebensräume für die Passagiere können zwei Wege gewählt werden. Zum einen kann nachgewiesen werden, dass die plastischen Dehnungen die Bruchdehnung des Materials nicht überschreiten (jedoch maximal 10%). Alternativ kann auch gezeigt werden, dass alle 5 m Bereiche des Wagenkastens um maximal 50 mm gestaucht werden. An den Enden der Fahrzeuge kann der Wert auf 100 mm erhöht werden. Für den Überlebensraum des Fahrers muss gezeigt werden, dass dieser erhalten bleibt.

Dass Aufklettern und Entgleisen begrenzt werden, wird entweder dadurch nachgewiesen, dass wenigstens ein Radsatz im effektiven Kontakt zur Schiene bleibt oder die Aufkletterschutzeinrichtungen voll im Eingriff bleiben. Der effektive Kontakt zur Schiene kann gezeigt werden, wenn der Radsatz maximal um 75% der Spurkrannennhöhe abhebt. Für den Fall, dass die Aufkletterschutzeinrichtungen im Eingriff sind, ist auch ein Abheben von 100 mm zulässig.

Neben großen Hindernissen, wie LKWs oder Bussen kommt es zu Kollisionen mit PKWs, Tieren oder Unrat. Diese Hindernisse weisen zumeist einen niedrigen Schwerpunkt auf und werden vom Bahnräumer erfasst. Die Struktur und Anbindung des Bahnräumers wird mit statischen Lastfällen und Anforderungen an das Überlastverhalten validiert. Der Bahnräumer soll keine signifikanten plastischen Verformungen unter zentrischer und außermittiger Last erfahren. Die Höhe der Last ist von der Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges abhängig. In Figur 7 sind die Lasteinleitungsstellen schematisch dargestellt. Unter Überlast soll der Bahnräumer nicht abreißen oder zur Gefahr werden. Das kann zum Beispiel dadurch gezeigt werden, dass er bei zentrischer Überlast 36 kJ absorbiert.

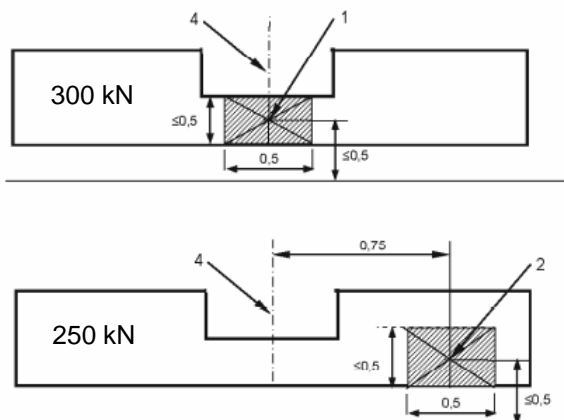


Fig.7: Statische Lastfälle für den Bahnräumer nach [3]

2.3 Insassenschutz

Der Bereich des Insassenschutzes ist für Vollbahnfahrzeuge in Europa vor allem in Großbritannien relevant. Normative Anforderungen zum Beispiel die GM/RT2100 Issue 5 fordern eine Überprüfung des Fahrzeuginnenraumes nach bestimmten Kriterien. Beispielsweise sind Radien von minimal 20 mm an Stellen, wo das Risiko einer Kopfkollision besteht, empfohlen. Weitere Anforderungen für statische Nachweislastfälle für Scheiben, Trennwände und Gepäckanlagen müssen beachtet werden. Neben geometrischen Anforderungen und statischen Lastfällen müssen zum Beispiel Sitze und Führerpult durch reale oder simulierte Tests mit Crashtest-Dummys validiert werden. In einem Schlittenversuch mit definiertem Kollisionspuls soll gezeigt werden, dass bestimmte Insassenschutzkriterien für die Kollision von Dummy und Führerpult eingehalten werden (siehe Figur 8). Die Passagiersitze werden in Versuchen auf strukturelle Integrität und auf Insassensicherheit getestet. Dabei wird zum einen mit männlichen Hybrid III 50% Dummys für die Bewertung der Passagierverletzungen gearbeitet, zum anderen werden männliche Hybrid III 95% Dummys für den Nachweis der Stabilität der Sitzstrukturen verwendet.

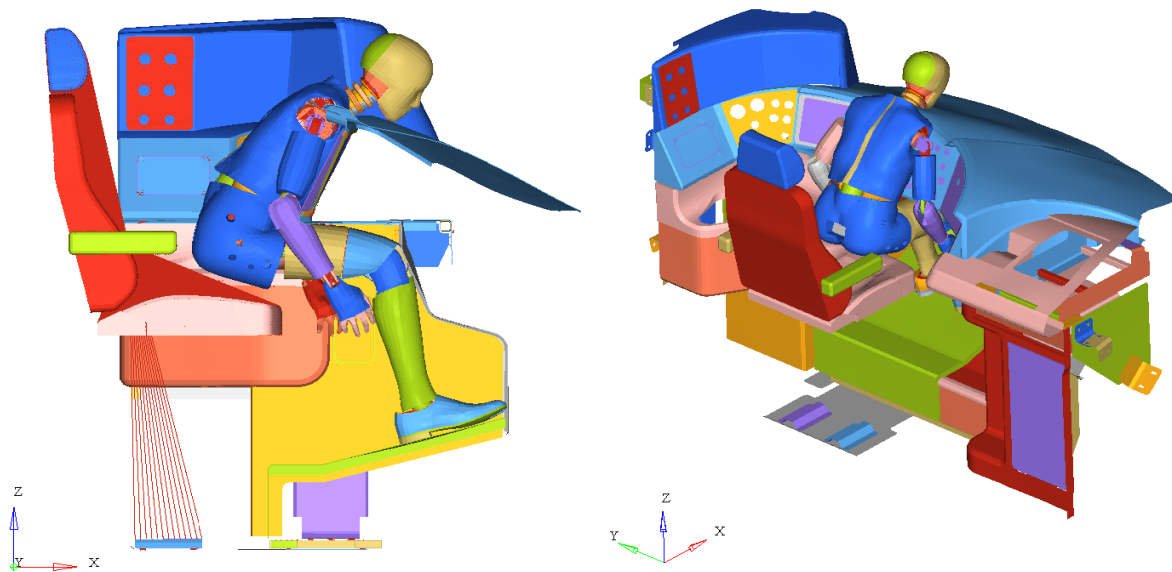


Fig.8: Simulation des Aufpralls eines Dummys auf das Führerpult

In Deutschland ist ein solches Vorgehen nicht normativ gefordert. Ein Regelwerk, das vom Verband der europäischen Eisenbahnindustrie herausgegeben wird (UNIFE) [5], gibt in vergleichbarer Weise Anforderungen an die Insassensicherheit. Dieses Dokument hat nur den Stellenwert einer technischen Empfehlung und kann aufgrund eines Kundenwunsches im Lastenheft enthalten sein. Die Erkenntnisse in diesem Regelwerk basieren auf dem europäischen Forschungsprojekt „SafeInteriors“.

3 Simulation realer Unfälle

3.1 Ziel der Simulation

Neben der Auslegung von crash-sicheren Fahrzeugen werden auch reale Unfälle simuliert, um den Unfallhergang besser zu verstehen und Beschädigungen zu lokalisieren. Informationen zum Unfallhergang, Hindernis und Randbedingungen sind nicht immer im ausreichenden Maße vorhanden und müssen vom Simulationsingenieur sinnvoll gewählt werden. Dennoch bieten diese Unfälle eine zusätzliche Validierungsmöglichkeit für die Simulationsmodelle. Die Parameter der Simulation werden so angepasst, dass eine Korrelation zwischen Ergebnissen und Schadensbildern des Fahrzeuges erreicht wird. Beispielhaft ist in Figur 9 der Vergleich des Schadensbildes eines quer-belasteten Crashabsorbers gezeigt. Diese Art der Belastung tritt in den Nachweisszenarien der EN 15227 nicht auf, sodass ein Vergleich zwischen realem Schadensbild und gewählter FE-Modellierung hilft, die Modellierung zu verbessern.

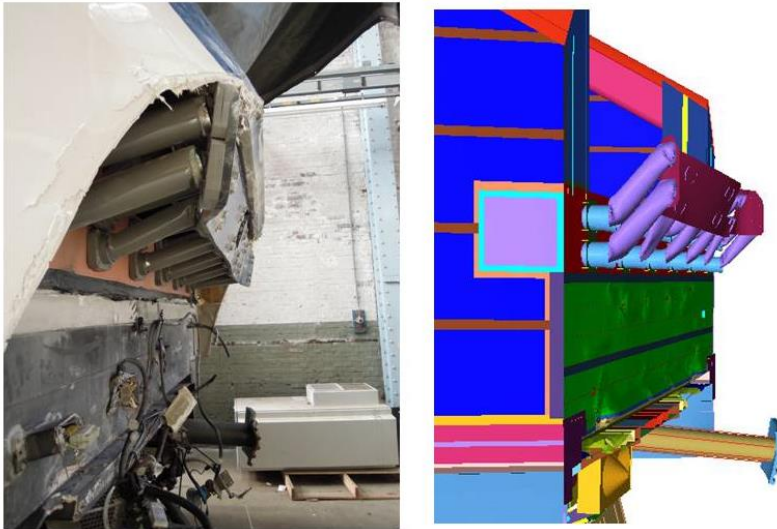


Fig.9: Schadensbild von quer-belasteten Crashabsorbern

3.2 Beispiel: Talent 2 gegen Güterzug in Meerbusch

Im Folgenden wird beispielhaft ein Unfallhergang näher beschrieben und auf die nachträgliche Simulation eingegangen. Der Unfall ereignete sich in der Nähe von Meerbusch (Nordrhein-Westfalen) am 5. Dezember 2017. Eine Regionalbahn vom Typ Talent 2 fuhr auf einen in gleicher Richtung fahrenden Güterzug auf (siehe Figur 10). Der Talent 2 Triebzug fuhr in Doppeltraktion bestehend aus 2 mal 5 Wagen. Die Geschwindigkeit des Talent 2 betrug 85 km/h, die des Güterzuges 17 km/h, sodass von einer Relativgeschwindigkeit von 68 km/h ausgegangen werden kann. Im Vergleich zu dem Szenario 2 der EN 15227 ergibt sich somit eine vielfach höhere Kollisionsenergie. In der Regionalbahn befanden sich 173 Passagiere, von denen 50 verletzt wurden (davon 9 schwer). Unter den Fahrgästen und dem Zugpersonal gab es keine tödlich Verunglückten. Die stabile Front- und Wagenkastenstruktur und der Umstand, dass kein kritisches Entgleisen des Talent 2 Triebzuges erfolgte beeinflussten das Verhalten des Talent 2 Zuges in diesem Crash positiv. Die Energieabsorptionseinrichtungen (Absorber, Kupplungen und Gelenke) funktionierten weitestgehend wie erwartet und nahmen kontrolliert Energie auf. Im ersten Zugverband wurden die Deformationswege komplett aufgebraucht. Auch große Deformationen, wie zum Beispiel am Übergang zwischen Hoch- und Niederflur, konnten ohne globalen Bruch der Struktur ertragen werden (siehe Figur 11). Das ist ein Vorteil einer Wagenkastenstruktur aus Baustahl mit hohen ertragbaren Dehnungen.



Fig.10: Unglücksstelle in der Nähe von Meerbusch [5]



Fig.11: Schadensbild des führenden Wagens – nach Anheben bei der Bergung [5]

Bei der nachträglichen Simulation des Unfallhergangs ergaben sich einige Herausforderungen. Für die Modellierung der Güterwagen und ihres Verhaltens musste die Geometrie in geeigneter Weise abgebildet, Parameter zur Kupplung, Steifigkeit und Trägheit beschafft und in das Simulationsmodell eingebettet werden. In den Szenarien für den Nachweis nach EN 15227 sind die Fahrzeuge ungebremst, sodass Iterationen zur Anpassung des Bremsverhaltens notwendig waren. Erschwerend kam hinzu, dass einige Radsätze des Talent 2 entgleisten und somit die Bremswirkung nicht mehr quantifizierbar war. In ähnlicher Weise stellt sich die Simulation der Güterwagen nach dem Entgleisen dar. Einige Güterwagen sind nach der Kollision den Bahndamm herabgerollt (siehe Figur 10), ein Verhalten das durch unsymmetrische Belastungen begünstigt wurde. Im Simulationsmodell wurde mittels geometrischer Anpassungen ein Entgleisen der Güterwagen absichtlich herbeigeführt, um den Unfall besser nachbilden zu können.

Unabhängig von diesen notwendigen Anpassungen zeigen die Simulationsmodelle vor allem am hochbelasteten Übergang von Hoch- zu Niederflur eine gute Übereinstimmung mit den Schadensbildern. In Figur 12 ist das Verformungsbild aus der Simulation dargestellt.

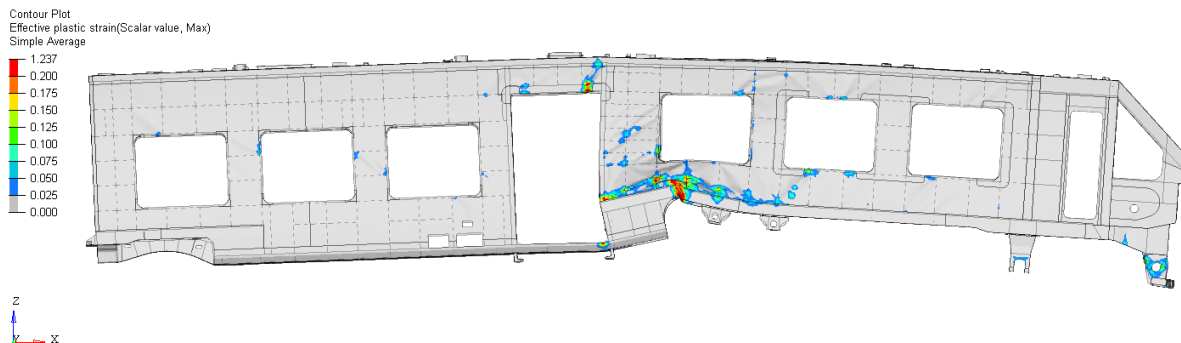


Fig.12: Deformation des Wagenkastens in der LS-DYNA Simulation

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklung von Schienenfahrzeugen nach EN 15227 sorgt für eine Erhöhung der passiven Sicherheit. Dabei nimmt die Crashesimulation einen zentralen Platz ein, da aufgrund wirtschaftlicher Randbedingungen weniger Tests durchgeführt werden. In der Zukunft ist eine weitere Detaillierung der Modelle zu erwarten, wobei die Abbildung von zusätzlichen physikalischen Eigenschaften wie der Geschwindigkeitsabhängigkeit im Mittelpunkt stehen wird. Eine weitere Entwicklung geht dahin, dass Kunden spezielle Szenarien fordern. Diese kundenspezifischen Szenarien betreffen oftmals die Reparaturfreundlichkeit der Fahrzeuge und sollen beispielsweise den Grad der Beschädigung bemessen. Für den Betreiber sind solche Informationen sehr wichtig, da Standzeiten infolge von aufwendigen Reparaturen kostenintensiv sind. Problematisch sind ungenaue Randbedingungen oder die fehlende Definition von Hindernissen. Eine große Variationsmöglichkeit der Simulationsparameter erschwert zusätzlich die Aussagefähigkeit in diesem Bereich.

5 Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.allianz-pro-schiene.de/presse/pressemitteilungen/2012/031-in-der-eisenbahn-sind-reisende-am-sichersten-unterwegs/> (20.06.2013).
- [2] Halbjahresbilanz der DB AG In: Eisenbahn-Revue International, Heft 10/1998; S.441.
- [3] DIN EN 15227:2008+A1:2010, Bahnanwendungen – Anforderungen an die Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugkästen.
- [4] DIN EN 12663-1:2010+A1:2014, Bahnanwendungen - Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen - Teil 1: Lokomotiven und Personenfahrzeuge (und alternatives Verfahren für Güterwagen).
- [5] UNIFE REF: 001, Technical Report for Interior Passive Safety in Railway Vehicles, 1. Dezember 2014.
- [6] <https://www1.wdr.de/mediathek/video/sendungen/lokalzeit-duesseldorf/video-zugunglueck-meerbusch---bergung-der-waggons-100.html> (6.10.2019)