



ETR

EISENBAHNTECHNISCHE RUNDSCHAU

MIT
JUBILÄUMS-
SPECIAL

IMPULSGEBER FÜR DAS SYSTEM BAHN

EUROPA

AutomatedTrain

Guidance Curves für den Digitalen Knoten Stuttgart

Hyperloop: Netzwerk und Wirtschaftlichkeit

Mehr Fahrwegkapazität: Im Fließbandverfahren bauen

RESILIENZ

Definition für das System Bahn und Entwicklung
einer Methodik zur Quantifizierung

FAHRZEUGE & KOMPONENTEN

Simulationsgestützte Untersuchung
des Schwallverhaltens in Tanks



Zusammenhalt ist der beste Schutz.

Von und für Eisenbahner:innen gegründet. Heute für alle da, die den Verkehr bewegen.



Jahre Zusammenhalt

© DVV Media Group GmbH

DEVK

Simulationsgestützte Untersuchung des Schwallverhaltens in Tanks

Beim Transport von Flüssigkeiten in Tanks kommt es zu Schwalleffekten, die zusätzliche Kräfte auf das Fahrzeug ausüben. In dem vom DZSF geförderten Forschungsprojekt wurde das Schwallverhalten und dessen Wirkung auf die Entgleisungssicherheit von Schienenfahrzeugen untersucht. Insbesondere wurden die Regelwerks-Anforderungen an Schwallwände für verschiedene Tankarten und Füllungsgrade überprüft.



Die DB Systemtechnik GmbH wurde vom Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) mit dem Projekt „Simulationsgestützte Untersuchungen zum Schwallverhalten in Tanks“ beauftragt. Ziel war es, ein grundlegendes Verständnis des Schwallverhaltens in Tanks unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu erhalten.

Neben den Wechselwirkungen zwischen Schwallverhalten und Fahrtechnik sollten ebenfalls der Einfluss der Ladungscharakteristik (Füllungsgrad, Dichte, Viskosität) sowie der Tankart (z. B. Tankcontainer, Kesselwagen) untersucht werden. Hintergrund ist die Regulierung des Füllungsgrades für den Transport von flüssigem

Gefahrgut in Tankcontainern [1]. Hiernach sind bei Füllungsgraden zwischen 20 - 80 % Schwallwände vorgeschrieben, wenn das Tankvolumen 7,5 m³ übersteigt.

Gerade für den Einsatz von besonders großen Tankcontainern im Schienengüterverkehr, die nicht für den intermodalen Verkehr vorgesehen sind, ergibt sich rechtlicher Klärungsbedarf. Kesselwagen im Schienengüterverkehr sind von solchen Beschränkungen ausgenommen. Diese dürfen unabhängig von ihrem Fassungsvermögen zu beliebigen Füllungsgraden befördert werden. Der Ursprung für die Regulierung bei Tankcontainern ist unklar, weshalb diese mithilfe von Simulationen untersucht werden sollte.



Dipl.-Ing. Clemens Höppe

Stellv. Abteilungsleiter
Simulation Gesamtfahrzeug
DB Systemtechnik GmbH
Clemens.hoeppe@
deutschebahn.com



Denis Ehrhardt, M.Sc.

Simulation Gesamtfahrzeug
DB Systemtechnik GmbH
Denis.Ehrhardt@
deutschebahn.com



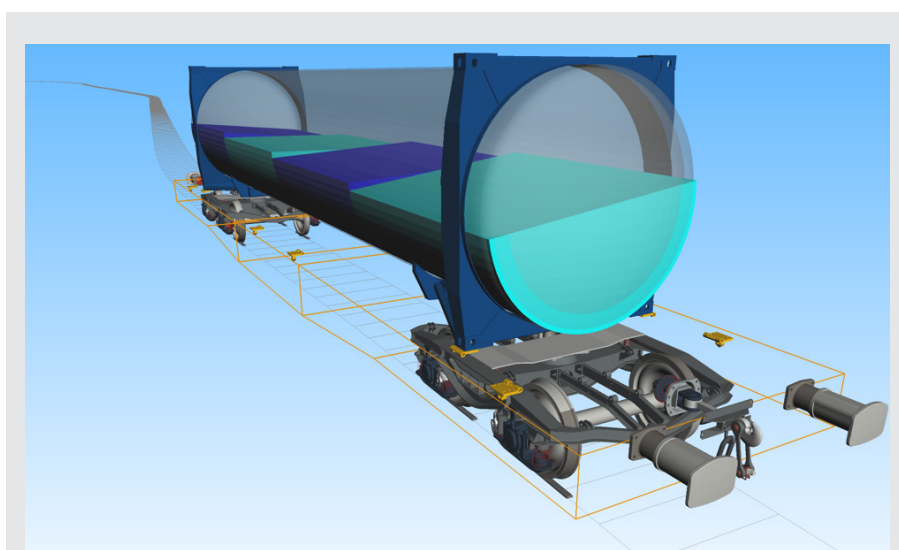
Simon Stüwe, M.Sc.

Simulation Gesamtfahrzeug
DB Systemtechnik GmbH
Simon.Stuewe@
deutschebahn.com

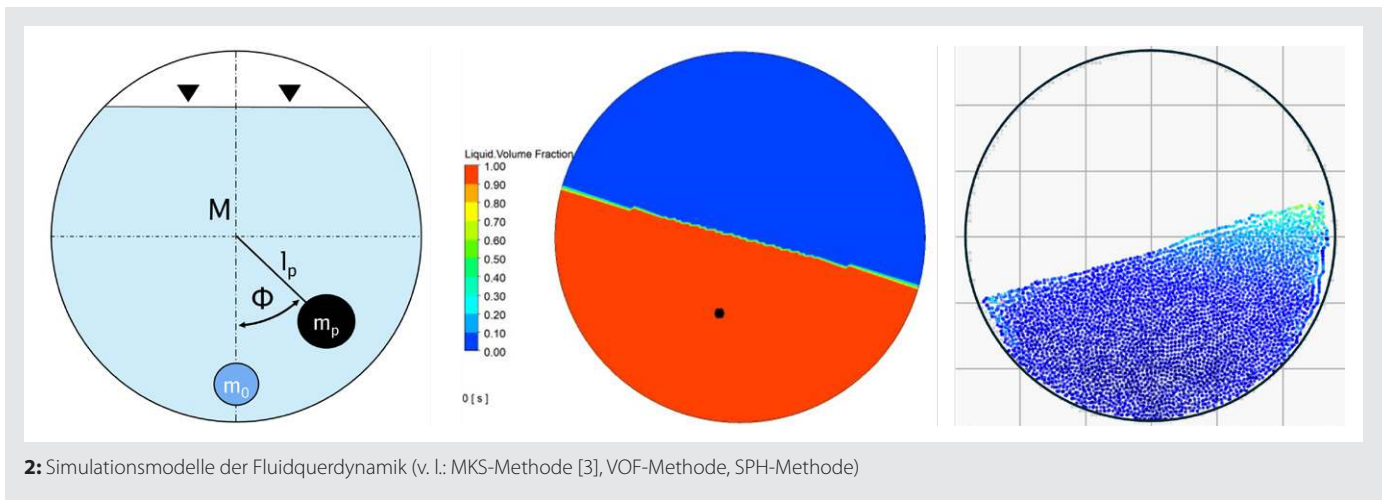


Dipl.-Ing. Michael Hieke

Technikkompetenz Aerodynamik
und Klimatechnik
DB Systemtechnik GmbH
Michael.hieke@deutschebahn.com



1: MKS-Modell eines Containertragwagens mit Tankcontainer (Abbildung der Fluidodynamik mittels MKS-Methode)



Modellierungsmethoden für Fahrdynamik und Fluiddynamik

Zur Simulation der Fahrdynamik ist die Nutzung kommerzieller Mehrkörpersimulationsprogramme (MKS) seit vielen Jahren gängige Praxis. Für die Untersuchung wurde das MKS-Programm SIMPACK genutzt und ein parametrisches Schienenfahrzeugmodell aufgebaut, welches mit Y25 Drehgestellen ausgestattet ist (vgl. Abbildung 1). Es eignet sich für Untersuchungen nach [2]. Außerdem lässt sich durch Steuergrößen das Fahrzeugmodell in den Parametern Drehgestellabstand, Tankgröße (Durchmesser und Länge) und Tankposition (bei Containertragwagen) verändern, um so umfangreiche Parametervariationen einfach zu ermöglichen.

Die Flüssigkeitsbewegung wurde in der durchgeführten Untersuchung durch drei unterschiedliche Methoden abgebildet (vgl. Abbildung 2) und hinsichtlich Rechengenauigkeit, Rechengeschwindigkeit und Integrierbarkeit in das bestehende Fahrzeugmodell analysiert.

MKS-Methode

In der Literatur ist eine Vielzahl von Untersuchungen zur vereinfachten Berechnung des Schwallverhaltens in Behältern zu finden. Eine bewährte Methode ist die Abbildung der Flüssigkeit als Pendelmodell oder Feder-Masse-Modell [3,4]. Dabei wird ein Teil der Flüssigkeit als starr mit dem Tank verbunden angenommen, ein anderer Teil ist gefedert bzw. pendelnd aufgehängt. Federsteifigkeit / Pendellänge hängen vom Füllungsgrad und Größe des Tanks ab.

VOF-Methode

Bei der klassischen Berechnung von Strömungen wird ein Berechnungsnetz über das Berechnungsgebiet gelegt und der Strömungszustand in jedem Knoten bestimmt (Volume of Fluid, VOF) [5]. Für die Berechnungen wurden kommerzielle CFD-Programme genutzt, wobei die Eignung zunächst im Rahmen der Recherche ermittelt wurde.

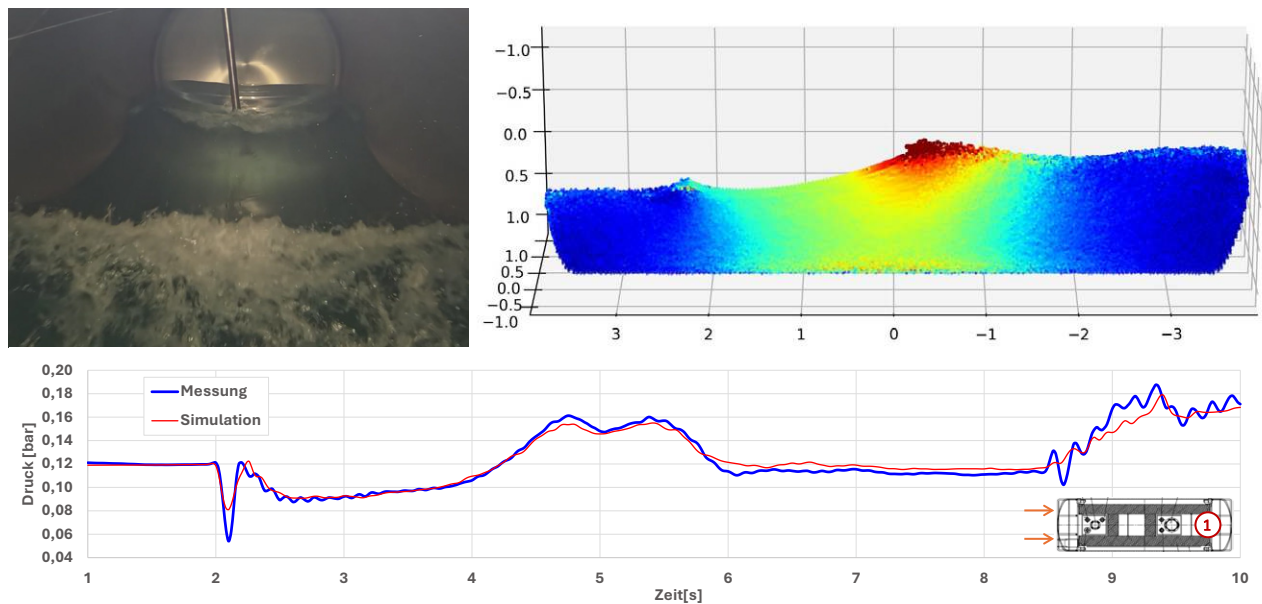
SPH-Methode

Die SPH-Methode (Smooth Particle Hydrodynamics) ist ein neuerer Ansatz, der sich besonders für die Berechnung von Flüssigkeiten mit freier Oberfläche eignet [6]. Die Flüssigkeit wird dabei als Partikelströmung abgebildet, wobei die Partikeldichte den lokalen Druck der Flüssigkeit beeinflusst. Die genutzte Software erwies sich bei Tests als sehr leistungsfähig, um auch stark verwirbelte Strömungen in komplexen Tankgeometrien zu berechnen (z. B. Schwallwände).

Bis auf die Abbildung der Schwallbewegung mittels MKS-Methode werden die Berechnungen zur Fluidodynamik in anderen Programmen als die Simulation der Fahrzeugdynamik durchgeführt. Es ist daher notwendig, die Programme miteinander zu koppeln, um die Auswirkungen des Schwallverhaltens auf die Fahrdynamik zu berechnen oder auch die Auswirkungen der Fahrdynamik auf das Schwallverhalten. Die Analysen zeigen, dass sich die auf den Tank wirkenden Beschleunigungen im Schienenverkehr im Wesentlichen durch



3: Links: Versuchsfahrzeug mit einem 45-Fuß-Tankcontainer für Auflaufstoßversuche und Fahrversuche durch einen engen S-Bogen. Rechts: Versuchsfahrzeug mit zwei 26-Fuß-Tankcontainern mit und ohne Schwallwände für Auflaufstoßversuche



4: Auflaufstoßversuch: Die Ergebnisse der Versuche (oben links) können optisch überzeugend durch die SPH-Simulation (oben rechts) abgebildet werden. Auch der numerische Vergleich der im Versuch und in der Simulation gemessenen Drücke (unten) zeigt eine sehr gute Genauigkeit

die Trassierung und Fahrzeuggeschwindigkeit ergeben und nur zu einem kleinen Teil durch die in Bewegung gebrachte Flüssigkeit. Daher lässt sich die Gesamtsimulation mit hinreichender Genauigkeit durch eine dreistufige sequenzielle Berechnung durchführen:

- Stufe 1: Berechnung der Beschleunigungen durch eine MKS-Fahrzeugsimulation und starrer Flüssigkeit
- Stufe 2: Berechnung des Schwallverhaltens mit der VOF- oder SPH-Methode und Bestimmung der Schwallkräfte
- Stufe 3: Erneute MKS-Fahrzeugsimulation unter Berücksichtigung der Schwallkräfte

Für die in dieser Untersuchung angestrebten Parametervariationen wurden Fahrscenarien gewählt, die eine starke Anregung des Tankinhalts erzeugen.

Für die Anregung in Querrichtung wurde ein doppelter Gleiswechsel modelliert, wie er bei der Ein- und Ausfahrt eines Güterzugs in und aus dem Bahnhof in der Regel vorkommt. Durch geschickte Wahl der Parameter kann das Fahrzeug dabei periodisch in Querrichtung angeregt werden.

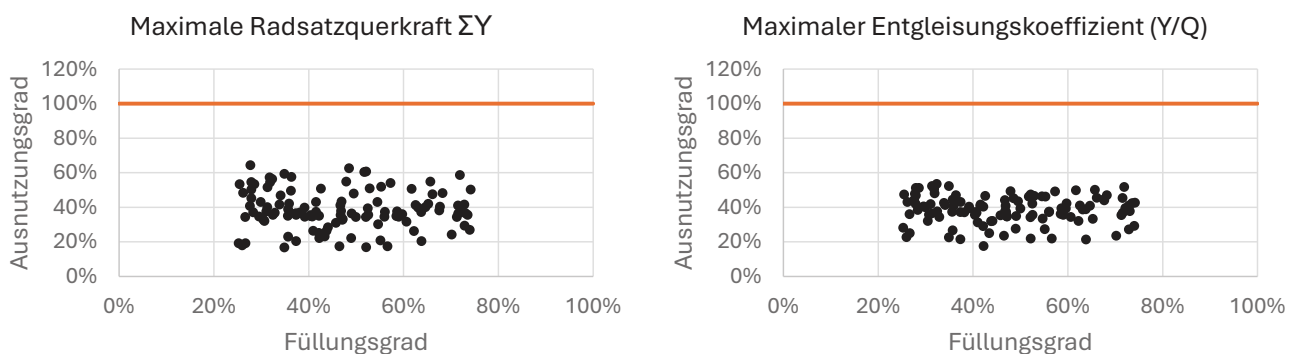
Das Schwallverhalten in Längsrichtung wurde anhand eines Auflaufstoßszenarios analysiert, wie es bei der Zugbildung von Güterzügen vorkommt. Das stoßartige Aufeinandertreffen der Güterwagen sorgt

dabei für eine impulsartige Anregung der Flüssigkeit im Tank.

Validierung der Simulationsmodelle durch Versuche

Für die Validierung der Simulationsmethoden fanden 1:1-Versuche auf dem Versuchsgelände der DB Systemtechnik GmbH in Minden statt.

Mit einem großen 45-Fuß-Tankcontainer wurden Fahrversuche durch einen engen S-Bogen zur Untersuchung des Querschwallverhaltens und Auflaufstoßversuche zur Untersuchung des Längschwallverhaltens durchgeführt. Bei den



5: Ergebnis der Parameterstudie für die Fahrversuchssimulation mit doppeltem Gleiswechsel. Die jeweilige Auswertgröße ist im Verhältnis zum Grenzwert nach [2] aufgetragen

Auflaufstoßversuchen wird ein 80 Tonnen schwerer Schüttgutwagen von einer Rampe abgelaufen und trifft mit niedriger Geschwindigkeit auf das Versuchsfahrzeug.

Zudem fanden Auflaufstoßversuche mit zwei 26-Fuß-Containern statt, von denen einer mit Schwallwänden ausgestattet war, um auch den schwallhemmenden Einfluss dieser Konstruktionselemente bewerten zu können. Die Versuchsfahrzeuge sind in Abbildung 3 dargestellt. Alle Versuche fanden mit Wasser als Fluid statt.

Beide Versuchsszenarien eigneten sich durch ihre Nähe zu den Simulationslastfällen sehr gut, um Aussagen über die Qualität der einzelnen Simulationen zu treffen. Insgesamt wurden für die Versuchskampagne 54 verschiedene Messkanäle für Radkräfte, Beschleunigungen, Dehnmessstreifen und Tankdrucksensoren aufgezeichnet.

Die Ergebnisse zeigten gute Übereinstimmung mit den Berechnungsergebnissen der Simulationsmodelle, sowohl bei Tanks ohne Schwallwände als auch bei Tanks mit Schwallwänden (vgl. Abbil-

dung 4). Sie bestätigen, dass auch das einfache Feder-Masse- bzw. Pendel-Modell das Schwallverhalten und die wirkenden Kräfte in Tanks ohne Schwallwände hinreichend genau abbildet. Das Modell eignet sich daher besonders für umfangreiche Parametervariationen.

Die Simulation des Schwallverhaltens in Tanks mit Schwallwänden ist hingegen nur mit der SPH-Methode mit hinreichender Genauigkeit und akzeptabler Rechenzeit möglich.

Parametervariation

Nach Abschluss der Validierung wurden umfangreiche Parametervariationen durchgeführt, um das Gefährdungspotenzial eines schienengebundenen Tankfahrzeugs durch das Schwallverhalten in Tanks ohne Schwallwände bewerten zu können. Variiert wurden:

- Füllungsgrad
- Flüssigkeitsdichte

- Viskosität
- Tanklänge
- Tankvolumen
- Drehgestellabstand
- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Position des Containers auf dem Tragwagen.
- Bei den Untersuchungen zur Querdynamik wurden zudem die Weichengeometrie (Radius und Länge der Zwischengrade) variiert.

Ermittelt wurden die fahrtechnisch relevanten Auswertegrößen Radentlastung, Radsatzquerkraft, Entgleisungskoeffizienten aller Radsätze und Räder nach [2] sowie Pufferkräfte und Kräfte zwischen Container und Untergestell.

Alle Varianten wurden zunächst mit dem im Fahrzeugmodell integrierten vereinfachten Feder-Masse- bzw. Pendel-Modell berechnet. Zur Absicherung der Ergebnisse wurden anschließend stichpunktartig Simulationen zu Varianten mit den höchsten erzielten fahrtechnischen

Technische und wirtschaftliche Fachinformationen für Bahn-Professionals

**JETZT
INFORMIEREN!**

**Eurail
press**

EI
DER
EISENBAHN
INGENIEUR

ETR
EISENBAHNTECHNISCHE ZEITSCHRIFT



bahn
manager

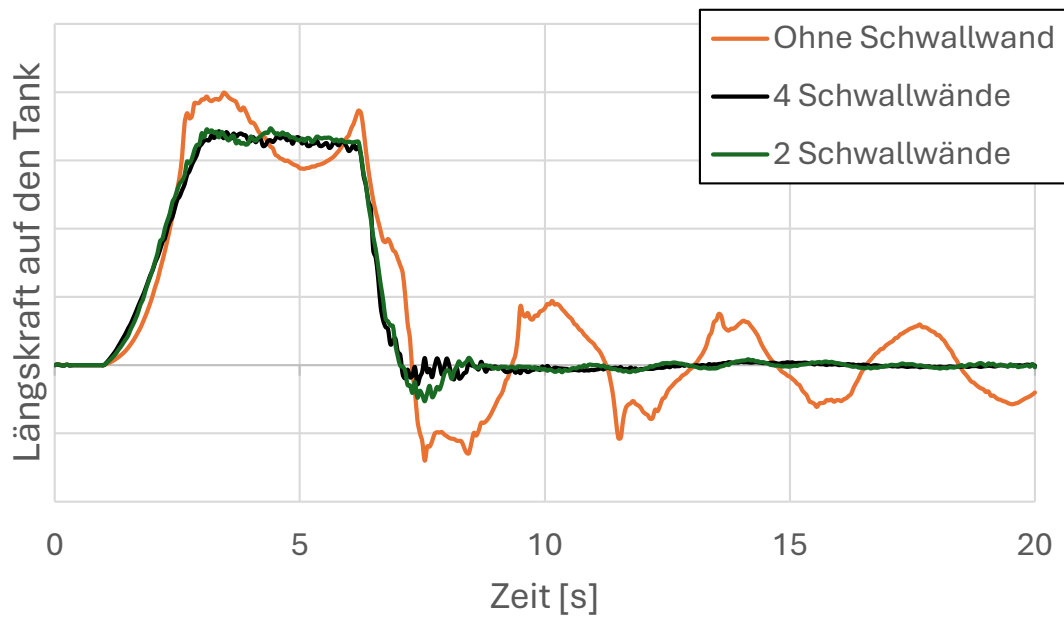
Rail
BUSINESS



**Eurail
press**

Archiv

www.eurailpress.de



6: Berechnung eines Bremsmanövers mit der SPH-Simulation. Eine Reduktion der Fahrdynamik beeinflussenden Längskräfte auf den Tank und damit auf das Fahrzeug lässt sich deutlich erkennen

Größen mit den genaueren Multiphysics-Modellen berechnet.

Für jede Auswertegröße wurde zudem ein quadratischer Regressionsansatz zur vereinfachten Beschreibung der Abhängigkeit von den oben genannten Parametern erstellt. Das Ergebnis ist eine Koeffizientenmatrix, mit der auch ohne Simulationsrechnung abgeschätzt werden kann, ob eine Parameterkonfiguration zu einem fahrtechnisch kritischen Zustand führen kann. Das Verfahren ist für eine Grobabschätzung geeignet, ersetzt die Simulation für detaillierte Untersuchungen aber nicht. Im Ergebnis zeigt sich, dass im untersuchten Parameterraum keine kritischen Fahrzustände zu erwarten sind (vgl. Abbildung 5). Eine Aufhebung der Beschränkung der Füllungsgrade gemäß [RID] [1] bei Tankcontainern wäre damit im Schienenverkehr möglich.

Untersuchungen zum Straßenverkehr

Obwohl im Schienenverkehr Schwallwände in Kesselwagen und Tankcontainern nach diesen Ergebnissen nicht erforderlich sind, sollte im Rahmen des Forschungsprojekts ebenfalls die Wirkung von Schwallwänden genauer untersucht werden, um damit auch einen Erkenntnisgewinn für den Straßenverkehr zu liefern. Neben Grundsatzuntersuchungen (z. B. zwei verschiedene Schwallwand-Geometrien, periodische

Anregung des Tanks) wurden insbesondere durch Regelwerke vorgegebene Szenarien des Straßenverkehrs simuliert (Bremsen, Überholmanöver). Da im Straßenverkehr die Beschleunigungen größer und auch die Richtungswechsel häufiger sind, kommt es zu deutlich ausgeprägterem Schwallverhalten bei mittleren Füllungsgraden als im Schienenverkehr. Die dämpfende Wirkung der Schwallwände reduziert hier die Schwallkräfte deutlich und stabilisiert damit das Fahrverhalten des Lkw (vgl. Abbildung 6). Folglich ist ein Verzicht auf Schwallwände im Straßenverkehr nicht möglich.

Zusammenfassung

In dem vom DZSF geförderten Forschungsprojekt wurde das Schwallverhalten von Flüssigkeiten in Tanks untersucht und dessen Wirkung auf die Rad/Schiene-Kräfte bewertet. Die Validierung der erstellten Simulationsmodelle erfolgte durch umfangreiche 1:1-Versuche. Die Ergebnisse zeigen, dass im Schienenverkehr auf Schwallwände in Tanks aus fahrdynamischer Sicht verzichtet werden kann. Die Untersuchungen zu typischen Fahrscenarien im Straßenverkehr belegen hingegen, dass Schwallwände die Kräfte in Fahrtrichtung signifikant verringern (Bremsvorgang) und daher unverzichtbar sind.

Literatur

- [1] Verordnung: Übereinkommen über den internationalen Eisenbahnverkehr (COTIF) Anhang C – Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter (RID), OTIF, 2025.
- [2] Norm: Bahnanwendungen – Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen – Fahrverhalten und stationäre Versuche: Deutsche Fassung EN 14363:2016+A1:2018+A2022, Berlin, 2022.
- [3] R. Ranganathan, Y. Ying und J. B. Miles, „Analysis of fluid slosh in Partially filled tanks and their impact on the directional response of tank vehicles“, Section 2: Journal of Commercial Vehicles, Bd. 102, pp. 505-511, 1993.
- [4] R.A. Ibrahim, V.N. Pilipchuk, „Recent advances in liquid sloshing dynamics“, Appl. Mech. Rev., Bd. 54, pp. 133-199, 2001.
- [5] C. W. Hirt and B. D. Nichols, „Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries“, Journal of Computational Physics, vol. 39, no. 1, pp. 201-225, 1981.
- [6] <https://dual.sphysics.org/>; Abruf: 26.03.2025, 13:57:26

Summary

Simulation-based study of surge behaviour in tanks

A simulation-based investigation of surge behaviour in tanks was carried out within a DZSF-funded research project. The influence of sloshing on wheel-rail forces was assessed using validated numerical models supported by extensive full-scale tests. The results indicate that slosh baffles are not required for rail transport, whereas for typical road driving scenarios they are essential to significantly reduce longitudinal forces during braking.