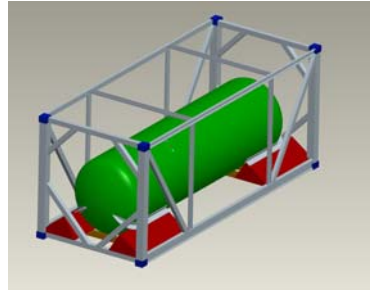


Simulation von Gefahrguttransportbehältern als alternatives Verfahren zum Festigkeitsnachweis für die Zulassung



Nsenga , E.; Schäfer, G.

Vor ihrer Zulassung werden Transportbehälter für die Beförderung gefährlicher Güter bezüglich Vorschriftenkonformität geprüft. Dies erfolgt im Allgemeinen experimentell durch Versuche. Heutzutage besteht mehr und mehr die Tendenz diese durch Simulationswerkzeuge auf Basis von MKS-Programmen und FEM zu ersetzen, um die Abnahmeversuche zu simulieren.

Before tank containers for the transportation of dangerous goods would be certified they must be tested according the defined standards. In the past these tests were done essentially experimentally. Nowadays simulation tools by means of MBS- and FEM-programs are used to simulate these tests.

1 Einleitung

Flüssige Ladegüter einschließlich flüssiger Gefahrgüter wurden zunächst in auf Fahrzeugen verladene Fässern und später auf fest mit dem Fahrzeug verbundenen Tanks transportiert. Mit dem Aufkommen von international genormten Containern, so genannten ISO-Containern, begann auch die Entwicklung von Gefahrguttanks welche fest in Tragrahmen mit containertypischen Abmessungen und Befestigungselementen eingebaut sind.

Die Auslegungs- und Bauvorschriften wurden ursprünglich von den Schiffsklassifizierungsgesellschaften festgelegt. Folglich wurden die dem Schiffstransport typischen Beanspruchungen stärker berücksichtigt als jene die beim Transport auf der Schiene oder Strasse und insbesondere hier beim Unfall auftreten können. Entsprechend dem Transport auf der Schiene, sind heute für die Auslegung von Containern höhere Beanspruchungen in Längsrichtung zu berücksichtigen als in Querrichtung (siehe z.B. ISO 1496-3 oder Absatz 6.8.2.1.1 des ADR [Europäisches Übereinkommen zum Straßen-Gefahrgut-Transport (Abk. franz. Accord...Dangereuse...Route)]). Dynamische

Beanspruchungen sind in den Auslegungs- und Prüfkriterien nur in Längsrichtung definiert (z.B. United Nations – Recommendations on the Transport of Dangerous Goods – Manual of Tests and Criteria Amendment 1).

Beim Landverkehr von Containern ist eine zunehmende Verlagerung von der Bahn auf die Strasse festzustellen. Folglich steigt das Risiko von Unfällen mit seitlichem Aufprall des Gefahrgutcontainers und dementsprechend die Gefahr der Freisetzung von gefährlichen Stoffen.

In diesem Artikel wird die Erstellung von numerischen Modellen eines bereits existierenden Transportbehälters beschrieben, mit denen die für eine Abnahme notwendigen Prüfstandsversuche simuliert werden können. Im Rahmen einer Diplomarbeit am IMW der TU Clausthal wurde im ersten Schritt eine Recherche notwendiger Prüfversuche an Tankcontainern, mit den dazu anzusetzenden Randbedingungen, durchgeführt und dabei sichtbar werdende Lücken zu den realen Belastungssituationen im Straßenverkehr herausgearbeitet. Es wurde darauf aufbauend FEM- und MKS-Container-Modelle erstellt. Mit diesen Modellen sind erste Festigkeitsberechnungen realisiert und kurz vor dem Hintergrund der besonderen straßenverkehrstypischen Anforderungen bewertet worden.

2 Anforderungen an Gefahrguttransportbehälter - Vorschriften - Zulassung

Tanks von Tankfahrzeugen und Tankcontainern zur Gefahrgutbeförderung werden nach technischen Regelwerken, Normen und technischen Richtlinien unter Zugrundelegung der verkehrsrechtlichen Vorschriften/Übereinkommen gefertigt. Die Vorschriften werden grundsätzlich in drei Kategorien klassifiziert:

- Internationale Gefahrguttransportvorschriften: UN - Empfehlungen / Orange Book bezüglich internationaler Übereinkommen (IMO, IATA, RID-Regeln, ADR)
- Regionale Regelwerke zum Gefahrguttransport : Europäisches Übereinkommen über die Gefahrgutbeförderung auf der Straße/auf der Schiene (ADR/RID)
- Nationale Regelwerke zur Beförderung gefährlicher Güter: In der Bundesrepublik Deutschland gibt es das Gefahrgutbeförderungsgesetz (GGBefG). Die Umsetzung dieses Gesetzes führt über weitere nationale Gefahrgutverordnungen: GGVSE (für Strasse und Eisenbahn), GGVBInSch (für Binnenschiffe), GGVSee (für Seeschiffe), NfL (für Luftfracht)

Die Gefahrguttransportvorschriften stellen detaillierte Anforderungen an die Umschließungen für die Gefährlichen Güter. Neben Bau- und Ausrüstungsanforderungen werden hohe Maßstäbe an die Prozeduren des „In Verkehr Bringen“ („Zulassung“) gestellt. Weiterhin werden Anforderungen an den Betrieb und insbesondere das Beförderungs- oder Transportmittel – das Schiff, den Eisenbahnwagen oder das Kraftfahrzeug gestellt. Die mit dem Gefahrguttransport beschäftigten Personen müssen eine aufgabenspezifische Sonderausbildung erfolgreich durchlaufen haben. Schließlich sind die Transportbehälter entsprechend den Verordnungsanforderungen nur so auszulegen, dass sie sicher den normalen betrieblichen Belastungen standhalten und demzufolge nur bestimmten höheren Beanspruchungen noch ohne Freisetzung widerstehen. Konkreterweise müssen neu erstellter bzw. modifizierter Transportbehälter für die Zulassung die Prüftests bestehen. Diese Tests sind im Detail in der Norm ISO 1496-Teil 3, Abschnitte 6.2 bis 6.13 angegeben. Sie sind mit entsprechenden Testnummern aufgelistet: Stapeln (1), Heben an den oberen Eckbeschlägen (2), Heben an den unteren Eckbeschlägen (3), Längsbelastung durch äußere Kräfte (4), Längsbelastung durch innere Kräfte (5.a), dynamischer Auflaufstoßtest (5.b), Querbeltung durch innere Kräfte (6), Verwindung in Querrichtung (7), Verwindung in Längsrichtung (8), Prüfung der Lastaufstandsflächen (9), Laufweg-Prüfung (10), Leiter-Prüfung (11), Druck-Prüfung (12).

3 Numerische Simulationsmodelle der Prüfstandtests

Aufgrund der hohen Kosten von Versuchen (statische Tests und dynamische Stoßtests) besteht der Wunsch ersatzweise numerische Simulationen (MKS und FEM) durchzuführen. Bei der Verwendung von Mehrkörpersystemmodellen (MKS) können die Kinematik und die an den verschiedenen Koppelpunkten wirkenden Kräfte berechnet werden. Beim Einsatz numerischer Tankcontainer-Modelle auf der Basis der Finiten-Elemente-Methode (FEM) lassen sich darüber hinaus Belastungen auf alle Systemkomponenten wie z. B. einzelne Träger des Rahmenwerkes oder auch den Tank berechnen. Dadurch erhält man die Möglichkeit, Einblicke in die Spannungen und Verformungen bei bestimmten verkehrbedingten Belastungssituationen zu gewinnen. Durch den Einsatz numerischer Modelle des Tankcontainers ist es also möglich, das Wissen über die bei den Versuchen oder verkehrsbedingten Lasten auftretenden Beanspruchungen im Tankcontainer zu simulieren.

3.1 Entwicklung numerischer Modelle bereits existierender Transportbehälter

Das Modell des in der Diplomarbeit untersuchten Tankcontainers wurde anhand einer bereits existierenden Bauart entwickelt. Als Beispielfall wurde ein Tankcontainer für den Transport von flüssigem Gefahrstoff ausgewählt. Vorgesehen wurde eine Containergröße des Typs 1C, deren Abmessungen nach der Norm DIN ISO 668 festgelegt sind. Die Eckbeschläge wurden nach der Norm DIN ISO 1161 ausgewählt und der Tank selbst wurde mittels der AD-Merkblätter ausgelegt. Dieser Tankcontainer wurde dann entsprechend den vorher angegebenen Zulassungsprüfungen durch Simulationen numerisch getestet.

3.2 Simulation der statischen Tests (Simulation unter statischen Lasten)

Außer dem Test Nr.5.b - dynamischer Auflaufstoßtest, sind der Rest der zwölf oben aufgelisteten Tests statische Prüfungen d.h. für den Tests werden nur statische Belastungen aufgebracht.

Der in Kapitel 3.1 beschriebene Tankcontainer wurde als erstes dem Stapeltest unterzogen. Das dazugehörige FE-Modell mit Vernetzung und Randbedingungen ist in **Bild 1** und die Verformung in der vertikalen Y-Richtung als Simulationsergebnis im **Bild 2** dargestellt.

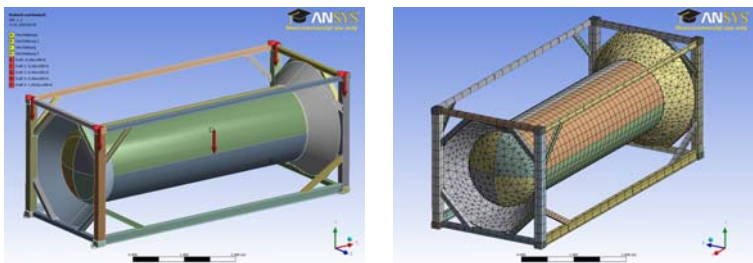


Bild 1: Modell des Tankcontainers (in ANSYS WORKBENCH) mit eingesetzten Randbedingungen (Fesselung in vertikaler Richtungen und Stapellast, Flüssigkeitsgewicht und auch Eigengewicht des Tankcontainer) und das FE-Modell

Jeder Tankcontainer wird so ausgelegt, dass er infolge der aus Transportbewegungen auftretenden Trägheitswirkungen des Tankinhalts standhalten muss. Zum Zweck der Auslegung werden diese Effekte im numerischen Modell durch Ersatzkräfte berücksichtigt. Diese Belastungen können vereinfachend als gleichmäßig verteilt und als auf den geometrischen Mittelpunkt des Tanks wirkend betrachtet werden. Vertikale Lasten sind Gesamtlasten, welche auch die dynamischen Effekte mitberücksichtigen /5/.

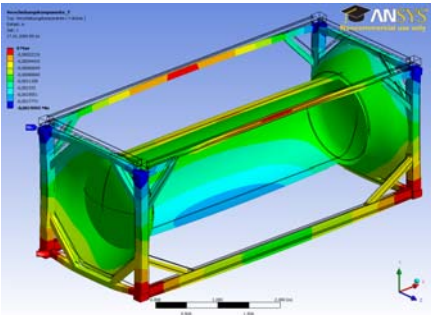


Bild 2 : vertikale Verformung im Tankcontainer, $U_{y,max} = 2 \text{ mm}$
(Stapelprüfung)

3.3 Simulation des (dynamischen) Auflaufstoß-Tests

In einem ersten vereinfachten Ansatz wird der Tankcontainer als Augenblicksbetrachtung mit einer statischen Last beaufschlagt, welche die tatsächliche dynamische Last ersetzt. Nach dieser Methode sollte diese statische Ersatzkraft einem Wert von $5Rg$ entsprechen, wobei R die Gesamtmasse des Tankcontainers und g die Erdbeschleunigung darstellen. Eine andere Methode ist die dynamische Finite Elemente Analyse (FEA). Hierbei führt man eine transiente Analyse durch, wobei die einzugebende Last eine zeitabhängige Funktion ist. Diese Funktion erhält man aus Versuchen oder aus Mehrkörpersimulation des Systems aus Tankcontainer mit seinem Tragwagen unter Auflaufstoßbedingungen.

Der erste einfachste Ansatz entspricht nicht genau der Realität. Da man die größte Lastspitze ohne Berücksichtigung ihrer zeitlichen Ausdehnung verwendet. Zusätzlich wird die Dämpfung des Systems vernachlässigt. Allerdings führt diese Methode ohne lange Rechenzeiten zu einem ersten angenäherten Ergebnis.

3.3.1 Simulation des Auflaufstoß-Tests mittels der FEA unter einfacher statischer Ersatzlast

Das FE-Modell wird mit einer statischen Ersatzlast $F_{\text{stat}} = 5Rg$ in der Längsrichtung des Tankcontainers belastet. Die Last wirkt im Mittelpunkt des Tankcontainers. In diesem FEA-Modell wird angenommen, dass die im Tank geladene Flüssigkeit, auf die diese Ersatzkraft wirkt, den Tank vollständig ausfüllt und inkompressibel ist, so dass die Ersatzlängsbelastung vollständig auf den Tankboden übertragen wird.

3.3.2 Simulation des Auflaufstoß-Tests mittels der FEA unter transientser Analyse des Transportbehälters

Die transiente Analyse ist eine Technik zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens bzw. der dynamischen Antwort einer Struktur, welche sich unter Einwirkung einer allgemeinen zeitabhängigen Last befindet. Mit dieser Art der Analyse kann man die resultierenden ebenfalls zeitlich veränderlichen Verschiebungen, Dehnungen, Spannungen und Kräfte in einer Struktur bestimmen. Dabei können beliebige Kombination von statischen, transienten und harmonischen Lasten aufgegeben werden. Durch die zeitliche Folge der Belastungen werden die Wirkungen der Trägheit und der Dämpfung berücksichtigt. Sind die Effekte von Trägheit und Dämpfung nicht signifikant, liefert bereits die statische Analyse aussagefähige Ergebnisse.

Für den entwickelten Tankcontainer wurde der Auflaufstoß-Test durch eine transiente Analyse simuliert, wobei die Stoßkraft ($F_{\text{dyn}} = 5Rg$) als Impuls kürzerer Zeit (1 ms) im FE-Modell aufgegeben wurde. In **Bild 3** ist das vernetzte Modell mit den eingesetzten Randbedingungen zu sehen. Das Simulationsergebnis wird im **Bild 4** gezeigt, wobei die Verformungen und Beschleunigungen in der Längsrichtung (x-Richtungen) an bestimmten ausgewählten Punkten (Modellknoten) ausgewertet sind.

Hier sieht man, dass die größte Verformungsspitze in der Längsrichtung des Tankbodens ca. 20 mm und denen der Eckbeschläge ca. 2,80 mm betragen. D.h. gegenüber dem Rahmen bewegt sich den Tank infolge der Kollisionskraft um einen Wert in der Größenordnung von 17 mm. Diese Berechnung sollte weiter geführt werden mit einem Einsatz von plastischen Materialeigenschaften, um zu ermitteln, ob eine bleibende Verformung vorhanden oder nicht ist, damit man in dem Beschluss kommen kann, dass der Tankcontainer die dynamische Prüfung bestanden hat und somit Kandidat zum Abnahme-Przedur ist, wenn die anderen Prüfungen schon bestanden würden.

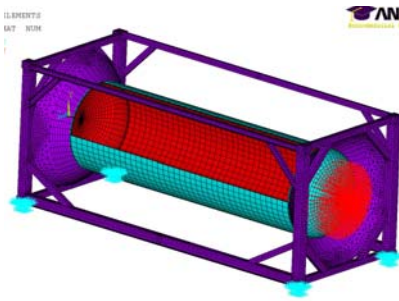


Bild 3: FE-Modell und eingesetzte Randbedingungen für eine transiente Analyse

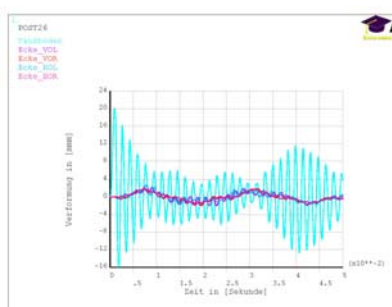


Bild 4: Ergebnis der transienten Analyse, dynamische Verformung des Tankcontainers am Tankboden (größerer Ausschlag) und an der oberen Ecke (kleineren Ausschläge)

3.3.3 Simulation des Aufprallstoß-Tests mittels des MKS-Modells in SIMPACK und transiente FE-Analyse

Zusätzlich zu den durchzuführenden statischen Prüfungen eines Tankcontainers muss dieser auch dynamische Prüfungen bestehen. Nach den Normen ISO 1496-3 1995 zusammen mit 1496-3 Amendment 1 2006-02 (Testing of the external restraint (longitudinal) dynamic) wird für den Tankcontainer eine Aufprallprüfung auf einem Prüfstand gefordert. Nach dieser Stoßprüfung sollte die bleibende Verformung an den Strukturelemente des Tankcontainer 3 mm nicht übersteigen. Nachfolgend wird der Ablauf dieser experimentellen Prüfung kurz erläutert, damit daraus das entsprechende Simulationsmodell abgeleitet werden kann.

Für die experimentelle Durchführung des Auslaufstoß-Tests wird nach ISO 1496-3 eine Aufprallprüfung mit 5g für den Tankcontainer gefordert. Bei dieser experimentellen Durchführung der Prüfung wird ein Aufprall zwischen einer massebeladenen rollbaren Plattform (Schienenwagen, auf dem eine bestimmte Masse liegt) und einem zweiten, den beladenen Tankcontainer tragenden, Schienenwagen erzeugt. Bei diesem System von Plattformen kann das erste oder das zweite System in Stillstand sein und das andere in Bewegung oder beide bewegen sich aufeinander zu. Die relative Geschwindigkeit zwischen den beiden Systemen sollte 4,5 m/s betragen. Während des Stoßes werden Beschleunigungen mit Sensoren aufgenommen, welche an der äußeren Seitenfläche der unteren Eckbeschläge (am Rahmenwerk des Tankcontainers) in der Längsrichtung montiert werden müssen.

Das **Bild 5** zeigt den Versuchsstand des Systems aus Schienenwagen und Tankcontainer für den experimentellen dynamischen Auflaufstoß-Test. Das **Bild 6** stellt schematisch die Prüfstoßeinrichtung mit ihren Haupt-Subsystemen aus zwei Schienenwagen einschließlich des getragenen Tankcontainers dar.



Bild 5: Versuchsstand des Systems aus Schienenwagen und Tankcontainer für den dynamischen Auflaufstoß-Test /5/

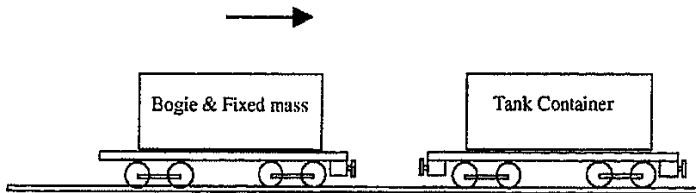


Bild 6: Schematische Darstellung der Aufprallprüfeinrichtung /1/

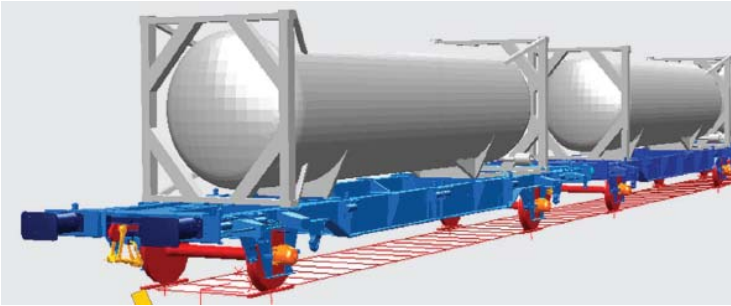


Bild 7: MKS-Modell (SIMPACK) des Systems aus den Untersystemen „flüssigkeitsgefüllte Tankcontainer“ und „Schienenwagen“ /3/.

Für die mathematische Modellierung und Simulation des Auflaufstoß-Tests wurde ein Simulationsmodell mit zwei Freiheitsgraden (2DOF) der vorher angesprochenen Systeme aus Schienenwagen und Tankcontainer erstellt und anhand dessen Simulationen unter Veränderung unterschiedlicher Parameter, wie Tankcontainermasse, -steifigkeit, Auflaufgeschwindigkeit usw., in SIMPACK durchgeführt. Man unterscheidet lineare Modelle mit zwei Freiheitsgraden und nichtlineare Mehr-Freiheitsgrad-Modell. Das lineare viskos gedämpfte Zwei-Freiheitsgrade-Modell ist im **Bild 8** dargestellt. Ein 2DOF-Modell gilt als ausreichend, um die Auswirkungen der Beziehungen zwischen den relativen Massen, relativen Steifigkeiten und relativen Eigenfrequenzen der beiden Teilsysteme auf die Antwort des Tankcontainers zu bestimmen /2/.

Die Bewegungsgleichungen für den Tankcontainer (Masse M2) und den Schienenwagen (Masse M1) sind in den Gleichungen der Zweimassenschwinger aufgeführt.

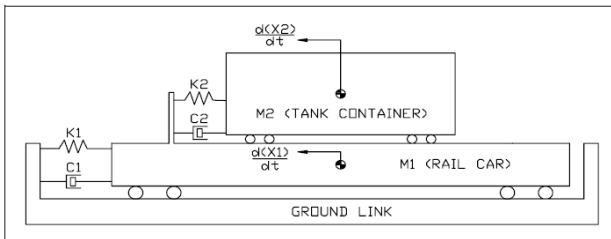


Bild 8: Zwei-Freiheitsgrad-Modell für Eisenbahn-Auflaufprüfung /2/

Für die Simulation der dynamischen Prüfung eines Tankcontainers wurden anhand eines so aufgebauten MKS-Modells Simulationen durchgeführt, um zunächst die auf den Tankcontainer einwirkende Stoßlast zu ermitteln, welche anschließend auf das FEM-Modell des Tankcontainers angebracht wurde.

Es wurde als Beispiel in SIMPACK ein Modell aus zwei Fahrzeugen mit Tankcontainern für den Auslaufstoß-Test erstellt (**Bild 10**).

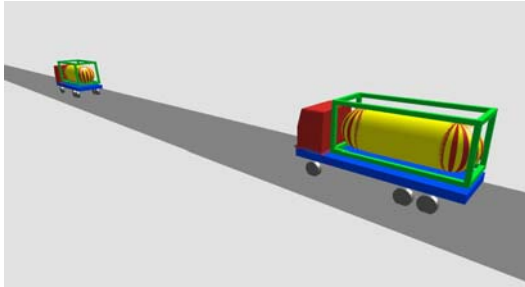


Bild 10: SIMPACK-Modell aus zwei Fahrzeugen mit Tankcontainern zur Simulation eines Auslaufstoß-Tests

Das Modell (**Bild 10**) wurde nach dem oben genannten linearen Modell aus Zweimassenschwingern, deren Bewegungsrichtung sich nur auf die Längsrichtung beschränkt, aufgebaut. Die Teile (Fahrzeug und Tankcontainer für jedes Teilsystem) sind als Starrkörper aufgebaut. Zusätzlich werden diese mittels Feder- und Dämpferelementen verbunden, die einerseits die Struktursteifigkeit und -dämpfung des Tankcontainers ersetzen und andererseits die Ersatzsteifigkeit der Fahrzeuge in Längsrichtung einschließlich der Steifigkeit und Dämpfung der Kontaktstelle zwischen den beiden Fahrzeugen darstellen.

Die Verbindung zwischen den zwei Teilsystemen jeweils aus Fahrzeug und Tankcontainer erfolgt über ein Kontaktelement im SIMPAK, das eine Reaktionskraft erzeugt, wenn die beiden Fahrzeuge in Kontakt kommen, d.h. wenn sie aufeinander auflaufen. Das Ergebnis eines solchen Auslaufstoßes wird im **Bild 11** dargestellt, wobei die Simulationsparameter angegeben sind.

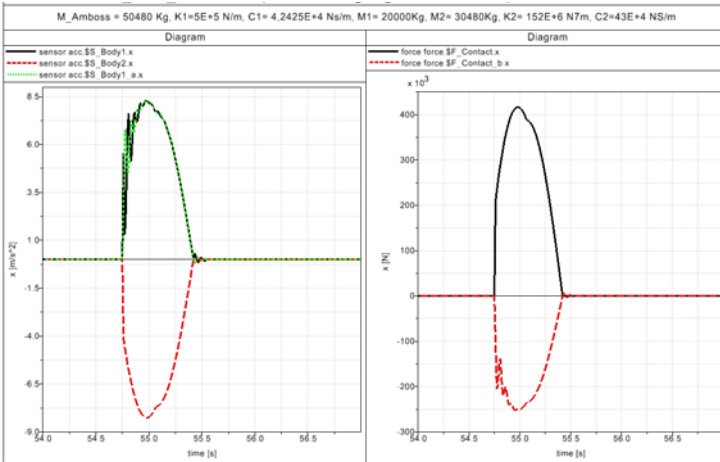


Bild 11: Vergrößerte Bilder der Beschleunigung und Stoßkraft des Ergebnisses der 1. Auflaufstoß-Simulation ($K_2 = 152E+6 \text{ N/m}$).
 $F_{\text{max,Stoß,Wagen}} = 420 \text{ kN}$; $F_{\text{max,Stoß,Tankcontainer}} = 250 \text{ kN}$.

4 Zusammenfassung

Die Vorschriften bestimmen die Anforderungen, die ein Tankcontainer einhalten muss, damit er zugelassen und in Verkehr gebracht werden kann. Der Zulassungsprozess erfolgt aktuell noch hauptsächlich durch Tests auf Versuchsständen; diese Teste sind kosten- und zeitaufwendig. Aus diesem Grund besteht der Wunsch vermehrt Simulationen einzubinden. Es wurden auf Basis von FEM und MKS für bereits ausgeführte Bauarten von Tankcontainern numerische Modelle entwickelt. Mit diesen Modellen wurden die Prüfstandstests für den Festigkeitsnachweis als Teil der Abnahme von Tankcontainer simuliert. Als Ergebnis der Simulationen werden nicht alleine Über- oder Unterschreitungen von zulässigen Grenzwerten erhalten, sondern es werden auch gleichzeitig Optimierungspotentiale sichtbar.

5 Ausblick

Die für den Auflaufstoß-Test verwendete dynamische Ersatzlast wirkt nach den Regelwerken im Tankcontainer nur in dessen Längsrichtung, was nicht immer den realen Belastungsfällen im Straßen- und Schienenverkehr entspricht. Besonders bei möglichen Unfallsituationen können in den Tankcontainern Belastungen in unterschiedlichen

Richtungen auftreten. Für solche Situationen könnten zukünftig die einwirkenden dynamischen Kräfte und Momente unter Verwendung von MKS-Simulation in allen Details ermittelt werden. Auf dem Weg dahin müssen weiterhin experimentelle Versuche realisiert werden, um die Simulationsmodelle zu verfeinern und die Simulationsergebnisse abzusichern.

6 Literatur

- /1/ Tiernan, S.; Fahy, M.: Dynamic FEA modelling of ISO tank containers, *Journals of Materials Processing Technologie* 124, 2002
- /2/ Heller, W.: Sicherheitsanalyse zur Optimierung und Entwicklung von Gefahrguttanks unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens bei Unfällen und der Auswirkung betrieblicher Belastungen. BAM-Bericht, Juni 2001
- /3/ Vera, C.; Paulin, K.; Suarez, M. : Simulation of Freight Trains Equipped with Partially Filled Tank Containers and Related Resonance Phenomenon. *Proc. IMechE Vol. 219*, 2005
- /4/ Sturk, M.: Development of a Tank Container Impact Test Standard (TP13127E), Centre for Surface Transportation Technology (NCR), November 1997
- /5/ Omer, M., Sturk, M.: Tank container Impact Standard Phase II Report, Centre for Surface Transportation Technology (NCR), September 1998.
- /6/ DIN ISO 1496-3: Series 1 freight containers – Specification and testing – Part 3: Tank containers for liquids, gases and pressurized dry bulk. 1995