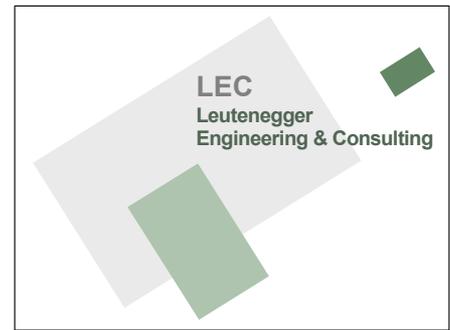




Zürcher  
Hochschule  
Winterthur

Institut für Datenanalyse  
und Prozessdesign



# Dynamik schienengebundener Fahrzeuge

## Ein Projekt des idp und der LEC

### idp/ZHW

Das Institut für Datenanalyse und Prozessdesign der Zürcher Hochschule Winterthur entwickelt Lösungen zur Erfassung und Optimierung komplexer Systeme in den vier Geschäftsbereichen quantitative Unternehmensforschung, Modellierung technischer Systeme, empirische Wirtschafts- und Sozialforschung, Analyse von Umweltdaten.

### LEC

Leutenegger Engineering & Consulting befasst sich mit Stahlbau, Fahrzeugbau und Leichtbau im Allgemeinen und im Speziellen mit Schienenfahrzeugen. In diesen Bereichen bietet sie Engineering und Beratung an.

Schwerpunkte im Bahnbereich sind Auslegung, Konstruktion und Zulassung von Wagenkästen und weiteren Struktur-Komponenten, Auslegung und Nachweise der Crash- und Aufprall-Tauglichkeit sowie Risiko-Analysen und sicherheitstechnische Gutachten.

LEC arbeitet im Verbund mit weiteren Engineering- und Beratungs-Unternehmen, welche gemeinsam ein breites Spektrum an Kompetenzen und Dienstleistungen abdecken. Zu erwähnen sind FE-Analysen und Simulationen, Typenprüfungen, Fahrzeug-Zulassungen, Messtechnik, statische und dynamische Belastungsversuche.

Auftraggeber sind kleinere sowie grössere Unternehmen im In- und Ausland.

### Kontakt:

Prof. Werner Maurer, idp/ZHW, Postfach 805, CH-8401 Winterthur  
Tel.: 0041 52 267 78 03; Fax: 0041 52 268 78 03; mau@zhwin.ch

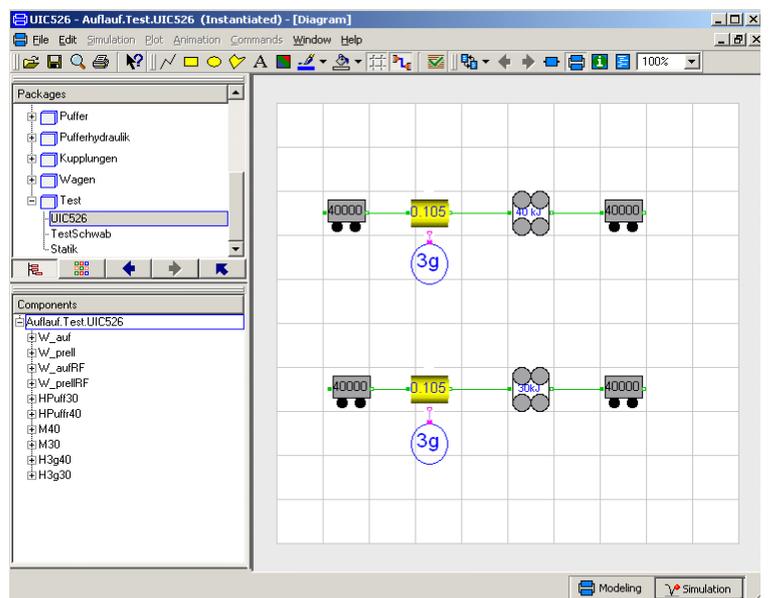
Simon Leutenegger, dipl. Ing. ETH/SIA, Im Weidli 6, CH-8405 Winterthur  
Tel.: 0041 52 238 24 49; Fax: 0041 52 238 24 48; simon.leutenegger@leconsult.ch

## Simulationsmodelle werden immer leistungsfähiger

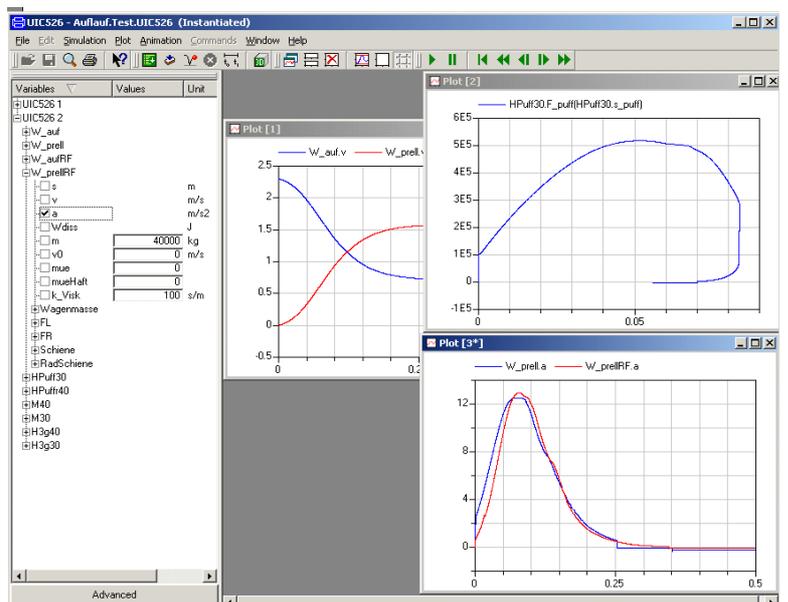
Die zunehmende Vielfalt der Schienenfahrzeuge erschwert die sicherheitstechnische Beurteilung von dynamischen Vorgängen wie Bremsen, Rangieren, Kuppeln, Aufprall gegen Hindernisse und Zusammenstöße. Mit der Zahl von Kombinationsmöglichkeiten wächst der experimentelle Aufwand, um alle Lastfälle zu überprüfen. Handrechnungen liefern meist nur ungefähre Resultate und Computersimulationen können im Einzelfall aufwändig und entsprechend teuer werden.

Im Rahmen eines KTI-Projektes ((KTI-Nr. 6225.1) ist eine Modelica-Bibliothek aufgebaut und validiert worden, mit der sich Rangierstöße von Güterwagen, Kupplungsvorgänge von Personenzügen und Kollisionen rechnerisch nachbilden lassen. Modelica ist eine objektorientierte Modellierungs- und Simulationssprache, mit der hydraulische, pneumatische, mechanische, elektrische oder thermische Vorgänge berechnet werden können. Die einzelnen Modelle sind wie bei den realen Systemen nach dem Baukastenprinzip organisiert. Einmal erstellte Objekte werden in Bibliotheken abgelegt und können bei Bedarf direkt am Bildschirm zusammengefügt werden. Diese Methode spart Zeit und ist fehlertolerant. Dank wohldefinierter Schnittstellen können Systeme ergänzt, Teile ausgewechselt oder mehrere Varianten definiert werden.

Das Bild zeigt den Modelleditor von Modelica/Dymola. Die Modelle werden mit der Maus den Bibliotheken (links oben) entnommen, in der Diagrammebene eingefügt und graphisch verbunden. Den einzelnen Modellen können Bilder, Gleichungen und Information zugeordnet werden.



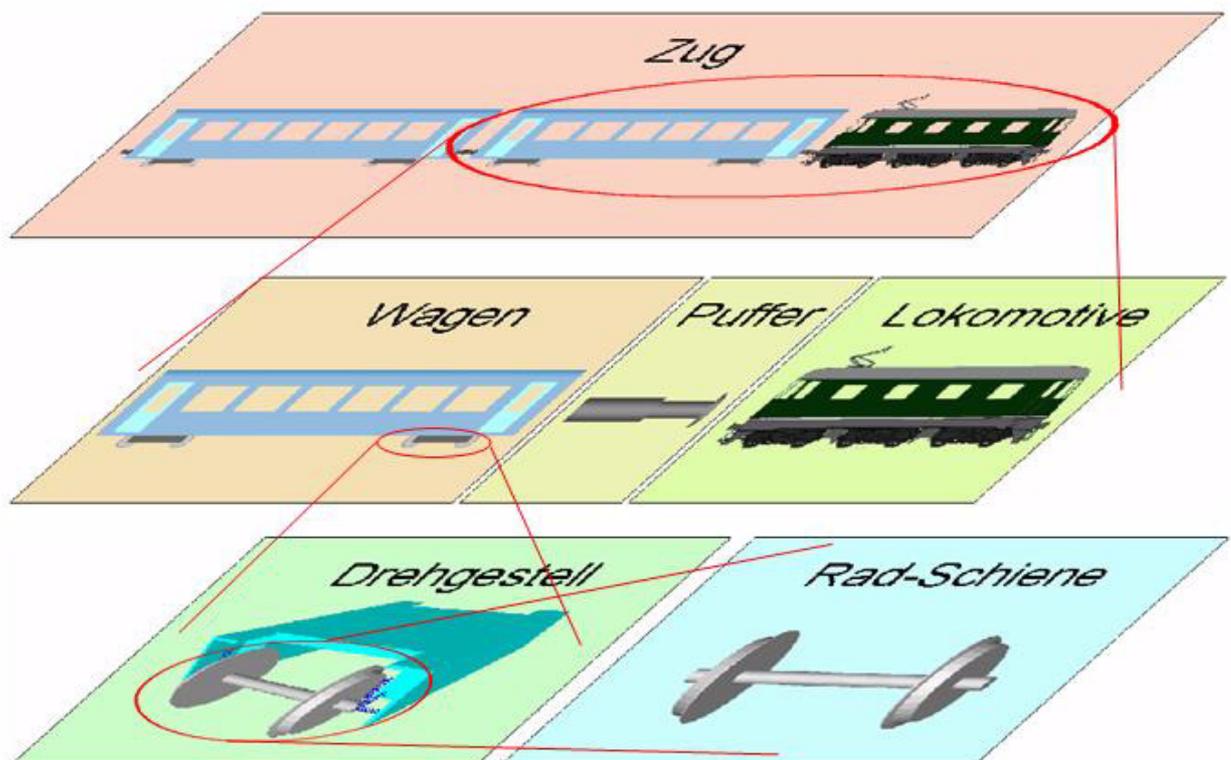
Das Bild zeigt den Simulationseditor von Modelica/Dymola. Anfangswerte, Parameter, Simulationszeit und Berechnungsmethode sowie Genauigkeit können für jeden Simulationslauf neu definiert werden. Die gerechneten Größen von mehreren Simulationsläufen werden gespeichert und lassen sich in Diagrammen darstellen.



## Modellsharing dank definierten Schnittstellen

Ziel dieses Projekts ist der Aufbau einer Modelica-Bibliothek zur Dynamik schienengebundener Fahrzeuge für eine Gruppe von Anwendern (Bahnbetreiber, Aufsichtsbehörden, Sicherheitsexperten, Gutachter). Die Ergebnisse aus dem KTI-Projekt „Auflaufsimulation von Personen- und Güterzügen“ dienen als Basis. Puffer (Reibfeder, Elastomerfeder und Hydraulik), Zughaken sowie automatische Kupplungen sind schon hinreichend genau modelliert und mittels Versuchen validiert worden. Neue Fragestellungen wie sicherheitstechnische Gutachten von Personen- und Güterzügen, Risikoanalysen im Zusammenhang mit Aufprallvorgängen, dynamisches Fahrverhalten von Personenzügen bei vorgegebenem Lastwechsel oder Kraftaufbau beim Bremsen von langen Güterzügen sollen effizient und sicher berechnet werden können.

Simulationsmodelle erstellen und validieren ist aufwändig und entsprechend teuer. Soll ein Modell umgebaut oder ein Teimodell ersetzt werden, muss vieles noch von Hand gemacht werden, was wiederum mit einem gewissen Aufwand verbunden ist. Zudem können sich beim Umbau neue Fehler einschleichen. Modelica bietet in dieser Hinsicht ein grossen Vorteil. Einmal erstellte Modelle werden in Bibliotheken abgelegt und müssen beim späterem Gebrauch nur noch aufgerufen werden. Weil Modellstruktur, Parameter und Anfangswerte gemeinsam vererbt werden, ist die Wiederverwendung bestehender Modelle mit der Maus (drag and drop) möglich. Modelle verschiedener Anwender können, falls die Anwendergruppe den gleichen Satz von Schnittstellen verwendet, problemlos zusammengebaut werden. Der Systementwickler muss sich somit nicht mehr um die Struktur der Komponentenmodelle kümmern. Wer Komponentenmodelle baut, muss nicht unbedingt wissen, wie diese später eingesetzt werden. Dank dem objektorientierten Ansatz lassen sich komplexe Modelle aufbauen, ohne dass man Gefahr läuft, sich in einem Dschungel von Gleichungen zu verlieren:



## Schwerpunkte

Aufgrund der bisherigen Arbeit, den Wünschen von Projektpartnern sowie den technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen können folgende Schwerpunkte gesetzt werden: Simulation von Aufbau und Kupplungsvorgängen, Spezifikation von Komponenten, Längsdynamik von Zugverbänden.

## Spezifikation der Komponenten:

Optimierung und Spezifikation von energie-absorbierenden Komponenten wie

- Kupplungen
- Puffer
- Knautschzonen

## Aufprall- und Kupplungsvorgänge:

Risiko-Analyse im Zusammenhang mit Aufprallvorgängen

Sicherheit von gefährlichen oder empfindlichen Gütern

Entgleisungs-Sicherheit

Unterstützung beim Erstellen von Pflichtenheften

Erarbeitung von Anforderungen für Aufprall- und Crashzenarien

Nachweis der Kollisionstauglichkeit

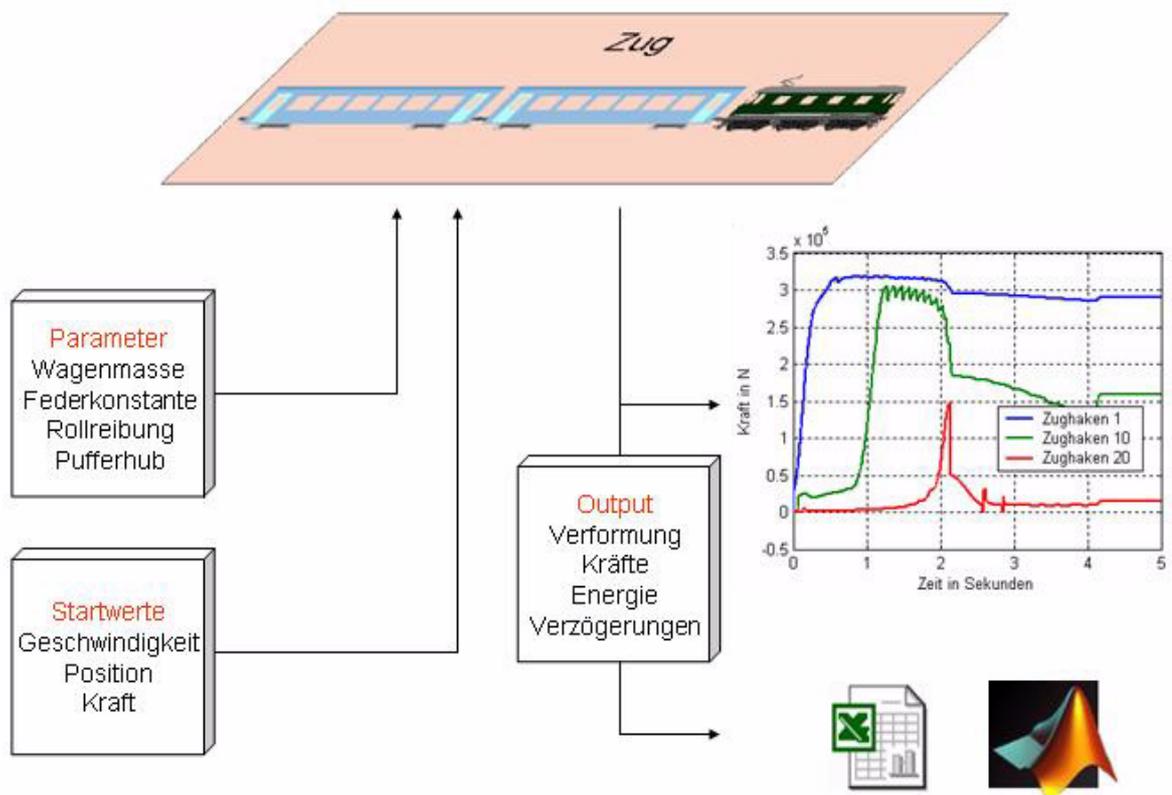
## Längsdynamik in Zugverbänden:

Kraftaufbau bei Anfahr- und Bremsvorgängen eines beliebigen Zugverbandes

Zugtrennungen

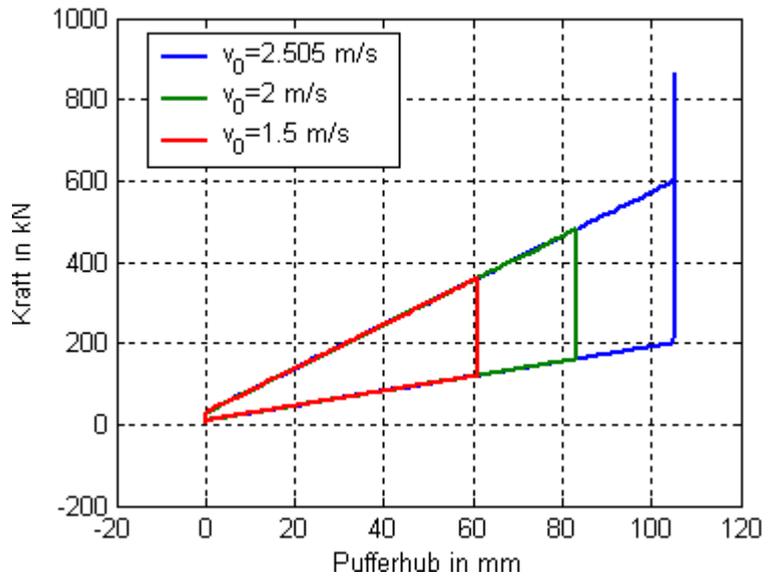
## Simulation

Mögliche Anwender der Modelica-Bibliothek lassen sich in drei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe entwickelt Modelle und testet sie aus, die zweite Gruppe führt Simulationen aller Art durch und die dritte Gruppe arbeitet mit Modellen, die genau auf ihre spezifischen Bedürfnisse zugeschnitten sind. Mitglieder der ersten Gruppe sollten in Modellbildung und Simulation ausgebildet sein, Mitglieder der zweiten Gruppe müssen mit den Grundfunktionen des Simulationstools und der Struktur der Bibliothek vertraut sein, die Mitglieder der dritten Gruppe arbeiten als reine Anwender und kümmern sich hauptsächlich um ihre spezifischen Probleme.

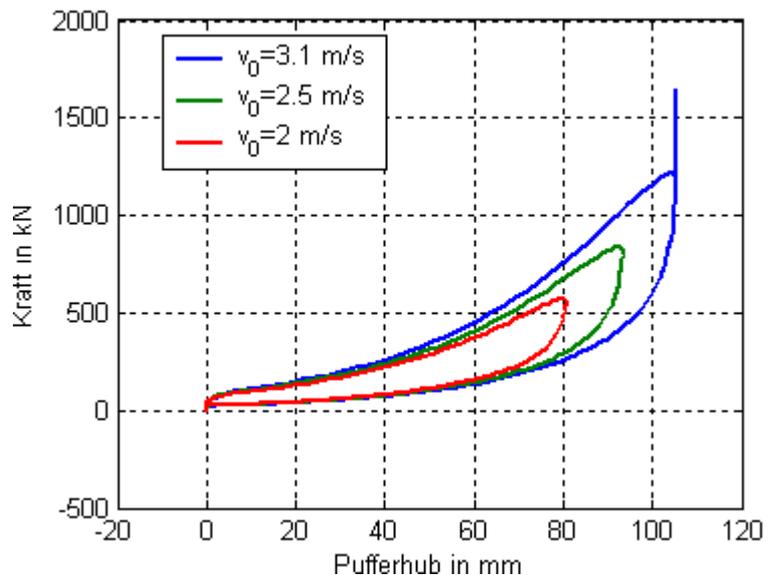


## Beispiel 1: verschiedene Pufferfedern

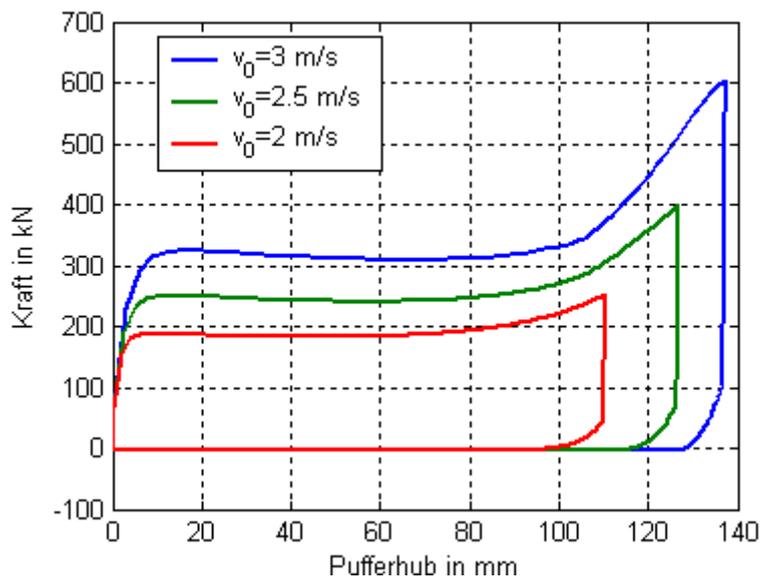
Ein Güterwagen (Masse 90 t) prallt mit unterschiedlicher Anfangsgeschwindigkeit gegen einen zweiten Wagen (Masse 80 t). Alle vier Puffer sind mit **Reibfedern** bestückt. Das Bild zeigt das Kraft-Hub-Diagramm eines Puffers für drei verschiedene Geschwindigkeiten. Die Wagen sind als starre Körper modelliert.



Beide Güterwagen sind mit **Elastomerfedern** ausgerüstet. Das fünfparametrische Federmodell bildet die nichtlineare Kennlinie und die innere Reibung der Elastomerfeder ab. Die innere Reibung setzt sich aus einem viskoelastischen Anteil und einem Coulomb-Anteil zusammen.

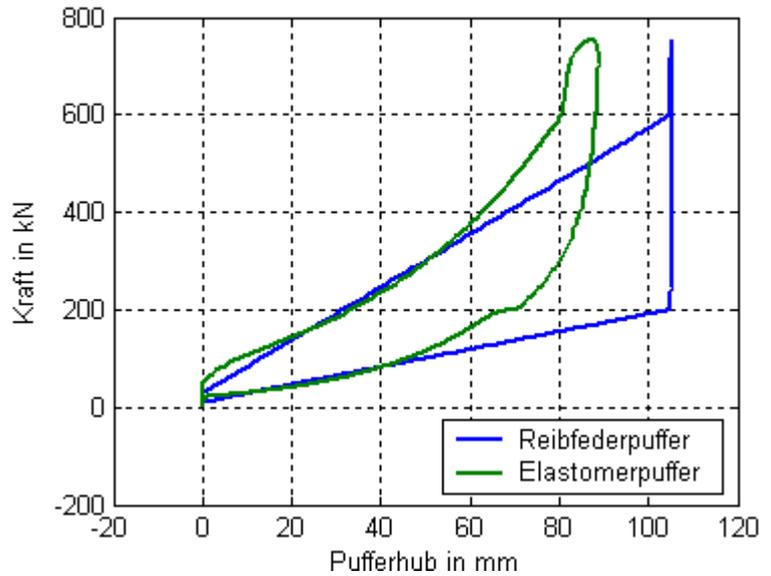


Auflaufender Wagen (Masse 90 t) und stehender Wagen (Masse 80 t) sind mit **Hydraulikpuffern** ausgerüstet. Eine Gasfeder erzeugt zusammen mit einem Multiplikatorventil die statische Kennlinie. Bei dynamischer Belastung erhöht eine hubabhängige Blende die Kraft. Die Kennlinie nimmt eine annähernd rechteckige Gestalt an.

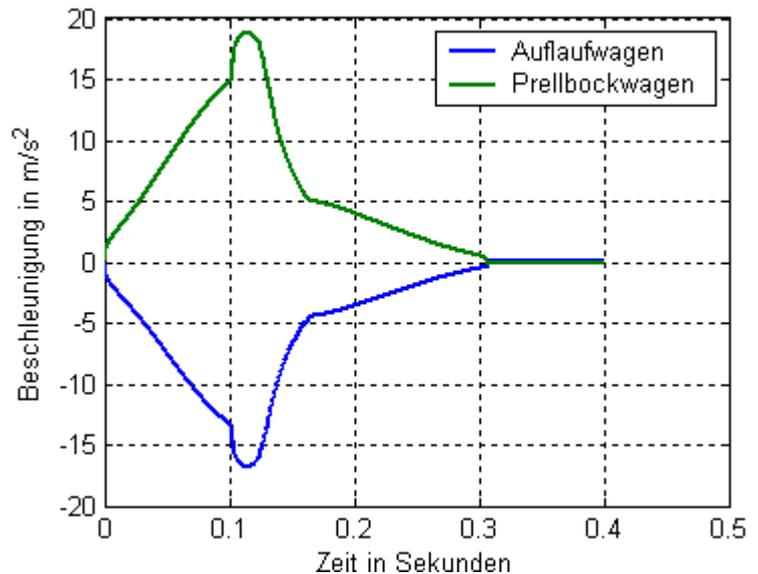


## Beispiel 2: Reibfeder gegen Elastomerpuffer

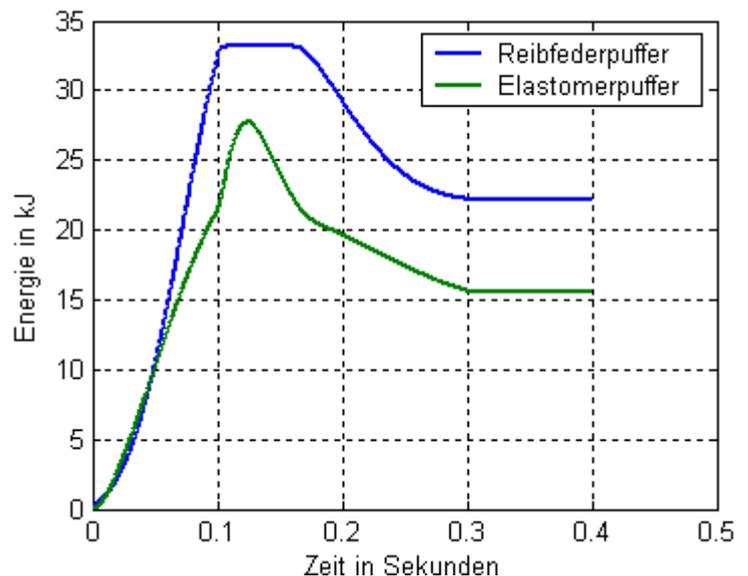
Ein Güterwagen (Masse 90 t) fährt mit einer Geschwindigkeit von 8.5 km/h gegen einen ruhenden Wagen (Masse 80 t). Der auflaufende Wagen ist mit **Elastomerpuffern** und der stehende mit **Reibfederpuffern** bestückt. Die Grafik zeigt das Kraft-Hub-Diagramm für beide Puffertypen. Die Reibfederpuffer gehen bei einer Kraft von 600 kN auf Block. Die noch verbleibende Geschwindigkeitsdifferenz muss von den Elastomerpuffern abgebaut werden.



Die Grafik zeigt das Beschleunigungs-Zeitverhalten der beiden Güterwagen. Zum Zeitpunkt 0.1 s gehen die Reibfederpuffer auf Block. Die Elastomerpuffer dämpfen den nachfolgenden Schlag ab. Weil die Güterwagen als starre Körper modelliert sind, ist die Beschleunigung nur durch die Pufferkräfte festgelegt.

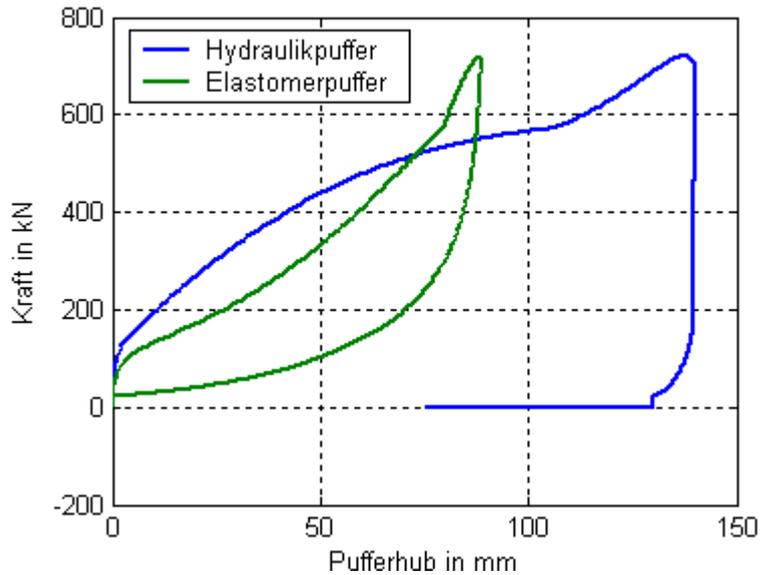


Die im Auflaufstoß freigesetzte Energie wird von den Puffern aufgenommen. Das nebenstehende Diagramm zeigt diese Energie in Funktion der Zeit. Elastomer- und Reibfederpuffer geben nur etwa 30% der aufgenommenen Energie zurück.

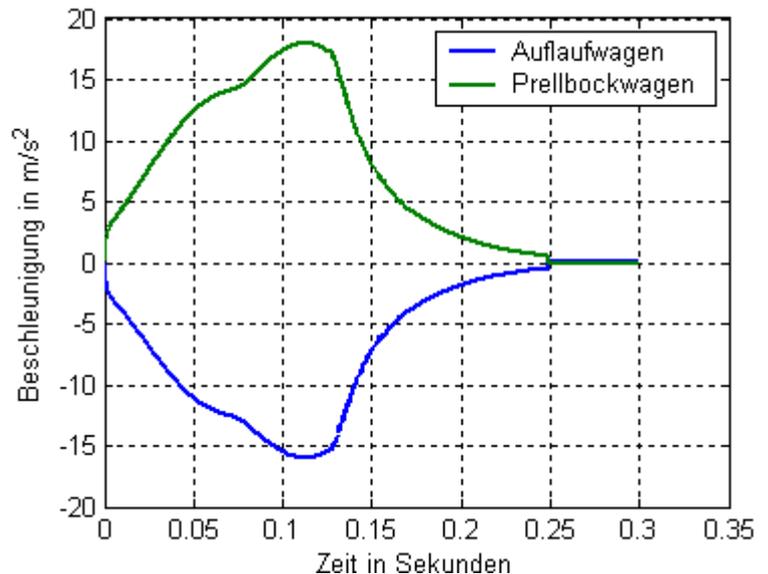


### Beispiel 3: Elastomerfeder gegen Hydraulik

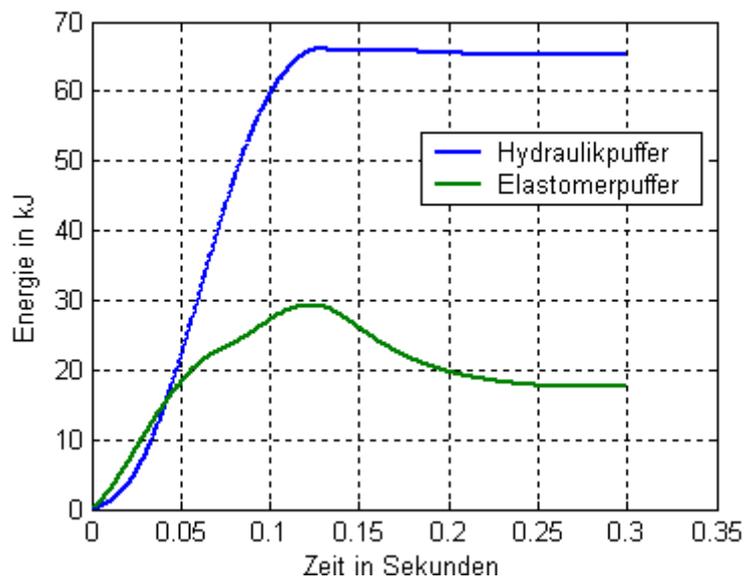
Ein Güterwagen (Masse 90 t) fährt mit einer Geschwindigkeit von 8.5 km/h gegen einen ruhenden Wagen (Masse 80 t). Der auflaufende Wagen ist mit Elastomerpuffern und der stehende mit Hydraulikpuffern ausgerüstet. Im Hydraulikpuffer geschieht der Kraftaufbau anfänglich dynamisch. Bei einem Hub von etwas mehr als 100 mm macht sich der Druckaufbau der Gasfeder bemerkbar.



Die Grafik zeigt das Beschleunigungs-Zeit verhalten der beiden Güterwagen. Die stark abfallende Beschleunigung im Rückhub wird durch den Elastomerpuffer verursacht.

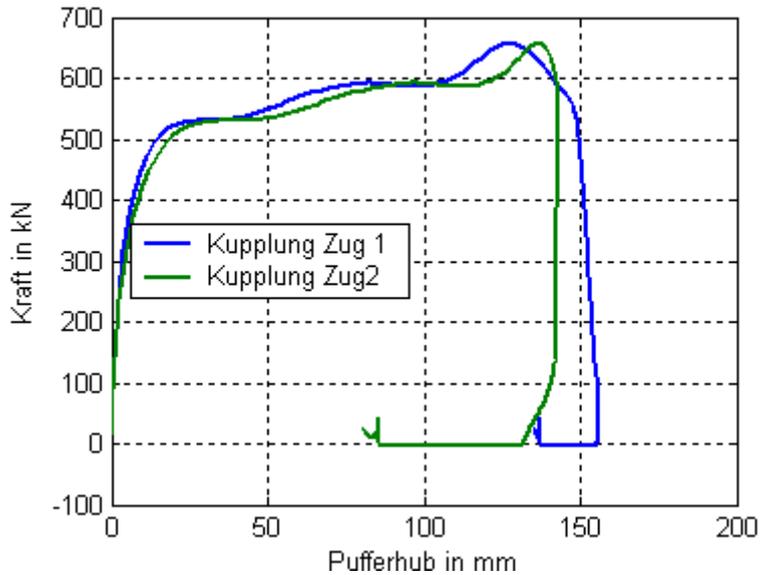


Die Grafik zeigt die Energieabsorption in Funktion der Zeit. Der Hydraulikpuffer nimmt insgesamt mehr Energie auf und gibt im Rückhub weniger Energie zurück als der Elastomerpuffer. Im Hydraulikpuffer wird ein Grossteil der aufzunehmenden Energie schon beim Einfahren dissipiert. Der Rest, die von der Gasfeder aufgenommene Energie, wird beim Rückhub vom zurückströmenden Öl dissipiert

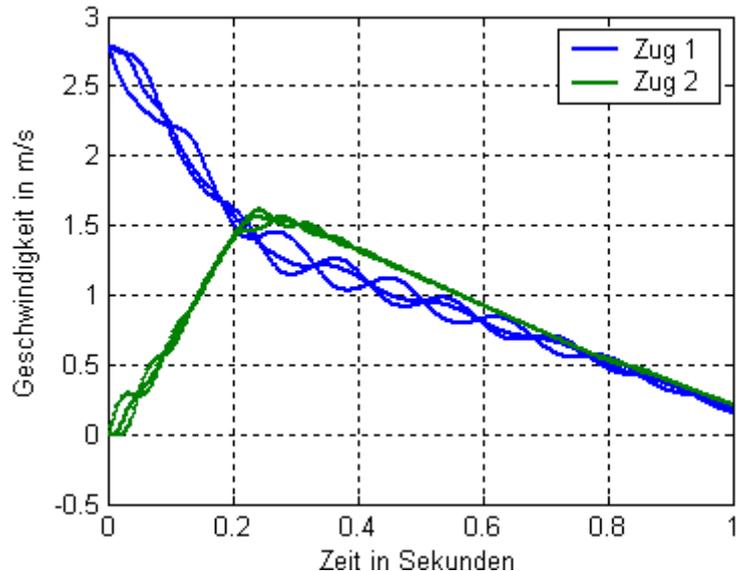


### Beispiel 4: Kupplungsvorgang von Nahverkehrszügen

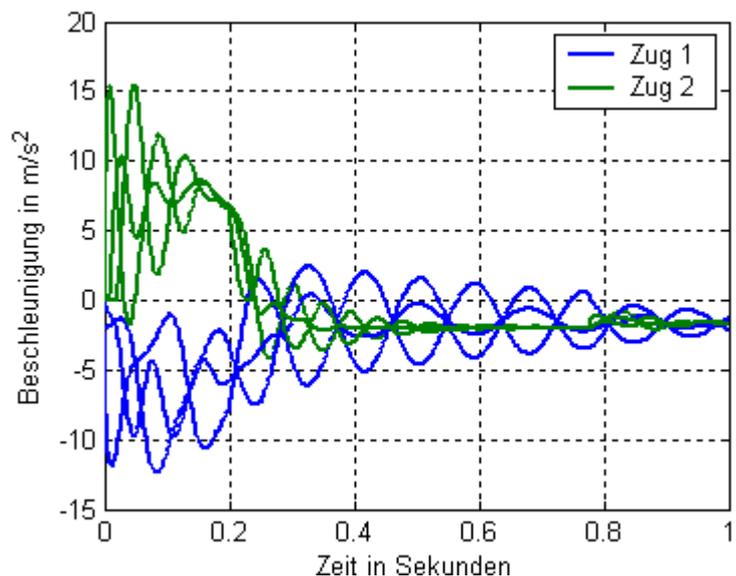
Ein Nahverkehrszug (Masse 125 t) kuppelt mit 7 km/h an einen stehenden Gelenktriebwagen (Masse 59 t) an. Die stehende Komposition ist gebremst. Die Skizze zeigt das Kraft-Hub-Diagramm der beiden hydraulischen Stossdämpfer. Der Hub der Kupplung am Gelenktriebwagen wird fast vollständig ausgeschöpft. Die andere Kupplung könnte maximal 200 mm Hub machen.



Das nebenstehende Diagramm zeigt das Geschwindigkeits-Zeit-Verhalten der vier Wagen des Nahverkehrszug (blau) und des Gelenktriebwagens (grün). Die Wagenelastizität ist in den Modellen berücksichtigt worden, nicht aber die Anbindung der Drehgestelle.

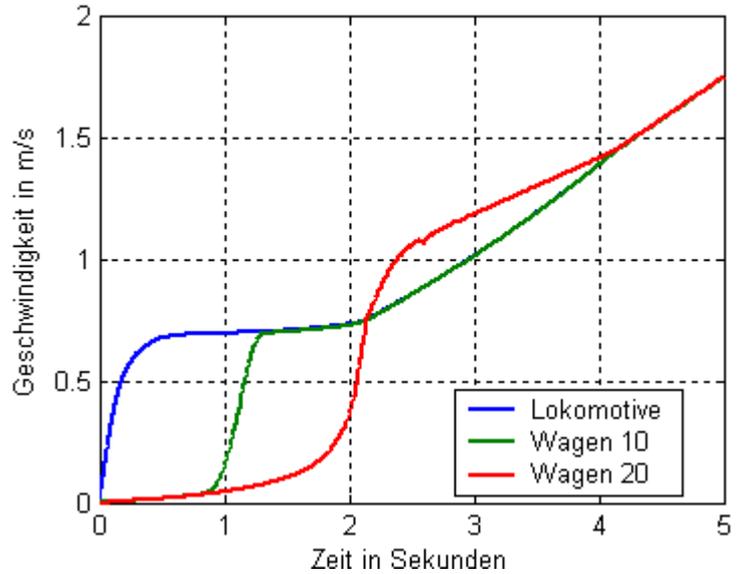


Das Diagramm zeigt das Beschleunigungs-Zeit-Diagramm der einzelnen Wagen. Ein detailliertes Modell würde mehr Informationen liefern.

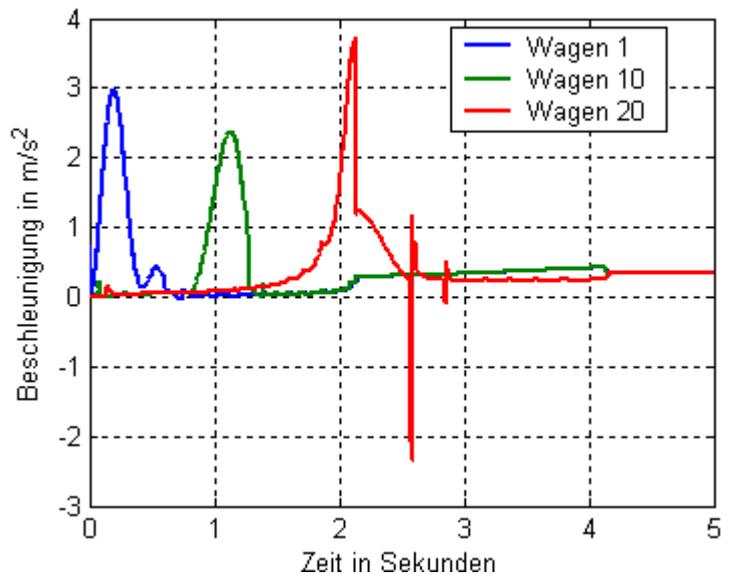


## Beispiel 5: Langer Güterzug

Eine Lokomotive (Masse 80 t) zieht mit gleichbleibender Antriebskraft 20 Wagen (Masse je 20 t) weg. Die Zughaken sind mit Elastomerfedern ausgerüstet. Die Skizze zeigt, wie die Lokomotive, der 10. und der 20. Wagen ihre Geschwindigkeit ändern.



Die Graphik zeigt das Beschleunigungs-Zeit-Verhalten der Lokomotive, des 10. und des 20. Wagens.



Die Skizze zeigt den Kraftverlauf in den einzelnen Zughaken. Nach zwei Sekunden hat die „Kraftwelle“ den hintersten Wagen erreicht. Dank der starken inneren Reibung der Elastomerfedern wird die „Kraftwelle“ nur schwach reflektiert. Nach gut 4 Sekunden stellt sich ein stationärer Zustand ein.

