

Simulationsgestützte Entwicklung von Puffern und Dämpfern für Eisenbahnzüge

Werner Maurer
mau@zhwin.ch

Institut für Datenanalyse und Prozessdesign/Zürcher Hochschule Winterthur
Postfach 805, CH-8401, Winterthur

Kurzfassung

Im Laufe der letzten zehn Jahre sind in Zusammenarbeit zwischen Schwab Verkehrstechnik AG in Schaffhausen und der Züricher Hochschule Winterthur hydraulische Stoss- und Zugvorrichtungen für Güter- und Personenzüge entwickelt worden. Dank den Simulationsmodellen konnte die Zahl der Prototypen sehr klein gehalten werden. In den ersten Jahren ist das systemdynamische Werkzeug STELLA, danach Matlab/Simulink und zuletzt Modelica eingesetzt worden. Trotz Umfang und Erfolg dieses Unternehmens handelt es sich eigentlich um ein „Abfallprodukt“ didaktischer Bemühungen, der Entwicklung der Physik der dynamischen Systeme.

1 Einleitung

Seit 1990 setzen wir, Kollege Hans Fuchs und ich, die systemdynamische Modellbildung ein, um das Grundverständnis für Prozesse im Bereich der Physik zu fördern [1]. Die aus einer Synthese von Karlsruher Physikkurs [2] und der Systemdynamik [3] entstandene Physik der dynamischen Systeme [4] wird heute an verschiedenen Mittel- und Hochschulen gelehrt [5].

Mitte der neunziger Jahre hat ein Absolvent des TWI (Technikum Winterthur, heute Departement T der ZHW) angefragt, ob man nicht auch die Längsdynamik von Personenzügen mit dem systemdynamischen Werkzeug STELLA [6] modellieren und simulieren könne. Die Resultate waren so überzeugend, dass wir uns entschlossen, ein Projekt zur Entwicklung eines hydraulischen Puffers bei der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) einzureichen. Im Rahmen dieses Projekts ist eine ganze Pufferfamilie entstanden, deren Mitglieder entsprechend ihrer dämpfenden Wirkung als 1g-, 2g-, 3g-Puffer bezeichnet werden [7].

Die von den Bondgraphen [8] inspirierte Modellbildungs- und Simulationssprache Modelica [9] weist ähnliche Strukturen auf wie die Physik der dynamischen Systeme. Bei der Modellierung mit Bondgraphen benutzt man Energieflüsse (Bonds), um die Kopplung zwischen den einzelnen Prozessen (hydraulisch, mechanisch, thermisch oder elektrisch) korrekt abzubilden. Modelica ist in gewissen Punkten konsistenter als die Bondgraphen-Theorie. So ist zum Beispiel die Kraft in Modelica als Impulsstrom und nicht als Potenzial implementiert. Um die Möglichkeiten und Grenzen von Modelica auszuloten, haben wir bei der KTI ein zweites Projekt eingereicht. Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung einer Modelica-Bibliothek zur Simulation der Längsdynamik von Zügen.

Ob die nachfolgend dargelegte Entwicklung von Puffern und Dämpfern als Beispiel einer erfolgreichen Zusammenarbeit zwischen einer kleinen Firma (Schwab Verkehrs-

technik AG, Schaffhausen) und einem Hochschulinstitut [10] oder als Gesellenstück der Physik der dynamischen Systeme gesehen werden kann, möge der Leser selber entscheiden.

2 Kupplungsdynamik des ICN

Der InterCity-Neigezug der SBB (ICN oder RABDe 500), ein siebenteiliger Triebzug mit rein elektrischer Neigetechnik, ist beidseits mit automatischen Kupplungen ausgerüstet. Die einzelnen Wagen einer Komposition sind über Kurzkupplungen miteinander verbunden. Der ICN kann wahlweise einzeln oder als Doppelkomposition (Länge 380 m) eingesetzt werden.

Die Anbieter der Zug- und Stossvorrichtungen für den ICN mussten den Nachweis erbringen, dass beim automatischen Kupplungsvorgang die Energie bis zu einer bestimmten Auflaufgeschwindigkeit reversibel aufgenommen wird. Energieabsorbierende Zusatzelemente (Zerstörungsglieder) haben dafür zu sorgen, dass bis zu einer zweiten Grenzwertgeschwindigkeit keine Schäden an der Wagenstruktur entstehen.

Die Anforderungen (Energieaufnahme, Hub, maximale Kraft) waren gemäss Pflichtenheft so gestellt, dass die Aufgabe nicht mehr mittels Pufferfedern gelöst werden konnte. Das Konzept sah nun vor, dass die Kurzkupplungen mit Federn und die automatischen Frontkupplungen mit gashydraulischen Dämpfern auszurüsten sind.

Im Gegensatz zu einem mit Reibfederpuffern bestückten Zug, bei dem die Dynamik von Hand berechnet werden kann, muss der Kupplungsvorgang zwischen zwei ICN-Kompositionen numerisch nachgebildet werden. Systemdynamisch gesehen besteht der ICN aus kapazitiven, resistiven und induktiven Gliedern bezüglich der bilanzierfähigen Grösse Impuls.

Die Modellierung mittels eines unspezifischen, einfach strukturierten Werkzeuges wie STELLA hat den Vorteil, dass physikalische Gesetze (Bilanz, Systemeigenschaften, Energieanalyse) unmittelbar abgebildet werden können. Dank graphischer Eingabe ist diese Methode intuitiv und ziemlich fehlertolerant. Die Modellierung der Trockenreibung bei den Rädern und in den Pufferfedern bereitete dagegen einige Mühe. Zudem mussten die vielen Zustandsübergänge (Puffer geht auf Block oder Zerstörungsglied spricht an) recht umständlich programmiert werden.

3 Der 1g-Puffer

Nach den positiven Erfahrungen mit der Modellierung des ICN wurde 1999 bei der KTI ein Projekt zur Entwicklung eines Puffers mit gashydraulischer Dämpfung eingereicht (Nr. 4181.1: Entwicklung eines Hydraulikpuffers für Schienenfahrzeuge). Hydraulische Dämpfer werden bei schweren Güterwagen eingesetzt, weil diese Systeme mehr Energie aufnehmen können als Federpuffer.

Etwas gleichzeitig hat DB-Cargo einen Wettbewerb zur Entwicklung eines Spezialpuffers ausgeschrieben. Der Puffer sollte so gebaut sein, dass die Beschleunigung der Wagen bei verschiedenen Massenverhältnissen und unterschiedlichen Pufferkombinationen unter dem Wert des freien Falls ($g = 10 \text{ m/s}^2$) bleibt. Eine erste Analyse der Lastfälle zeigte, dass die Anforderungen physikalisch nicht zu erfüllen sind. Die maximal zulässige Kraft unterschreitet bei grossem Hub die statische Kennlinie. Erst die Idee, das Ventil, das den

Gasdruck ölseitig vervierfacht, mittels einer passiven Steuerung auszuschalten, ermöglichte eine konstruktive Umsetzung des Pflichtenhefts von DB-Cargo.

Zur rechnerischen Nachbildung des Pufferverhaltens haben wir vorerst Matlab/Simulink benutzt. Das Simulationsmodell des Puffers mit Gasfeder, Ölströmung, Multiplikator- und Rückhalteventil wurde so komplex, dass Wartung und Umbau des Modells nicht immer problemlos waren. In einer späteren Phase ist das 1g-Modell vereinfacht und von Simulink auf STELLA übertragen worden.

Obwohl die Teilmodelle nie einzeln validiert und viele Parameter (Energieaufnahme der Wagen, Reibung der Pufferhülse, Querkontraktion des Ölstrahls, Polytropenexponent des Stickstoffs) nur grob geschätzt werden konnten, erfüllte schon die zweite Serie von Puffern alle Vorgaben von DB-Cargo [11].

4 Blähung der Pufferhülse

Die mit der Entwicklung des 1g-Puffers gemachten Erfahrungen ermöglichten eine schnelle Realisierung des 2g-Puffers (Typ L nach UIC 526-3 mit 150 mm Hub). Der berechnete Blendenverlauf erwies sich in allen Tests als optimal. Auflaufversuche mit Schiebewandwagen haben später gezeigt, dass Abweichungen zwischen den gemessenen und den gerechneten Daten auf das dynamische Verhalten der Wagen zurückzuführen sind.

Beim 3g-Puffer (Typ C nach UIC 526-1 mit 105 mm Hub) tauchten neue Schwierigkeiten auf. Die Maximalkraft lag deutlich unter dem vom Simulationsmodell vorhergesagten Wert. Eine Parameterstudie zeigte, dass die Fertigungstoleranzen eine grosse Streuung im dynamischen Verhalten nach sich ziehen. Bisher hat sich die Frage nach dem Einfluss der Fertigungstoleranzen nie gestellt, weil die weicheren Puffer (1g und 2g) grössere Blendenquerschnitte aufweisen. Die Fragestellung „Wirkung der Toleranzen auf das Systemverhalten“ zeigt, wie wertvoll ein validiertes Simulationsmodell für die Produktentwicklung ist.

Weil die systematische Abweichung der experimentellen Daten von den gerechneten Werten nicht durch die fertigungsbedingte Streuung erklärt werden konnte, kamen wir zur Überzeugung, dass die durch die Blähung der Pufferhülse bedingte Aufweitung der Blende für das Phänomen verantwortlich ist. Man hätte nun die Pufferdehnung mit einer FE-Rechnung für verschiedene Hübe und Drücke rechnen, geeignet parametrisieren und ins Simulationsmodell einbauen können. Die pragmatischere Methode, den Einfluss der Blähung durch Vergleich von Mess- und Berechnungsdaten zu schätzen, erwies sich als genau genug. Die Messungen zur Schätzung der Hülsenblähung sind auf der Versuchsanlage der Firma Schwab Verkehrstechnik AG in Schaffhausen gemacht worden. Auf dieser Anlage prallen zwei Güterwagen (Massen bis 45 t) mit bis zu 12 km/h Relativgeschwindigkeit aufeinander. Um die Wirkung von schweren Güterwagen (bis 90 t) zu testen, sind die Wagen mit nur je einem Puffer bestückt. Später hat man die gleichen Puffer auf der Versuchsanlage von Görlitz mit einem Hammer getestet. Obwohl der Hammerversuch eine andere Dynamik erzeugt als die Versuchsanlage von Schwab, erwies sich die im Simulationsmodell eingebaute „Blähungskorrektur“ als hinreichend genau (Bild 1).

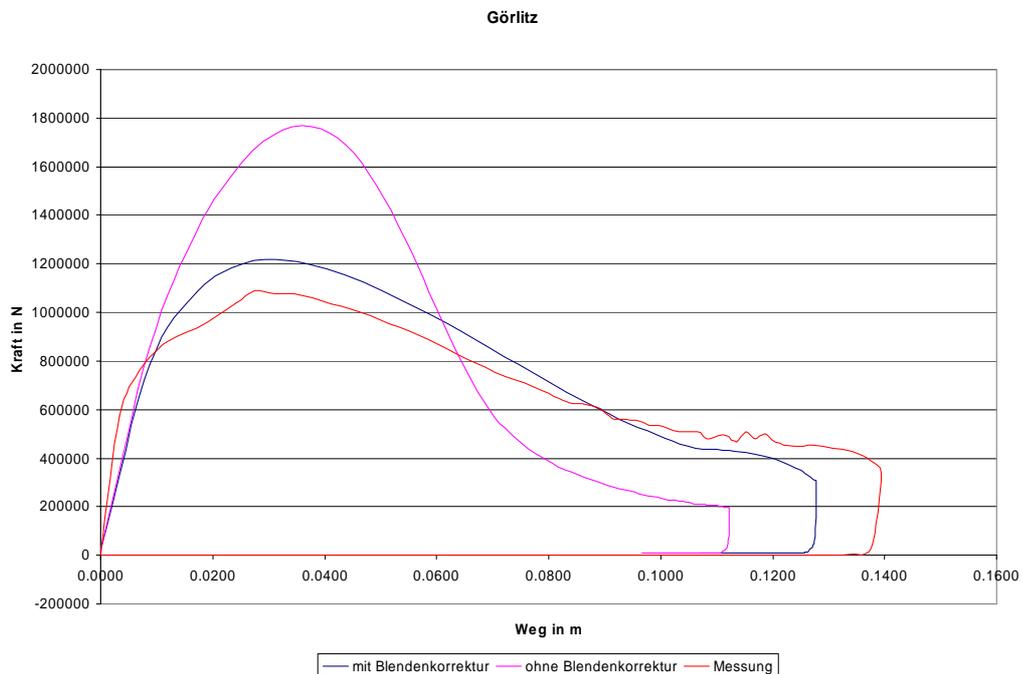


Bild 1: Gerechnetes Kraft-Hub-Diagramm des 2g-Puffers mit und ohne „Blähungskorrektur“ verglichen mit der gemessenen Kurve.

5 Modelica-Library

2003 ist ein zweites KTI-Projekt eingereicht worden (Nr. 6225.2: Auflaufsimulation von Personen- und Güterzügen). Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung von Modelica-Bibliotheken zur Simulation der Längs- und Vertikaldynamik von ganzen Eisenbahnzügen. Die nun vorliegende Bibliothek DyMoRail ermöglicht die effiziente Simulation ganzer Kompositionen in unterschiedlichsten Kombinationen. Die Bibliothek enthält einfache Wagenmodell, Zug- und Druckdämpfer mit Reib- und Elastomerfedern, die ganzen Palette von Hydraulikpuffern sowie die bisher gefertigten Mittelpufferkupplungen für verschiedene Triebzüge (Seetalbahn, Turbo, Flirt). Dank Antriebsmodulen und steuerbaren Bremssystemen können Fahrzyklen simuliert und Komfort mindernde Beschleunigungsspitzen studiert werden.

Die Modelle für die Puffer und Kupplungsdämpfer unterscheiden sich von den STELLA- und Simulink-Modellen, durch ihre Komplexität und ihre Stabilität. Konnte früher nur der Einfahrvorgang der Puffer simuliert werden, geben die DyMoRail-Modelle den ganzen Bewegungsablauf (Einfahren, Kraftanstieg bei Hubausschöpfung, Ausfahren, auseinander Fahren) wieder.

Dank einer robusten Ausgestaltung der Grundmodelle lassen sich Puffer, Zugvorrichtungen und Zerstörungsglieder beliebig miteinander kombinieren. Mussten in Simulink für die beiden Pufferkombination „neuer Puffer gegen neuen Puffer“ und „neuer Puffer gegen Standardpuffer“ zwei vollständige Modelle gebaut werden, kann man in Modelica problemlos Bauteile gegeneinander auswechseln. Das Baukastenprinzip hat sich speziell

dann bewährt, wenn von baugleichen Puffern der eine einen Defekt (Gasverlust, Ventil-schaden) aufweist. In diesem Fall kann mittels einer Parameterstudie an einem der vier Puffer Art und Stärke des Fehlverhaltens herausgearbeitet werden.

Weil die Bibliotheken hierarchisch gegliedert und die Modelle austauschbar sind, können Zugkompositionen in kurzer Zeit neu gegliedert oder mit unterschiedlichen Komponenten bestückt werden. Eine noch zu lösende Aufgabe ist der unterschiedliche Modellierungsgrad (Modellierungstiefe). Modelle, die zur Entwicklung von Prototypen gebaut werden, sind detaillierter zu gestalten als Modelle, die in hundertfacher Ausführung in einem langen Zug eingesetzt werden. Die Frage, wie stark die Modellkomplexität die Rechenzeit beeinflusst, hängt jedoch auch mit der Struktur des Gesamtmodells zusammen.

6 Die FLIRT-Kupplung

Die FLIRT-Kupplung ist das erste Produkt von Schwab Verkehrstechnik, das mit Unterstützung durch DyMoRail entwickelt worden ist. FLIRT (**F**linker, **L**eichter, **I**nnovativer, **R**egional **T**riebzug) ist ein vierteiliger Vorortzug der Firma Stadler Rail in Bussnang (Schweiz). Schon in der Entwicklungsphase zeigten sich die Vorteile einer detailgetreuen Modellierung. Mit Hilfe der Simulation konnten Erfahrungen bezüglich Ventilöffnungszeiten, Kraft- und Druckaufbau oder Rückhubdämpfung gesammelt werden, lange bevor der erste Prototyp gefertigt wurde.

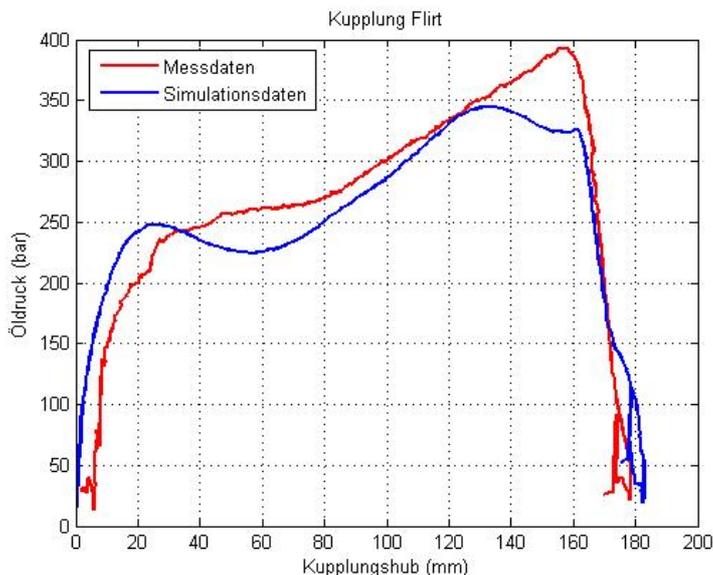


Bild 2: Gerechnetes Druck-Hub-Diagramm im Vergleich mit den gemessenen Daten.

Am 9. Dezember 2003 ist der Nachweis der Crashtauglichkeit des FLIRT von Leutenegger Engineering&Consulting an die SBB abgeliefert worden. Dieser Bericht enthält einige Simulationen, die mit DyMoRail erstellt worden sind. Am 2. Dezember 2004 (eine Woche vor der fahrplanmässigen Betriebsaufnahme!) sind in Luzern Messungen bei Auf-

laufstößen mit zwei FLIRTs durchgeführt worden. Bild 2 zeigt die gemessene Druck-Hub-Kurve im Vergleich mit den ein Jahr früher simulierten Daten.

7 STELLA, Simulink oder Modelica?

Wer nur einen Hammer hat, neigt dazu, alles wie einen Nagel zu behandeln. Weil wir im Grundlagenunterricht aus didaktischen Gründen STELLA benutzt haben, sind die ersten Modelle mit diesem Werkzeug erstellt worden. Die Assistenten haben ihre Modelle in Simulink gebaut, weil sie dieses Werkzeug vom Studium her kannten. Simulink bietet mehr Möglichkeiten als STELLA, verfügt über die bessere Numerik und ist unter den Ingenieuren weit verbreitet. In Simulink kann ein dynamisches Modell aber erst implementiert werden, wenn die Zusammenhänge geklärt sind, wenn die Differentialgleichungen schon aufgestellt worden sind. Deshalb ist STELLA als Entwurfswerkzeug besser geeignet als Simulink.

Modelica ist weder mit STELLA noch mit Simulink vergleichbar; Modelica ist mächtiger und näher bei den physikalischen Prozessen. Modelica hat aber auch ein großes didaktisches Potenzial. Wenn es gelingt, in den klassischen Ingenieurdisziplinen verkrustete Strukturen aufzubrechen, Altlasten zu entsorgen und den Blick frei zu machen auf die grundlegenden Prozesse in Natur und Technik, dann ist Modelica eine mögliche Beschreibungssprache.

8 Literatur

- [1] *Maurer, W.*: Ein systemdynamischer Zugang zur Mechanik. Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 5/54 (2005), S. 16-21.
- [2] *F. Herrmann*: Der Karlsruher Physikkurs S I (Teil 1: Energie, Impuls, Entropie; Teil 2: Daten, Elektrizität, Licht; Teil 3: Reaktionen, Wellen, Atome). Köln: Aulis Verlag Deubner, 2002.
- [3] www.systemdynamics.org
- [4] *H. Fuchs u. a.*: Physik – ein systemdynamischer Zugang für die Sekundarstufe II. Bern: hep-Verlag, 2005.
- [5] www.sysdyn.ch
- [6] www.hps-inc.com
- [7] www.schwab-ag.ch/svt/de/produkte/puffer/
- [8] *Karnopp D., Margolis D., Rosenberg R.*: System Dynamics – A Unified Approach. New York: Wiley 1990.
- [9] www.modelica.org
- [10] www.idp.zhwin.ch
- [11] *Maurer, W.*: Der 1g-Puffer. Technische Rundschau 12/93 (2001), S. 30-31.
- [12] *Maurer, W.*: Puffer nach Mass. Eisenbahn-Revue 3 (2003), S. 118-119.