

F. Wilhelm Bruns, Yong-Ho Yoo, Karolis Kleiza

Einheitliches Konzept für die Verbindung digitaler und physikalischer Modelle mit Hyper-Bonds

Impressum

artecLab paper 13

F. Wilhelm Bruns, Yong-Ho Yoo, Karolis Kleiza

**Einheitliches Konzept für die Verbindung digitaler und physikalischer
Modelle mit Hyper-Bonds**

- DFG Abschlussbericht VEDIP-

Laboratory for Art, Work and Technology

Universität Bremen

Enrique-Schmidt-Straße 7 (SFG)

D-28359 Bremen

www.arteclab.uni-bremen.de

Redaktion: Bernd Robben

ISSN 1860-9953

Copyright © artecLab-paper, Bremen, Oktober 2008

Satz und Herstellung im Eigenverlag

Abstract

This technological report presents some of our insights towards a Theory of Hyper-Bonds during a 3-year basic research project VEDIP, which has been supported by the Deutsche Forschungsgemeinschaft, Grant no. BR 1556/5-1

Hyper-Bonds are bi-directional energy-interfaces, controlled by signals which are sensed and generated from a computer-I/O-Board and some model and simulation software. We were motivated by the simple physical fact, that a real resistor, being included into an electrical circuit of any peculiarity, does behave in an energy transporting way, providing some flow continuity at its connectors, depending on the surrounding system. The direction of this energy-flow (effort x flow) can not be determined from the resistor component itself, it depends on the unknown surroundings. The resistor only behaves according to Ohm's law: difference of Effort on both connectors equals Flow through the connector times Resistance. But as far as we know, no existing computer-interface can handle this type of connection to an unknown environment. All digital interfaces operate on a predefined level of high or low effort and control the amount of input or output flow by a flexible internal resistor-network. All analog/digital interfaces are constructed as input (A/D) or output (D/A) devices. They may be switched between these states by some control-software. Then they are called versatile I/O, but they are not really bi-directional. A real bi-directional interface should adapt itself to the unknown surroundings. To have a bi-directional energy-interface in a control cycle with these input-, output- and computing-devices would result in advantages for the design and operation of flexible *Mixed Reality* solutions. This was the motivation for our work.

Inhaltsverzeichnis

1	PROJEKTZIEL	6
2	STAND DER FORSCHUNG.....	6
3	EIGENE VORARBEITEN.....	11
4	KONKRETISIERUNG DER ZIELE	22
5	ARBEITSPAKETE	25
5.1	Theoretische Untersuchung zum Übertragungsverhalten von Hyper-Bonds (AP1.1) .	25
5.1.1	Vorgehensweise	25
5.1.2	Aufteilung eines Systems in zwei Teilsysteme	26
5.1.3	Theoretischer Hyperbond.....	27
5.1.4	Multi-Hyperbonds	36
5.1.5	Der Einfluss von Diskretisierung und Zeitverzögerung	42
5.2	Praktische Untersuchung zum Übertragungsverhalten von Hyper-Bonds (AP1.2)	44
5.2.1	Untersuchung der Passivität mit 20-sim.....	45
5.2.2	Untersuchung der Stabilität	52
5.2.3	Beispiel 1 (ohne Abtastung)	56
5.2.4	Beispiel 2 (mit Abtastung).....	58
5.2.5	Beispiel 3 (Instabilität bei Abtastung).....	60
5.2.6	Untersuchung des Fehlers	60
5.2.7	Diskussion und Fazit	67
5.3	Konzept geeigneter Mess- und Generierungsarten von Phänomenen (AP1.3).....	68
5.4	Vergleich verschiedener Simulatoren (AP1.4)	71
5.4.1	MatLab und Modelica	72
5.4.2	20-sim.....	73
5.4.3	Diskussion und Fazit	73
5.5	Modellierung und Simulation ausgewählter Beispiele (AP2.1) und (AP2.2)	74
5.5.1	Beispiele aus der Mechanik	74
5.5.2	Beispiele aus der Elektrotechnik	82

5.5.3	Mixed Reality Beispiel	89
5.6	Technische Realisierung eines Beispiels mit realen Sensoren und Generatoren.....	96
5.7	Entwicklung eines Baukastens aus Submodellen (AP2.4)	99
5.8	Typische Mechatronik-Entwurfsaufgabe ohne und mit Hyper-Bond-Technik (AP3.1)	101
5.9	Weitere Beispiele für den Einsatz von Hyper-Bonds (AP3.2)	102
5.10	Demonstration einer Hybrid-Rechner Anwendung (AP3.3)	102
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	103
7	LITERATUR	104

1 Projektziel

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer einheitlichen Theorie der Kopplung virtueller (computerinterner) und realer (computerexterner) Elemente in verteilten Systemen sowie deren prototypische Implementierung in ausgewählten Gebieten der Produktionstechnik. Hierzu soll die Theorie der Bond-Graphen mit einem Konzept *Komplexer Objekte* zusammengeführt werden. *Komplexe Objekte* sind zusammenhängende Implementierungen unterschiedlich abstrakter logischer und physischer Instanzen physikalischer Konzepte und Konstrukte, die über *Hyper-Bonds* über ihre Geltungsbereiche hinaus verbindbar sind. *Hyper-Bonds* wurden entwickelt, um Wirklichkeitsausschnitte mit ihren Simulationsmodellen einfach und flexibel zu verbinden. In dieser Arbeit wird angestrebt, das *Hyper-Bond*-Konzept weiterzuentwickeln und theoretisch zu fundieren, damit eine große Klasse von Simulationsmodellen und Realkomponenten im Design- und Analyseprozess komplexer Maschinen und Anlagen frei kombinierbar wird. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten für ein verteiltes *physical* und *virtual prototyping*: konkrete Teil-Implementierungen einer Systemspezifikation lassen sich mit alternativen virtuellen Fortsetzungen koppeln und das Gesamtverhalten auch über die Grenze Realität/Virtualität im Zusammenspiel analysieren.

2 Stand der Forschung

Das DFG-Schwerpunktprogramm *Modellierung der Produktion* (1994-1997) hat einerseits die großen Potentiale der Simulationstechnik, die heute ihren Ausdruck in der *Digitalen Fabrik* finden, verdeutlicht, andererseits aber auch den Bedarf aufgezeigt, virtuelle Modelle mit realen Ausschnitten der Produktion enger zu koppeln.

Das Verhältnis von Realität und Virtualität und deren gegenseitige Durchdringung, auch als *Mixed Reality* bezeichnet, ist derzeit Gegenstand von Forschungsprogrammen (Badique (2001), 6. Rahmenprogramm der EU, IST-Future Emerging Technologies – Mixed Reality), Tagungen (ISMAR, ISMR) und Forschungsinstituten (Media Lab MIT, Mixed Reality Lab – Fraunhofer IMM, Mixed Reality Laboratory University of Nottingham, Mixed Reality Lab

Singapore, Human Interface Technology Lab Washington University, artecLab Universität Bremen, ..)

Der Begriff *Mixed Reality* wurde von Milgram & Kishino (1994) eingeführt, um verschiedene Formen der Projektion rechnerinterner Modelle (Virtual Reality) in die reale Umgebung zu beschreiben. Ihre Arbeit systematisiert Entwicklungen, die auf E. Sutherlands Vorstellungen von einem allgemeinen Projektionsbegriff („The ultimate display would, of course, be a room within which the computer can control the existence of matter“ Sutherland (1965)) zurückzuführen sind, diesen jedoch auf visuelle Projektionen einschränken. In den USA wurde diese Hinwendung zur Realität in den Forschungslaboren PARC, MIT, SRI geboren (siehe ACM Themenheft *Back to the Real World*) und führte zu den Ansätzen *Ubiquitous Computing*, *Augmented Reality*, *Ambient Intelligence* (Weiser 1993).

Erste Arbeiten über *Mixed Reality* waren stark von der Visualisierungstechnik (Head-Mounted Display, 3D-Stereo-Sichten, Projektionswänden, Holographie) geprägt. Milgram & Kishino (1994) führten den Begriff für ein Kontinuum zwischen Realität und Virtualität ein und beschrieben sechs Klassen hybrider Displays, um den gesamten Bereich der Mixed Reality Interfaces abzudecken. In *Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds* (Ohta & Tamura 1999) stellen Milgram & Coquhoun (1999) eine allgemeinere Taxonomie vor, in der sie auch Perspektiven des Betrachters und die Intuitivität der Nutzung einbeziehen. Das Kontinuum der gegenseitigen Durchdringung reicht dort von *Augmented Reality* bis *Augmented Virtuality*. Ein typisches Beispiele für Augmented Reality ist in Abb. 1 dargestellt. Der Antragsteller zeigte erstmals 2000 eine Anwendung dieser Technik in der Instandhaltung, in der auf einen realen Pneumatikzylinder blickend, der Betrachter in das Display eingeblendet vielfältige Informationen über den Zylinder erhielt.

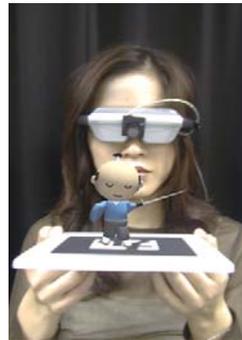
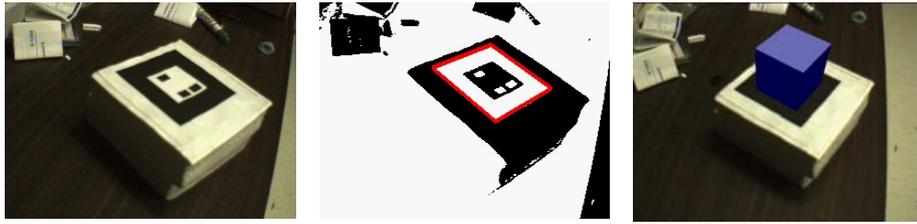


Abb. 1: Augmented Reality Toolkit - Displays mit befestigter Kamera (Kato et al 1999)

Bei dieser Technik handelt es sich um passgenaue Echtzeit-Projektionen dreidimensionaler computergenerierter Bilder in eine Videoaufnahme der Realität. Benutzer sehen die Wirklichkeit, durch eine Kamera vermittelt, auf einer Bildschirmbrille. Rohdaten der Video-Kamera werden mit Computerobjekten überlagert, und zwar so, dass an die Stelle von erkennbaren Mustern in der Realwelt, in Größe und Lage richtig eingepasst, das Artefakt im Display erscheint.

Eine *Augmented Virtuality* Anwendung zeigt Abb. 2. Dort werden Realkomponenten als Bereicherung der Virtualität verwendet, um Simulationsmodelle durch gegenständliches Vormachen zu spezifizieren. Das virtuelle Simulationsmodell kann nicht nur für systematische Experimente genutzt werden, sondern auch in ein SPS-Steuerprogramm für reale Automatisierungsanlagen übersetzt und exportiert werden. Hierbei handelt es sich also um eine erste Realisierung des erweiterten Mixed Reality Konzeptes im Sinne von

Sutherland.

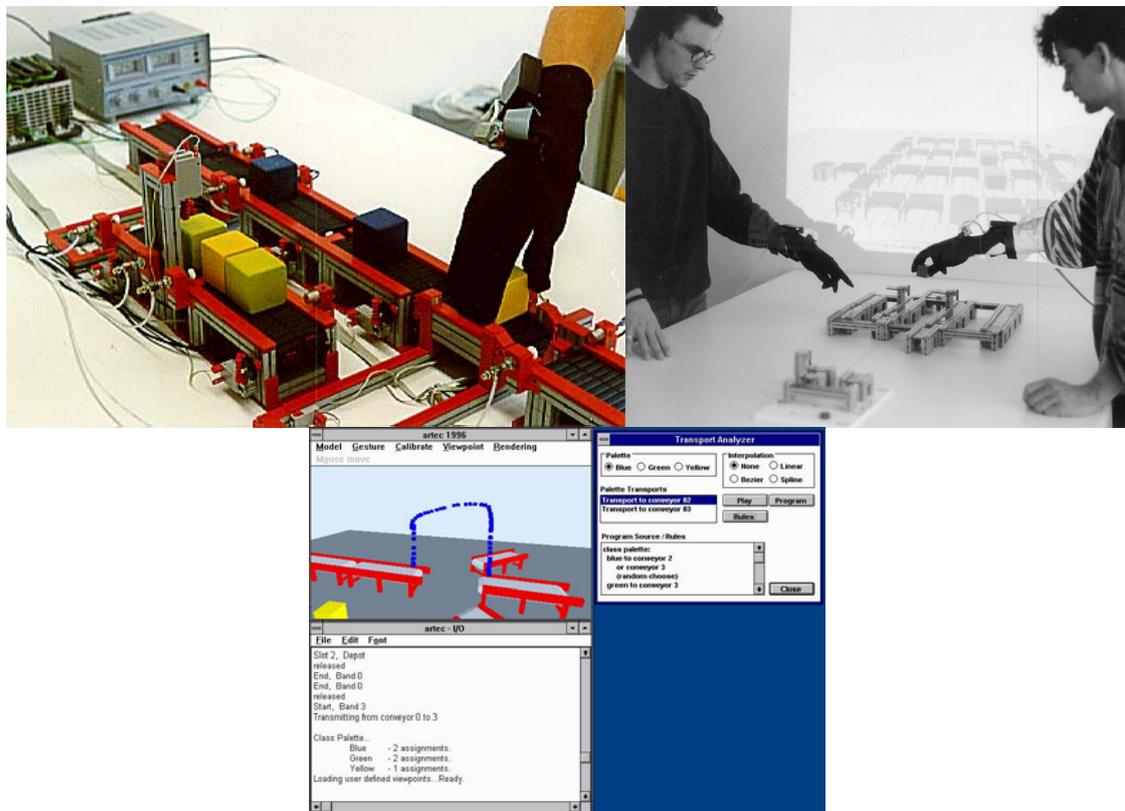


Abb. 2: Spezifizierung von Systemverhalten durch gegenständliches Vormachen

(Schäfer & Bruns 2001)

Die systematische **gegenseitige** Durchdringung realer und virtueller Modelle, die leicht in technische Implementierungen umsetzbar ist, ist bisher wenig erforscht.

Ansätze der Mischung

Fitzmaurice et al. (1995), Suzuki und Kato (1995) und Ishii & Ullmer (1997) gingen über die Anreicherung der realen Welt durch computer-generierte Bilder hinaus, indem sie explizit den Gegenständen der externen Welt eine Schnittstellenfunktion zur Rechnerwelt zuwies. Mit realen Griffen, *Handles*, konnten virtuelle Objekte manipuliert werden. Dies bedeutete die Bereicherung der virtuellen Welt durch reale Objekte (augmented Virtuality). Das For-

schungsprogramm „Tangible Bits“ der Tangible Media Group des MIT lenkte seine Aufmerksamkeit auf die Schnittstelle zwischen Menschen, Bits und Atomen. Zwar folgten aus dieser Perspektive zahlreiche interessante Anwendungen (Ishii et al 2004, Ishii 2004), jedoch keine systematische Behandlung der Frage, wie physikalische Phänomene auf einer abstrakten, verallgemeinerten Ebene als Energieströme mit ihren digitalen Repräsentationen und Fortsetzungen verbunden werden können. Die Konsequenz war, dass Steuerungs-, Regelungs- und Simulationsprobleme auf einer konkreten Ebene stehen blieben und nur für jeweils spezielle Anwendungen gelöst wurden. Von einem Konzept, das gar auf atomare Strukturen übertragbar wäre, ist keine Spur erkennbar.

Benford et al (1998) entwickeln eine Taxonomie des „Shared Space“ mit Grenzen und Interfaces für Mixed Reality, die anders als Milgram & Kishino (1994) den Fokus auf Transport (Immersion), Künstlichkeit und Räumlichkeit legt. Diese Sicht erweist sich als fruchtbar für die Klassifizierung von Mixed Reality Anwendungen, insbesondere im Performance (Theater) Bereich, bleibt aber ebenfalls auf der Ebene von Video- und Audioprojektionen stehen, wie viele andere Mixed Reality Entwicklungen auch.

Im DFG-Projekt RUGAMS (Rechnergestützte Übergänge zwischen gegenständlichen und abstrakten Modellen produktionstechnischer Systeme, Bruns 2000) wurden die Ansätze Augmented Reality und Augmented Virtuality verbunden und die Möglichkeit des Wanderns zwischen den Welten realisiert. Über einen Datenhandschuh wurden Gesten und Operationen auf realen Transportsystem-Modellen erkannt und so ein virtuelles Modell synchron zum realen aufgebaut. Dieses Simulationsmodell konnte benutzt werden, um in die reale Modellanlage ein simuliertes Verhalten zu projizieren. Je nach Fokus kann nun von angereicherter Realität oder angereicherter Virtualität gesprochen werden (Abb. 2). Aber auch hier existierte noch keine direkte Verbindung zwischen physikalischen und digitalen Phänomenen.

Betrachtet man die Arbeiten relevanter Tagungen wie ISMAR oder PerCom, so ist eine generelle Tendenz festzustellen: Mixed Reality wird hauptsächlich auf einer Kommuni-

kations- und Kooperationsebene mit Video- und Audio-Projektionen behandelt, eine weitergehende energetische und regelungstechnische Sicht bleibt ausgeblendet. Dadurch wird ein großes Potential der Mixed Reality Technik für die Tele-Präsenz, Ferndiagnose, Fernwartung, Fernwirkung und Kollaboration in der Produktionstechnik wenig genutzt und liegt für neue Formen eines integrierten Systemdesigns, wie von der Mechatronik gefordert, völlig brach.

3 Eigene Vorarbeiten

In dem oben genannten Projekt RUGAMS im DFG-Schwerpunktprogramm „Modellierung der Produktion“ wurde das Konzept entwickelt, über sensorisierte Hände die reale Welt als Schnittstelle zum Computer zu nutzen und den Rechner im Rücken in unsere Alltagswelt zu integrieren. Am Beispiel der Spezifikation von Transportsystemen durch gegenständliches Vormachen wurden Möglichkeiten der Verbindung von realer und virtueller Welt erkundet (Brauer 1996, Bruns 2000). Dabei wurde schwerpunktmäßig der Frage nachgegangen, wie gegenständliche Modelle, als eine fundamentale Dimension der Simulationsmethodik, mit virtuellen Modellen kombiniert werden können. Dieses von uns als *Real Reality* bezeichnete Konzept sah die Verknüpfung zweier Modellwelten vor, die bisher getrennt waren. Die Verknüpfung wurde erreicht, indem alle Aktionen, die an den Realbausteinen vorgenommen werden, über einen Datenhandschuh auf die gleichzeitig im Rechner vorhandenen virtuellen Bausteine übertragen wurden. In der Phase der Modellierung bestand also eine direkte geometrische, topologische und funktionale Analogie zwischen dem physikalischen und dem rechnerinternen Modell.

Über eine Kopplung des so generierten rechnerinternen Modells mit einem Simulator konnte das Verhalten der auf diese Weise spezifizierten Anlage systematisch studiert werden. Dabei wurden Realmodelle in verschiedenen Formen als Mittel zur Visualisierung und Kommunikation, aber auch als wichtige Erkenntnisquelle über eine noch nicht ausreichende formale Durchdringung des Systems erfolgreich eingesetzt.

Im DFG-Projekt EUGABE (Erfahrungsorientierte Übergänge zwischen gegenständlichen und abstrakten Modellen) wurde das Konzept der engen Kopplung

zwischen realer und virtueller Welt auf pneumatische Schaltungen in Lernumgebungen der Mechatronik ausgeweitet. Schaltelemente wurden aus einem Pneumatikbaukasten entnommen, auf eine Schalttafel gesteckt und mit Schläuchen verbunden, so dass ein pneumatischer Regelkreis entstand. Da die Verschaltung über ein Mustererkennungssystem gleichzeitig an den Computer übermittelt wurde, entstand simultan ein virtuelles pneumatisches Modell. Dieses Modell konnte, ebenso wie das Realmodell, in Betrieb genommen werden. Besonders interessant dabei war, dass eine Überprüfung stattfinden konnte, ob das digitale Modell sich tatsächlich so verhielt wie das reale. Als wichtige Erkenntnisquelle erwies sich die deutlich werdende Differenz zwischen Simulation, die immer eine Abstraktion von Wirklichkeit ist, und Realität (Druckluftquelle, Leitungen, mechanische Schalter, Ventile, Zylinder), die immer mehr Phänomene zeigt als ihr Modell. Die Erfahrungen mit *Real Reality* zeigten außerdem, dass die Einbindung der gegenständlichen Realität Vorteile gegenüber einem Arbeiten mit reinen Simulatoren hat, weil eine intuitive Kooperation der Modellierenden durch die realen Gegenstände erleichtert wurde. Die Modellelemente konnten wie gewohnt gegriffen, bewegt und manipuliert werden. Der gesamte Vorgang der Modellerstellung konnte gemeinsam durch mehrere Personen erfolgen, die sich gegenseitig ergänzten, Ideen einbrachten oder Kritik äußerten. Damit bot *Real Reality* nicht nur eine alternative Eingabeschnittstelle zum Computer, sondern auch ein interessantes Medium zur Kooperation (Hornecker, 2003)

Im EU-Projekt *BREVIE – Bridging Reality and Virtuality with a graspable User Interface* wurde diese Dimension der Realitäts- und Kooperationsorientierung für Lernumgebungen der Mechatronik weiter ausgebaut. Nicht die Handbewegungen, sondern die Positionen von Pneumatik-Elementen und Verbindungen wurden erkannt und in ein virtuelles Modell übersetzt, Abb. 3 und Abb. 4.

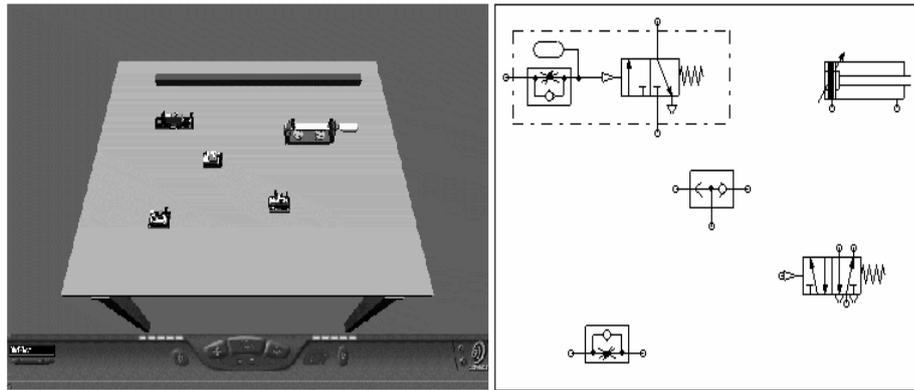


Abb. 3: Verschiedene Abstraktionen einer Pneumatikschaltung

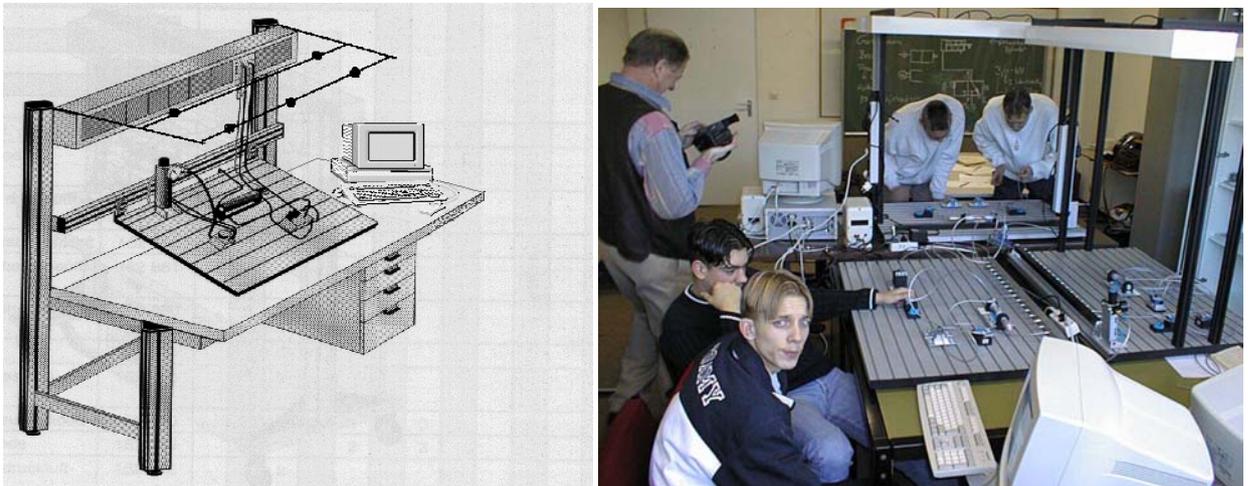


Abb. 4: Lernumgebung in BREVE

Gemeinsamkeit der vorgenannten Arbeiten war, dass die physikalischen Anlagen und die Simulatoren nebeneinander existierten, also funktional und energetisch nicht direkt verbunden waren. Diese Grenze aufzuheben, war das Ziel weiterer *Real Reality* Arbeiten.

Im EU-Projekt DERIVE (Distributed Real and Virtual Learning-Environment for Mechatronics and Tele-service) wurde erstmals das Nebeneinander von Realität und Virtualität überwunden. Über bidirektionale Kopplungen konnte dort von der Realität auf die Virtualität *und umgekehrt* zugegriffen werden. Zur Realisierung dieser Lösung wurden zwei neue Konzepte eingeführt: *Complex Objects* und *Hyper-Bonds* (Bruns, 2000b).

Verschiedene Repräsentationen eines technischen Konzepts (real und virtuell) werden zu einem *komplexen Objekt* zusammengefasst und für die Modellierung zur Verfügung gestellt (Abb. 5). *Hyper-Bonds* stellen einen Mechanismus dar, durch eine universelle Interfacetechnik Verbindungen zwischen realen und virtuellen Komponenten herzustellen und damit ein funktionales Modell über die Grenze Realität-Virtualität zu verteilen (Abb. 6). Diese Möglichkeit eröffnet neue Perspektiven für den Design-Prozess technischer Anlagen. Im Projekt DERIVE wurde dieser Ansatz für diskrete Elektropneumatik-Prozesse realisiert.

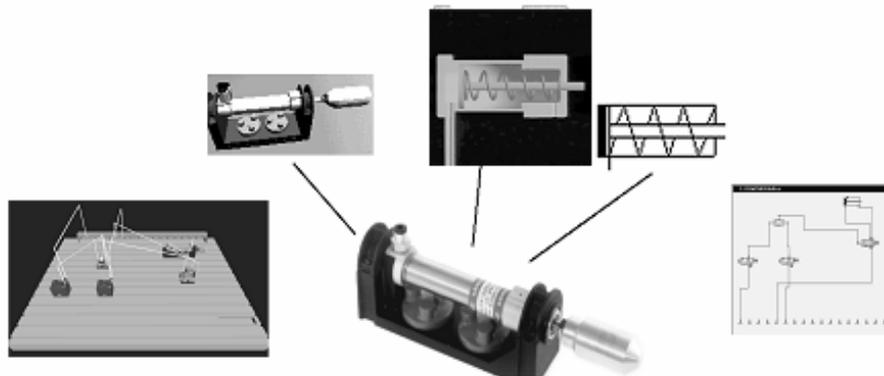


Abb. 5: Komplexes Objekt Pneumatikzylinder mit Realteil und Repräsentationen

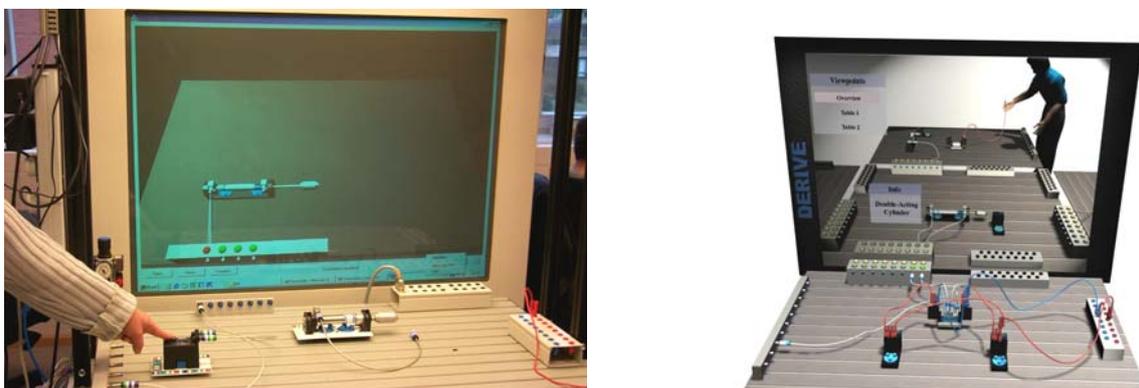


Abb. 6: Hyper-Bonds für diskrete Elektropneumatik

Das Konzept kann verallgemeinert und auf weitere physikalische Phänomene (Hydraulik, Elektrik, Mechanik, Thermodynamik) ausgeweitet und in Richtung kontinuierlicher Repräsentation verfeinert werden. Als vereinheitlichendes theoretisches Konzept eignet sich die Theorie der Bond-Graphen (Paynter 1961, Karnopp 1995). Die Theorie der Bond-Graphen betrachtet Systeme aus der Perspektive eines kontinuierlichen Leistungsflusses. Leistung fließt durch Systemkomponenten und Verbindungen nach dem Kontinuitätsprinzip: Das Produkt von Antrieb (Effort als Druck, Spannung, Kraft, Temperatur) und Fluss (Flow als Massestrom, Ladungsstrom, Geschwindigkeit, Wärmefluss) folgt typischen Energieerhaltungs- und Energieflussgesetzen. *Hyper-Bonds* verbinden diese vereinheitlichte abstrakte Beschreibung dynamischer Systeme mit Hilfe von Bond-Graphen mit deren technischer Implementierung. Es sind flexibel handhabbare Schnittstellen zwischen physikalischen Phänomenen der Rechner-Außenwelt und logischen Strukturen der Rechner-Innenwelt. Um diese flexiblen Schnittstellen zu realisieren, muss ein Mechanismus vorhanden sein, der alle relevanten Phänomene messen und wieder erzeugen kann. Hyper-Bonds können mit einem Baukasten aus Sensoren und Generatoren für diese Phänomene realisiert werden. Abb. 6 zeigt eine Realisierung für das Gebiet der Elektropneumatik. Ein realer Druckluftschlauch, vom realen Ventil kommend, wird über einen Hyper-Bond im Virtuellen fortgesetzt und treibt dort einen virtuellen Zylinder an. Die Richtung ist umkehrbar, sodass ein virtuelles Ventil einen realen Zylinder treiben kann. Durch diese bidirektionale Kopplung ist es möglich, mit der Realität die Virtualität zu steuern und umgekehrt. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für einen neuartigen Systementwurf, aber auch für das handlungsorientierte Lernen. Der Ansatz hat starke Bezüge zur Forschung über *Eingebettete Systeme*, unterscheidet sich jedoch von dem dort Üblichen dadurch, dass keine vorhergehende dedizierte Funktionszuweisung „eingebettet“ und „einbettend“ an die Systemteile erforderlich ist. Das Neuartige am Hyper-Bond Konzept ist seine einheitliche, bidirektionale, lokale Transformation von Effort/Flow Phänomenen.

In drei EU-Projekten Lab@Future, MARVEL und RexNet wurde diese Perspektive

weiter erforscht. Lab@Future entwickelte Vorstellungen und Prototypen für zukünftige Laborarbeit (Baudin et al 2003). MARVEL untersuchte weitere Einsatzmöglichkeiten der Mixed Reality Technik im Tele-Service-Bereich (Müller 2004) und RexNet hatte die praktische Erprobung in einem Verbund lateinamerikanischer und europäischer Mechatronik-Labore zum Ziel. Durch die erfolgreichen Implementierungen eines eher heuristischen Ansatzes, ergab sich der Wunsch und die Notwendigkeit, ein fundiertes theoretisches Konzept für die Hyper-Bond-Technik zu entwickeln, damit weitere Möglichkeiten und Grenzen des Ansatzes systematisch erschlossen werden können.

In der theoretischen Durchdringung der Hyperbond-Technik erwies sich die kontrolltheoretische und –praktische Verwendung des Simulators 20-sim als hilfreich. Mit ihm ließen sich erste theoretische und simulationspraktische Untersuchungen zum Übertragungsverhalten beim theoretischen Hyper-Bond (ohne Zeit- und Diskretisierungsfehler) und beim Simulationsmodell einer Implementierung (mit typischen Fehlern der Messung und Generierung) durchführen. Ausgangspunkt ist ein einfaches elektrisches Netzwerk, das durch einen Bond-Graphen repräsentiert werden kann (Abb. 7). Typische Elemente eines Bond-Graphen sind: Signalgenerator (WaveGenerator), Spannungsquelle (MSe, modulated source of effort), Stromquelle (MSf, modulated source of flow), Widerstand (R, resistor), Kondensator (C, capacity), Spule (I, inductivity), Energie-Verbindung (e,f half-arrow effort*flow) und Energie-Verzweigungsknoten (0-node für identische efforts und Summe der flows = 0, 1-node für identische flows und Summe der efforts = 0). Mit Hilfe eines Simulators (20-sim, Matlab o.ä.) wird diese grafische Notation in ein System von Differentialgleichungen übersetzt und das Systemverhalten durch deren numerische Integration ermittelt und dargestellt. Abb. 8 zeigt die Reaktion des einfachen Widerstandsnetzes auf zwei in der Phase verschobene Sinusspannungen. Die durchgehende grüne Kurve zeigt das Spannungspotential an einem Punkt zwischen den Widerständen R1 und R2.

Ziel der Hyper-Bond-Technik ist es nun, Energie-Verbindungen aufzutrennen (Abb.

9) und durch einen lokalen Hardware-Software-Hardware Mechanismus zu verbinden, der das Gesamtverhalten des Systems konserviert. Dieser Mechanismus ist lokal in dem Sinne, dass er nur den örtlichen Energiefluss messen und beeinflussen kann, aber ansonsten keine Information über das System hat. Ein derartiger, durch Software gesteuerter, Sensor-Generator Mechanismus böte dann den Vorteil, ein Gesamtsystem „aufschneiden“ zu können und beliebig auf Realität und Virtualität verteilen zu können. Heutige Simulatoren in der Regelungstechnik bieten die Möglichkeit, den Übergang vom Energielevel zum Signal- und Informationslevel durch realistische Modelle des Übertragungsverhaltens von Sensor- und Generator-Komponenten zu repräsentieren und auch die anderen Regelkomponenten in einer einheitlichen Notation zur Verfügung zu stellen. Dies ist auch der Fall für 20-sim und MatLab. In Abb. 10 ist die Realisierung eines Hyper-Bonds mit Stromsensor (FlowSensor), Analog-Digital (A/D)-, und Digital-Analog (D/A)-Wandler, Verstärker (K), Integrator und Spannungsgenerator (MSe-Modulated Source of effort) in 20-sim-Notation dargestellt. Das resultierende Verhalten deckt sich mit dem in Abb. 8 dargestellten. Weitere erfolgreiche Hyper-Bond Simulationen für komplexere Systeme sind in Abb. 11 (Schwingkreis mit R, I, C), Abb. 12, Abb. 13 und Abb. 14 (Masse-Feder-Dämpfer System) und Abb. 15 (Verteilte Kooperation im Virtuellen mit Krafrückkopplung: Gewicht an einem Seil wird über einen Fluss transportiert, Yoo 2000) dargestellt.

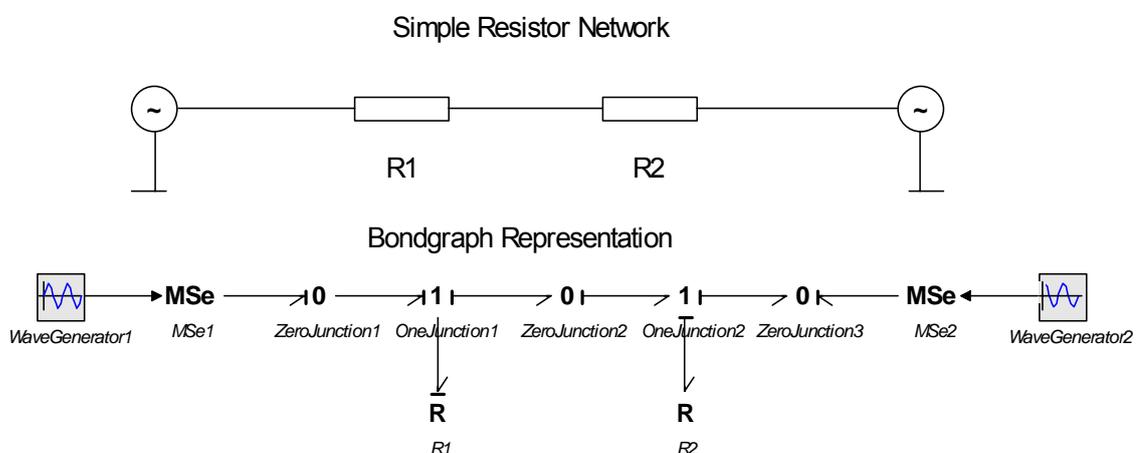


Abb. 7: Resistor Network in Bondgraph Representation

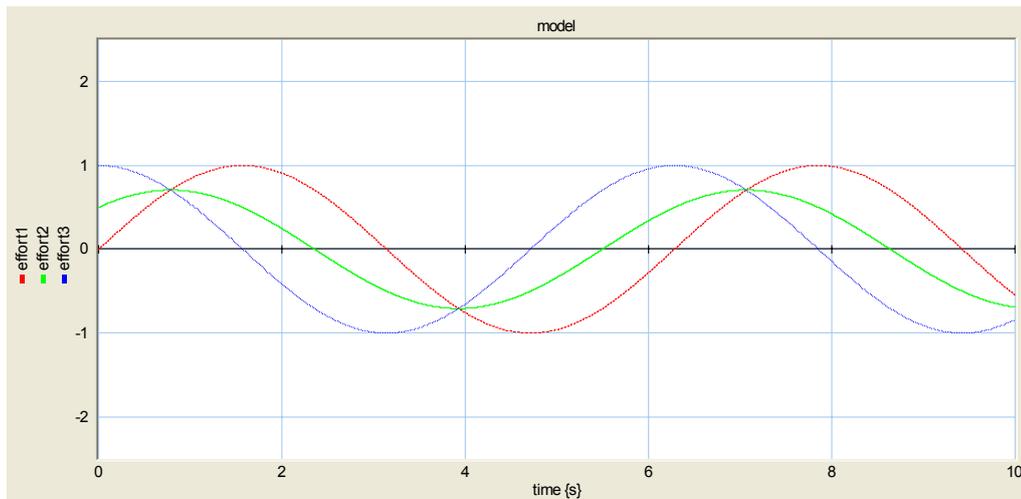


Abb. 8: Theoretisches Verhalten

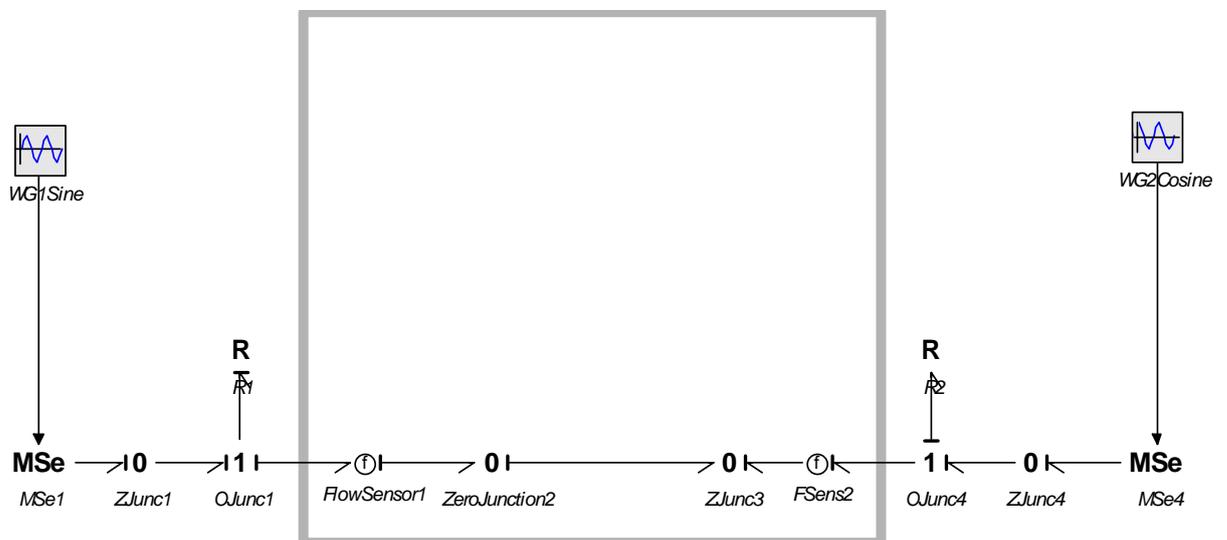


Abb. 9: Konzept eines leeren Hyper-Bonds

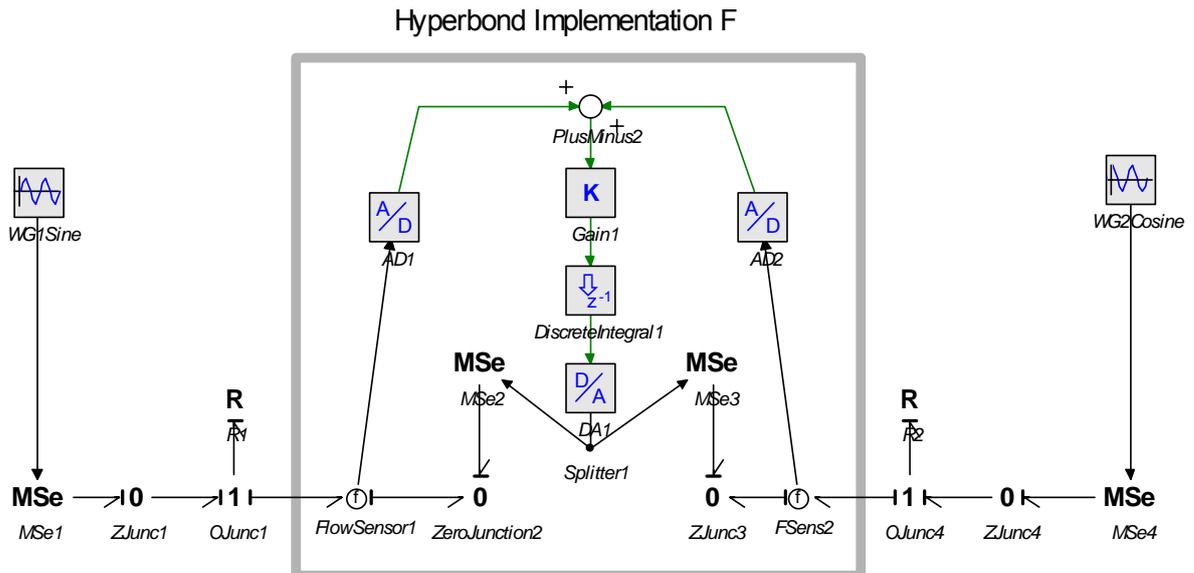


Abb. 10: Implementierung eines Hyper-Bonds (sensing flow, generating effort)

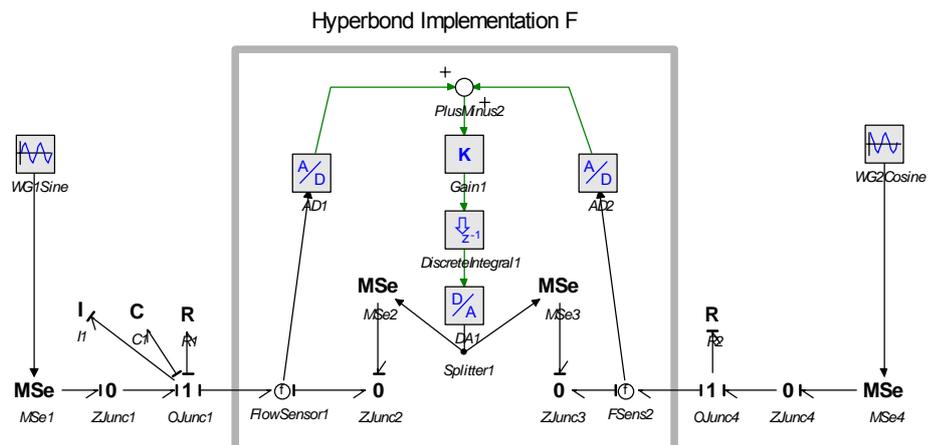


Abb. 11: Implementierter Hyper-Bond für ein System mit Induktivität $I=0.1$, Kapazität $C=0.1$, Widerstand $R=1.0$

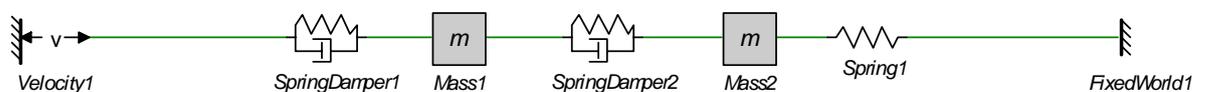


Abb. 12: Zwei-Massen-Feder-Dämpfer System (Karnopp Beispiel 4.11)

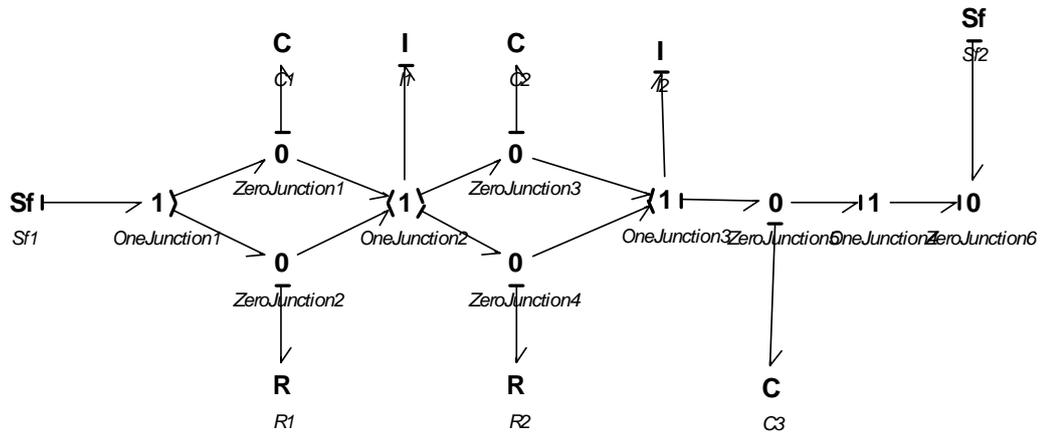


Abb. 13: Bond-Graph für Zwei-Massen-Feder-Dämpfer System (Karnopp Example 4.11)

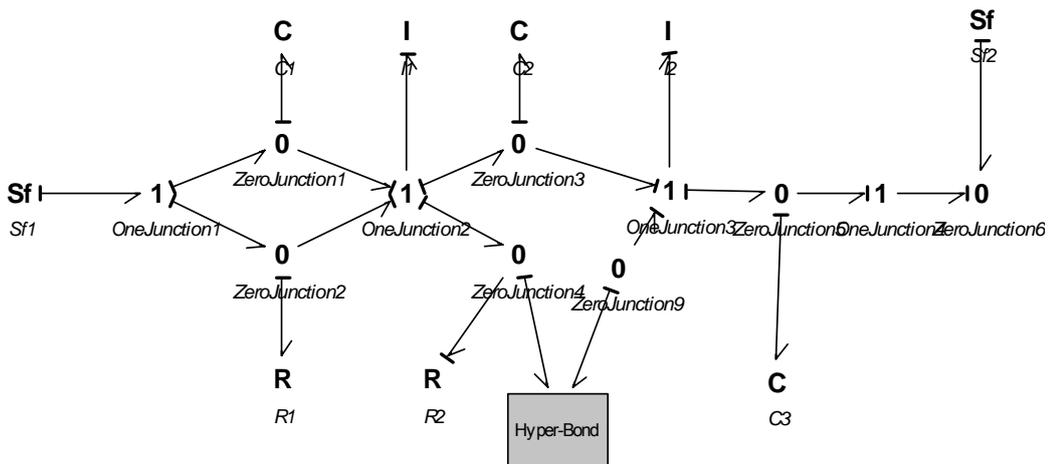


Abb. 14: Hyper-Bond als Sub-model

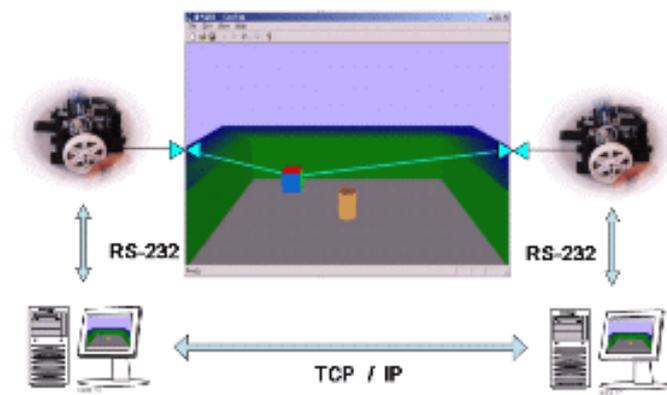


Abb. 15: Verteilte Kooperation mit haptischem Feedback (Yoo & Bruns 2004a)

4 Konkretisierung der Ziele

Konkrete Ziele der Arbeit sind die weitere Fundierung des Hyper-Bond-Konzeptes unter 1. kontrolltheoretischer, 2. modellierungstechnischer und 3. implementierungsbezogener Perspektive. Die bisherigen praktischen Arbeiten haben sich auf langsame *diskrete* Prozesse bezogen. Erste Hyper-Bonds für kontinuierliche Systeme wurden simuliert und in ihrem Verhalten theoretisch untersucht. Durch eine tiefere theoretische Durchdringung der Verbindung realer und virtueller Welten soll der Anwendungsbereich auf *schnelle analoge* Phänomene erweitert werden. Durch den Vergleich verschiedener Modellierungswerkzeuge (20-sim, Modelica, Matlab-Simulink) soll untersucht werden, welche Möglichkeiten und Grenzen der Einbindung von Hyper-Bonds in übergeordnete Modellebenen existieren. Durch den Bau realer Hyper-Bonds sollen Möglichkeiten und Grenzen ihrer Implementierung erkundet werden. Darüber hinaus wird 4. eine Aussage darüber erwartet, wie geeignet das Konzept für einen Hybridrechner-Ansatz ist. Dabei soll die Auslagerung realer komplexer physikalischer Prozesse gezielt eingesetzt werden, um numerisch aufwändige Teile eines Gesamtproblems nicht durch eine numerische Näherung auf einem Digital-Rechner zu lösen, sondern in die analoge Realwelt zu verlagern und dort physikalisch zur Gesamtlösung beizutragen. Das Gesamtmodell könnte auf diese Weise effektiver in seinem Verhalten abgeschätzt oder gesteuert werden.

Es sollen folgende Thesen untersucht und entsprechende Realisierungen implementiert werden:

These 1

Gegeben sei ein System S, das durch einen Bondgraphen BG beschrieben wird. Dann kann jede Energie-Kante durch einen Hyper-Bond ersetzt werden, ohne das Gesamtverhalten des Systems zu verändern. Dieser Hyper-Bond enthält einen Mechanismus, welcher zwei getrennte physikalische Leitungen über einen Regelkreis mit Sensoren und Generatoren so verbindet, dass die Kontinuität des Energieflusses erhalten bleibt. Damit wird die Aufspaltung des Ausgangssystems S in zwei Teilnetze S1 und S2, die über Hyper-Bonds verbunden sind, möglich.

These 2

Gegeben seien zwei physikalische Teilnetze S1 und S2, die über Hyper-Bonds verbunden sind. Dann lassen sich beliebige Verbindungen zwischen realen und virtuellen Instanzen von S1, S2 herstellen, die lediglich durch Signalübertragungszeiten und Diskretisierungsfehler begrenzt sind (Abb. 16).

Der Vorteil von These 1 ist eine lokale Bestimmbarkeit, unabhängig von Informationen über S1 und S2. Diese lokale Eigenschaft ist eine wertvolle Voraussetzung für ein allgemeines Mixed Reality – Konzept. These 2 bildet die Grundlage für die Fortsetzbarkeit virtueller in reale und realer in virtuelle Phänomene. Zusammen stellen sie eine mächtige Grundlage für den Entwurf und die Analyse mechatronischer Systeme dar.

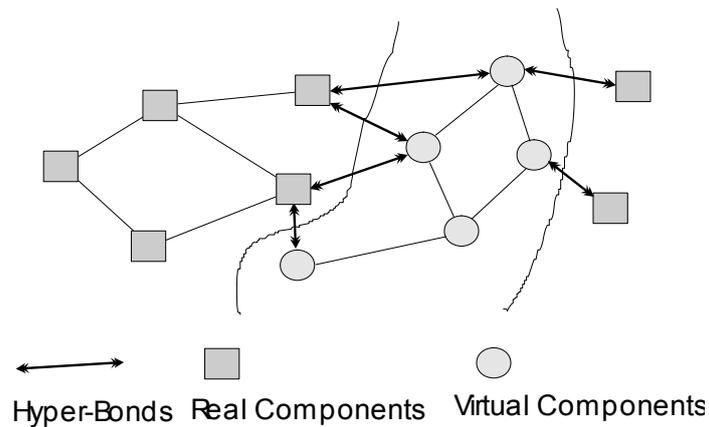


Abb. 16: Gesamtsystem und verschiedene reale und virtuelle Subsysteme

Die Thesen sollen durch theoretische Herleitungen mit Hilfe der Regelungstheorie (Übertragungsverhalten, Stabilitätsbetrachtungen) bewiesen und in Theoreme überführt werden oder ihre allgemeine Gültigkeit soll durch empirische Falluntersuchungen aus der Beispielsammlung von Karnopp et al 1990 falsifiziert und gegebenenfalls eingeschränkt werden (1. Zielbereich). Für den bestätigten Gültigkeitsbereich der Thesen sollen geeignete Simulationsmodellbausteine in einer Form verfügbar gemacht werden, die es erlaubt, diese Modellbausteine in eine übergeordnete Software-Systemarchitektur einer verteilten Mixed-Reality-Umgebung (siehe DERIVE-Systemarchitektur) einzubinden (2. Zielbereich). Für den Gültigkeitsbereich der Thesen sind geeignete reale Sensor-Generator-Komponenten in möglichst universell verwendbarer Form zu entwickeln und zu evaluieren (3. Zielbereich). Mit den so gewonnenen Erfahrungen soll versucht werden, ein physikalisches Problem zu finden, dessen „steife“ Charakteristik (stark unterschiedliches Zeitverhalten) zu langen numerischen Integrationszeiten führt. An diesem Beispiel könnte gezeigt werden, wie eine geeignete Verlagerung von Systemteilen in die gekoppelte Realität zu entscheidenden Verkürzungen der Lösungszeiten führt. Mit dieser Demonstration würde der Anstoß für eine neue Hybridtechnik (Digital-Analog-Rechner) gegeben (4. Zielbereich).

5 Arbeitspakete

Der Bericht beschreibt drei Arbeitspakete. Das erste Arbeitspaket besteht aus den kontrolltheoretischen Untersuchungen von Hyperbonds (AP 1.1 und AP 1.2), sowie der geeigneten Wahl von Simulationsumgebungen (AP 1.4). Hierbei wird versucht, die zwei gegebenen Thesen auf Ihre Korrektheit hin zu überprüfen und zu verifizieren oder zu falsifizieren bzw. einzuschränken. Die verschiedenen Typen von Hyperbonds werden in AP 1.3 diskutiert. Im zweiten Arbeitspaket werden für einige mechanische und elektrische Systeme Modelle in Bondgraphen-Notation erstellt und deren Verhalten mit und ohne Hyperbonds untersucht. Im letzten Arbeitspaket werden Ergebnisse und offene Fragen diskutiert. Hierbei werden sowohl die entstandenen Probleme als auch die Möglichkeit weiterführender Forschungsansätze diskutiert.

5.1 Theoretische Untersuchung zum Übertragungsverhalten von Hyperbonds (AP1.1)

5.1.1 Vorgehensweise

Es wird versucht, die Thesen 1 und 2 durch kontrolltheoretische Überlegungen zu begründen. Dabei wird zunächst ein System untersucht, das aus zwei beliebigen Teilsystemen A und B besteht, welche nur über *eine* Energieleitung miteinander verbunden sind. Die Energieleitung wird durch einen Hyperbond ersetzt und das neu entstandene System in seinem Verhalten mit dem Ausgangssystem verglichen. Anschließend wird versucht, die Erkenntnisse für beliebige Energieverbindungen zu verallgemeinern. Im darauf folgenden Abschnitt wird der Einfluss von Diskretisierung und Verzögerung (Sampling) bei einem implementierten Hyperbond untersucht.

5.1.2 Aufteilung eines Systems in zwei Teilsysteme

Ein einfaches System lasse sich in zwei disjunkte Teilsysteme mit nur einer Energieverbindung aufspalten. Diese Energieverbindung kann dann in einer Bondgraphdarstellung durch einen 1-Knoten mit zwei Bonds, die die zwei Teilgraphen A und B verbinden, repräsentiert werden (Abb. 17). Diese Einschränkung der Systemvielfalt erlaubt einen einfachen mathematischen Zugang.

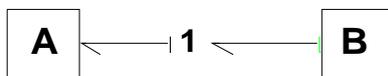


Abb. 17: Aufteilung eines Graphen in zwei Teilgraphen

Der 1-Knoten liefert, gemäß der Bondgraphtheorie, die Gleichungen:

$$f_1 = f_2$$

$$e_1 - e_2 = 0$$

Aus mathematischer Sicht lassen sich die Systeme A und B wie Signal-Input/Output-Systeme mit einer unterstellten Kausalität behandeln, wobei energetisch hier keine Präferenz existiert. Die so betrachteten Teilsysteme A und B können dann über ihre zugeordneten Bondgraphen in ein System von Differenzialgleichungen überführt werden, deren Laplace-Transformation eine einfachere algebraische Beziehung zwischen Input und Output liefert: die Übertragungsfunktionen $A(s)$ und $B(s)$. Es habe der Teilgraph A gemäß der Kausalitätsuntersuchung Flow als Input und Effort als Output. Der Teilgraph B hat dann entsprechend umgekehrten Input und Output. Daraus ergeben sich folgende Gleichungen:

$$e_1(s) = A(s)f_1(s) + S_A(s)i_A(s)$$

$$f_2(s) = B(s)e_2(s) + S_B(s)i_B(s) \Leftrightarrow e_2(s) = B^{-1}(s)f_2(s) - B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s)$$

Dabei bilden $A(s)$ und $B(s)$ die Übertragungsfunktionen für die Inputs an der Schnittstelle und $S_A(s)$ und $S_B(s)$ die restlichen Inputs des Gesamtsystems.

Diese Gleichungen zusammen mit den Gleichungen von dem 1-Knoten lassen sich zu der gesamten algebraischen Gleichung zusammensetzen:

$$\boxed{A(s)f_1(s) + S_A(s)i_A(s) - B^{-1}(s)f_1(s) + B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s) = 0} \quad (1)$$

Diese Gleichung gilt es zu lösen, um den Flow ($f_1(s)$) an dem 1-Knoten für einen gegebenen Bondgraphen zu erhalten. Später wird jedoch klar, dass es vielmehr wichtig ist, dass die Herleitung der Gleichung bei einem theoretischen Hyperbond der Gleichung 1 gleicht oder eine Approximation darstellt.

5.1.3 Theoretischer Hyperbond

Der Hyperbond lässt sich an der Energiekante einsetzen, was dazu führt, dass sich der Energieaustausch zwischen den Teilgraphen A und B mit einem rein lokalen Verfahren realisieren lässt (Abb. 18).



Abb. 18: Hyperbond eingesetzt

Aus der Abb. 18 wird ersichtlich, dass sich die Kausalität zwischen dem Teilgraphen A und dem Hyperbond umgekehrt hat. Diese Notwendigkeit ergibt sich aus der Tatsache, dass der Hyperbond an beide Teilgraphen Effort als Quelle abgibt (acting effort). Dabei wird der Flow aus den beiden Teilgraphen als Input für den HB genutzt (sensing flow). Dies ist eine Variante des theoretischen Hyperbonds. Eine andere Variante ergibt sich analog dazu, indem

der Effort gemessen wird und der Flow eingespeist wird (sensing effort, generating flow). Darüber hinaus ist ein Hyperbond denkbar, der über Kreuz effort und flow misst und generiert (Yoo 2007).

Im weiteren Verlauf werden wir uns zunächst auf den Sensing flow/Generating effort Hyperbond konzentrieren (Abb. 19). Wegen einer Analogie zwischen den beiden ersten Varianten sind alle mathematischen Herleitungen leicht ineinander überführbar.

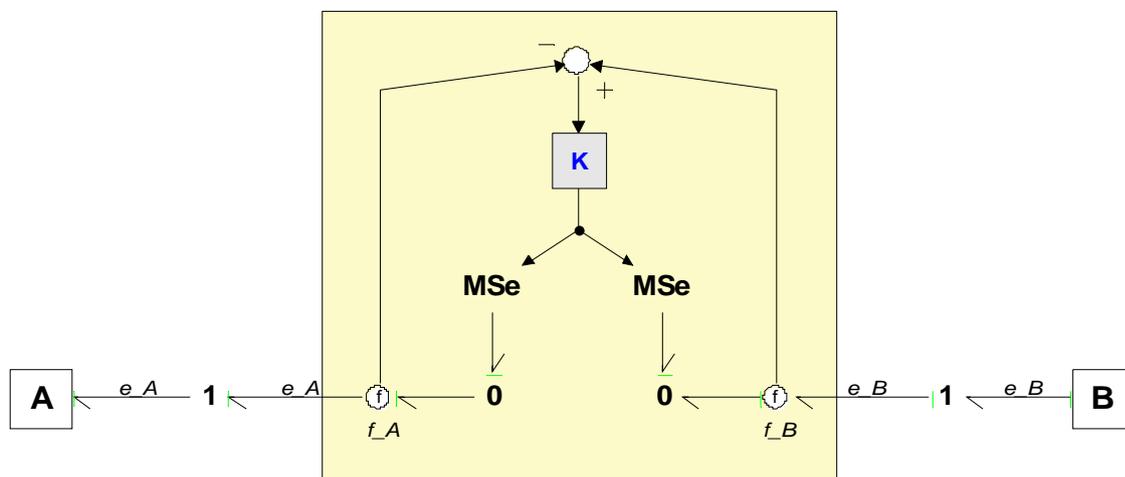


Abb. 19: Theoretischer Hyperbond (sensing flow, generating effort)

Die Gleichung für den Theoretischen Hyperbond lässt sich aus Abb. 19 ableiten:

$$e_A(t) = K(-f_A(t) + f_B(t))$$

Die Differenz der Flows an den Anschlüssen der beiden Teilgraphen wird errechnet und als Effort-Output multipliziert mit einer Proportionalitätskonstante K wieder an beide Teilgraphen abgegeben.

Mit Hilfe des Efforts soll also die Diskrepanz zwischen den Flows der beiden Teilgraphen

minimiert werden. Zu untersuchen ist, wie die Proportionalitätskonstante K sich auf die Regelung des Flows auswirkt.

These 1 besagt, dass sich jede Energiekante durch einen Theoretischen Hyperbond (Abb. 19) ersetzen lässt, ohne dass es zu Fehlern oder gar Instabilitäten führt.

Im Folgenden werden die Stabilität durch eine Passivitätsbetrachtung und der Fehler durch das Konvergenzverhalten der Laplace-transformierten Gleichung mit Hyperbond untersucht.

Untersuchung der Passivität

Ein Netzwerk mit zwei Ports und der initialen Energie $E(0)$ ist genau dann passiv, wenn gilt

$$\int_0^t e_1(\tau)f_1(\tau) + e_2(\tau)f_2(\tau)d\tau + E(0) \geq 0 \quad \text{für alle } t > 0 \quad (2)$$

für beliebige f_1 , f_2 , e_1 und e_2 , also nicht mehr Energie aus- als eintritt.

Gleichung 2 besagt, dass die Energie zu jedem Zeitpunkt Positiv sein muss. Das Element darf keine Energie produzieren.

Aus der Passivität [Adams ...] folgen einige praktische Eigenschaften:

- Ein Netzwerk, welches ausschließlich aus passiven Elementen besteht, ist ebenfalls passiv.
- Ein passives Netz ist absolut stabil.
- Die Passivität gilt sowohl für lineare als auch für nicht-lineare Elemente.

Der theoretische Hyperbond (Abb. 19) hat eine Energiekante zum Hyperbond hin, und die zweite vom Hyperbond weg. Somit muss der zweite Term im Integral negiert werden.

Außerdem hat der theoretische Hyperbond keine Energie $E(0)$ zum Anfangszeitpunkt. Die angepasste Gleichung lautet demnach:

$$\int_0^t -e_1(\tau)f_1(\tau) + e_2(\tau)f_2(\tau)d\tau \geq 0.$$

Der Hyperbond lässt sich durch die Gleichung $e(t) = K(-f_1(t) + f_2(t))$ beschreiben. Dabei ist $e(t) = e_1(t) = e_2(t)$.

$$\int_0^t -K(-f_1(\tau) + f_2(\tau))f_1(\tau) + K(-f_1(\tau) + f_2(\tau))f_2(\tau)d\tau \geq 0$$

$$K \int_0^t -(-f_1(\tau) + f_2(\tau))f_1(\tau) + (-f_1(\tau) + f_2(\tau))f_2(\tau)d\tau \geq 0$$

$$K \int_0^t f_1^2(\tau) - f_1(\tau)f_2(\tau) - f_1(\tau)f_2(\tau) + f_2^2(\tau)d\tau \geq 0$$

$$\underbrace{K}_{>0} \int_0^t \underbrace{(f_1(\tau) - f_2(\tau))^2}_{\geq 0} d\tau \geq 0$$

Da K stets positiv gehalten wird und das Integral durch das Quadrieren ebenfalls positiv ausfällt, ist die Gleichung für alle Eingangsfunktionen und die positive Proportionalitätskonstante K gültig. Daraus folgt also, dass der theoretische Hyperbond passiv ist.

Untersuchung der Stabilität

Falls der Bondgraph ausschließlich aus passiven Elementen besteht und der Hyperbond ebenfalls passiv ist, kann daraus geschlossen werden, dass das gesamte Systemverhalten absolut stabil ist.

Untersuchung des Fehlers

Von wesentlicher Bedeutung ist die Gleichheit des Modells ohne Hyperbond gegenüber dem gleichen Modell mit Hyperbond (These 1). Dafür wird in diesem Abschnitt die Laplace-Transformierte Gleichung des Modells mit zwei Teilgraphen und einem theoretischen Hyperbond hergeleitet und mit der Gleichung 1 aus Abschnitt 5.1.2 verglichen.

Um die gesamte Gleichung im Bildbereich zu errechnen, muss Abb. 19 genauer betrachtet werden. Die Gleichungen für die zwei 1-Knoten auf der linken und rechten Seite zwischen dem Hyperbond und den Teilgraphen haben folgende Gestalt:

$$e_A - e_A = 0$$

$$e_B - e_B = 0$$

Diese beiden Knoten lassen sich zwar kürzen, sie werden jedoch beibehalten, da sich hierdurch die Modellierung und das Aufstellen der Gleichung vereinfachen lässt. Die beiden Gleichungen der zwei Teilgraphen mit den angepassten Inputs und Outputs ergeben:

$$e_A(s) = A(s)f_A(s) + S_A(s)i_A(s)$$

$$f_B(s) = B(s)e_B(s) + S_B(s)i_B(s) \Leftrightarrow e_B(s) = B^{-1}(s)f_B(s) - B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s)$$

Diese Gleichungen in die Gleichungen für die 1-Knoten eingesetzt ergeben:

$$A(s)f_A(s) + S_A(s)i_A(s) - e_A(s) = 0$$

$$B^{-1}(s)f_B(s) - B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s) - e_B(s) = 0$$

Die verbleibenden $e_A(s)$ und $e_B(s)$ werden nun durch die Hyperbondgleichung aus Abschnitt 5.1.3 ersetzt:

$$A(s)f_A(s) + S_A(s)i_A(s) - K(-f_A(s) + f_B(s)) = 0$$

$$B^{-1}(s)f_B(s) - B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s) - K(-f_A(s) + f_B(s)) = 0 \Leftrightarrow f_B(s) = -\frac{B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s) - Kf_A(s)}{K - B^{-1}(s)}$$

Schließlich wird die zweite Gleichung in die erste eingesetzt und der Limes für $K \rightarrow$ unendlich gebildet:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \left[A(s)f_A(s) + S_A(s)i_A(s) - K(-f_A(s) - \frac{B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s) - Kf_A(s)}{K - B^{-1}(s)}) \right] =$$

$$A(s)f_A(s) + S_A(s)i_A(s) - B^{-1}(s)f_A(s) + B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s)$$

Aus dem Ergebnis wird ersichtlich, dass die Gleichung mit der Proportionalitätskonstante $K \rightarrow$ unendlich gegen die Gleichung ohne Hyperbond (Gleichung 1) konvergiert.

Des Weiteren lässt sich die Gleichung zu einer Gleichung mit einem Steady-State Fehlerterm umformulieren:

$$A(s)f_A(s) + S_A(s)i_A(s) - B^{-1}(s)f_A(s) + B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s) + \underbrace{\frac{S_B(s)i_B(s) - f_A(s)}{B^2(s)K - B(s)}}_{\text{fehlerterm}} = 0 \quad (3)$$

Beispiele

Diese theoretischen Überlegungen sollen an einigen praktischen Beispielen veranschaulicht werden.

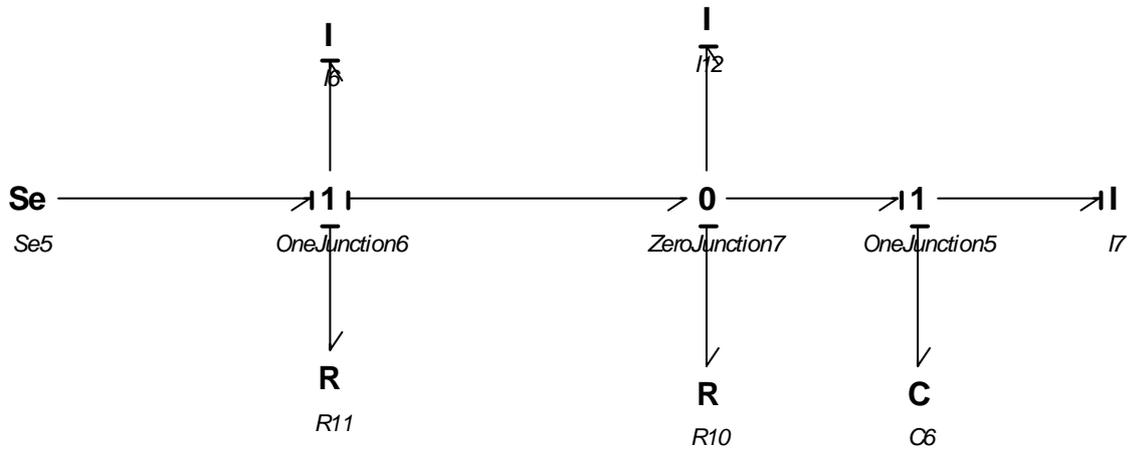


Abb. 20: Beispiel Bondgraph

Der Bondgraph aus Abb. 20 wird auf sein Systemverhalten hin untersucht. Es wird die Aufteilung in zwei Teilgraphen bestimmt und getrennt voneinander die Übertragungsfunktion errechnet (Abb. 21).

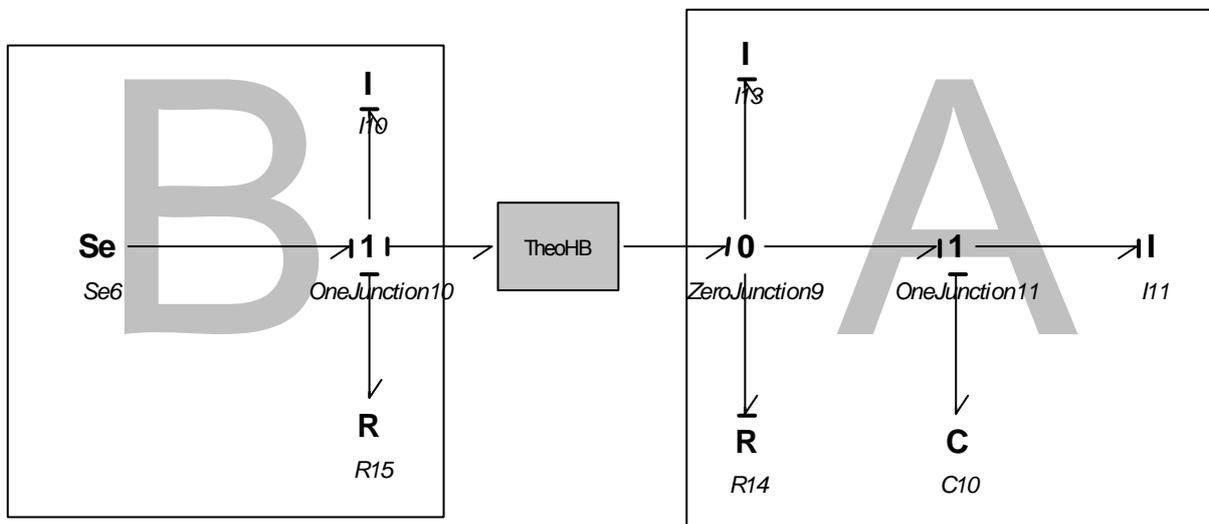


Abb. 21: Aufteilung in Teilgraphen A und B

In Abb. 21 wird der Bondgraph in zwei Teilgraphen aufgeteilt. Aus der Kausalität in Abb. 17 folgt, dass der Teilgraph A rechts und Teilgraph B links zuzuordnen sind. Im Folgenden werden die Übertragungsfunktionen für die beiden Teilgraphen errechnet:

oneJunction10:

$$e_1 = e_2 + e_3 + e_4; f_1 = f_2 = f_3 = f_4$$

Die entsprechenden Komponenten (Se6 Input, Induktion und Widerstand) eingesetzt ergibt:

$$Se6(s) = sf_4(s) + R_{15}f_4(s) + e_4(s) \Leftrightarrow f_4(s) = \frac{1}{s + R_{15}} Se6(s) - \frac{1}{s + R_{15}} e_4(s)$$

Daraus ergibt sich für Teilgraph B, dass $B(s) = -\frac{1}{s + R_{15}}$ und $S_B(s) = \frac{1}{s + R_{15}}$ sind.

oneJunction11:

$$e_7 = e_8 + e_9; f_7 = f_8 = f_9$$

Die entsprechenden Komponenten (Kondensator und Induktion) eingesetzt ergibt:

$$e_7(s) = \frac{1}{s} f_7(s) + R_{16}f_7(s) \Leftrightarrow f_7(s) = \left(\frac{1}{\frac{1}{s} + R_{16}} \right) e_7(s)$$

zeroJunction9:

$$f_4 = f_5 + f_6 + f_7; e_4 = e_5 = e_6 = e_7$$

Die entsprechenden Komponenten eingesetzt, sowie die Gleichung aus *oneJunction11* ergibt:

$$f_4(s) = \frac{1}{s} e_4(s) + \frac{1}{R_{14}} e_4(s) + \left(\frac{1}{\frac{1}{s} + R_{16}} \right) e_4(s) \Leftrightarrow e_4(s) = \frac{1}{\frac{1}{s} + \frac{1}{R_{14}} + \left(\frac{1}{\frac{1}{s} + R_{16}} \right)} f_4(s)$$

Daraus ergibt sich für den Teilgraphen A, dass $A(s) = \frac{1}{\frac{1}{s} + \frac{1}{R_{14}} + \left(\frac{1}{\frac{1}{s} + R_{16}} \right)}$. Da Teilgraph A

keine Inputs hat, fällt $S_A(s)$ auch weg.

Die Gleichung 1 nach $f_A(s)$ umgestellt ergibt

$$f_A(s) = \frac{-B^{-1}(s) * S_B(s)}{A(s) - B^{-1}(s)} i_B(s)$$

Nun kann $B(s)$, $S_B(s)$ und $i_B(s)$ in die Gleichung eingesetzt und vom Bild- in den Zeitbereich rücktransformiert werden.

$$f_A(s) = \frac{1}{\frac{1}{1 + \frac{1}{s} + \frac{1}{\frac{1}{s} + 1}} + (s+1)} * \frac{1}{s}$$

Dabei wird $i_B(s)$ durch den Einheitssprung $\frac{1}{s}$ in Bildbereich ersetzt. Die Lösung lautet demnach:

$$f_A(t) = e^{-t} (1 - 2e^{t/2} + e^t + t)$$

Die Gleichung 3 lässt sich ebenfalls nach $f_A(s)$ umstellen und in den Zeitbereich rücktransformieren:

$$f_A(s) = \frac{-KS_B(s)i_B(s)}{-A(s) - K + KA(s)B(s)}$$

Es ergibt sich für $K=5$ die Lösung:

$$f_A(t) = \frac{1}{36} e^{-t} (25 - 61e^{6t/11} + 36e^t + 30t)$$

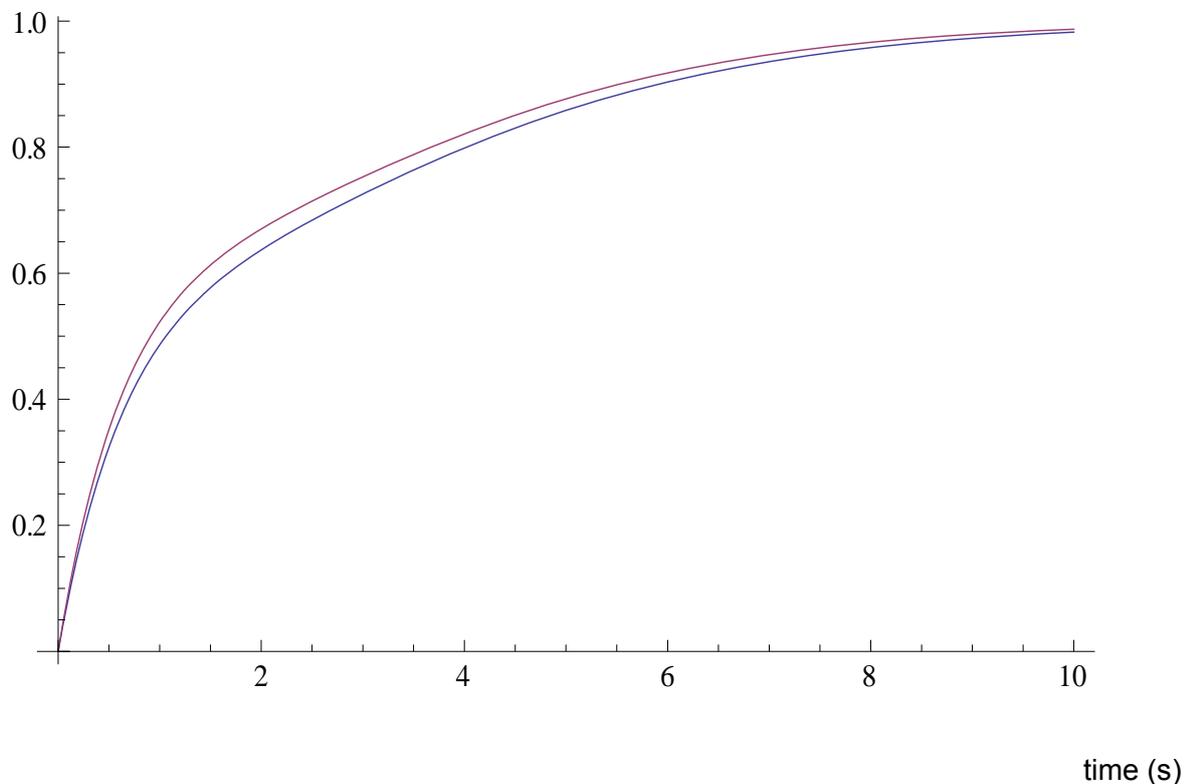


Abb. 22: Errechneter Flow (lila: ohne Hyperbond; blau: mit Hyperbond bei K=5)

Aus Abb. 22 wird deutlich, dass bereits bei K=5 die Approximation relativ gut ist, und der Fehler bei einer Sprungantwort gering ausfällt.

5.1.4 Multi-Hyperbonds

Bisher wurde lediglich eine Energiekante eines Systems durch einen theoretischen Hyperbond ersetzt. In Mixed Reality Anwendungen kann es aber durchaus zu komplexeren Szenarien kommen, weshalb in These 1 auch von beliebig vielen Energie-Kanten ausgegangen wurde. So kann der Real-Reality Teil an einen Virtual-Reality Teil durch mehrere Energiekanten anknüpfen. Desweiteren kann dann der Virtual-Reality Teil erneut zu

einem anderen Real-Reality Teil führen. Es muss also untersucht werden, wie das Gesamtverhalten von Systemen mit mehreren Hyperbonds aussieht.

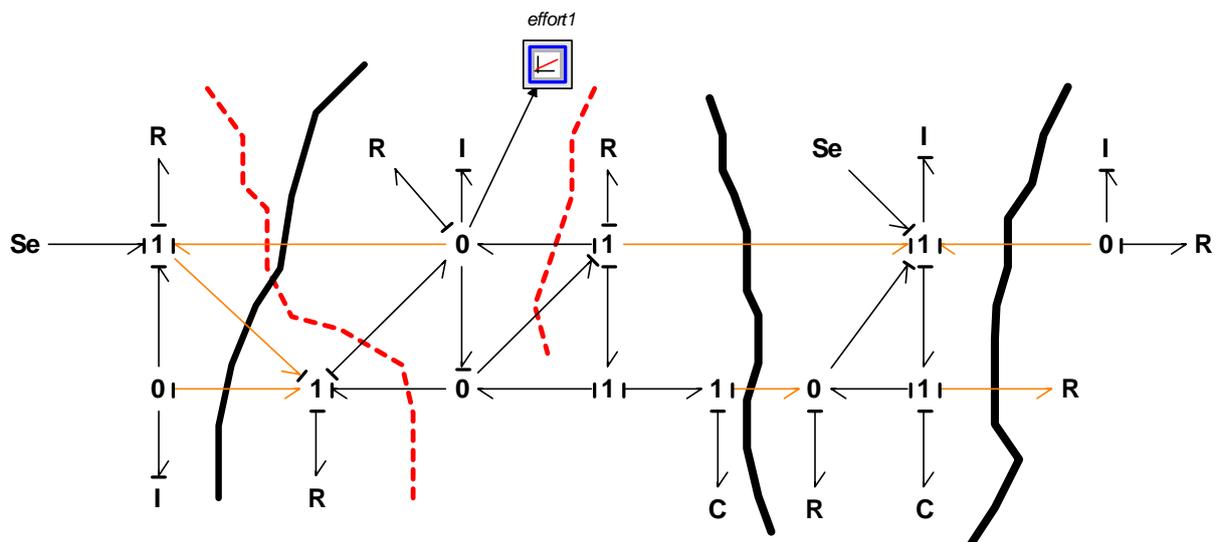


Abb. 23: Unterteilung in mehreren theoretischen Hyperbonds

Abb. 23 zeigt ein Beispiel mit mehreren Mixed-Reality-„Schnitten“. Es lassen sich daraus schon wichtige Regeln schließen, um ein legales Mixed-Reality-Szenario zu erhalten:

- Der Schnitt muss immer durch den gesamten Bondgraphen führen. Die Teilgraphen dürfen also über keine weitere Energiekante, außer denjenigen, die geschnitten werden, miteinander verbunden sein. Nur so entstehen komplett disjunkte Teilgraphen, die auch mathematisch getrennt voneinander untersucht und schließlich mit Hyperbonds verbunden werden können.
- Es können beliebig viele Schnitte erfolgen, jedoch dürfen sich die Schnitte nicht schneiden.

Die roten Linien in Abb. 23 zeigen zwei nicht zulässige Schnitte. Der rechte Schnitt führt nicht durch den kompletten Bondgraphen. Die untere Energiekante wird nicht geschnitten. Dies verletzt die erste Regel für legale Mixed-Reality-Szenarien. Der linke, rot gestrichelte, Schnitt kreuzt einen anderen Schnitt. Dies verletzt die zweite Regel, da keine klare Trennung der Umgebungen mehr möglich ist. Die schwarzen Linien hingegen bilden ein legales Mixed-Reality-Szenario, da sie keine Regel brechen.

Es lassen sich also grundlegend zwei verschiedene Arten von Hyperbonds definieren:

- *Parallel geschaltete Hyperbonds* sind diejenigen, die durch einen einzigen Schnitt entstehen.
- *Seriell geschaltete Hyperbonds* sind diejenigen, die durch mehrere Schnitte entstehen.

Die Konvergenz eines Bondgraphen mit seriell geschalteten Hyperbonds lässt sich mit Hilfe eines Induktionsbeweises ableiten. In Abschnitt 0 wurde bereits gezeigt, dass ein Bondgraph mit zwei Teilgraphen A und B und einem Hyperbond korrekt konvergiert. Dies gilt als Induktionsanker. Die Induktionsannahme lautet, dass sich beliebig viele Hyperbonds zu einem Teilgraphen A zusammenfassen lassen und korrekt funktionieren. Der Induktionsschluss ergibt sich analog zum Induktionsanker, indem der letzte Hyperbond die Teilgraphen A und B aufspaltet.

Bei parallel geschalteten Hyperbonds lässt sich der Beweis nicht ohne weiteres führen. Wie man bereits aus Abb. 23 entnehmen kann, sind die Kausalitäten zwischen den parallel geschalteten Hyperbonds gemischt, d.h. es lässt sich nicht eindeutig festlegen, welchen Input die Teilgraphen haben. Z.B. gibt es beim linken Schnitt zwei Effortinput und einen Flowinput nach links. Somit kann man den Konvergenzbeweis aus Abschnitt 0 nicht

ohne weiteres mit Matrizen darstellen. Die verschiedenen Gleichungen müssen vielmehr einzeln behandelt werden und lassen sich somit nicht ohne weiteres verallgemeinern.

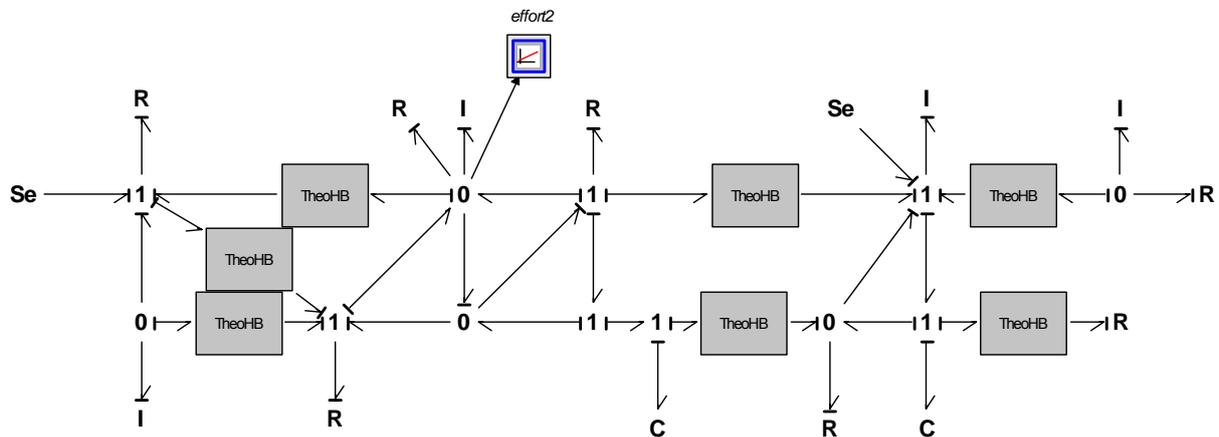


Abb. 24: Theoretische Hyperbonds eingesetzt

In Abb. 24 werden die Theoretischen Hyperbonds an den entsprechenden Energiekanten eingesetzt. Es ergibt sich also ein Szenario mit sieben Hyperbonds. Um die Korrektheit zu testen, wird an dem mittleren 0-Knoten der Effort des Systems ohne Hyperbond gegenüber dem System mit Hyperbonds verglichen.

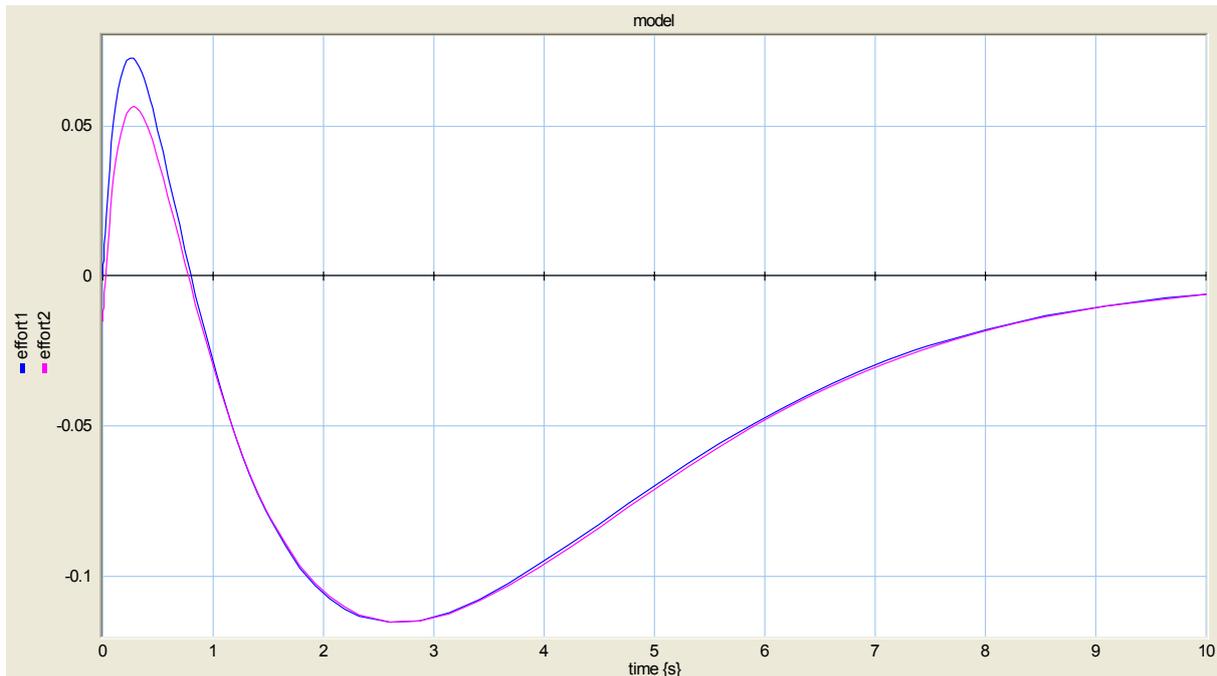


Abb. 25: Vergleich der Bondgraphen

Abb. 25 zeigt die Efforts der beiden Bondgraphen für $K=30$ bei allen Hyperbonds.

Fazit

Der Hyperbond ändert die Kausalität des Bondgraphen an der Energiekante, die durch den Hyperbond ersetzt wird. Dies kann unter Umständen zu numerisch nicht lösbaren Zuständen führen.

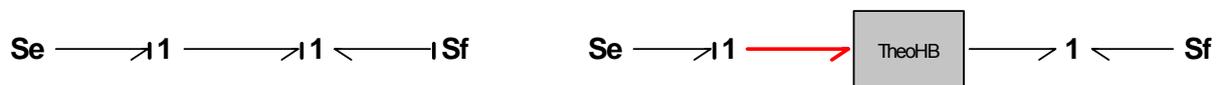


Abb. 26: Bondgraph (links), Hyperbond eingesetzt mit nicht lösbarer Kausalität (rechts)

Abb. 26 zeigt einen einfachen formal möglichen, aber unrealistischen Bondgraphen, der sich ausschließlich aus einer Effort- und Flowquelle (bzw. Spannungs- und Stromquelle) zusammensetzt. Setzt man nun den Hyperbond zwischen die Quellen, so ergibt es einen nicht-zulässigen Kausalitätszustand. Der Hyperbond (sensing flow, generating effort) hat an

beiden Seiten einen *fixed effort out*, jedoch muss der linke 1-Knoten eine flow-Kausalität erhalten. Die rote Energiekante gibt also einen Kausalitätskonflikt an, da an dem linken 1-Knoten der Flow nicht berechenbar ist. Dieses Problem lässt sich auch nicht durch die anderen Hyperbondvariante (*sensing effort, generating flow*) lösen, da in dem Fall der Effort auf der rechten Seite nicht berechenbar ist und es dann dort zu einem Kausalitätskonflikt führt. Hier muss allerdings zwischen zwei Arten der Kausalität unterschieden werden: einer physikalischen und einer numerischen. Das Beispiel in Abb. 26 zeigt einen physikalischen Widerspruch. Eine Spannungsdifferenz an einem leeren Netz (nur 1-Knoten) ist nicht zulässig. Der Fluss würde unendlich und ließe sich auf diese Weise nicht steuern. Für nichtleere Teilsysteme A und B kann dieser physikalische Konflikt nicht auftreten. Der oben gezeigte Effekt kann jedoch als numerischer Effekt auch bei nichtleeren Teilsystemen A und B auftreten. Er kann dann zu Schwierigkeiten bei der numerischen Simulation eines Hyperbond Systems führen. Diese numerischen Schwierigkeiten lassen sich in der Regel durch Einführung eines kleinen scheinbaren Widerstandes beheben.

Die These 1 muss in dem Sinne erweitert werden, dass ein Hyperbond nur zwischen nichtleeren (mindestens ein R-, C-, oder I-Element) Teilsystemen eingesetzt werden kann. Bezüglich der Gleichheit der Systeme muss abschwächend festgestellt werden, dass für jede vorgegebene Fehlerschranke ein theoretischer Hyperbond gefunden werden kann, der diese Genauigkeit liefert. Ob dieses hybride System dann auf einem digitalen Rechner mit begrenzter Zahlendarstellung simuliert werden kann, ist eine weitere Frage. These 1 lässt sich nun neu formulieren.

These 1'

Gegeben sei ein System S, das durch einen Bondgraphen BG mit R-, C-, I-Elementen beschrieben wird. Dann kann eine Energie-Kante, die das System in zwei disjunkte, nichtleere Teilsysteme teilt, durch einen Hyper-Bond ersetzt werden, der das Gesamtverhalten des Systems innerhalb einer vorgegebenen Fehlertoleranz garantiert. Dieser Hyper-Bond enthält einen Mechanismus, welcher zwei getrennte physikalische Leitungen über einen Regelkreis mit Sensoren und Generatoren so verbindet, dass die Kontinuität des Energieflusses erhalten bleibt.

Bei mehrfachen Verbindungen zwischen zwei Teilsystemen kann diese Aussage mit dem bisherigen Ansatz nicht allgemein begründet werden. Hier ergibt sich also weiterer Forschungsbedarf.

5.1.5 Der Einfluss von Diskretisierung und Zeitverzögerung

Für den Implementierten Hyperbond, der sowohl die Zeitverzögerung also auch die Diskretisierung mitberücksichtigt, gehen wir zunächst ebenso vor, wie bei dem theoretischen Hyperbond.

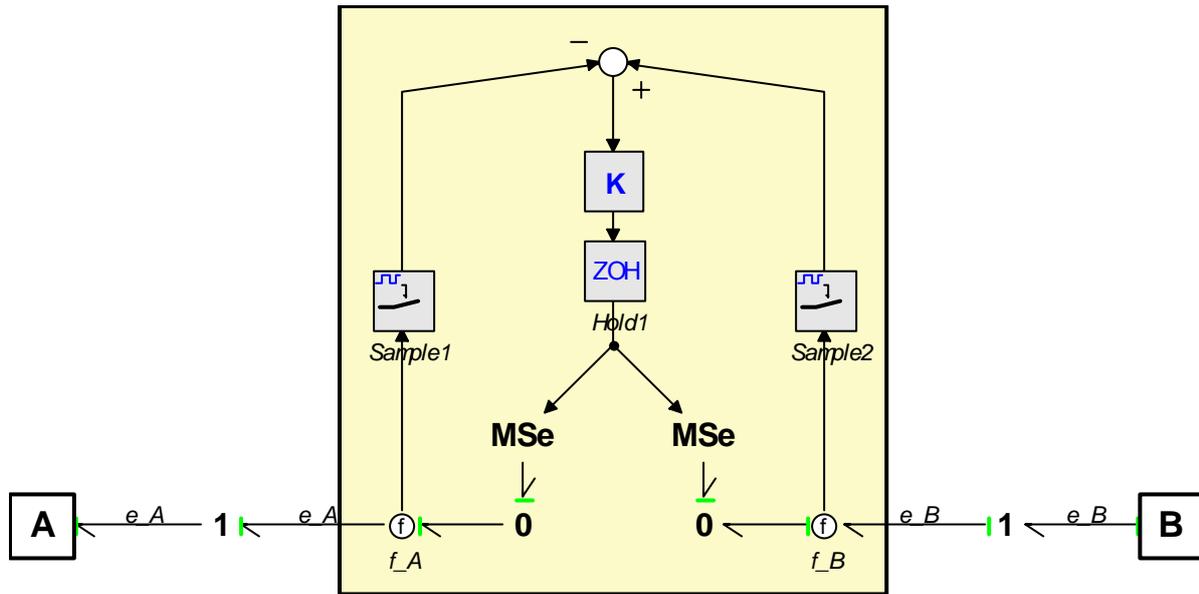


Abb. 27: Implementierter Hyperbond mit Teilgraphen A und B

Der Regelalgorithmus für den Hyperbond aus Abb. 27 sieht wie folgt aus:

$$e_{A,k} = K * (-f_{A,k-1} + f_{B,k-1})$$

der Ausgang $e_{A,k}$ wird also zeitverzögert ($k-1$) von den beiden Eingängen f_A und f_B

bestimmt. Die Z-Transformation dieses Regelalgorithmus lautet demnach:

$$e(z) = K * (-z^{-1} * f_A(z) + z^{-1} * f_B(z))$$

dabei gibt z^{-1} die Zeitverzögerung um einen Schritt an. Schließlich muss der Regelalgorithmus um das Halteglied (Zero-Order-Hold) erweitert werden, welches den Ausgang in ein kontinuierliches Signal umwandelt:

$$e(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} K * e^{-Ts} (-f_A(z) + f_B(z))$$

Linker und rechter Teilgraph behalten dieselben Gleichungen, wie schon im Abschnitt 5.1.3:

$$A(s)f_A(s) + S_A(s)i_A(s) - e_A(s) = 0$$

$$B^{-1}(s)f_B(s) - B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s) - e_B(s) = 0$$

Wird nun die diskretisierte Hyperbondgleichung eingesetzt, so ergibt sich:

$$A(s)f_A(s) + S_A(s)i_A(s) - \frac{1 - e^{-Ts}}{s} K * e^{-Ts} (-f_A(z) + f_B(z)) = 0$$

$$B^{-1}(s)f_B(s) - B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s) - \frac{1 - e^{-Ts}}{s} K * e^{-Ts} (-f_A(z) + f_B(z)) = 0$$

Die zweite Gleichung enthält sowohl die kontinuierliche Funktion $f_B(s)$ als auch die diskretisierte Funktion $f_B(z)$. Bei dem theoretischen Hyperbond war der nächste Schritt, diese zwei Funktionen zusammenzuführen, da beim theoretischen Hyperbond die Funktionen beide kontinuierlich sind. Leider ist dies bei dem Implementierten Hyperbond nicht ohne weiteres möglich, da die z-Transformation mit einem Informationsverlust einhergeht und nicht umkehrbar ist. Aus diesem Grund müssen die Gleichungen für eine weitergehende Analyse konkretisiert werden.

Dabei verwenden wir den Closed-Loop-Ansatz der Regelungstechnik und spezifizieren ihn für jeweilige Klassen von Problemen.

5.2 Praktische Untersuchung zum Übertragungsverhalten von Hyper-Bonds (AP1.2)

Ziel der Untersuchung ist es, am Beispiel ausgewählter Hyper-Bonds den Gültigkeitsbereich von These 2 aufzuzeigen.

In der praktischen Implementierung einer HB Verbindung muss ein diskretes Modell mit Integration realitätsnaher Komponenten, wie Sensoren, Generatoren, A/D-D/A-Wandler im Computer realisiert werden. Dafür wird die theoretische Analyse von Passivität, Stabilität und Fehler mit entsprechenden Parametern realitätsnaher Komponenten um ein diskretes HB Modell erweitert.

5.2.1 Untersuchung der Passivität mit 20-sim

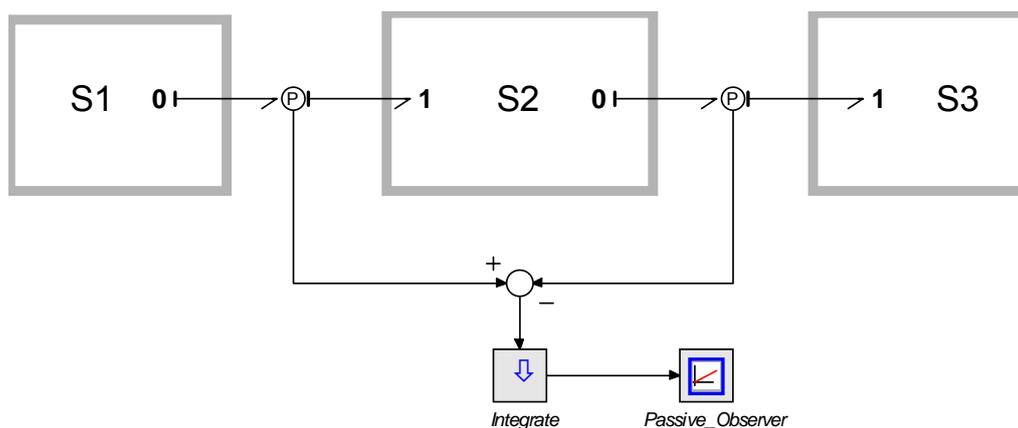
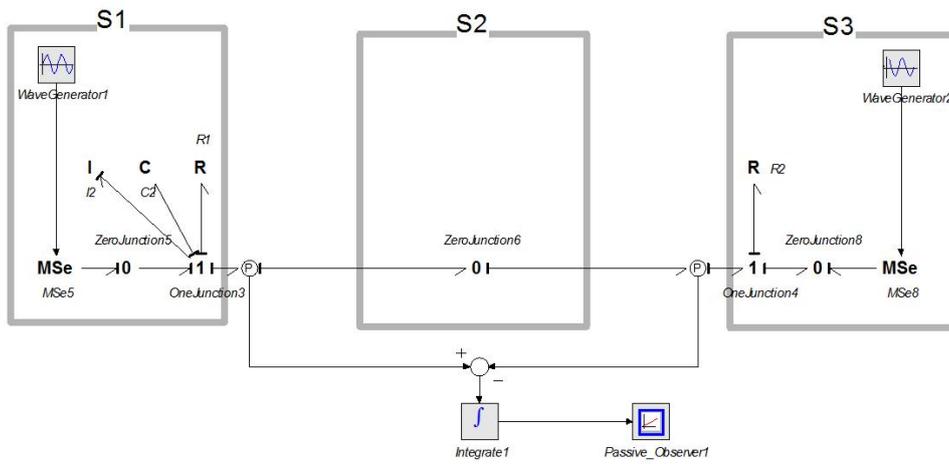


Abb. 28 : Passive Observer in Bond Graph Model

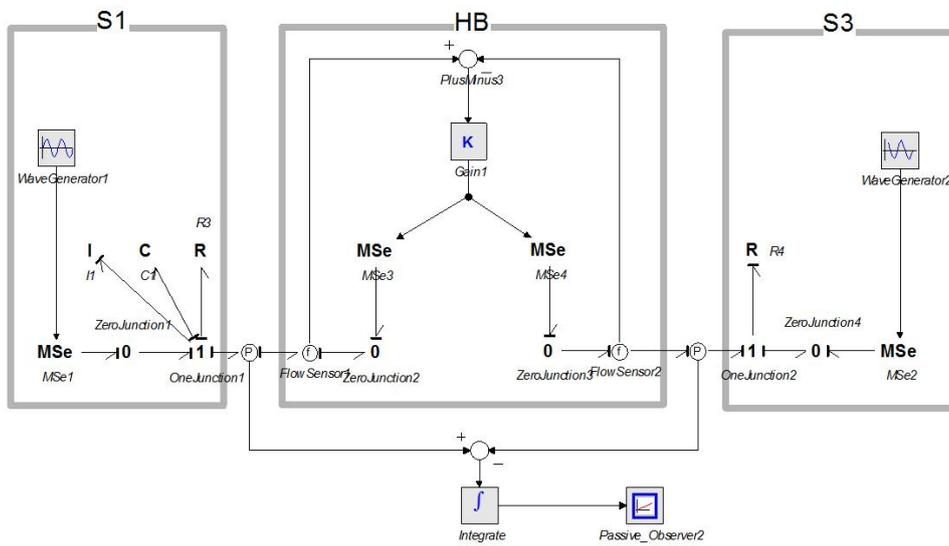
Ein passiver Beobachter (PO) für den Energiefluss zwischen den beiden Leistungs-Ports von S2 wird in Abb. 28 definiert. Epo sei das Integral der Energieflussdifferenz. Die gespeicherte Anfangsenergie von S2 sei Null. S2 ist dann und nur dann passiv wenn $Epo(t) \geq 0$, also S2 Energie verbraucht, und aktiv, wenn $Epo(t) < 0$, also S2 Energie erzeugt.

Untersuchung der Passivität bei einem theoretischen HB

Das folgende Beispiel zeigt, dass der theoretische Hyper-Bond passiv ist. In Abb. 29a wird ein System gezeigt, welches drei Subnetze hat: S1, S2, S3. Wie leicht ersichtlich ist, ist die Energie von S2 immer Null. Das System S2 ist passiv. Andererseits zeigt Abb. 29b für den theoretischen Hyper-Bond ebenfalls $E_{po} \geq 0$, er ist also ebenfalls passiv. Die Beziehung zwischen K und der akkumulierten Energie kann theoretisch abgeleitet und auch in Simulationsläufen gezeigt werden. Für den implementierten Hyper-Bond ergibt sich jedoch eine andere Situation. Hier kann, wie im Folgenden gezeigt, eine scheinbare aber doch wirksame Aktivität auftreten.



(a) a system which has three subnets



(b) connection between S1 and S3 via theoretical HB

Abb. 29: Passive observer with bond graph model

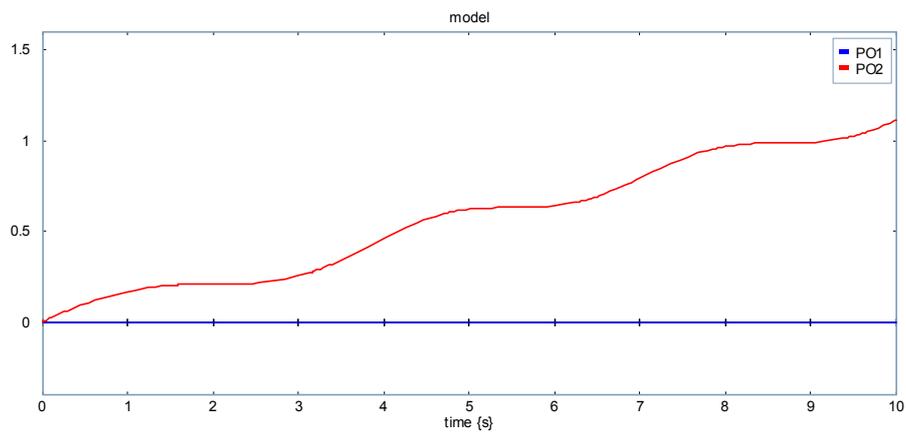


Abb. 30: PO1 bei System a und PO2 bei System b für gain K = 1

Beziehung zwischen Energie E_{p_o} und gain K beim theoretischen Hyper-Bond

Die Ergebnisse von Simulationen mit dem theoretischen HB zeigen, dass je größer K, desto weniger passive Energie von S2. Abb. 30 zeigt die Entwicklung von E_{p_o} für $K=1$, Abb. 31 die für $K=1000$. Dieses Ergebnis stimmt mit der bekannten Tatsache überein, dass je größer K, desto kleiner der *Steady-State* Fehler ist.

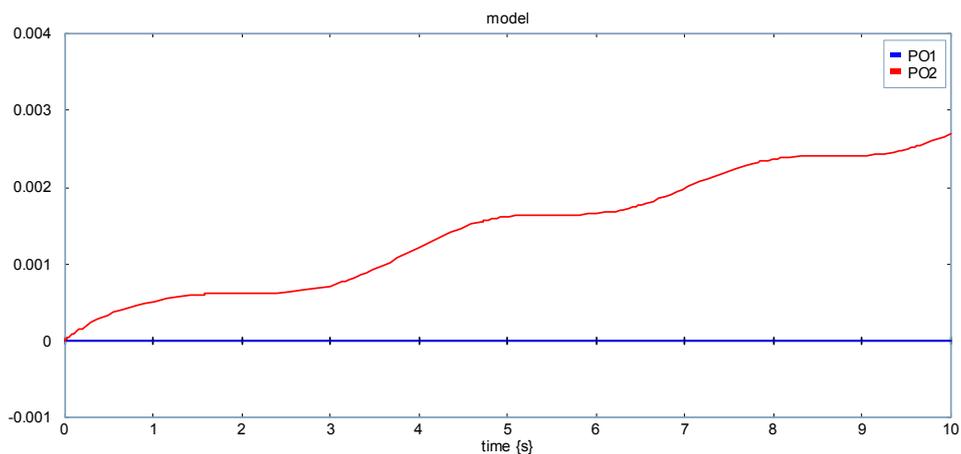


Abb. 31: PO1 und PO2 für gain K = 1000

Passivität beim implementierten HB

Das folgende Beispiel (Abb. 32) zeigt, dass der implementierte HB aktiv ist (Abb. 33 und Abb. 34), da ein $E_{po} < 0$ existiert. Es stellt sich die Frage, welcher Parameter dafür verantwortlich ist. Es ist bekannt [2,3], dass Systeme, die auf Messungen angewiesen sind, typischerweise aktiv sind. Die Sampling-Rate der A/D und D/A Komponenten im betrachteten System führt zu einem Verlust in den Signalen, der zu einer scheinbaren Aktivität in dem Subnetz HB und damit zur Instabilität führen kann.

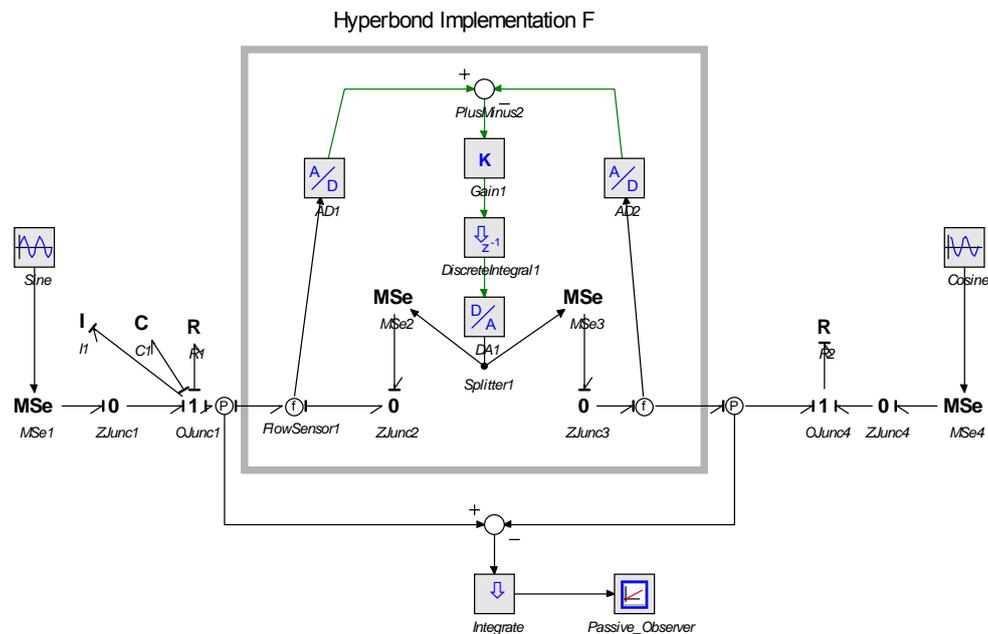


Abb. 32: Implementierter HB mit einem passiven Beobachter (Beispiel 1)

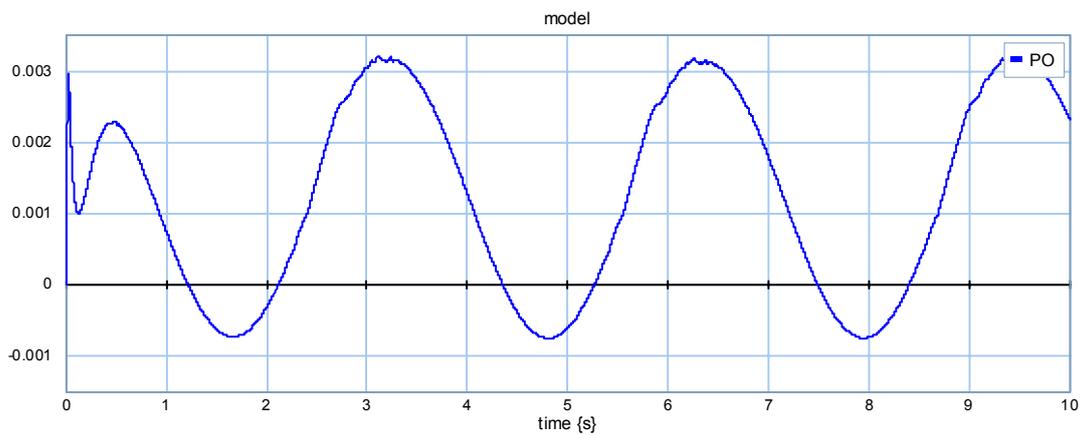


Abb. 33: Passive Beobachtung für K=100

Mit Abb. 34 ist eine interessante Tendenz erkennbar. Bei gleicher Sampling Rate ist der HB potentiell umso aktiver, je größer K ist. Aus den oben angestellten Fehlerbetrachtungen sollte K möglichst groß sein, aus den hier erfolgten Stabilitätsbetrachtungen möglichst klein.

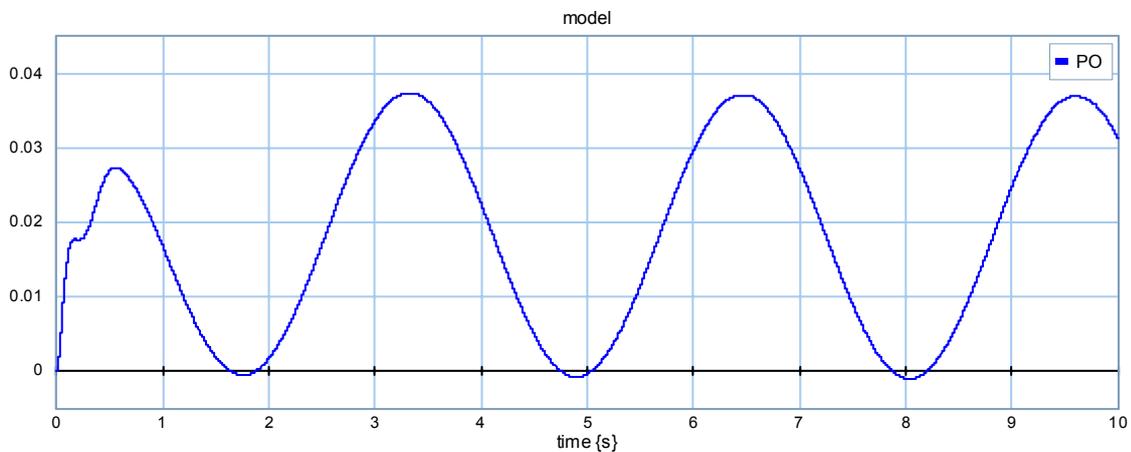


Abb. 34: Passive Beobachtung für K=10

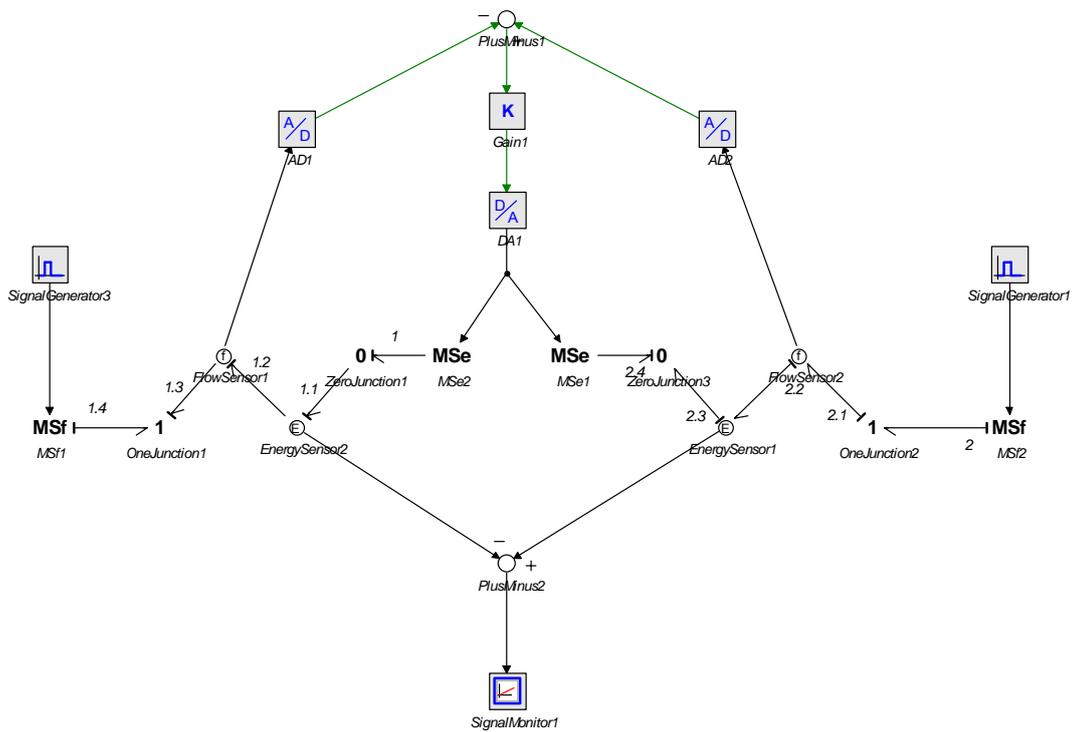


Abb. 35: Implementierter HB mit einem passiven Beobachter

Der Implementierte Hyperbond (Abb. 35) zeichnet sich durch die Analog/Digital- und Digital/Analog-Wandler aus. Durch die Zeitverzögerung, die bei dieser Wandlung entsteht, kann der Beweis der Passivität nicht erfolgen. Es stellt sich sogar durch ein Gegenbeispiel heraus, dass der Hyperbond aktiv ist. Dabei wählen wir zwei Impulsfunktionen, und diskretisieren im 0,9 sek Intervall.



Abb. 36: Passive Beobachtung (Beispiel 2)

Der SignalMonitor1 überwacht die Energie, die über die Ein- und Ausgänge fließt. Die zwei Impulse haben unterschiedliche Dauer. Signal1 ist vier Sekunden und Signal3 eine Sekunde. Dadurch, dass das Intervall der Diskretisierung auf 0.9 gesetzt wird, wird Signal3 erst bei 1,8 Sekunden erfasst. Daraus folgt, dass der EnergieSensor2 lange Zeit negative Energie liefert, das auch schließlich zu der negativen Gesamtenergie entscheidend beiträgt (Abb. 36). Es wird deutlich, dass die Gesamtenergie sich stets im negativen Bereich aufhält, sodass laut Definition keine Passivität gewährleistet ist.

5.2.2 Untersuchung der Stabilität

Das Ergebnis der Passivitätsuntersuchung des implementierten HBs zeigt, dass die Sampling-Rate eine wichtige Rolle für die Systemstabilität spielt. Das heißt, die optimale Regelung von Parametern, wie Gain K und Sampling-Rate des HB müssen gefunden werden. Dafür wird die folgende Closed-Loop Feedback System Analyse angewendet.

Closed-Loop Feedback System Analyse

Ein Energienetzwerk (Abb. 37 links), das aus zwei Teilsystemen A und B besteht, die über eine Energiekante verbunden sind, kann durch ein entsprechendes Signal-Block-Diagramm (Abb. 37 rechts) repräsentiert werden, indem die beiden Energieparameter Effort und Flow zwischen A und B als gekoppelte Input/Output-Größen interpretiert werden. Es lässt sich dann das System A-B als geschlossener Regelkreis analysieren (Closed-Loop Feedback System).

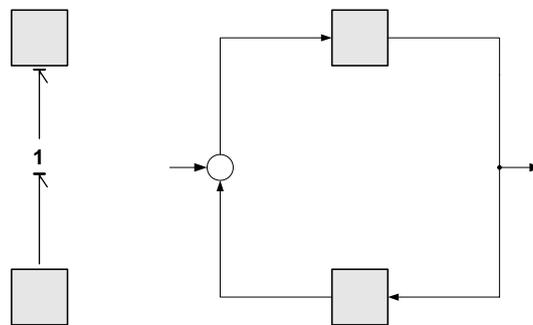


Abb. 37: Energienetzwerk als Bond-Graph und Signal-Block-Diagramm

Die Übertragungsfunktion eines derartigen Systems ist:

$$T(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{A'(s)}{1 + A'(s)B(s)} \quad (4)$$

Die Pole von Gleichung 4 müssen innerhalb der abgeschlossenen linken komplexen Halbebene (LHE-Linke Halbebene) liegen, damit das System stabil ist. Die charakteristische Gleichung ist $1 + A'(s)B(s) = 0$. Wenn ein HB zwischen Teilnetzwerk A und B eingefügt ist, kann das Teilnetzwerk A und der Hyperbond als Teilnetzwerk A' betrachtet werden.

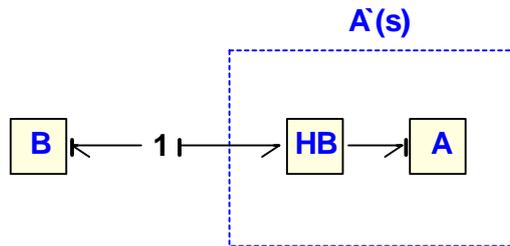


Abb. 38: Energienetzwerk mit Hyperbond

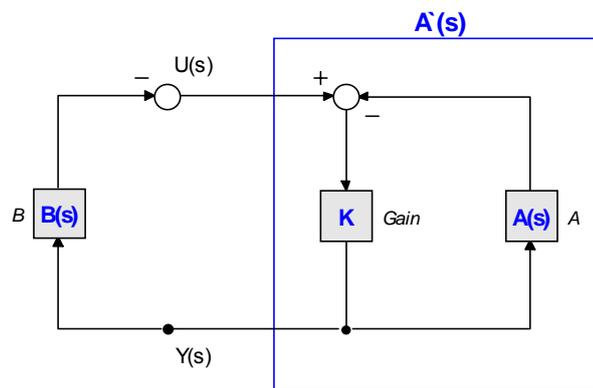


Abb. 39: Signal-Block Diagramm für das Energienetzwerk in Abb. 38

$$T(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{A'(s)}{1 + A'(s)B(s)} \quad (5)$$

$$A'(s) = \frac{K}{1 + KA(s)} \quad (6)$$

$$T(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\frac{K}{1 + KA(s)}}{1 + \frac{KB(s)}{1 + KA(s)}} = \frac{K}{1 + K\{A(s) + B(s)\}} \quad (7)$$

Die Pole von GL 7 müssen innerhalb der abgeschlossenen linken Halbebene liegen wenn das System stabil sein soll. Die charakteristische Gleichung ist $1 + K\{A(s) + B(s)\} = 0$.

Ein kontinuierliches System kann in ein diskretes System durch folgende Transformationen überführt werden:

'zoh'	(Default) Zero-Order-Hold Methode
'tustin'	Tustin's Methode
'forward'	Forward Rectangular Methode.
'backward'	Backward Rectangular Methode.
'foh'	First-Order-Hold method.
'matched'	Matched Pole-Zero method.

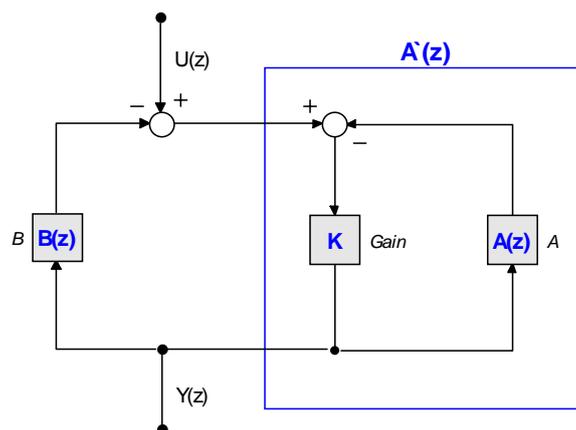


Abb. 40: Diskrete Repräsentation von Abb. 39

Die Umwandlung von GL 7 mit Hilfe einer z-Transformation führt zu

$$T(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{\frac{K}{1 + KA(z)}}{1 + \frac{KB(z)}{1 + KA(z)}} = \frac{K}{1 + K\{A(z) + B(z)\}} \quad (8)$$

Die Pole von Eq. 8 müssen innerhalb des Einheitskreises in der z-Ebene liegen, damit das

System stabil ist. Die charakteristische Gleichung ist $1+K\{A(z)+B(z)\} = 0$.

5.2.3 Beispiel 1 (ohne Abtastung)

$R1=100$, $Gain=Gain1=1$, $R2=1$, $I1=0.05$, $C1=0.05$

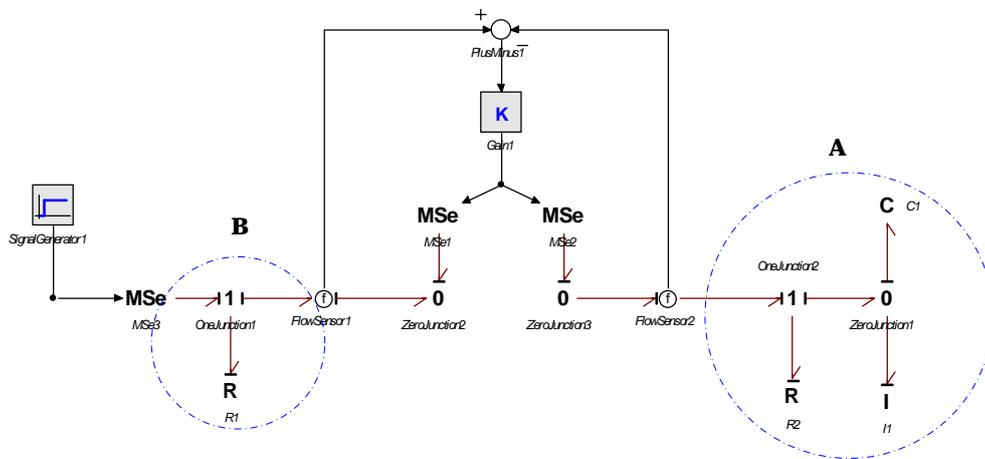


Abb. 41: Ein Beispiel Teilgraph B-HB-A

Das Signal-Block-Diagramm ist

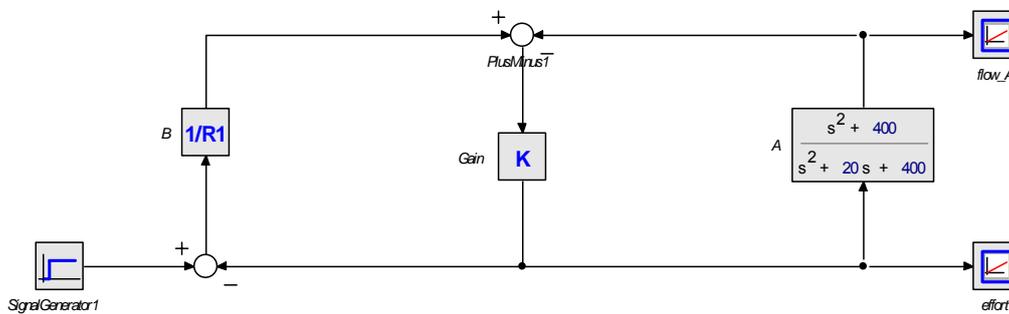


Abb. 42: Signal-Block Diagramm

Das B-HB-A System hat einen closed-loop mit den folgenden analytisch berechenbaren Polen

$$A(s) = \frac{F_A(s)}{E_A(s)} = \frac{s^2 + 400}{s^2 + 20s + 400}, \quad B(s) = \frac{F_B(s)}{E_B(s)} = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{100}$$

Aus Eq. 7, folgt die charakteristische Gleichung

$$1 + K\{A(s) + B(s)\} = 0$$

$$1 + K \left\{ \frac{s^2 + 400}{s^2 + 20s + 400} + \frac{1}{100} \right\} = 0$$

$$(100 + 101K)s^2 + (2000 + 20K)s + 80000 + 400K = 0 \quad (9)$$

Für K=1 in Eq.9 ist das System stabil. Seine charakteristische Gleichung ist

$$201s^2 + 2020s + 80400 = 0 \quad (10)$$

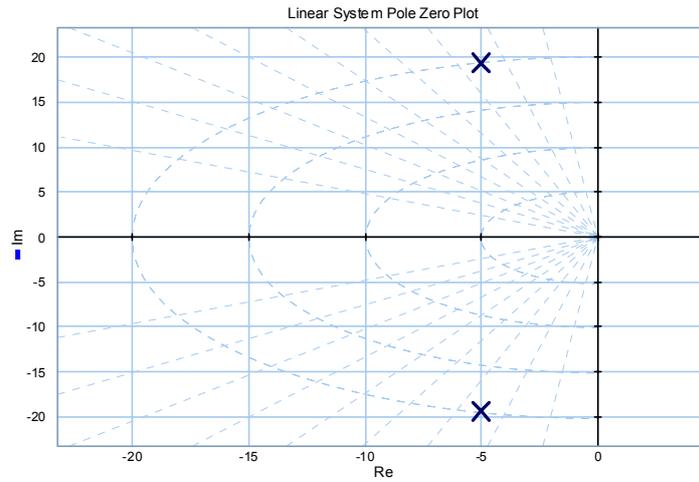


Abb. 43: Root Locus mit K=1

5.2.4 Beispiel 2 (mit Abtastung)

Das Modell aus Beispiel 1 wurde mit folgenden Elementen diskretisiert: R1=100, Gain K=1, R2=1, I1=0.05, C1=0.05, Sampling time=0.01

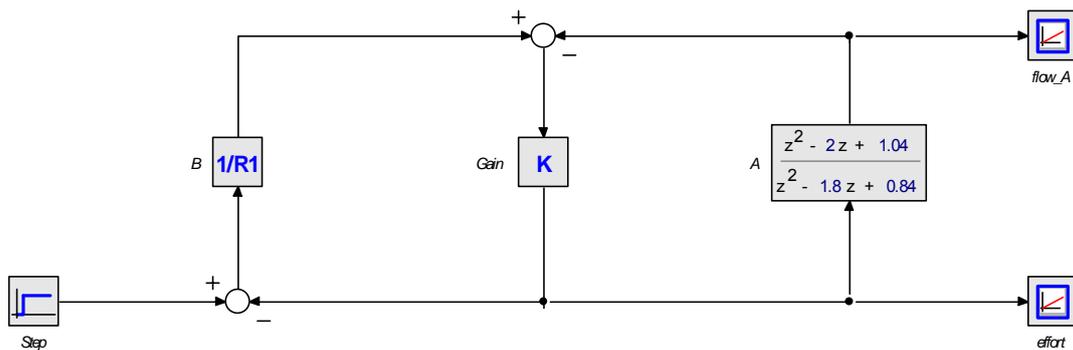


Abb. 44: Diskrete Repräsentation von Beispiel 1

$$A(z) = \frac{F_A(z)}{E_A(z)} = \frac{z^2 - 2z + 1.04}{z^2 - 1.8z + 0.84}, \quad B(z) = \frac{F_B(z)}{E_B(z)} = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{100}$$

From Eq. 7, the characteristic equation of this system is

$$1 + K\{A(z) + B(z)\} = 0$$

$$1 + K \left\{ \frac{z^2 - 2z + 1.04}{z^2 - 1.8z + 0.84} + \frac{1}{100} \right\} = 0$$

$$(100 + 101K)z^2 - (180 + 201.8K)z + 84 + 104.84K = 0 \quad (11)$$

For example, when $K=1$ in Eq.11, the system is stable and the characteristic equation of the system is as follows

$$201z^2 - 381.8z + 188.84 = 0 \quad (12)$$

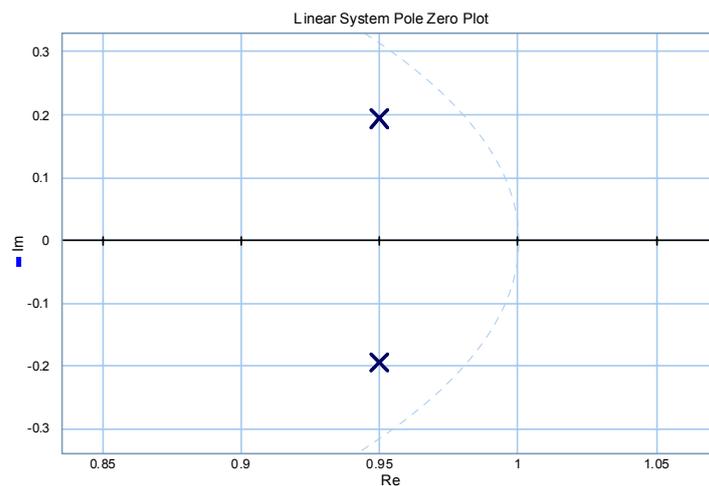


Abb. 45: Root Locus mit K=1

5.2.5 Beispiel 3 (Instabilität bei Abtastung)

Wenn $K=10$ in Eq.11, ist das System instabil

Characteristic Equation:

$$1110z^2 - 2198z + 1132.4 = 0$$

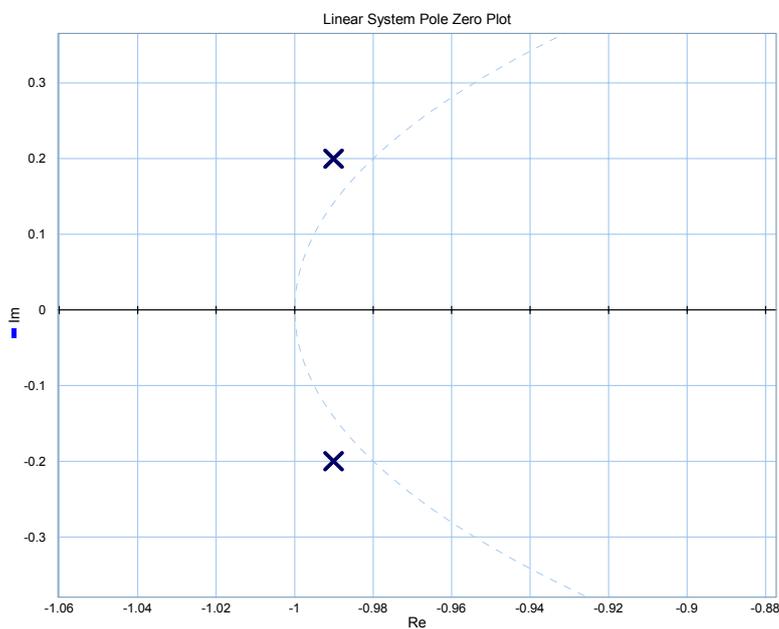


Abb. 46: Root Locus mit $K = 10$. Instabilität

5.2.6 Untersuchung des Fehlers

Aus den obigen Untersuchungen zur Passivität und Stabilität wird deutlich, dass ein System mit einem implementierten Hyperbond durchaus instabil werden kann und die Parameteroptimierung für „Gain K “ und „Sampling Time T “ wichtig ist, um den Fehler im Toleranzbereich zu halten. Dazu zeigt dieser Abschnitt eine Lösung mit einem PID Regler. Das folgende Beispielsystem in Abb. 47 hat einen implementierten Hyperbond; es wird ein

idealer Sampler als A/D-Wandler betrachtet, um die Quantifizierungsfehler beim Sampling zu ignorieren; $R1=100$, Gain $K=1$, $R2=1$, $I1=0.05$, $C1=0.05$ und Sampling Time=0.01 sec. Das System mit Gain1=1 ist zwar stabil, aber der Unterschied der Signale am FlowSensor1 gegenüber FlowSensor2 wird in Abb. 48 gezeigt. Der Unterschied bedeutet einen Übertragungsfehler der Hyperbond Verbindung.

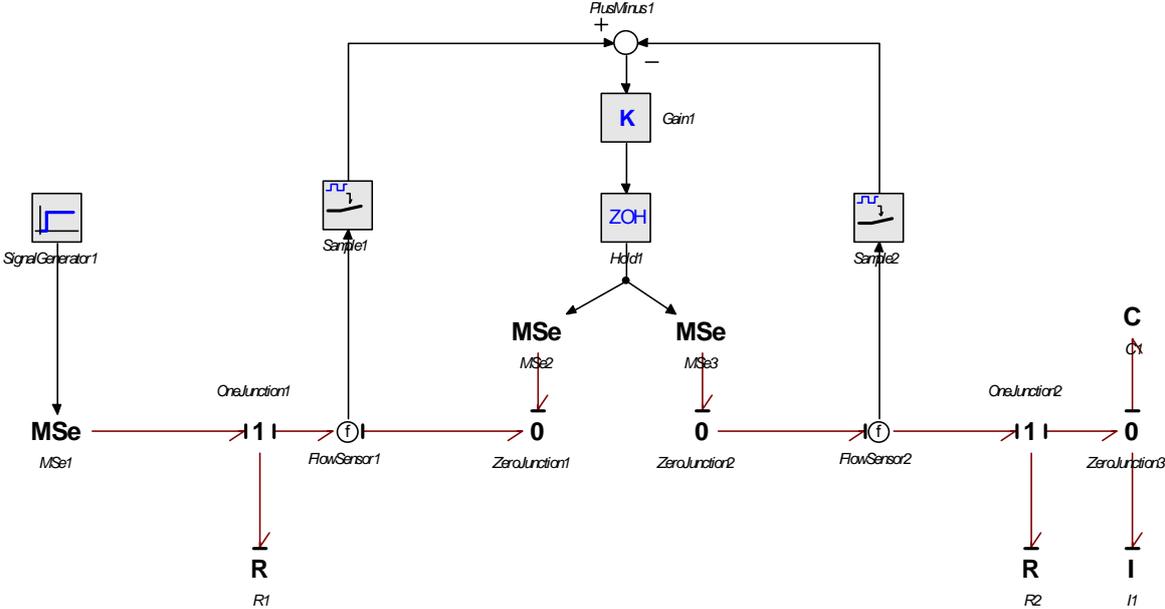


Abb. 47: Beispielsystem mit implementiertem Hyperbond

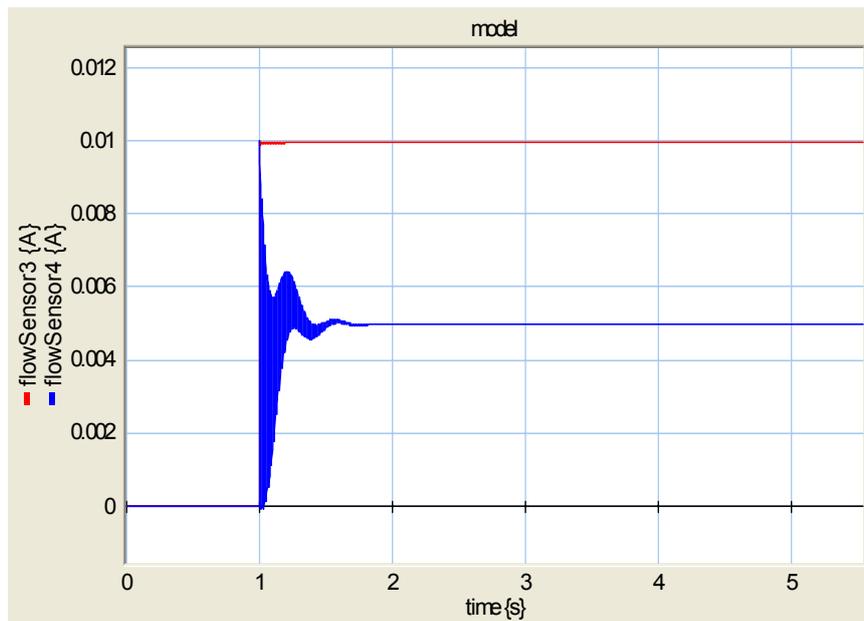


Abb. 48: Übertragungsverhalten mit K=1

Zur Minimierung solcher Übertragungsfehler kann ein PID-Regler eingesetzt werden. Abb. 49 zeigt zunächst das Signalblock-Diagramm vom Beispielsystem. Aus den Stabilitätsuntersuchungen mit dem Root Locus Verfahren folgt, dass der Gain1 auf weniger als 3 gestellt werden muss, damit das System sich stabil verhält.

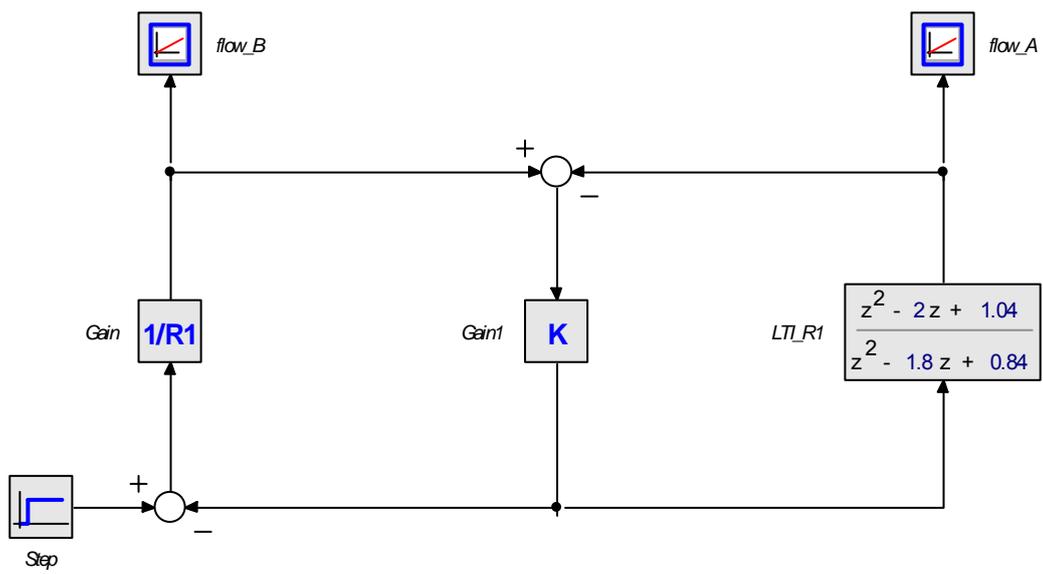


Abb. 49: Signal-Block Diagramm Repräsentation von Abb. 47

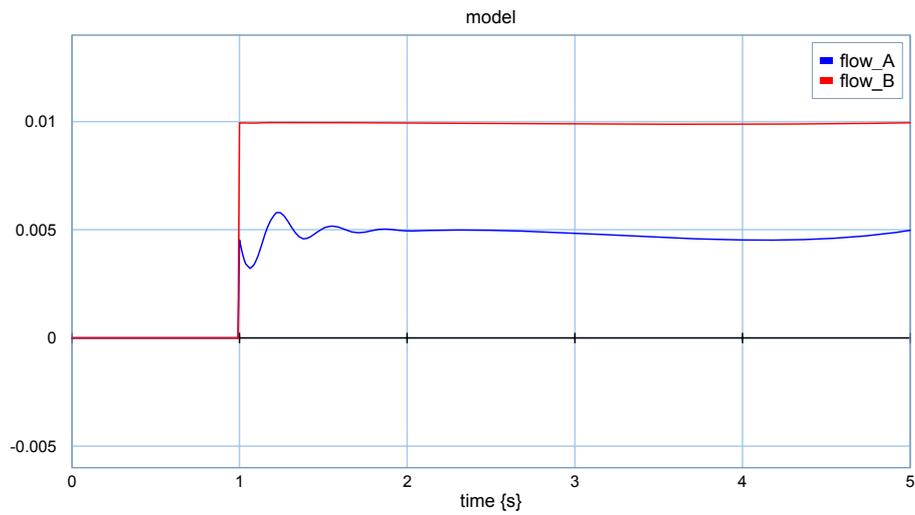


Abb. 50: Übertragungsverhalten für flow A und flow B mit K=1

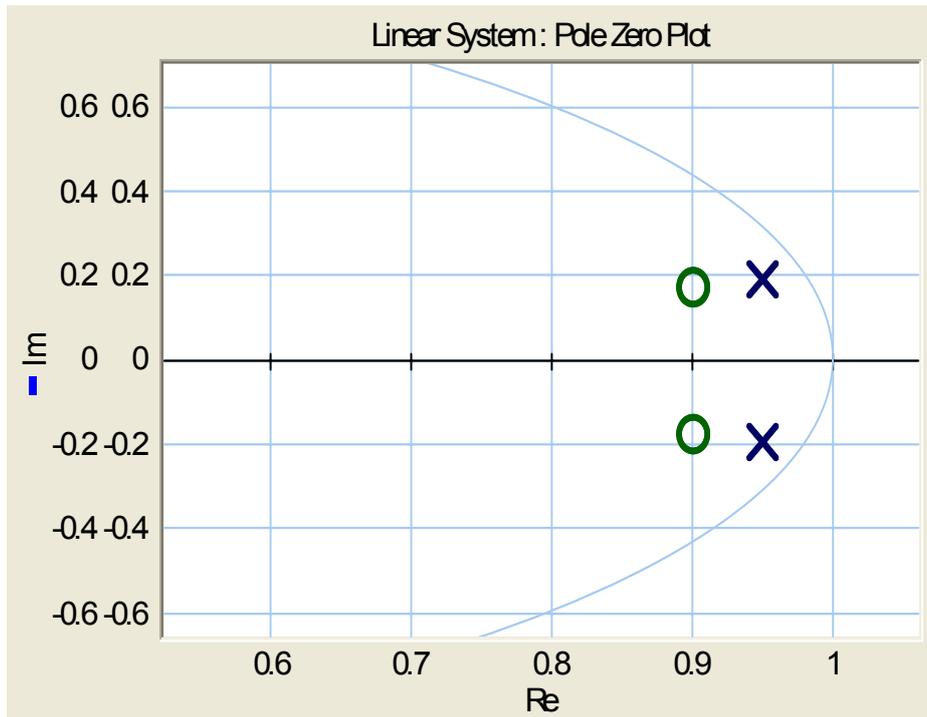


Abb. 51: $K=1$

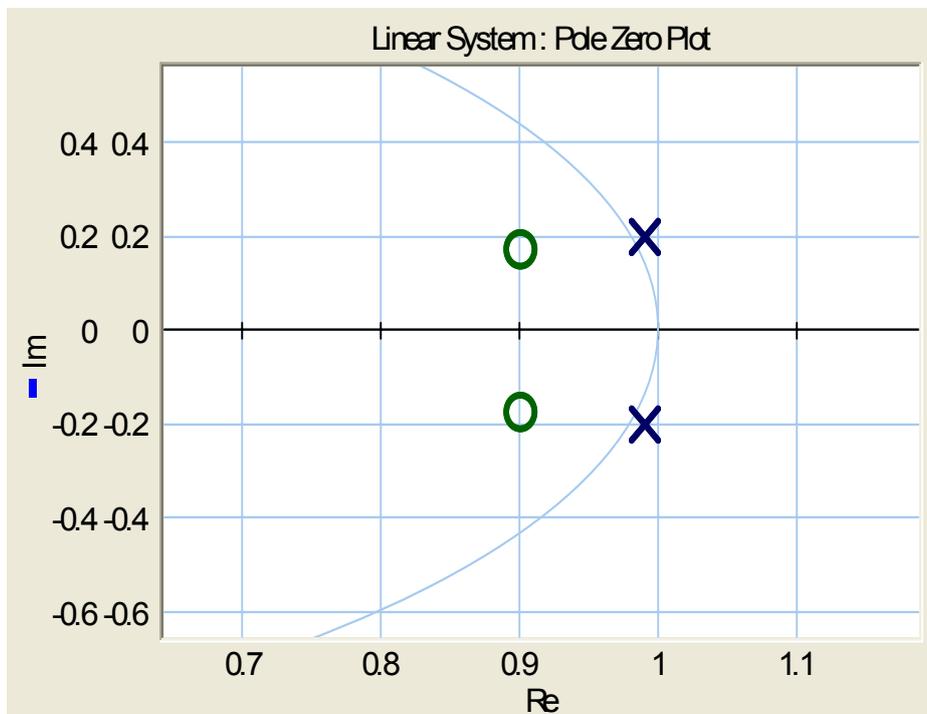


Abb. 52: $K=10$

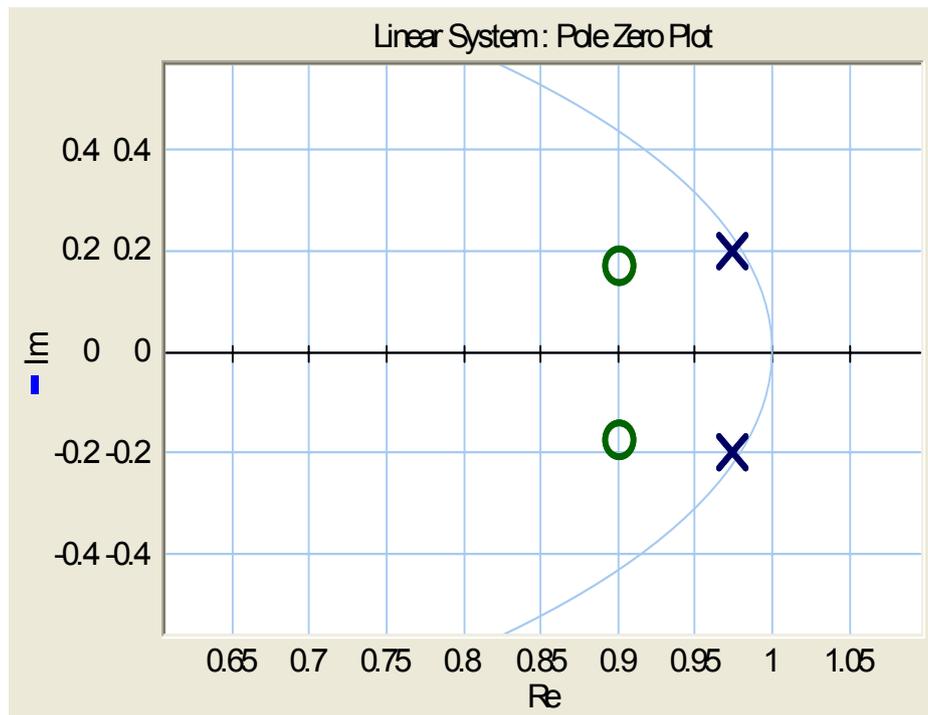


Abb. 53: $K=3$

Das Ergebnis in Abb. 56 zeigt ein kompensiertes Übertragungsverhalten mit dem PID Regler, der in Abb. 54 und Abb. 55 gezeigt wird. Des weiteren muss die PID Parameteroptimierung für die Spezifikation des Systems (bezüglich overshoot, steady-state error, rising time, etc.) angepasst werden.

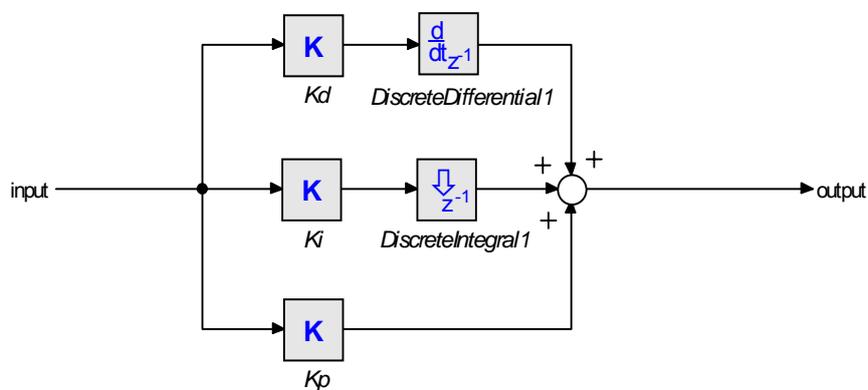


Abb. 54: PID Regler

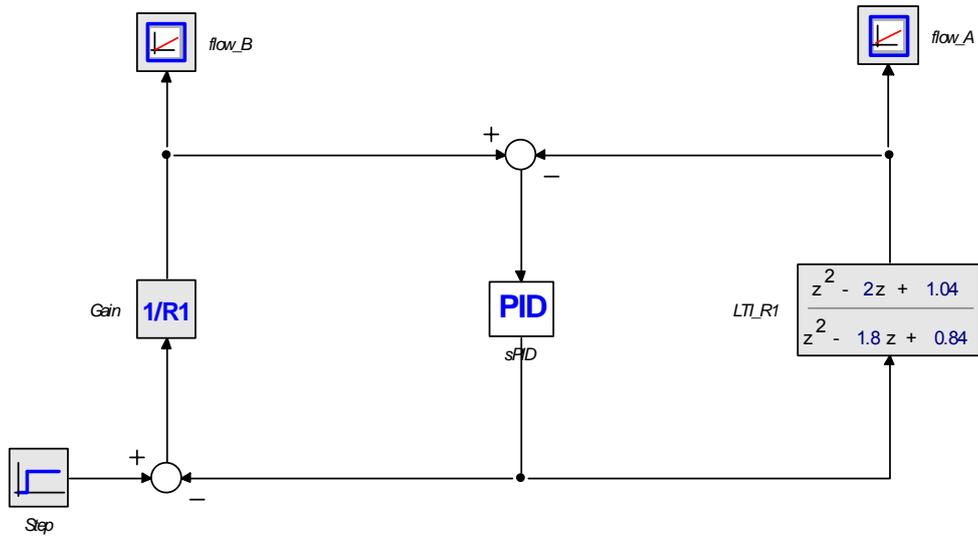


Abb. 55: mit PID Compensator

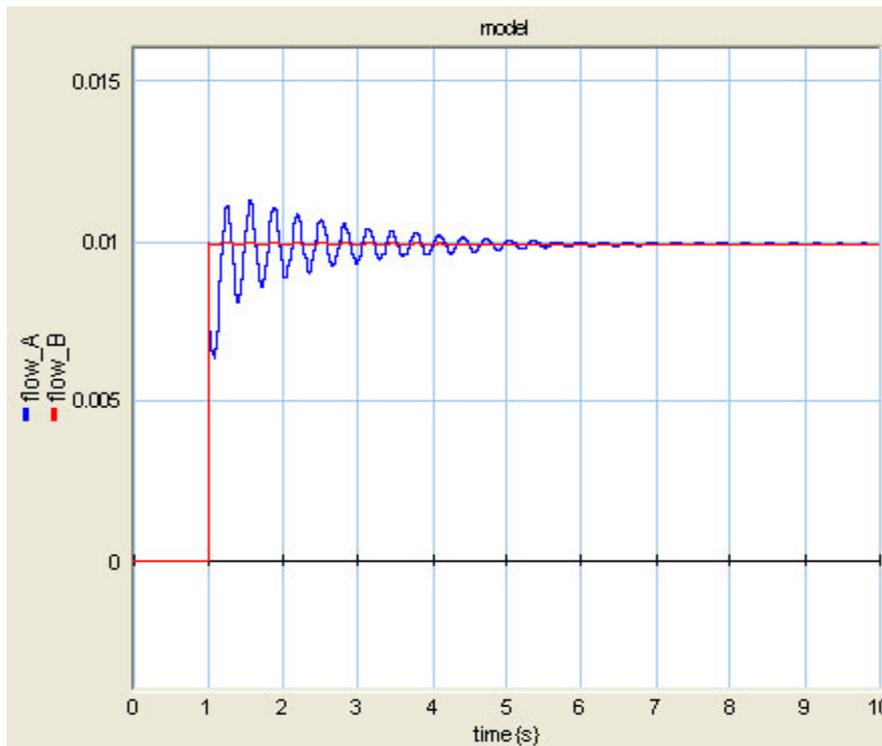


Abb. 56: Result with Optimal parameter values ($K_p=2.94$, $K_i=20.12$, and $K_d=0.032$)

5.2.7 Diskussion und Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass zwei gegenläufige Tendenzen die Implementierung eines Hyper-Bonds beschränken. Die Begrenzung eines Steady-State Fehlers erfordert einen möglichst hohen Verstärkungsfaktor K , dieser hat aber die Tendenz, zur Instabilität bei abgetasteten Systemen mit Zeitverzögerung zu führen. Durch höhere Abtastraten und geringere Verzögerungszeiten einer optimierten Regelung kann dieser Tendenz begegnet werden. These 2 kann nun eingeschränkt und präzisiert werden.

These 2':

Gegeben seien zwei disjunkte physikalische Teilnetze S1 und S2, die über einen Hyper-Bond verbunden sind. Dann lässt sich eine Verbindung zwischen realen und virtuellen Instanzen von S1, S2 herstellen, die durch den Regelungsmechanismus und den Diskretisierungsfehler begrenzt wird.

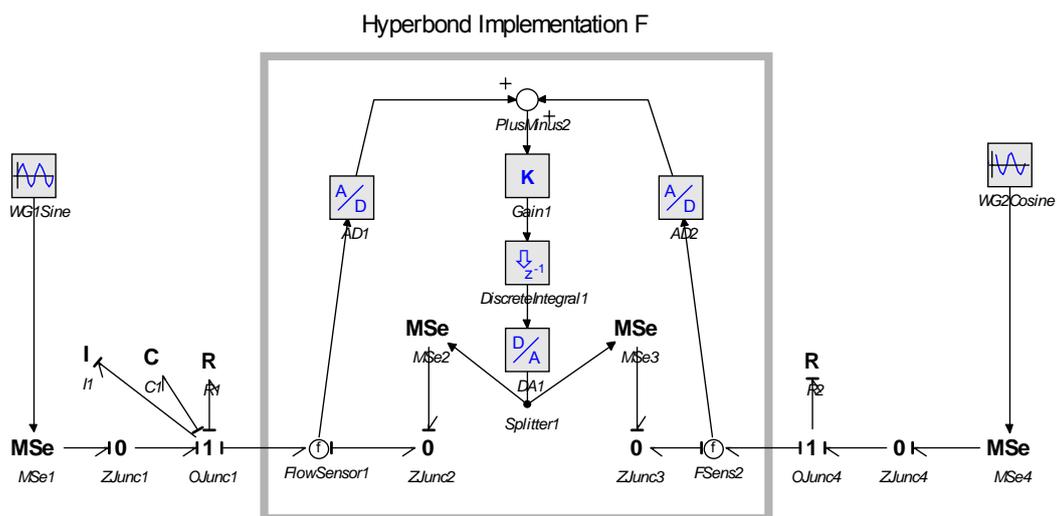


Abb. 57: Implementierter HB

5.3 Konzept geeigneter Mess- und Generierungsarten von Phänomenen (AP1.3)

Analyse der Kombinationen geeigneter Mess- und Generierungsarten:

An einem beliebigen Leistungsport kann der Flow als Output durch einen Effort als Input und umgekehrt gesteuert werden. Dieser Zusammenhang wird für kausales Schlussfolgern und die Reihenfolge der Gleichungslösung verwendet. In Bondgraphen wird diese kausale Richtung durch Querbalken an den Energiepfeilen angezeigt. Bondgraphen mit Kausalitätsbalken können als Blockdiagramme dargestellt werden. Wir haben Hyper-Bonds mit drei unterschiedlichen kausalen Kombinationen entwickelt, um flexibel verschiedene Input/Output Kombinationen von beliebigen Systemkomponenten mit Hyper-Bonds zur Verfügung zu haben. Abb. 58 zeigt diese Kombinationen. Eine von drei Verbindungen kann gewählt werden. Die Hyper-Bond Kausalität in Abb. 58 a oder b kann in einem elektrischen System je nach Verfügbarkeit oder Präferenz der Mess- oder Generator-Komponenten gewählt werden. In einem mechanischen System werden häufig Positionsmessungen zur Geschwindigkeitsbestimmung (flow) gewählt, weil Kraftmessungen (effort) teuer sind. Für Hyper-Bond Anwendungen bietet sich daher die Lösung in Abb. 58c an. Diese Lösung ist auch dann interessant, wenn ein Hyper-Bond verschiedene Kausalitäten anpassen soll. Darüber hinaus entfällt hier eine K-Abhängigkeit beim theoretischen Hyper-Bond. Je nach Anwendungsfall kann also der eine oder andere Hyper-Bond Typ verwendet werden.

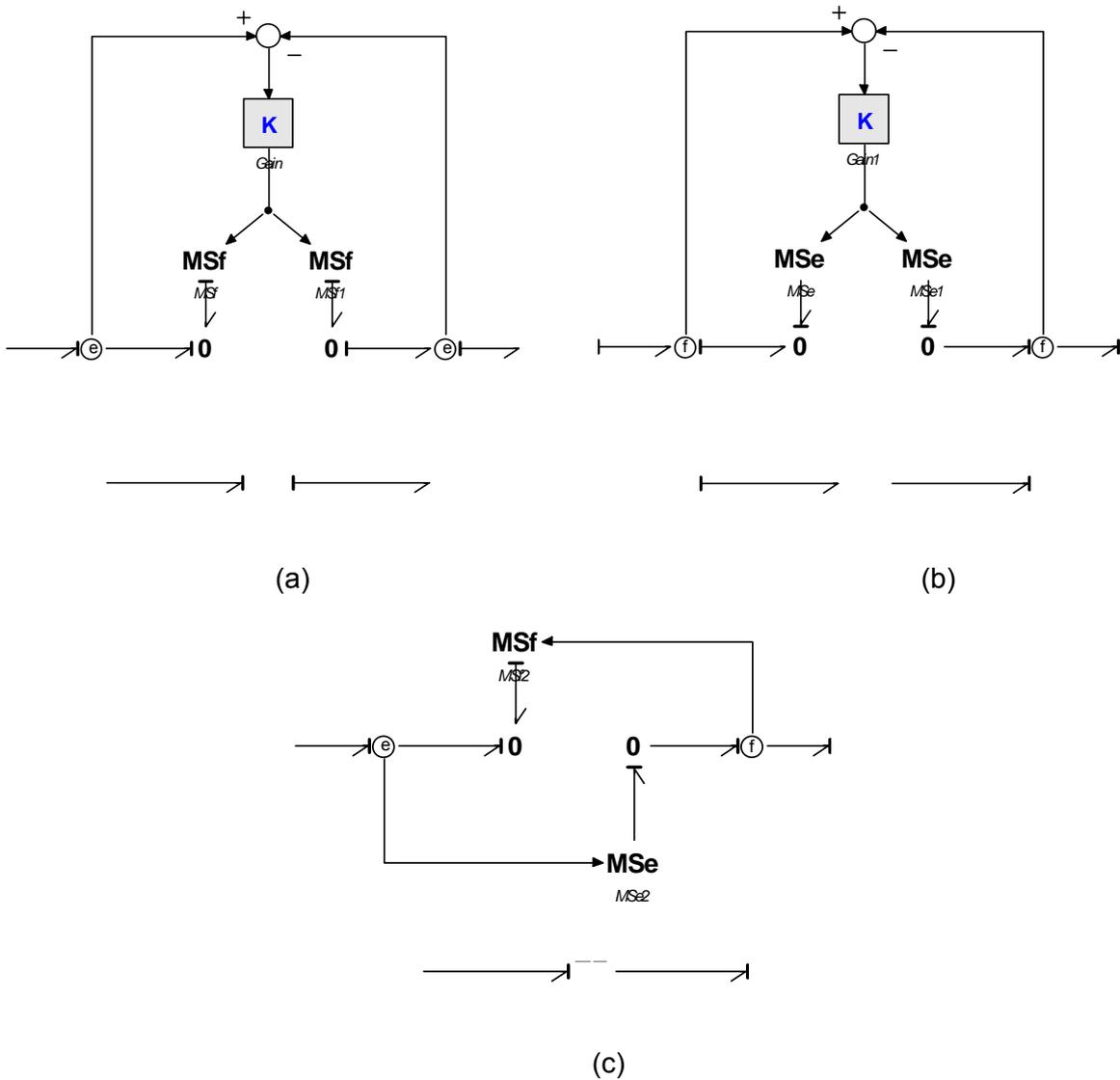


Abb. 58: Kausalität bei theoretischen Hyper-Bonds

Der Theoretische Hyperbond soll den Effort und Flow der Energiekante, welche durch den Hyperbond ersetzt wurde, aufrechterhalten. Es sollte also sowohl die Richtung der Energiekante als auch der Effort und Flow dem Bondgraphen ohne Hyperbond gleichen. In Abbildung 19 wurde bereits eine Variante des Theoretischen Hyperbonds vorgestellt.

Dadurch, dass 0-Knoten innerhalb des Hyperbonds verwendet worden sind, bleibt der Effort auch bei einer Umkehrung der Energiekante bei dem rechten 0-Knoten erhalten.

e_B und e_A sind also gleich und erfüllen somit die Bedingung für die Efforterhaltung.

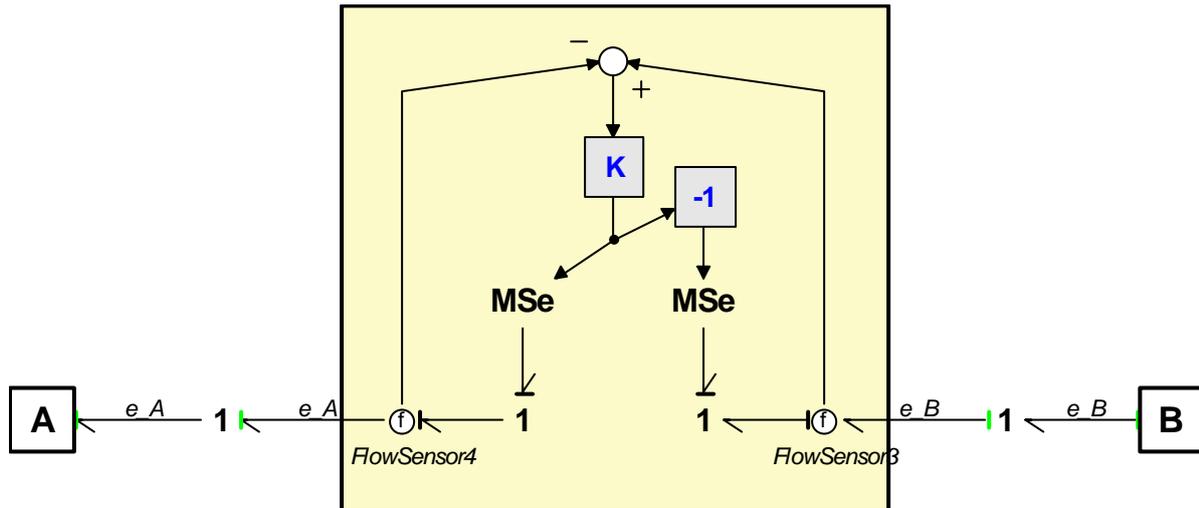


Abb. 59: Alternativer Theoretischer Hyperbond B

Eine weitere Variante ist in Abb. 59 dargestellt. Hier muss der rechte MSe negiert werden, da durch den rechten 1-Knoten der Effort erneut negiert wird. Insgesamt wird also der Effort bei dieser Variante zweimal negiert. In diesem Fall ist die Erhaltung des Efforts auf beiden Seiten auch gegeben.

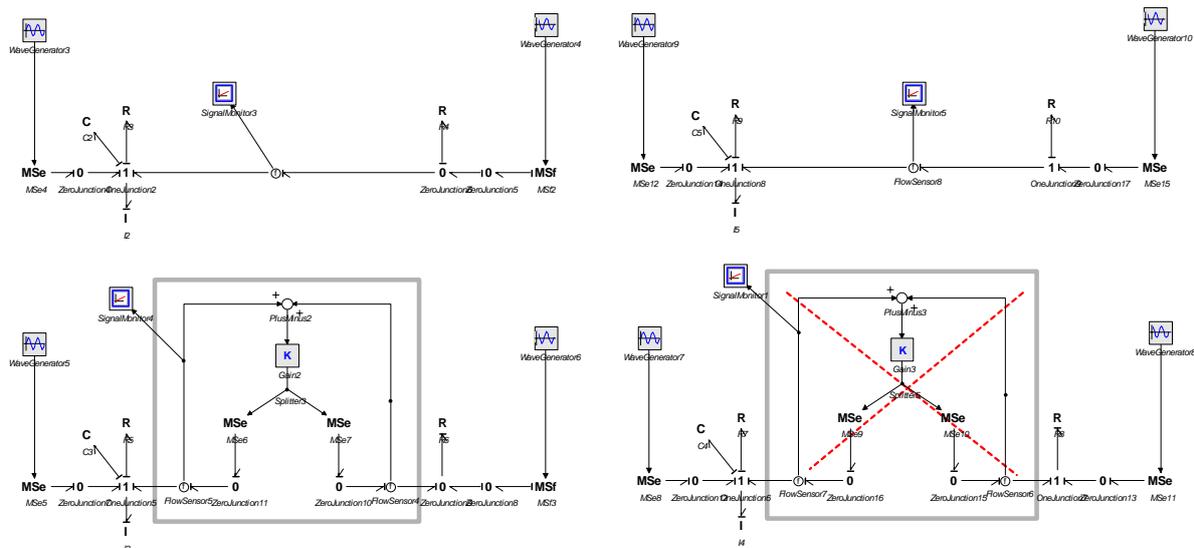


Abb. 60: Weitere Theoretische Hyperbonds

Ein weiterer Theoretischer Hyperbond ist in Abb. 60 dargestellt. Dabei wird jeweils der Bondgraph ohne Hyperbond und darunter der mit Hyperbond dargestellt. Dieser Hyperbond zeichnet sich dadurch aus, dass die Energiekante in beide Richtungen vom Hyperbond zu den Teilgraphen führt. Außerdem wird nicht die Differenz der beiden Flowsensoren genommen, sondern beide addiert. Dies ist durch die beiden abführenden Energiekanten begründet. Dieser Ansatz ist jedoch nicht empfehlenswert, da das rechte untere Beispiel nicht dem Bondgraphen ohne Hyperbond gleich. Die Korrektheit des Hyperbonds aus Abb. 60 hängt also von dem Aufbau des Bondgraphen ab.

5.4 Vergleich verschiedener Simulatoren (AP1.4)

Mehrere Simulatoren sollen unter dem Aspekt ihrer Eignung für die Integration der mit ihnen erstellten Modelle in eine hybride Systemarchitektur (real/virtuell, analog/digital) untersucht werden. In der Simulationstechnik kann unterschieden werden zwischen Modellen für diskrete und für kontinuierliche Systeme. Im vorliegenden Anwendungsfall handelt es sich

zunächst um kontinuierliche physikalische Prozesse, sodass nur die Klasse der kontinuierlichen Simulatoren in Betracht kommt. Andererseits stellt sich heraus, dass für eine Simulation implementierter Hyper-Bond Systeme eine Erweiterung der Bondgraph-Technik um diskretisierte Elemente erforderlich ist (Yoo 2007). Weitergehende Überlegungen zur Behandlung einer Hybridtechnik stellte Faust (2007) an.

Der Markt kontinuierlicher Simulatoren ist unterteilt in Simulationspakete, die orientiert sind an: Blockdiagrammdarstellung (SIMULINK (Ref)), Systemkomponenten (ACSL (Ref)), Elektronik und Signalen (SPICE (Ref)), Mehrkörperdynamik (ADAMS (Ref)), Bondgraphen (20-sim), DGL-Notation (MatLab). Modelica bietet mehrere Modelliernotationen an.

Es sollen im Folgenden MatLab, Modelica und 20-sim untersucht werden, da sie sich bereits in früheren Projektzusammenhängen in ihrer Funktionalität als sehr vielseitig erwiesen haben. Hier soll aber im Vordergrund der Aspekt der Integrierbarkeit in andere Umgebungen stehen.

5.4.1 *MatLab und Modelica*

MatLab und *Modelica* sind zwei verbreitete universelle Simulationspakete.

MatLab ist eine textuelle gesteuerte Bibliothek numerischer Lösungsverfahren für Differentialgleichungen. Für verschiedene Ingenieursbereiche existieren neben dem allgemeinen Paket Spezialpakete, wie die *Control System Toolbox*, die *Symbolic Math Toolbox* oder die Verbindung zu Simulink, einem Simulator für dynamische Systeme in Blocknotation einschließlich hybrider (kontinuierlich/diskreter) Phänomene. MatLab unterstützt keine Bondgraph Notation.

Modelica ist für die Modellierung und Simulation dynamischer Systeme entworfen und hat folgende Vorteile gegenüber dem gegenwärtigen Stand der Technik

- Objektorientierung
- Nichtkausales Modellieren
- Modellierung verschiedener Ingenieursbereiche

Modelica unterstützt Blockdiagramm- und Bondgraph- Notation

5.4.2 20-sim

Diese Modellier- und Simulationsumgebung basiert auf Bondgraph- und Blockdiagramm-Notation und unterstützt die Modellierung in gemischten Notationen und gemischten Symbolbibliotheken unterschiedlicher Bereiche der Mechatronik. Die Modelle können in MathLab Gleichungssysteme übersetzt werden und bieten daher eine gute Verbindungsmöglichkeit zum Simulationsumfeld. Eine Übersetzung von Bondgraphen in Spice-Notation wurde von Kemnade (2007) realisiert. Mit 20-sim wurden in der Arbeitsgruppe bereits über Jahre sehr gute Erfahrungen gemacht.

5.4.3 Diskussion und Fazit

20-sim bietet für die Modellierung von Systemen mit Hyperbonds sehr gute Möglichkeiten. Die Bondgraphendarstellung erweist sich dabei bezüglich der Handhabung, als auch der theoretischen Überlegung als äußerst nützlich. Die Abstraktion von realen Systemen auf Basis von energetischen Systemen verallgemeinert implizit den Hyperbondansatz auf sämtliche Systeme mit konzentrierten Parametern.

Leider gibt es nach heutigem Stand der Entwicklung noch keinen Simulator, der die feste Trennung zwischen der Modellierungsphase und der Simulationsphase aufhebt. Nach wie vor müssen also die Systeme zuerst modelliert und schließlich simuliert werden, d.h. die topologische Neukonfiguration des Systems ist immer mit einem Neustart der Simulation verbunden. Es ist daher bisher nicht möglich, die Objekte ständig „unter Physik“ zu stellen.

20-sim bietet jedoch eine „Realtime-Simulation“ an. D.h., es ist möglich, die Simulation auf Echtzeit zu stellen. Dies ist bei einer Mixed-Reality-Umgebung von essenzieller Bedeutung, da nur so eine Diskrepanz zwischen der Wirklichkeit und der virtuellen Realität vermieden werden kann. Zusammen mit dem DLL-Import von 20-sim können so echte Hyperbonds mit einer Schnittstelle zu 20-sim entwickelt werden. Der DLL-Import erlaubt es, eine Schnittstelle zu dem Bondgraphen aufzubauen, die mit einer DLL-Funktion kommuniziert. Die DLL-Funktion kann in jeder beliebigen Programmiersprache implementiert werden und über USB oder RS232 mit der Außenwelt kommunizieren. So ist eine vollständige Hyperbondschnittstelle zwischen 20-sim und der Außenwelt gegeben.

5.5 Modellierung und Simulation ausgewählter Beispiele (AP2.1) und (AP2.2)

5.5.1 Beispiele aus der Mechanik

Es sollen zwei Beispiele für Hyper-Bonds in mechanischen Systemen vorgestellt werden. Das Masse-Feder-Dämpfer Modell und das Antriebssystem wurden als typische Verbindungen der Mechanik ausgewählt.

Masse-Feder-Dämpfer Modell

Der Schnitt der Energieverbindungen soll zwischen zwei Masse-Feder-Dämpfer Einheiten liegen. Parameter dieses Modells sind

$Mass1=Mass2=0.01$, $Spring1=Spring2=0.01$, $Damper1=Damper2=1$.

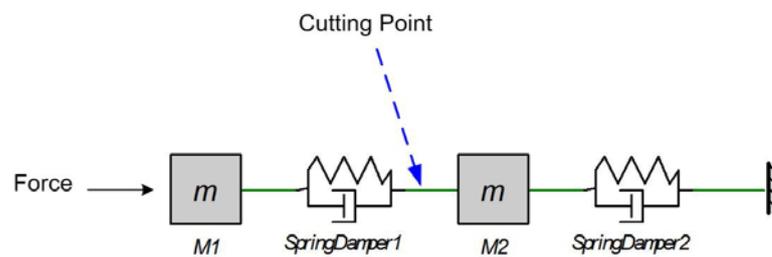


Abb. 61: Masse-Feder-Dämpfer Modell

Modell ohne Hyper-Bond

Abb. 62 zeigt das Bondgraphen Modell für das System ohne Hyper-Bond mit I für Masse, C für Feder, R für Dämpfer. Eine Sprung-Funktion steuert den Kraft-Eingang, gemessen wird der Fluss (Geschwindigkeit) an der Schnittstelle über einen Sensor und wird in (Abb. 63) dargestellt.

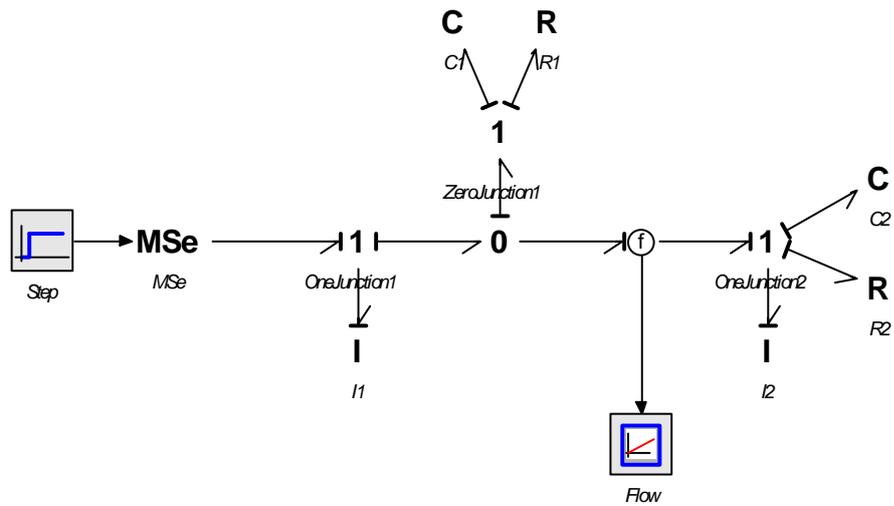


Abb. 62: The bond graph model of the mass-spring-damper system

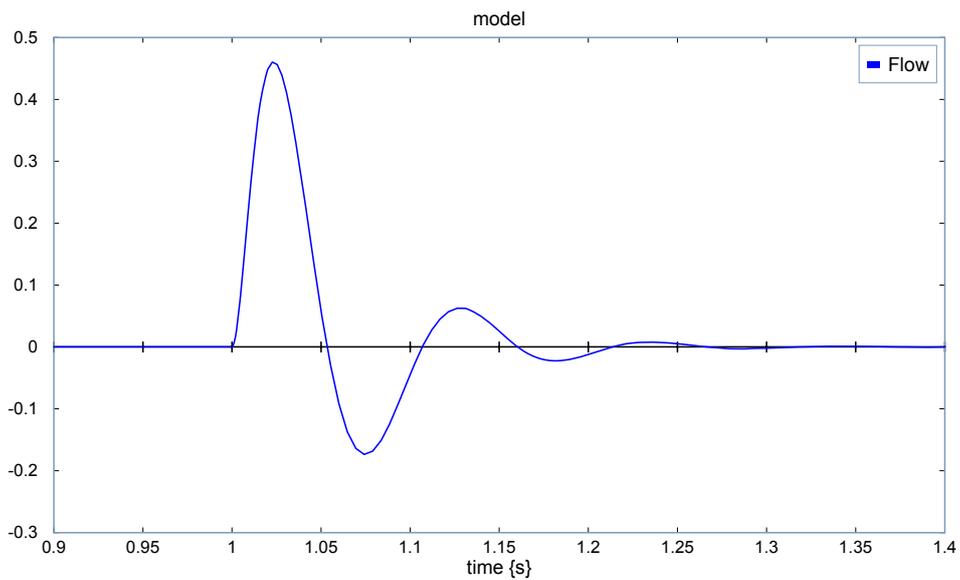


Abb. 63: Result at the cutting point

Modell mit Hyper-Bond

Abb. 64 zeigt die Verbindung über einen theoretischen Hyper-Bond (a) und dessen Implementierung (b) für $K=100000$, Abtastrate $ST = 0.001$ sec, $K_p = 1$, $K_i=950$, $K_d= 1e-5$ für

einen PID-Regler zur Berücksichtigung von Überschwingen, Anstiegszeit, Fehlerintegral, SteadyState Fehler.

Abb. 65 stellt die Ergebnisse beider Simulationen gegenüber. Das Beispiel zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen theoretischem und implementiertem HB.

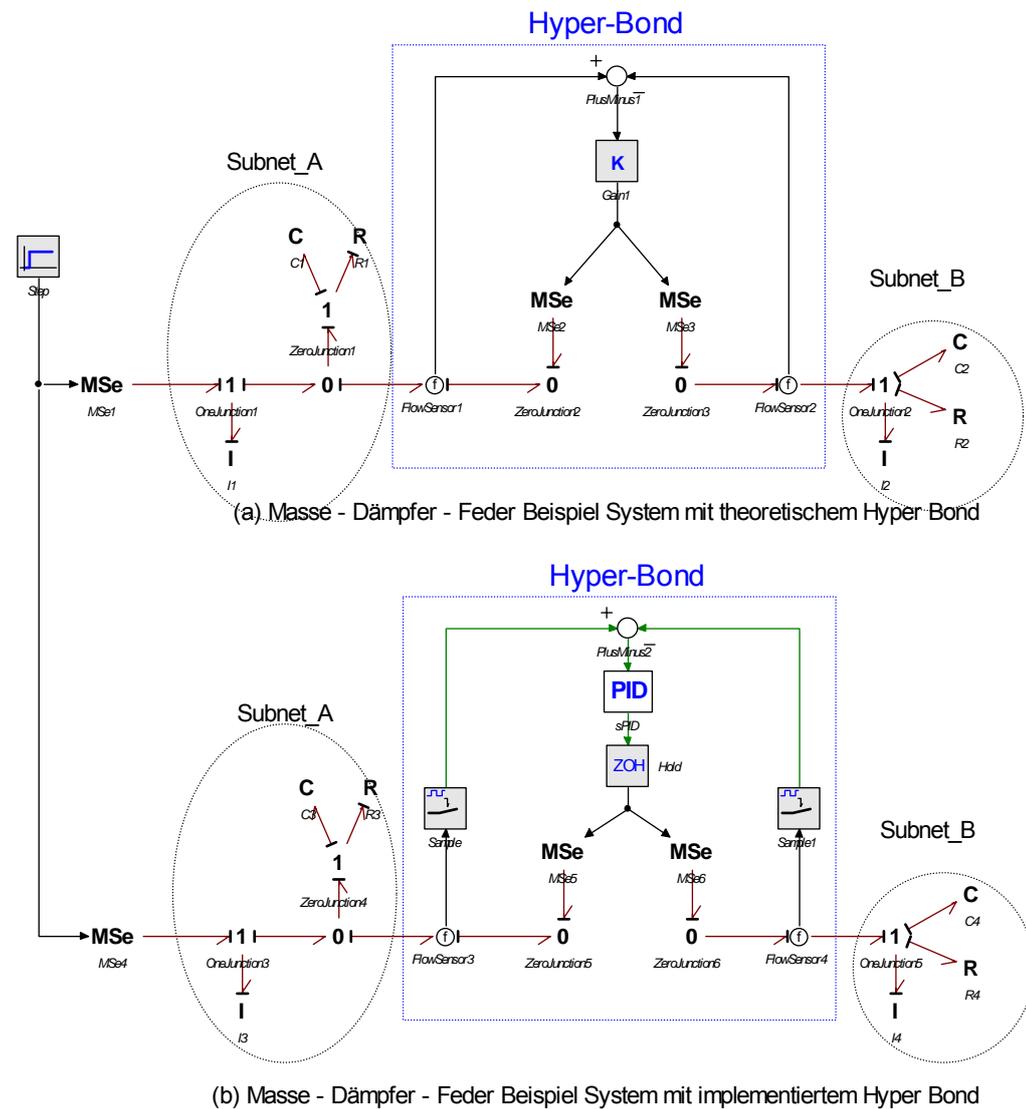


Abb. 64: Theoretischer (a) und implementierter (b) Hyper-Bond als Interface

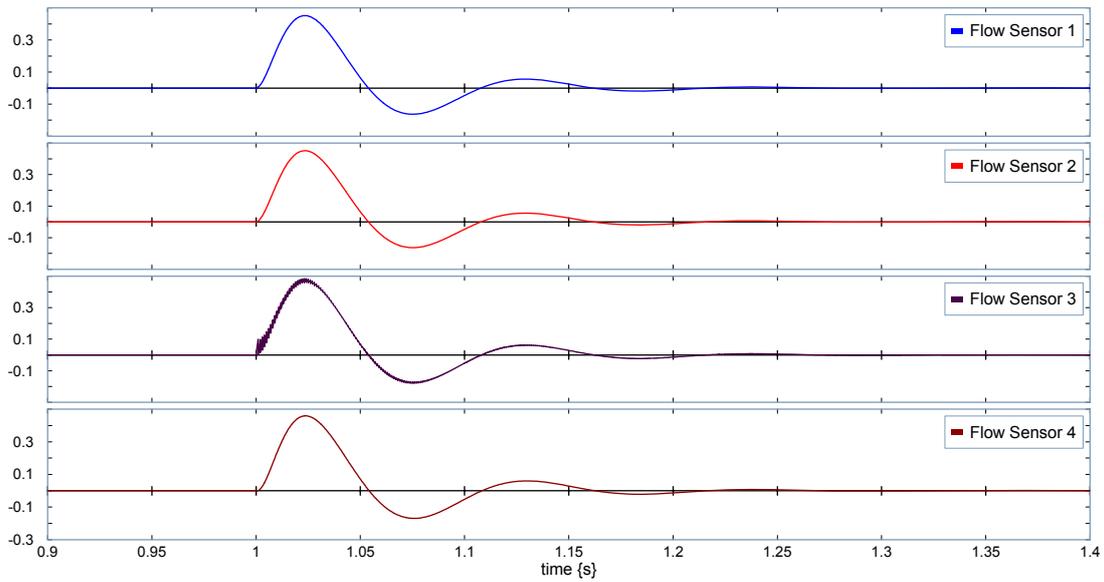


Abb. 65 the results from the bond graph model

Antriebs-Modell

Abb. 66 zeigt einen Achs-Antrieb mit Last. Das System besteht aus Achse, Schwungscheibe (Objekt 1), Kupplungsscheibe (Objekt2) und zwei Lagern. Zwischen Objekt1 und Objekt2, sowie in den Lagern entsteht Reibung, die Achse wirkt als Torsionsfeder, die Elemente haben eine Masse.

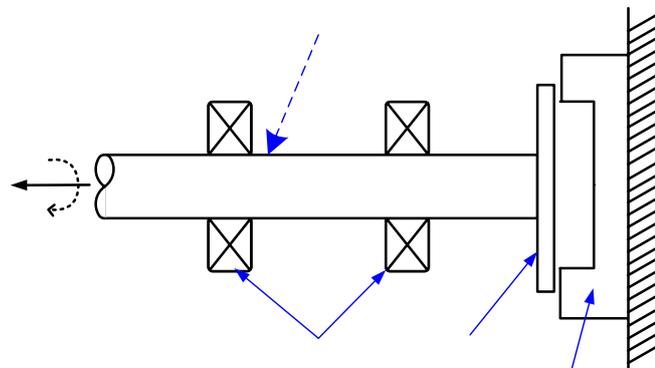


Abb. 66: Achsantrieb mit Last

Bond Graph Modell (ohne Hyper-Bond)

Abb. 67 zeigt das zugehörige Bondgraphen Modell und Abb. 68 die Simulationsergebnisse.

Die Parameter sind:

- input velocity to the shaft is defined as a step input and MSf,
- shaft twisting (capacitor) between input and first bearing is C1,
- shaft twisting between first bearing and second bearing and inertia are C2 and I1,
- shaft twisting between second bearing and Object 1 and inertia are C3 and I2,
- Friction at the first bearing is R1,
- Friction at the second bearing is R2

Der Signalmonitor zeigt den Fluss (Geschwindigkeit) an der Schnittstelle für die Parameterwerte

$I1=I2=0.01$, $C1=C2=C3=0.01$, $R1=R2=0.1$, $R3=1$.

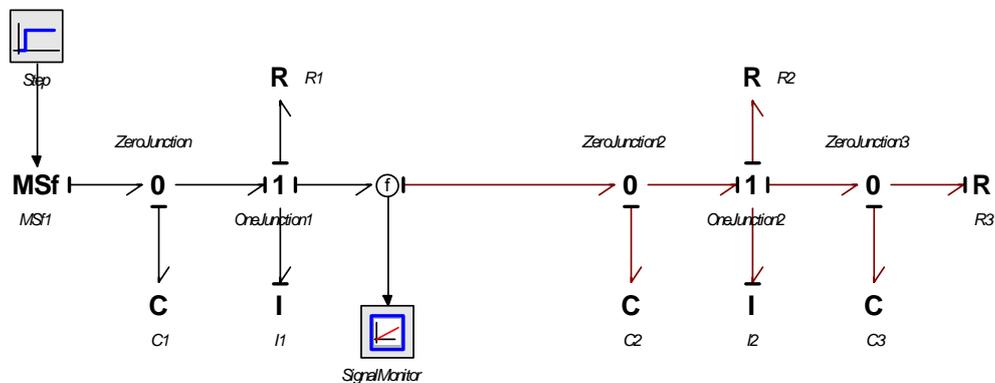


Abb. 67: Bondgraph Modell eines Achsantriebs mit Last

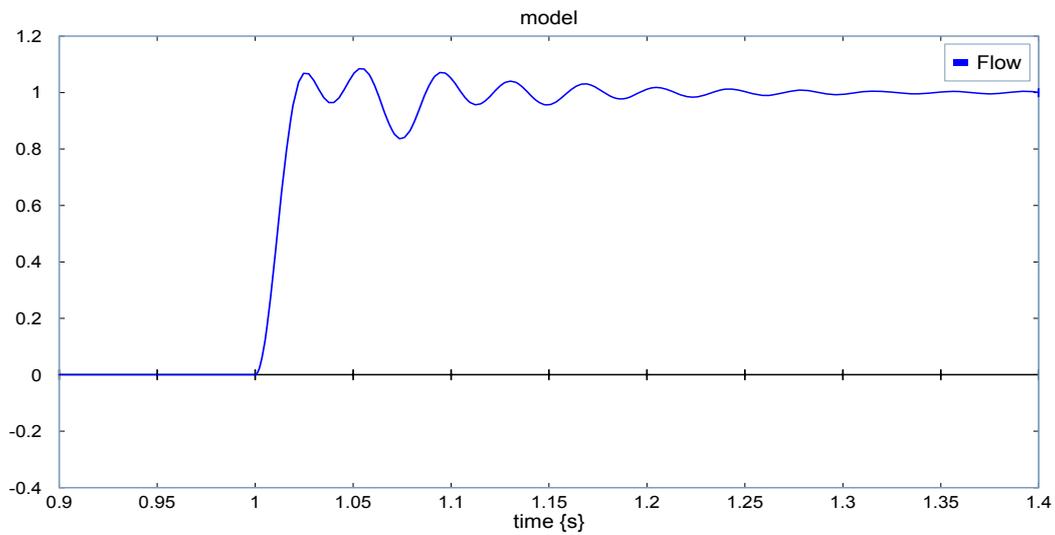


Abb. 68: Simulationsergebnisse für den Achs-Antrieb

Modellierung mit Hyper-Bond

Abb. 69 zeigt die Verbindungen als theoretischen (a) und implementierten (b) Hyper-Bond.

Abb. 70 zeigt die Simulationsergebnisse für $K=10000$, Sampling Time = 0.001 sec, $K_p=2.2$, $K_i=300$, and $K_d=7.2e-5$. Das Beispiel zeigt keine gute Übereinstimmung zwischen theoretischem und implementiertem HB.

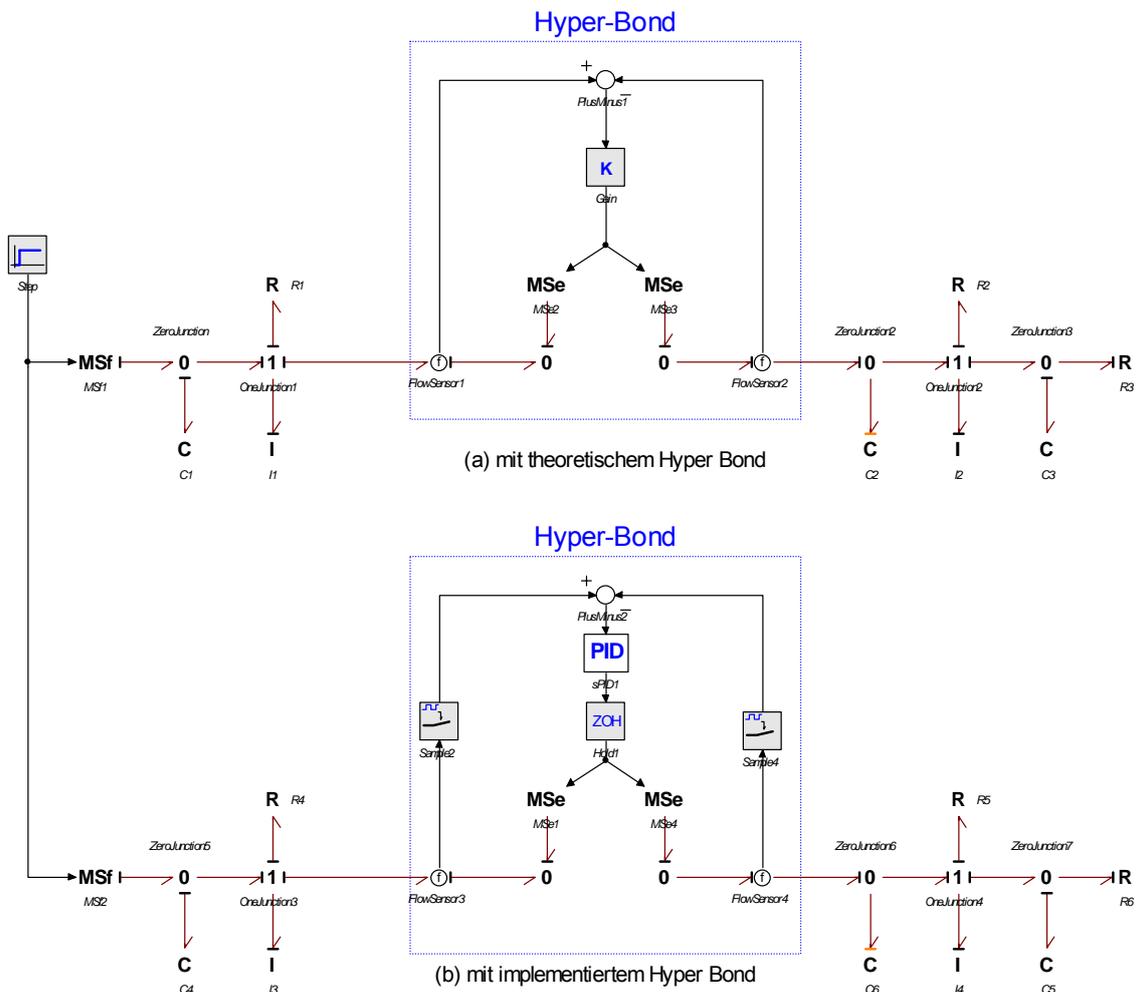


Abb. 69: Theoretischer (a) und implementierter (b) Hyper-Bond

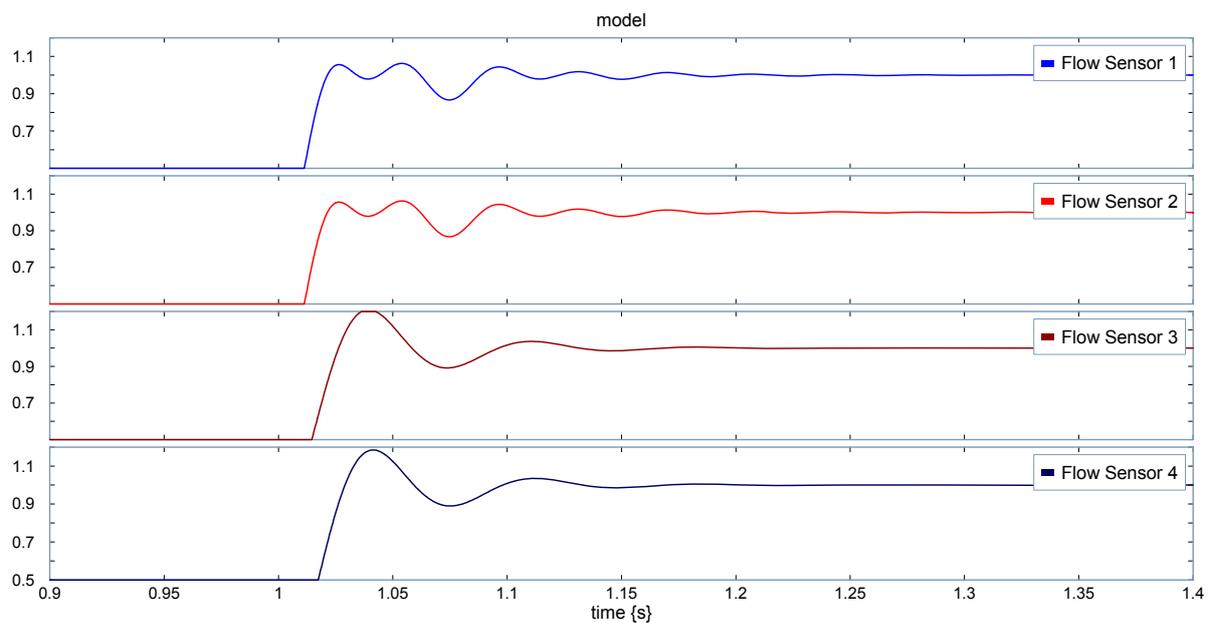


Abb. 70: Ergebnisse der Simulation

5.5.2 Beispiele aus der Elektrotechnik

Es werden zwei typische Verbindungen elektrischer Systeme durch Hyper-Bonds ersetzt. Im ersten Beispiel werden Komponenten parallel (als 0-1-Knotenverbindung), im zweiten seriell (als 1-0-Knotenverbindung) geschaltet.

Elektrotechnik Modell 1 (vom 0-Knoten zum 1-Knoten)

Abb. 71 zeigt einen elektrischen Schaltkreis mit parallelen und seriellen Elementen. Dieser soll an dem Port AB geschnitten und durch einen Hyper-Bond verbunden werden. Die Parameter für das Modell sind:

$R1=R2=R3=1, I1=1, C1=1, I2=0.01, C2=0.1.$

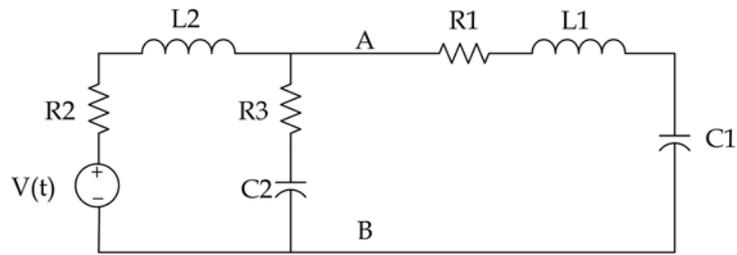


Abb. 71: Elektrotechnik System (0-Knoten zum 1-Knoten)

Bond Graph Modell ohne Hyper Bond

Abb. 72 zeigt den zugehörigen Bondgraphen mit dem Sensor für den Fluss an der Schnittstelle. Die Simulationsergebnisse zeigt Abb. 73.

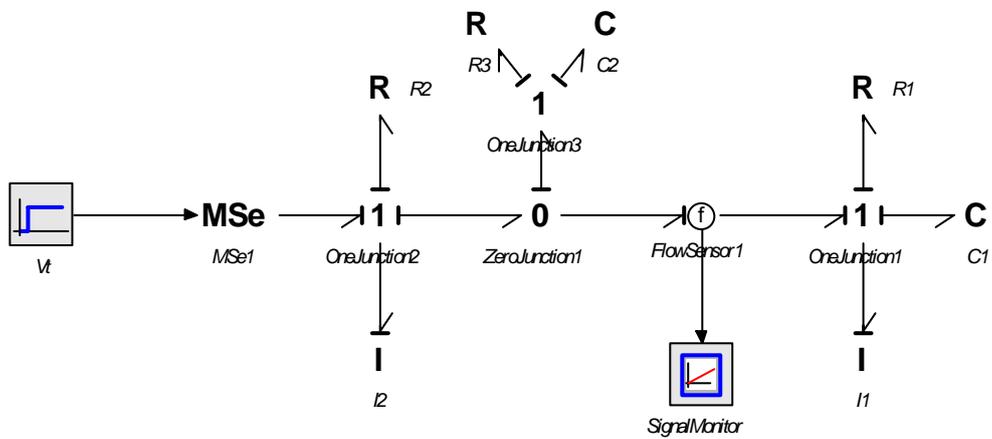


Abb. 72: Bondgraph für elektrisches System 1

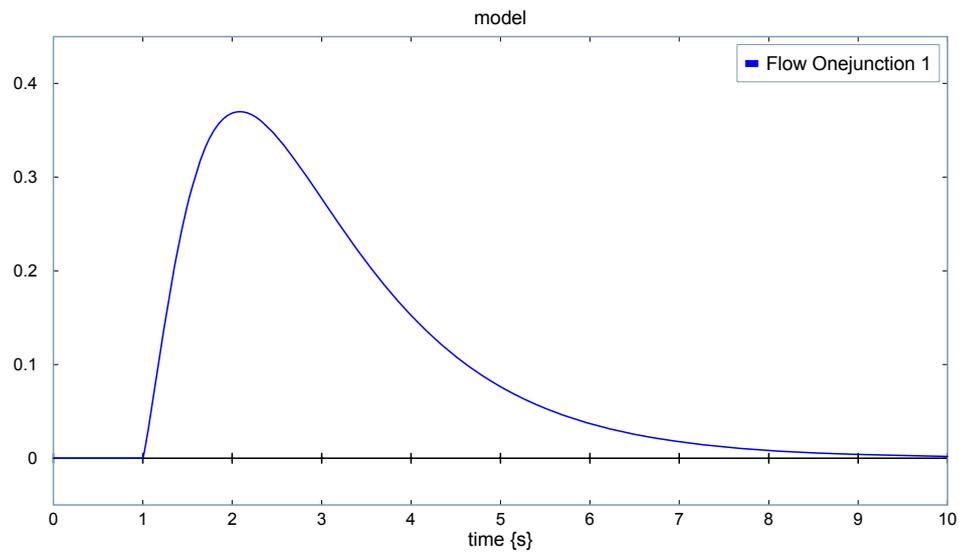


Abb. 73: Ergebnisse der Simulation

Modellierung mit Hyper-Bond

Abb. 74 zeigt eine theoretische (a) und eine implementierte (b) Hyper-Bond Verbindung. Es sind $K=100000$, Sampling Time = 0.001sec, $K_p=1$, $K_i=1000$, and $K_d=5e-5$. Abb. 75 zeigt die Ergebnisse der Simulation. Das Beispiel zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen theoretischem und implementiertem HB.

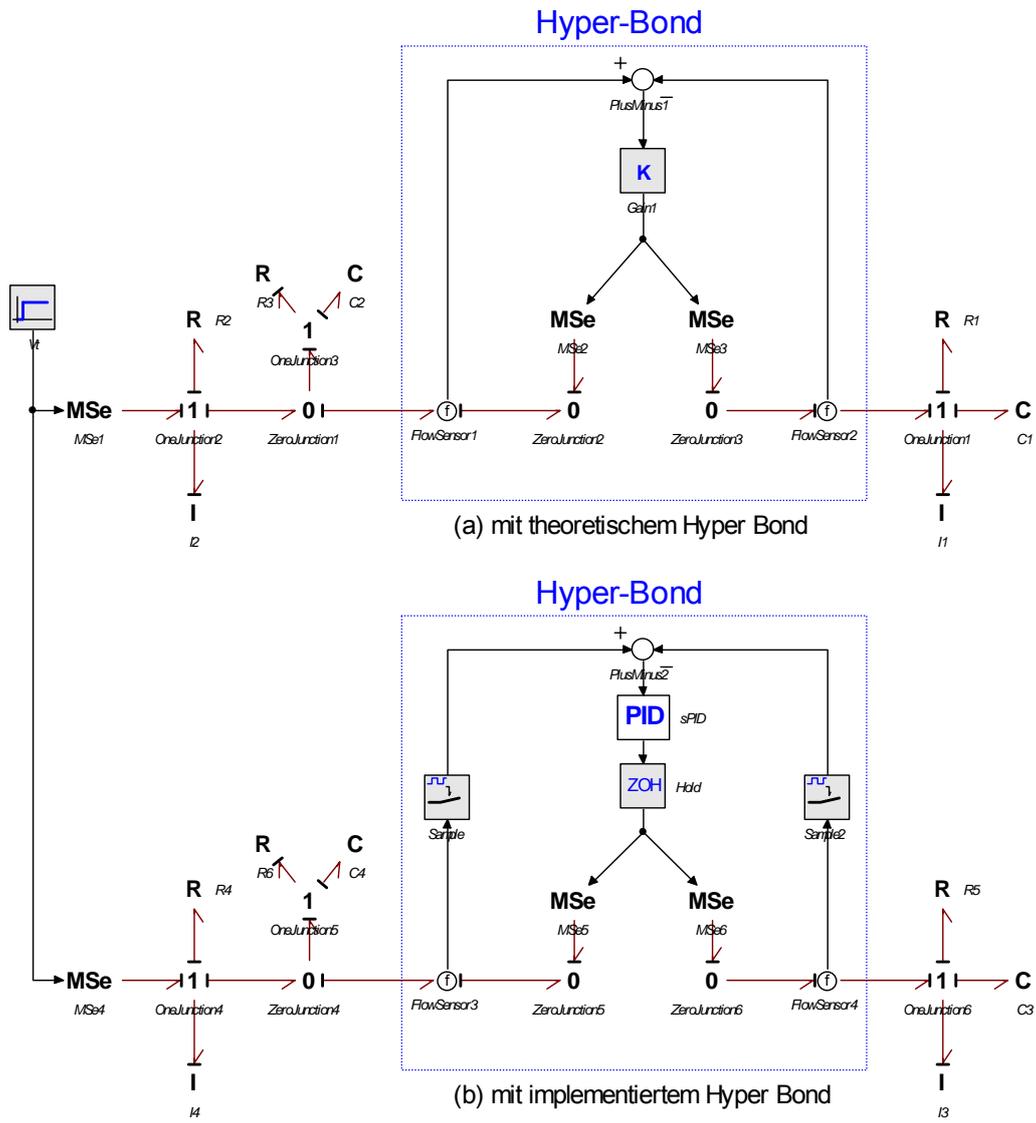


Abb. 74: Theoretischer (a) und implementierter (b) Hyper-Bond

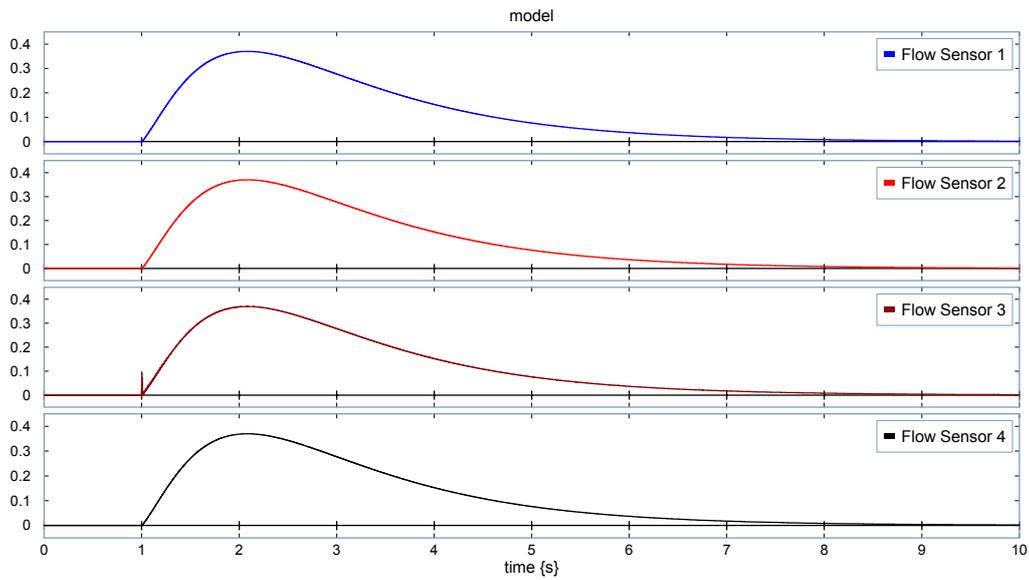


Abb. 75: Ergebnisse der Simulation

Elektrotechnik Modell 2 (vom 1-Knoten zum 0-Knoten)

Abb. 76 zeigt einen elektrischen Schaltkreis mit dem Übergang seriell-parallel. Die Parameter sind: $R1=R2=R3=1$, $I1=1$, $C1=1$, $I2=0.01$, $C2=0.1$.

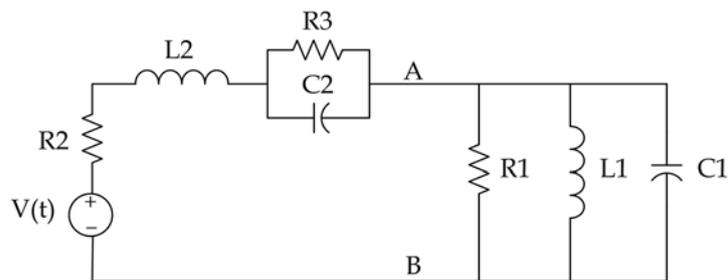


Abb. 76: Elektrotechnik System 2 (1-Junction to 0-Junction)

Bond Graph Modell ohne Hyper Bond

Abb. 77 zeigt den Bondgraphen, Abb. 78 die Simulationsergebnisse.

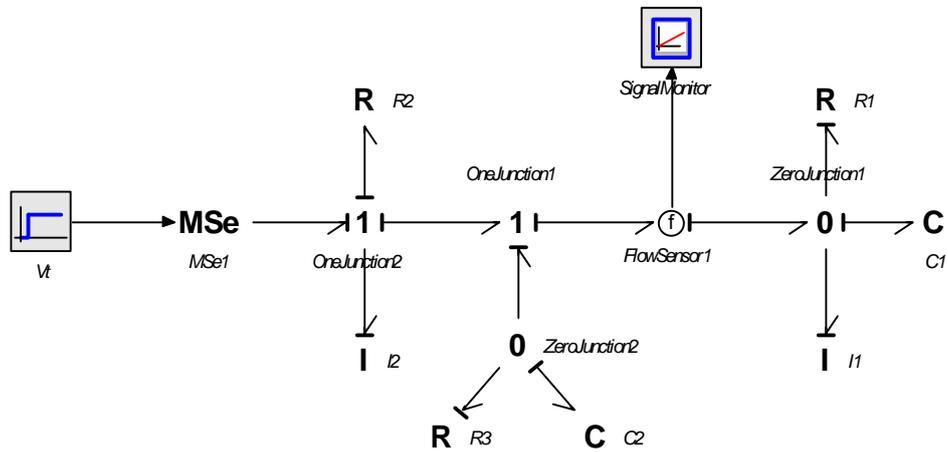


Abb. 77: Bondgraph für elektrisches System 2

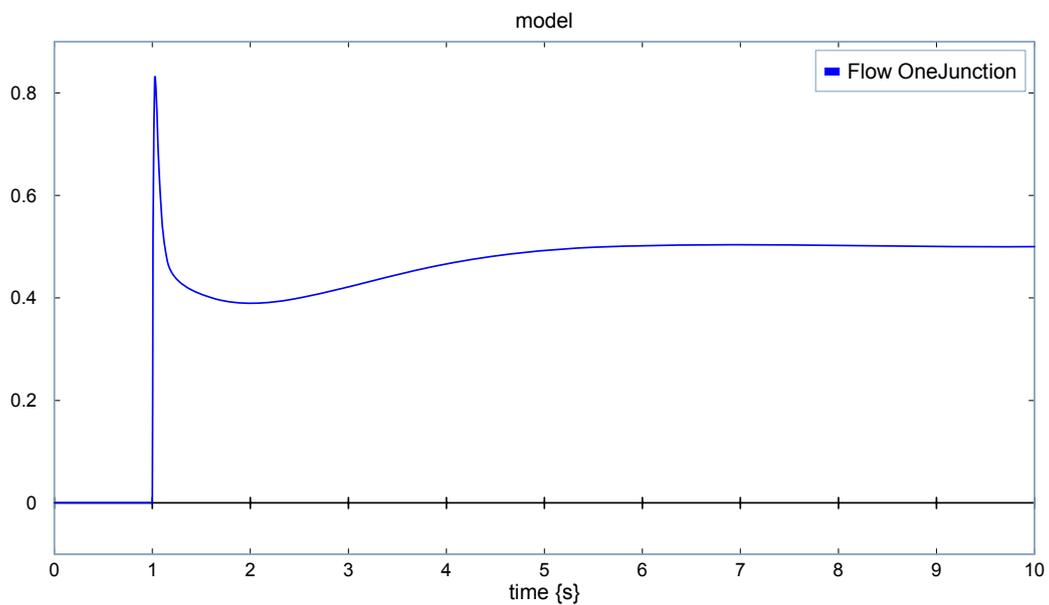


Abb. 78: Simulationsergebnisse des ungeschnittenen Systems 2

Modellierung mit Hyper-Bond

Abb. 79 zeigt einen theoretischen (a) und einen implementierten (b) Hyper-Bond als Verbindung an der Schnittstelle, Abb. 80 die Ergebnisse der Simulation für $K=100000$, Sampling Time = 0.001 sec, $K_p=1$, $K_i=1500$, and $K_d=1e-7$. Das Beispiel zeigt keine gute Übereinstimmung zwischen theoretischem und implementiertem HB.

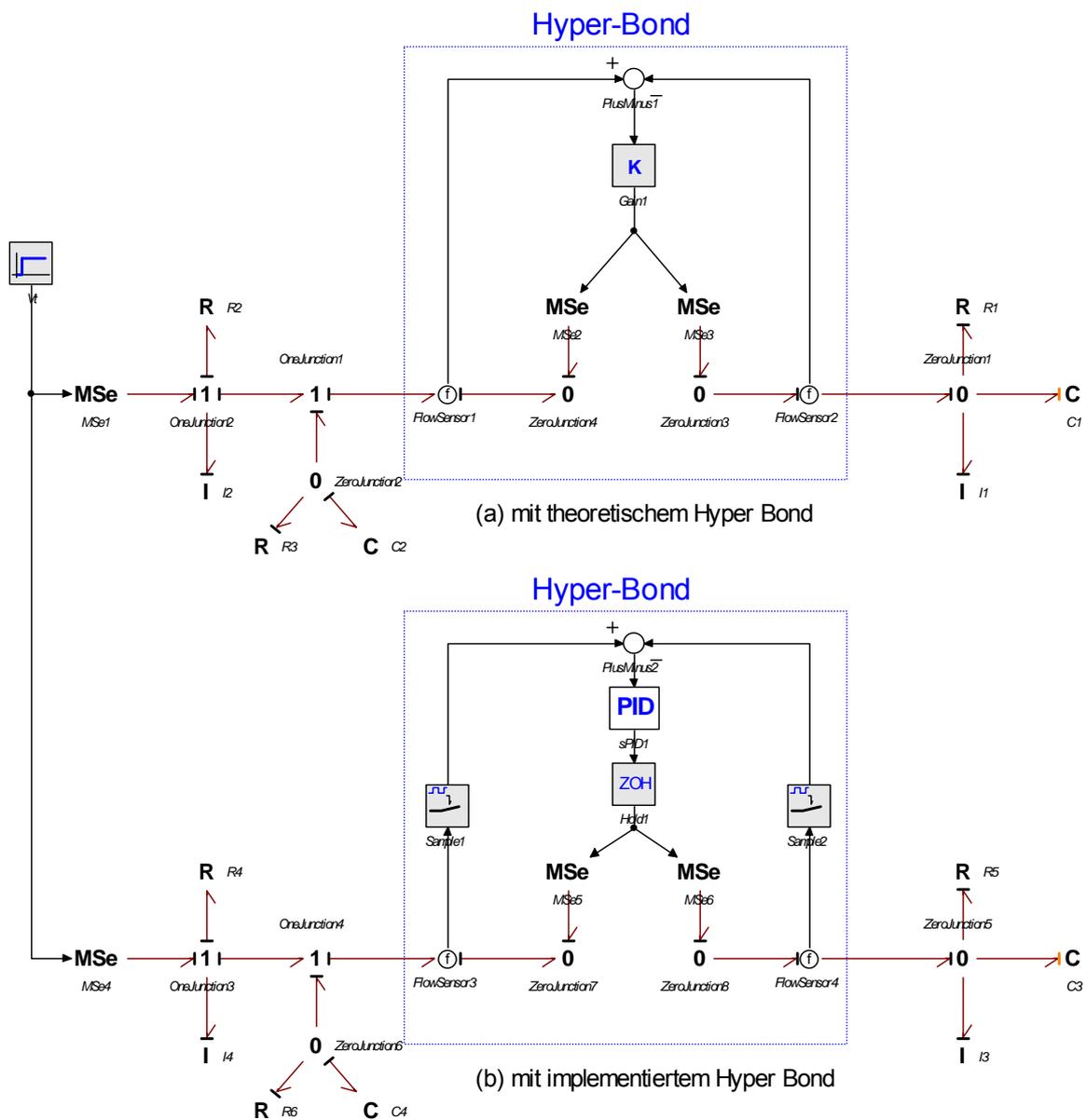


Abb. 79: Theoretischer (a) und implementierter (b) Hyper-Bond

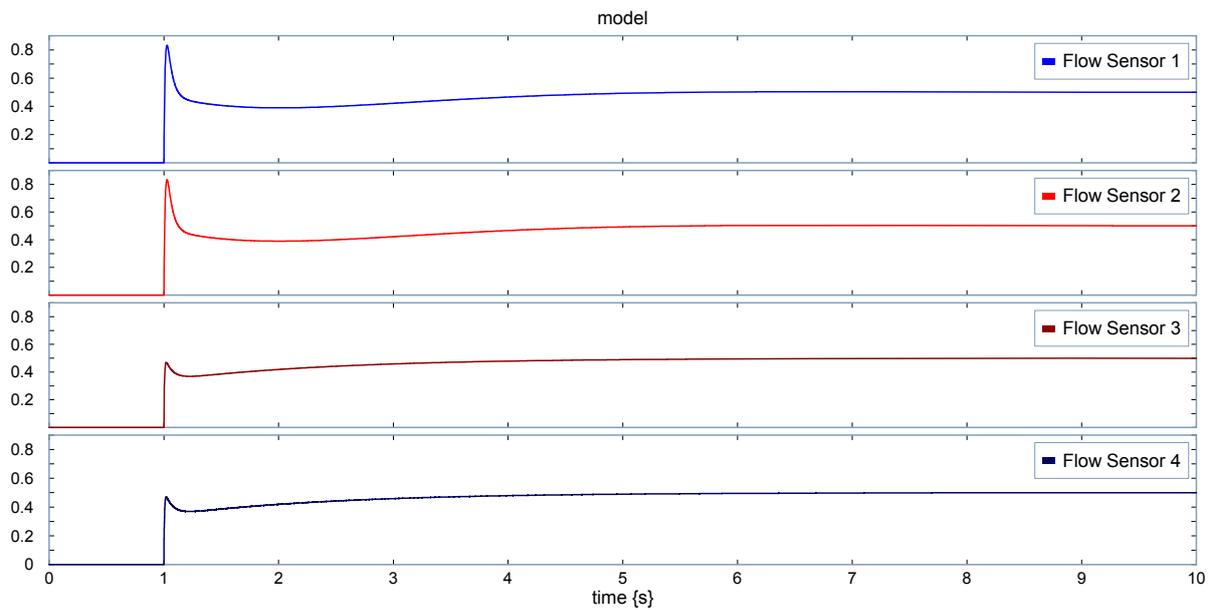


Abb. 80: Simulationsergebnisse

5.5.3 Mixed Reality Beispiel

Als weiteres Beispiel soll eine typische Anwendung aus dem Bereich *Mixed Reality* untersucht werden: die Ruderdynamik eines Kanus. Der Hyper-Bond wird benutzt, um die reale und die virtuelle (simulierte) Dynamik zu verbinden. Die reale Dynamik wird als kontinuierliches System, die virtuelle Dynamik, wegen der diskreten Rechnerrepräsentation, mit Hilfe diskreter Transferfunktionen modelliert. Die Dynamik wird zunächst eindimensional, dann zweidimensional (mit zwei Rudern) entwickelt.

1D Ruderdynamik

Es wird angenommen, dass das Kanu nur durch die Ruderkraft $Eoar1$ angetrieben wird.

$Loar1$ ist die Masse des Ruders im Kanu, $Loar2$ die außerhalb. $Roar$ -water ist die Reibung

zwischen Ruder und Wasser, e_{oar2} und f_{oar2} sind Kraft und Geschwindigkeit des Ruders im Wasser. I_{canoe} ist die Masse des Kanus, $R_{canoe-water}$ die Reibung zwischen Kanu und Wasser, e_{canoe} und f_{canoe} sind Kraft und Geschwindigkeit des Kanus. Die Ruderkraft ist die Summe der Kräfte, die Kanu und Ruder bewegen. Die Ruderdynamik kann mit Bondgraphen, wie in Abb. 82 dargestellt, modelliert werden.

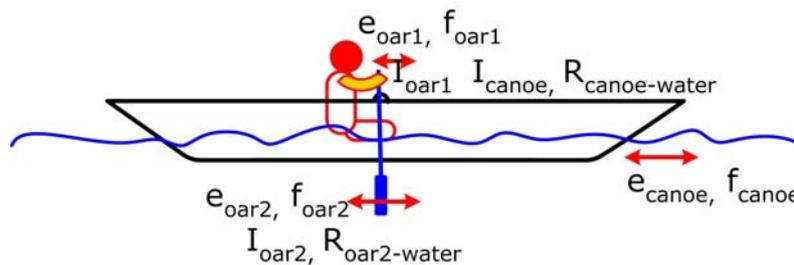


Abb. 81: Ruderdynamik eines Kanus für 1D Rudern

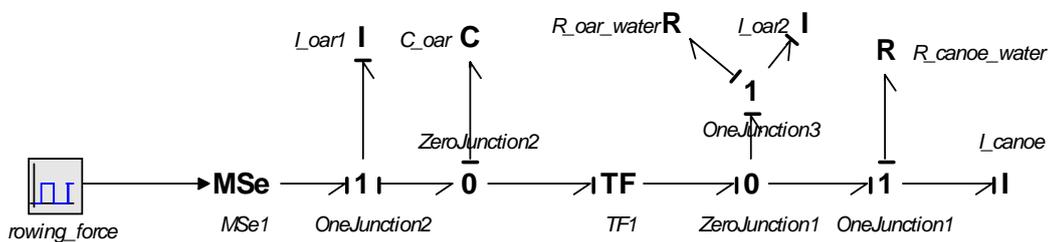


Abb. 82: Bond Graph Modellierung der Ruderdynamik

$1/Coar$ ist die Steifigkeit des Ruders, $TF1$ die Übersetzung. Abb. 83 zeigt eine Simulation der Ruderdynamik mit dem Simulator 20-sim. Die folgenden, typischen Werte wurden verwendet: $Loar1 = 0.1 \text{ N-s}^2/\text{m}$, $Loar2 = 0.2 \text{ N-s}^2/\text{m}$, $I_{canoe} = 5 \text{ N-s}^2/\text{m}$, $R_{canoe-water} = 5 \text{ N-m-s}$, $Roar-water = 1 \text{ N-m-s}$, $Coar = 0.0001 \text{ m/N}$, $TF1 = 2$. Die Ruderkraft erfolgt periodisch und ist idealisiert 1 N während der Eintauchphase und 0 N während der Freiphase.

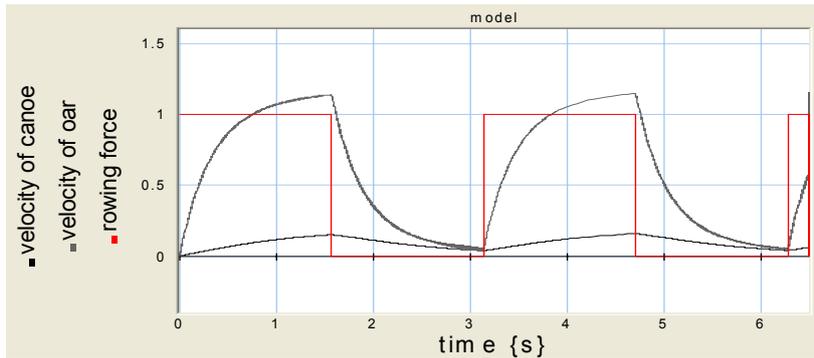


Abb. 83: Simulation der Ruderdynamik

2D Ruderdynamik

Das Modell soll nun auf Zweidimensionalität erweitert werden. Abb. 84 zeigt ein Kanu mit zwei Rudern. Das Kanu kann in Translations-Richtung x und Rotations-Richtung r bewegt werden. Es gilt dann

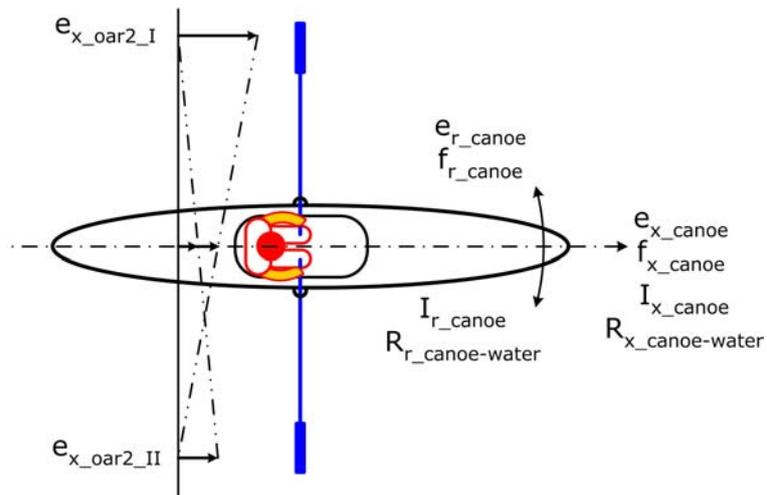


Abb. 84: 2D Ruderdynamik

$$e_{x_canoe} = \frac{e_{x_oar_I} + e_{x_oar_II}}{2}$$

$$e_{r_canoe} = e_{x_oar_I} - e_{x_oar_II}$$

mit Ex_oar2_I and Ex_oar2_II als Kräfte des Ruders gegen das Wasser.

Eine Mixed Reality Modellierung der 2D Dynamik führt zu Abb. 85: Die Ruder werden als Schnittstelle zwischen realer und virtueller Dynamik betrachtet. Das Übersetzungsverhältnis (Transformer) ist $m=2$, '*name of element_I*' bezeichnet die Elemente des ersten Ruders, '*name of element_II*' bezeichnet die des zweiten Ruders, 'part A' beschreibt die Dynamik des realen Ruders *oar1_I/II*; 'part B' beschreibt die Dynamik des virtuellen Ruders *oar2_I/II*, virtuellen Kanus und virtuellen Wassers. ZeroJunciton2 ist durch einen Hyper-Bond mit TF1*, ZeroJunciton4 mit TF3* verbunden. Die Kraft des Ruderers ist die Summe der Ruderkräfte in x- und r-Richtung.

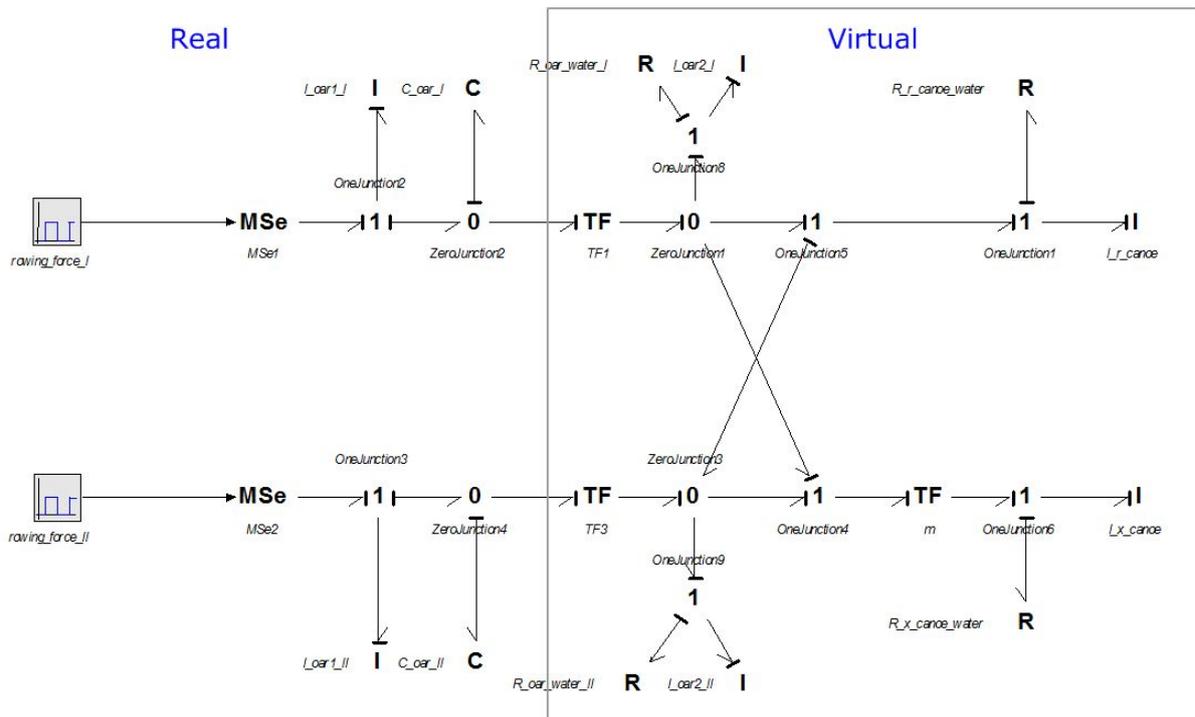


Abb. 85: 2D Mixed Reality Ruderdynamik (Mixed Reality)

$$I_{x_canoe}^* = 5 \text{ N-s}^2/\text{m}, R_{x_canoe-water}^* = 5 \text{ N-m-s},$$

$$I_{r_canoe}^* = 10 \text{ N-s}^2/\text{m}, R_{r_canoe-water}^* = 10 \text{ N-m-s},$$

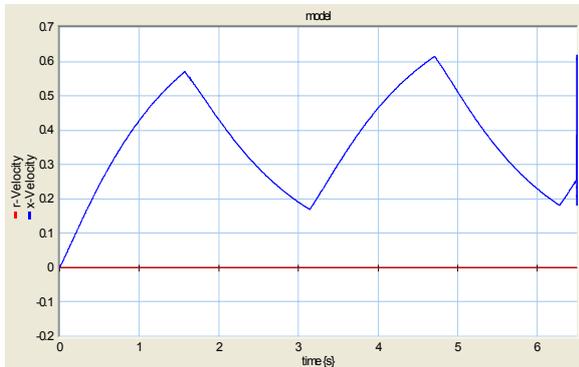
$$I_{oar1_I} = I_{oar1_II} = 0.1 \text{ N-s}^2/\text{m},$$

$$I_{oar2_I}^* = I_{oar2_II}^* = 0.5 \text{ N-s}^2/\text{m},$$

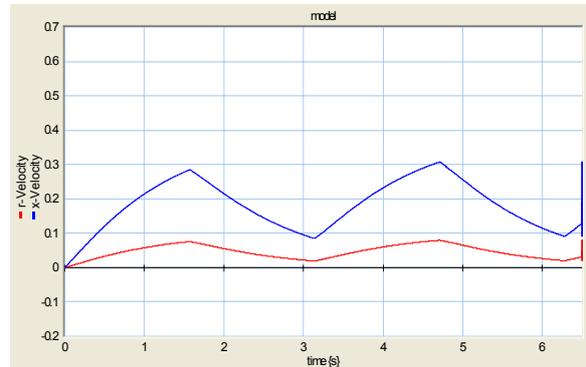
$$TF_1^* = TF_3^* = 1,$$

$$C_{oar_I} = C_{oar_II} = 0.0001 \text{ m/N},$$

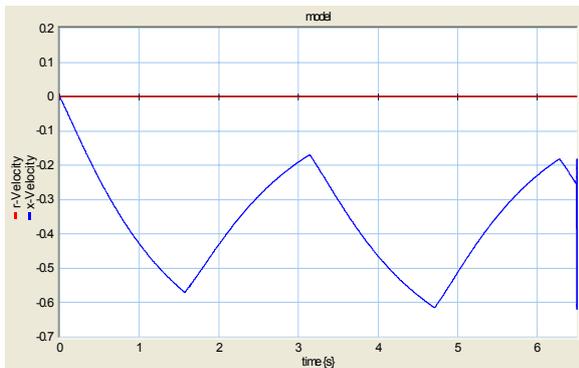
$$\text{and } TF_m^* = 0.5$$



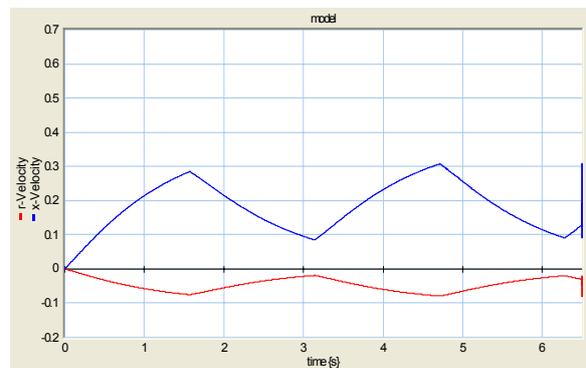
(a) Ruderkraft I = 1, Ruderkraft II = 1



(b) Ruderkraft I = 1, Ruderkraft II = 0



(c) Ruderkraft I = -1, Ruderkraft II = -1



(d) Ruderkraft I = 0, Ruderkraft II = 1

Abb. 86: Simulation in 20-sim

Mixed Reality Rowing Dynamics

Die Mixed Reality Dynamik mit implementierten Hyper-Bonds ist in Abb. 87 dargestellt: *flow_OneJunction1* liefert die Geschwindigkeit des Kanus in r-Richtung, *flow_OneJunction6* die Geschwindigkeit in x-Richtung.

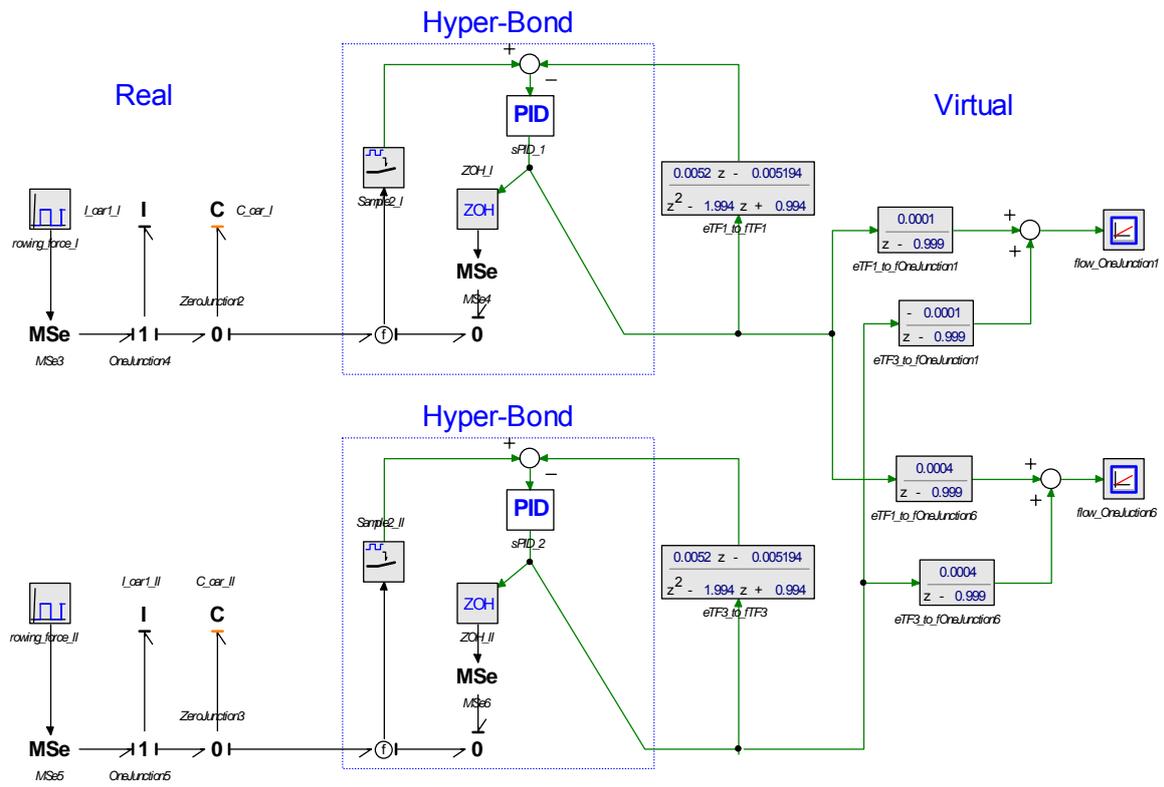
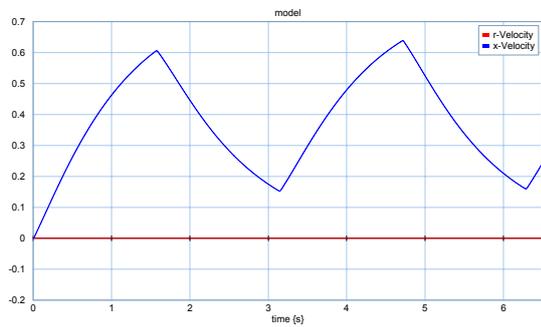
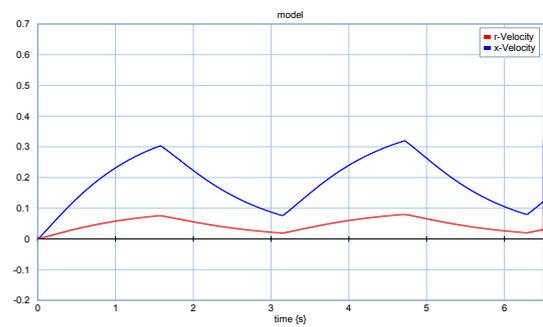


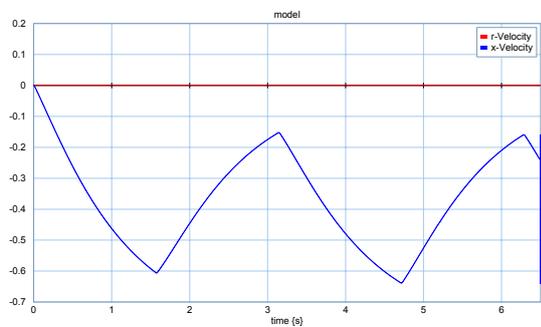
Abb. 87: Implementierung in 20-sim. ($Rz_I = Rz_{II}=0.05$)



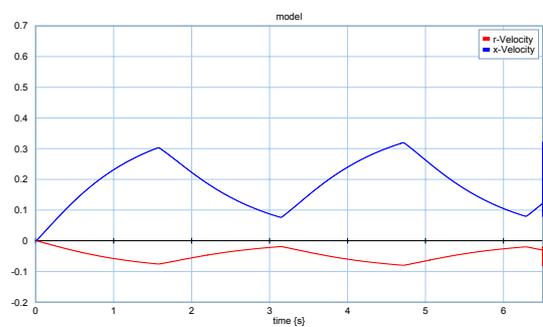
(a) Ruderkraft I = 1, Ruderkraft II = 1



(b) Ruderkraft I = 1, Ruderkraft II = 0



(c) Ruderkraft I = -1, Ruderkraft II = -1



(d) Ruderkraft I = 0, Ruderkraft II = 1

Abb. 88: Simulation der x/r-Geschwindigkeiten des Kanus: (a) vorwärts, (b) vorwärts/rechts, (c) rückwärts, (d) rückwärts/links

Die Simulation zeigt eine gute Übereinstimmung der Implementierung mit den theoretischen Werten

5.6 Technische Realisierung eines Beispiels mit realen Sensoren und Generatoren

In einer praktischen Studie (Schwarten 2006) wurden Probleme, die bei dem Bau und Betrieb eines implementierten Hyper-Bonds auftreten können, analysiert. Diese Arbeit

realisierte erstmals einen analogen Hyper-Bond für das Gebiet der Elektrotechnik. Das Hyper-Bond Subnetz wurde mit einem einfachen Netz aus 2 Widerständen und Spannungsquellen verbunden. Die Hardwarestruktur des Hyper-Bonds ist in Abb. 89 dargestellt. Der Leistungsfluss kann bidirektional zwischen den linken und rechten Ports erfolgen. Es wird angenommen, dass beliebige Spannungsquellen am linken und rechten Port anliegen können und eine Flussrichtung in beiden Richtungen möglich ist.

Leistung kann bidirektional über den Hyper-Bond zwischen linkem und rechtem Port fließen und soll eine Leistungsbalance herstellen. Der Regelalgorithmus berechnet die Differenz zwischen Leistungs-Input auf beiden Port-Seiten und kompensiert mit einer Output-Leistung in beide Ports. Abb. 90 zeigt die Ergebnisse dieses Experiments LC ist der elektrische Strom auf der linken Seite, RC der auf der rechten, DC die Differenz. V ist die Spannungsdifferenz zwischen beiden Seiten. Wenn eine Änderung in der linken Spannung erfolgte, brauchte das System 0.5 sec zur Herstellung der Leistungsfluss Balance.

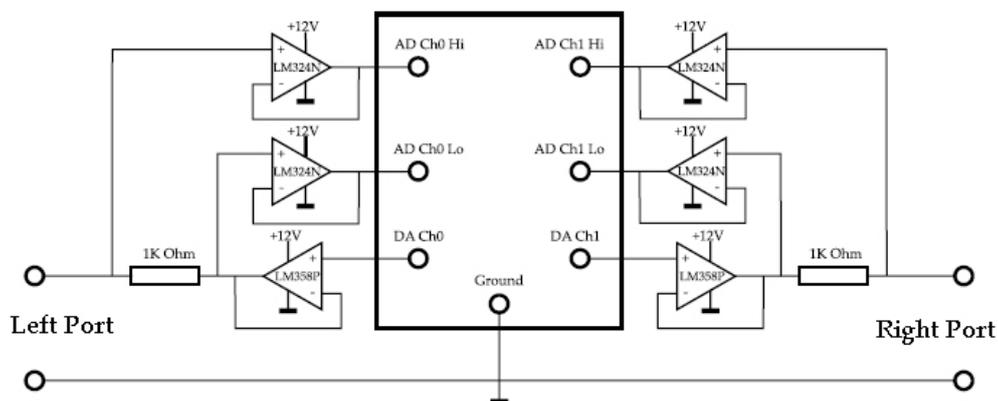


Abb. 89: Das virtuelle Kabel

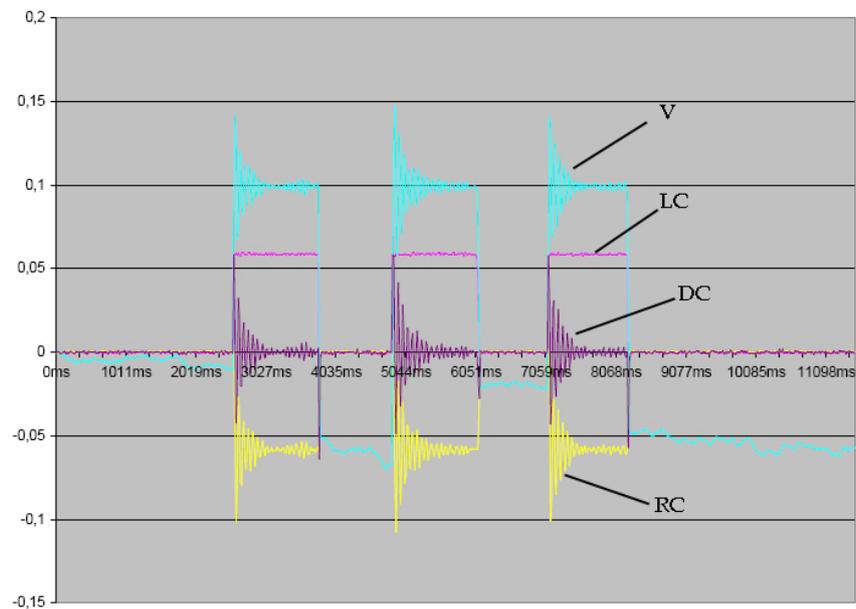


Abb. 90: Simulation eines virtuellen Kabels

LC ist der Strom am linken Anschluss, RC der am rechten, DC ist die Stromdifferenz zwischen linkem und rechtem Anschluss, V ist die Spannungsdifferenz zwischen den Anschlüssen.

„Es reichte nicht aus, einen schnellen Rechner zu benutzen. Vor allem geht es darum eine möglichst kurze Zeit für die Rückkopplung im Regelkreis zu erreichen. Damit ist die Zeit gemeint, die das System benötigt, um eine an einer Stelle eingegebene Information durch alle Stationen zu senden und wieder eine Reaktion zu erhalten, die auf der eingegebenen Information beruht. Als Flaschenhalse lassen sich zurzeit zwei Ursachen benennen: erstens die Transferzeiten von Rechnerkopplungen bei einer Vernetzung, und zweitens die Analog/Digital-/Digital/Analog-Wandlung. Letztere sind sehr häufig so ausgelegt, dass zwar eine hohe Samplingrate erzielt wird, die Daten aber nur blockweise an das System weitergegeben werden, was die Latenzzeit um Größenordnungen heraufsetzt. Ein weiteres Problem stellt die geringe Auflösung der Wandler dar. 12-Bit, wie hier verwendet, werden in

vielen Anwendungen nicht ausreichend sein. Während sich die Probleme der Analog/Digital-/Digital/Analog-Wandler lösen lassen, indem hochwertigere Systeme eingesetzt werden, stellen die Latenzzeiten eines Netzes, wie des Internets, eine große Hürde dar.“ (Schwarten, 2006, S. 79)

5.7 Entwicklung eines Baukastens aus Submodellen (AP2.4)

Für eine geeignete Modellier- und Simulations-Umgebung soll ein Baukasten mit Submodellen dynamischer Systeme in Bondgraph-Repräsentation entwickelt werden.

20-sim bietet die Möglichkeit, Submodelle zu erstellen. Dabei wird zwischen graphischen Submodellen (Graphical Submodels) und Gleichungs-Submodellen (Equation Submodels) unterschieden.

Bei beiden Typen werden die Inputs und Outputs der Submodelle zuerst definiert. Bei den Gleichungs-Submodellen wird schließlich das Verfahren, welches das Submodell erfüllen soll, mit Hilfe von Gleichungen definiert. Bei dem graphischen Submodell werden Verfahren graphisch, also mit Hilfe von Bondgraphen, Signalflussdiagrammen oder elektrischen Netzwerken, dargestellt.

Für den theoretischen sowie implementierten Hyperbond eignen sich zwar beide Typen, jedoch ist das graphische Submodell anschaulicher und intuitiver zu verstehen. Es wird der Hyperbond aus Abb. 19: Theoretischer Hyperbond (sensing flow, generating effort)

für das Submodell verwendet. Als erstes werden die Inputs und Outputs folgendermaßen definiert:

Es gibt einen Input *right* und einen Output *left*. Somit entsprechen die Pfeilrichtungen der Energiekanten der Vorschrift, dass eine Kante in das System, die andere aus dem System führt. Des Weiteren wird die Kausalität bei *left* und *right* auf *fixed effort out* gestellt,

da der Hyperbond jeweils Flow misst und Effort erzeugt und das an den Output und Input weitergibt.

Abb. 91 zeigt den Hyperbond als Submodell.

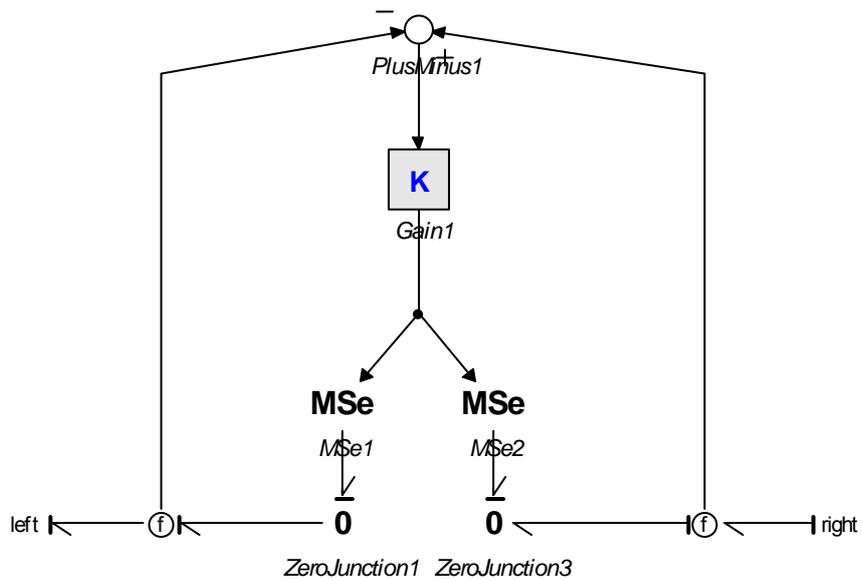


Abb. 91: Hyperbond als Submodell



Abb. 92: Theoretischer Hyperbond Submodell Symbol

Abb. 92 zeigt das Symbol, welches das Submodell für den Theoretischen Hyperbond repräsentiert. In zukünftigen Beispielen können die Hyperbonds durch derartige Symbole für Submodelle repräsentiert werden. Dadurch erleichtert sich der Entwurf von Hyper-Bond Systemen erheblich.

5.8 Typische Mechatronik-Entwurfsaufgabe ohne und mit Hyper-Bond-Technik (AP3.1)

Am Beispiel eines Servomotors soll die Methode des Entwurfs eines Mechatroniksystems nach Van Amerongen (2000) um Perspektiven erweitert werden, die sich aus der Anwendung einer Hyper-Bond-Technik eröffnen.

Der traditionelle Entwurf geregelter technischer Systeme sieht den Entwurf und die Optimierung eines Reglers für eine gegebene Regelstrecke (das technische System) vor. Van Amerongen plädiert beim mechatronischen Entwurf für eine integrative Vorgehensweise, in der Regler und System gemeinsam zur Disposition für ein gewünschtes Verhalten stehen. Am Beispiel eines Servomotors mit einem internen Transmissionsriemen für die Übersetzung kann demonstriert werden, dass eine bessere Qualität des Servomotorverhaltens (Einschwingzeit, Fehlerintegral) erreicht wird, wenn sowohl die K-Faktoren der Regelung als auch die R-, I-, C-Parameter der Regelstrecke in den zulässigen Grenzen variiert werden, also z.B. die Steifigkeit des Transmissionsriemens. Dieses integrierte Vorgehen nach Van Amerongen setzt eine Modellierung aller Komponenten des Systems und dessen Simulation in einer Simulationsumgebung voraus, die es erlaubt, eine systematische Mehrparameter-Variation als Serie mit Optimierungsverfahren wie *Steepest Descend* o.ä. durchzuführen. Mit Hilfe der Hyper-Bond Technik, lässt sich theoretisch ein hybrides System optimieren, das aus realen variablen Komponenten, für die noch keine Modell existiert, und Simulationsmodellen, die über Hyper-Bonds mit den realen Komponenten verbunden sind, besteht. Wie sinnvoll dieses Vorgehens ist, kann nach den oben dargestellten Erkenntnissen erst in weiteren exemplarischen Studien untersucht werden.

5.9 Weitere Beispiele für den Einsatz von Hyper-Bonds (AP3.2)

Es hat sich gezeigt, dass die konkrete Implementierung wegen der Diskretisierungs- und Verzögerungsproblematik und den daraus resultierenden Fehlern bzw. Instabilitäten sorgfältig einer Kosten/Nutzen Analyse unterzogen werden sollte. Durch hohe Kosten schneller und genauer Sensorik, Aktorik und Netzverbindungen kann sich eine Hyper-Bond Lösung als zu aufwändig erweisen.

Eine neue Perspektive eröffnet sich jedoch für den Einsatz des theoretischen Hyperbonds bzw. seiner Implementierung als Simulationskomponente. Diese reine Digitallösung, ohne D/A/D Wandlung und schnellen Zykluszeiten, eignet sich für eine bisher nicht gekannte Modellierung und Simulation unter ständiger Physik. Erste Versuche in diese Richtung sind viel versprechend und werden in einer folgenden Publikation vorgestellt.

5.10 Demonstration einer Hybrid-Rechner Anwendung (AP3.3)

Dieses Arbeitspaket wurde nicht realisiert, da die bisherigen Ergebnisse noch keine diesbezüglich brauchbaren Ergebnisse lieferten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass das Hyper-Bond Konzept eine interessante Sicht auf hybride (real/virtuell, analog/digital) Modelle technischer Systeme eröffnet. Dabei konnten die beiden Ausgangsthesen präzisiert und korrigiert werden. Es zeigte sich insbesondere, dass der theoretische Hyperbond die Erwartungen bezüglich einzelner und sequenzieller Schnitte erfüllt, beliebige Schnitte aber im konkreten Fall untersucht werden müssen. Bezüglich der Implementierung der Hyper-Bond Technik mit realer Sensorik/Aktorik kann die vorliegende Arbeit eine methodische Hilfe zur Hand geben, um abzuschätzen, welche Fehler- und Stabilitätscharakteristik bei angeschlossenen Teilsystemen, die bekannt sein müssen, bei gegebener Hardware zu erwarten ist. Insbesondere lässt sich die Hoffnung auf eine vollkommen lokale Lösung des implementierten Hyper-Bonds unabhängig von den angeschlossenen Subsystemen nicht aufrecht halten. Eine kontrolltheoretische Abschätzung im oben demonstrierten Sinne ist erforderlich.

Für den Einsatz des Hyper-Bondkonzeptes in Simulatoren spricht die Tragweite der ersten These.

7 Literatur

20-sim (2008): <http://www.20-sim.com>.

Adams (2008): <http://www.mscsoftware.com>.

Adams, R. J., Hannaford, B. (1999): Stable Haptic Interaction with Virtual Environments, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.15, S. 465-474.

Amerongen, J. van (2000): Modelling, Simulation and Controller Design for Mechatronic Systems with 20-sim Proc. 1st IFAC conference on Mechatronic Systems, pp. 831-836, Darmstadt, Germany.

Badique, E. (2001): Under Construction in Europe: Virtual and Mixed Reality for Rich Media Experience. In : Balet, Subsol, Torquet (Ed) s.u.

Baudin, V., Faust, M., et al (2004): Lab@Future, IFIP World Conference 2004, Toulouse

Benford, S., Greenhalgh, C., Reynard, G., Brown, C., Koleva, B. (1998): Understanding and Constructing Shared Spaces with Mixed-Reality Boundaries, ACM Trans. Computer-Human Interaction, Vol. 5, No.3, S. 185-223.

Bouraoui, A. (2008): Transformationen von Bond-Graphen zum Vergleich elektromechanischer Systeme. Diplomarbeit, Universität Bremen.

Brauer, V. (1996): Simulation Model Design in Physical Environments. Computer Graphics Vol 30, Nr. 4, 55-56, ACM Siggraph

Brave, S., Ishii, H., Dahley, A. (1998): Tangible Interfaces for remote Collaboration and Communication. Proc. Of CSCW '98, Nov. 14-18

Brereton, M., McGarry, B. (2000): An Observational Study of How Objects Support Engineering Design Thinking and Communication: Implications for the design of tangible media. CHI 2000 Conf. Proceedings, acm press, 217-224

Bruns, F. W. (1996): Grasping, Communicating, Understanding - Connecting Reality and Virtuality. AI & Society, 10: 6-14

Bruns, F. W., Brauer, V. (1996): Bridging the Gap between Real and Virtual Modeling - A New Approach to Human-Computer Interaction. 2. IFIP 5.10 Workshop on Virtual Prototyping, Arlington, Texas (artec Paper Nr. 46, Universität Bremen)

Bruns, F. W. (1999): Complex Construction Kits for Engineering Workspaces, in: Streit, N. A., Siegel, J., Hartkopf, V., Konomi, S. (Hrsg): Cooperative Buildings – Integrating Information, Organizations and Architecture. Second Int. Workshop, CoBuild'99. Lecture Notes of Computer Science 1670, Heidelberg: Springer, S. 55-68

Bruns, F. W. (2000a): Rechnergestützte Übergänge zwischen gegenständlichen und abstrakten Modellen produktionstechnischer Systeme (RUGAMS), IFA Institut für Farbrikanlagen (Ed.): Abschlusskolloquium zum DFG-Schwerpunktprogramm

„Modellierung der Produktion“, 7.-8. 3. 2000, Universität Hannover, E2-6,1-4, ISBN 3-00-006281

- Bruns, F. W. (2000b): Complex Objects and anthropocentric Systems Design. In: L.M. Camarinha-Matos, H. Afsarmanesh, H.-H. Erbe (Ed.), *Advances in networked Enterprises: Virtual Organizations, Balanced Automation and Systems Integration*, Kluwer Academic Publishers, S. 249-258
- Bruns, F. W. (2001): Hyper-Bonds – Enabling Mixed Reality. ARTEC Paper 82, Universität Bremen, <http://arteclab.artec.uni-bremen.de/publications/artec-01-Bruns-hyperbonds.pdf>
- Bruns, F. W.; Ernst, H.; Faust, M.; Amaral, P. G.; Gathmann, H.; Grund, S.; Hadfield, I.; Huyer, J.; Karras, U.; Pundt, R.; Schmudlach, K. (2002): Distributed Real and Virtual Learning Environment for Mechatronics and Tele-service. Abschlussbericht zum EU-Projekt DERIVE, ARTEC Paper 102, <http://arteclab.artec.uni-bremen.de/publications/artec-02-Bruns-artec-paper102DERIVEFinalReport.pdf>
- Bruns, F. W. (2005): Hyper-Bonds - Distributed Collaboration in Mixed Reality. *Annual Reviews in Control* 29, 117-123, Elsevier, 2005
- Bruns, F. W., Erbe, H.-H. (2005): Mixed Reality with Hyper-Bonds. *Control Engineering Practice*, Elsevier, 2005, in print
- Cellier, E. F., Elmqvist, H., Otter, M. (1995): Modeling from Physical Principle. In W. S. Levine (Ed): *The Control Handbook*, CRC Press, Boca Raton, 1995, 99-108.
- Colgate, J. E., Schenkel, G. (1994): Passivity of Class of Sampled-Data Systems: Application to Haptic Interfaces, *American Control Conference*, Vol. 3, S. 3236-3240.
- Davis, A. M. (2004): *Analyse linearer Schaltungen*. Hüthig Verlag, Landsberg.
- Faust, M. (2007): *Multi-Perspektivität in Modellierung und Simulation*, Dissertation, Fachbereich 3 (Mathematik & Informatik) , Universität Bremen.
- Fitzmaurice, G. W., Ishii, H., Buxton, W. (1995): Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces. *CHI'95 Mosaic of Creativity*, 442-449
- Grund, S., Grote, G. (1999): Auswirkungen einer gegenständlich-virtuellen Lernumgebung auf Wissen und Problemlösen. *Arbeit - Zeitschrift für Arbeitsforschung, Arbeitsgestaltung und Arbeitspolitik*. Heft 3/1999. Wiesbaden. Westdeutscher Verlag, 312-317
- Grund, S., Grote, G. (2001): Integrating Real and Virtual Training Tools via a Graspable Interface in Vocational Training: The Evaluation of a New Training Tool, In: M. J. Smith & G. Salvendy (Ed.): *System, Social and Internationalization Design Aspects of Human Computer Interaction*, Lawrence Erlbaum Association, London, 2001, 819-823.
- Hannaford, B., Ryu, J. H (2002): Time-domain passivity control of haptic interfaces, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.18, S. 1-10.
- Hornecker, E. (2004): *Tangible User Interfaces als kooperationsunterstützendes Medium*. Dissertation, Bremen, Juni 2004.

- Ishii, H., Ullmer, B. (1997): *Tangible Bits: Toward Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms*. CHI'97, Atlanta, Georgia
- Ishii, H. (1996): *Tangible Media Group Project List*. Internet: media.mit.edu
- Ishii, H. (2004): *Bottles: A Transparent Interface as a Tribute to Mark Weiser*, IEICE Tran. Inf. & Syst., Vol E87-D, No. 6
- Ishii, H., Ratti, C., Piper, B., Wang, Y., Biderman, A., Ben-Joseph, E. (2004): *Bringing clay and sand into digital design – continuous tangible user interfaces*, BT Technology Journal, Vol., 22 No. 4
- Kang, S. B., Ikeuchi, K. (1994): *Grasp Recognition and Manipulative Motion Characterization from Human Hand Motion Sequences*. Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Diego, Cal., Vol. 2, 1759-1764
- Karnopp, D. C., Margolis, D. L., Rosenberg, R. C. (1990): *System Dynamics – A unified Approach*. John Wiley, New York
- Kato, H., Billingham, M., Blanding, R., May, R. (1999): *ARToolKit PC version 2.11 Human Interface Technology Laboratory*, University of Washington, Seattle
<http://www.hitl.washington.edu>
- Kemnade, A. (2007): *Verwendung von Elektronik Software als Simulationskern für Bondgraphen*, Diplomarbeit, Universität Bremen.
- Klinker, G., Stricker, D., Reiners, D. (1999): *Augmented Reality: A Balance Act between High Quality and Real-Time Constraints*, In: Y. Ohta and H. Tamura (eds.), *Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds*, Proc 1. Int. Symp. on Mixed Reality (ISMR '99), 325-346.
- Matlab (2008): <http://www.mathworks.com>.
- Melchiorri, C. (2003): *Robotic Telemanipulation Systems: An Overview on Control Aspects*. Proc. 7th IFAC Sympos. on Robot Control, Sept. 1-3, Wroclaw, Poland
- Mostermann, P. J. (1997): *Hybrid dynamic systems: A hybrid Bond Graph Modeling Paradigm and its Application in Diagnosis*. Dissertation, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee
- Milgram, F., Kishino, F. (1994): *A taxonomy of mixed reality and virtual display*. IEICE Trans. Inf. & Sys. Vol F77-D, no 12, 1321-1329
- Milgram, F. & Coquhoun, H. (1999): *A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration*. In: Ohta & Tamura s.u.
- Müller, D. (2004): *Mixed Reality Learning and Working Environments - The MARVEL approach*. Proceedings of the 12th European Conference for Educational and Information Technology (Learntec 2004), Karlsruhe 2004.
- Nise, N. S. (2004): *Control Systems Engineering*, John Wiley & Sons, Inc.
- Ohta, Y., Tamura, H. (1999): *Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds*. New-York.

- Paradiso, J. A. (1996): The Interactive Balloon: Sensing, Actuation and Behavior in a Common Object. MIT Media Laboratory, Draft 2.0, to be published in the IBM Systems Journal
- Paynter, H. M. (1961) : Analysis and Design of Engineering Systems, MIT Press, Cambridge, MA
- Resnick, M. (1993): Behavior Construction Kits. Communications of the ACM, 36(7), 64-71
- Rekimoto, J. (1998): Multiple-Computer User Interfaces: A Cooperative Environment Consisting of Multiple Digital Devices. In: Streitz, N., Konomi, S., Burkhardt, H.-J. (Eds.) Co-Build98, 42-52
- RUGAMS (1995): Rechnergestützte Übergänge zwischen gegenständlichen und abstrakten Modellen produktionstechnischer Systeme. Artec - Universität Bremen
- Schäfer, K., Bruns, F. W. (2001): PLC-Programming by Demonstration with graspable Models. Proceedings of 6th IFAC Symposium on Cost Oriented Automation. Berlin, 8.-9. 10. 2001.
- Schwarten, L. (2006): Das virtuelle Kabel - eine elektrische Verbindung zwischen der Physical –Reality und der Virtual-Reality. Diplomarbeit, Universität Bremen.
- Spice (2008): <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/>. Sutherland, Ivan E. (1965): The Ultimate Display, in: Proc. IFIP Congress, Washington, Vol. 1, 508
- Tachi, S. (1999): Augmented Telexistence. In: Ohta, Y., Tamura, H. (1999): Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds. New-York, 251-260
- Weiser, M. (1993): Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing. Communications of the ACM, Vol. 36, No. 7, 74-78
- Wellner, P. (1993): Interacting with Paper on the DigitalDesk. In: Communications of the ACM, 36/7
- Wellner, P., Mackay, W., Gold, R. (1993): Computer-Augmented Environments: Back to the Real World. Communications of the ACM, 36, 7, 24ff
- Yoo, Y. H. & Bruns, F. W. (2004a): Realtime Collaborative Mixed Reality Environment with Force Feedback. 7th IFAC Symposium on Cost Oriented Automation, 2004, Ottawa
- Yoo, Y., Bruns, W. (2004b): Motor Skill Learning with Force Feedback in mixed Reality. 9th IFAC Symp. on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, Atlanta
- Yoo, Y. H. (2004): Bi-directional Mixed Reality Electric Circuit – Virtual Equivalence –, artec Paper 114, Bremen University.
- Yoo, Yong-Ho (2007): Mixed Reality Design Using Unified Energy Interfaces, Dissertation, Bremen University.

Das artecLab:

bildet eine experimentelle Gruppe von Wissenschaftlern, Ingenieuren und Künstlern.

Wir analysieren und erproben formale und nicht-formale Methoden der Modellierung, Produktion und Simulation.

Wir konstruieren sensorisierte Computer-Umgebungen und erforschen neue Formen der Mensch-Maschine-Interaktion.

Wir experimentieren mit der Vermischung von realen und virtuellen Welten an der Grenze zwischen maschineller Funktion und menschlicher Phantasie.

Wir sind Grenzgänger auf den Gebieten Kunst, Arbeit und Technik: Art, Work and Technology.

Der Mixed Reality Ansatz eröffnet neue Sichtweisen.

Wir modellieren mit realen Gegenständen, die eine reiche sinnliche Erfahrung mit der Widerspenstigkeit realer Phänomene vermitteln.

Wir formen virtuelle Gegenstände, die vielfältige Übersetzungen zwischen konkreten und abstrakten Sichtweisen realisieren.

Wir bauen Schnittstellen und Interfaces, die komplexe Verhältnisse zwischen der realen Welt der physischen Gegenstände und der virtuellen Informationswelt erfahrbar machen.

Die Computer-Wissenschaften und ihre mathematischen Grundlagen haben eine eigene Ästhetik.

Wir verstehen Ästhetik als Balance zwischen sinnlicher Erfahrung und verstandesmäßiger Durchdringung der uns umgebenden Phänomene.

Wir haben das Ziel, eine spielerische Erfahrung der Mensch-Maschine-Beziehung zu ermöglichen - auch jenseits der Grenzen von Rationalität, Nützlichkeit oder Effizienz.

Wir verfolgen gleichzeitig einen partizipatorischen und sozial verpflichteten Ansatz.

artecLab Paper

1. Jörg Richard, F. Wilhelm Bruns, Mensch und Maschine im Spielraum - Technische Praxis und Ästhetische Erfahrung
2. F. Wilhelm Bruns, Hyperbonds - Applications and Challenges
3. Yong-Ho Yoo, Energy Interface for Mixed Reality Design
4. Micado, Projektbericht des studentischen Projekts micado zu Mixed Reality Caves
5. Micarpet, Projektbericht des studentischen Projekts micarpet zu Mixed Reality Caves
6. Micasa, Projektbericht des studentischen Projekts micasa zu Mixed Reality Caves
7. Bernd Robben, Ralf Streibl, Alfred Tews, Mixed Reality Adventures, Bericht vom Symposium im Kino 46
8. S. Budde, C. Fischer, Entwicklung des Autoradios
9. D. Pratsch, Der Aero-Cave – Wind zur Orientierung in virtuellen Welten
10. Themir, Theater in gemischten Welten – Projektbericht
11. J. Richard, Grenzüberschreitungen – Kultur im Kontext
12. Symposium – Media Theory's Role in Digital Media Studies
13. F. Wilhelm Bruns, Yong-Ho Yoo, Karolis Kleiza, Einheitliches Konzept für die Verbindung digitaler und physikalischer Modelle mit Hyper-Bonds