

## Dissertationen

Martin Pfeifer\*

# Automatisierte Erzeugung von Modellen und Beobachtern für physikalisch vernetzte Systeme

Automated model generation and observer design for interconnected systems

<https://doi.org/10.1515/auto-2022-0021>

Empfangen 15. Februar 2022; angenommen 16. Februar 2022

**Zusammenfassung:** Diese Arbeit befasst sich mit der Automatisierung der physikorientierten Modellbildung und des darauf basierenden Beobachterentwurfs. Hierzu werden Port-Hamiltonsche Methoden entwickelt, die erstmals eine durchgängige Automatisierung der Modellbildung und des Beobachterentwurfs für eine große Klasse physikalisch vernetzter Systeme ermöglichen.

**Schlagwörter:** Modellbildung, Beobachterentwurf, Automatisierung, Port-Hamiltonsche Systeme

**Abstract:** This work addresses the automated generation of physical-based models and model-based observers. We develop port-Hamiltonian methods, which for the first time allow a complete and consistent automation of these two processes for a large class of interconnected systems.

**Keywords:** modeling, observer design, automation, port-Hamiltonian systems

Physikalisch vernetzte Systeme stellen eine wesentliche Ausprägung moderner Gesellschaften dar. Bekannte Beispiele sind die Energiesysteme, die uns immerzu umgeben. Mit der Einführung neuer Kommunikationstechnologien und in Folge der fortgeschrittenen Nutzung von Synergiepotenzialen entstanden in den letzten Jahren physikalisch vernetzte Systeme ungeahnten Ausmaßes. Aufgrund der Komplexität dieser Systeme gelangen bestehende physikbasierte Modellierungs- und Beobachterentwurfsmethoden an ihre Grenzen. Modelle und Beobachter können deshalb häufig nur unter erheblichen Vereinfachungen der physikalischen Systembeschreibung

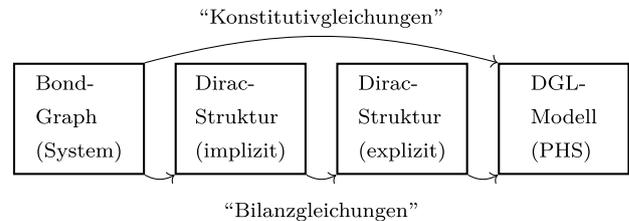


Abb. 1: Vorgehen bei der automatisierten Modellbildung.

entwickelt werden. Die Anwendbarkeit der so entwickelten Modelle und Beobachter ist jedoch auf den Gültigkeitsbereich dieser Vereinfachungen beschränkt.

Die hier vorgestellte Dissertation schafft dafür Abhilfe. Leitgedanke ist es, die Vorgänge der Modellbildung und des Beobachterentwurfs zu *automatisieren*. Hierzu werden automatisierbare Modellierungs- und Beobachtermethoden auf Basis der *Port-Hamiltonschen Systemtheorie* entwickelt.

Der erste methodische Beitrag der Dissertation besteht in der mathematisch rigorosen Herleitung von Methoden zur automatisierten Erstellung von Zustandsraummodellen für eine große Klasse physikalisch vernetzter Systeme. Ziel dieser Methoden ist es – ausgehend von einer Bond-Graphen-Darstellung des Systems – auf konstruktivem Wege eine Systembeschreibung in Form einer gewöhnlichen Differentialgleichung (DGL) mit Port-Hamiltonscher Struktur zu erzeugen.

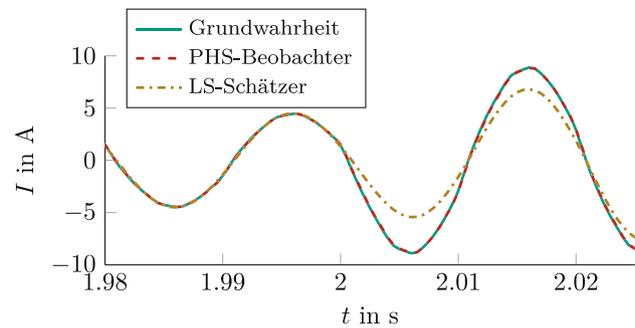
Abbildung 1 zeigt das prinzipielle Vorgehen, in welchem strikt zwischen den Konstitutivgleichungen energiespeichernder und energiedissipierender Systemelemente und den Bilanzgleichungen der Verschaltungsstruktur unterschieden wird. Die Bilanzgleichungen des Bond-Graphen-Systems werden mittels einer algebraischen Struktur, der sogenannten *Dirac-Struktur*, beschrieben. Ein zentraler Schritt auf dem Weg zu einem expliziten DGL-Modell ist die Umformung der Dirac-Struktur von einer impliziten in eine explizite Darstellung. Die explizite Darstellung wird schließlich mit den Konstitutivgleichungen zu einem Port-Hamiltonschen System (PHS) zusammengeführt.

\*Korrespondenzautor: Martin Pfeifer, Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe, Germany, E-Mail: martin.pfeifer@kit.edu

Aus den beschriebenen Methoden resultieren (a) notwendige und hinreichende Bedingungen an die physikalische Beschaffenheit des Systems, um dieses in ein Zustandsraummodell zu überführen und (b) Algorithmen für eine automatisierte Modellerstellung auf Basis der Bond-Graphen-Darstellung des Systems.

Die so erhaltenen PHS-Modelle können für numerische Simulationen sowie den modellbasierten Entwurf von Reglern und Beobachtern eingesetzt werden. Der weitere Verlauf der Arbeit befasst sich mit letzterem, d. h. dem PHS-basierten Entwurf von Beobachtern. Es werden zentrale und verteilte Beobachter für verschiedene Klassen von linearen und nichtlinearen Systemen vorgestellt. Die zugehörigen Entwurfsverfahren sind vollständig automatisierbar. Es zeigt sich, dass sich die physikalischen Systemeigenschaften gewinnbringend für den Beobachterentwurf einsetzen lassen. Beispielsweise kann für eine Klasse streng passiver nichtlinearer Systeme gänzlich auf eine Messfehlerinjektion verzichtet werden; der exponentiell konvergente Beobachter besteht dann lediglich aus einem Duplikat des Systemmodells; der Entwurf ist somit unmittelbar automatisierbar.

Die Methoden und Algorithmen aus der Arbeit sind in einem Software-Prototyp implementiert. Dessen Einsatz wird unter anderem an einem großskaligen Stromnetz demonstriert. Symbolische Modelle und Beobachter mit einhundert und mehr Zuständen, Eingängen und Ausgängen werden binnen Sekunden automatisiert erzeugt. Numerische Simulationen belegen die Funktionsfähigkeit der berechneten Modelle und Beobachter. Wie sich zeigt, ist der Stromnetz-Beobachter imstande, die Schätzgüte der heute in den Leitwarten verwendeten Least-Squares-Zustandsschätzung erheblich zu verbessern (siehe Abb. 2).



**Abb. 2:** Schätzung eines Laststromes unter Auftreten eines Lastsprunges bei  $t = 2$  s.

Die Dissertation wurde 2021 in englischer Sprache beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT) eingereicht und von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik genehmigt. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sören Hohmann und Univ.-Prof. Dr. techn. Andreas Kugi.

## Autoreninformationen



### Martin Pfeifer

Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe, Germany  
[martin.pfeifer@kit.edu](mailto:martin.pfeifer@kit.edu)

Dr.-Ing. Martin Pfeifer war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Seit 2021 ist er dort als Post-Doc tätig und leitet die Forschungsgruppe "Vernetzte Multi-Energiesysteme". Seine Forschungsarbeiten widmen sich der Entwicklung regelungstechnischer Methoden für digitale Zwillinge komplexer Systeme.