

Realisierbarkeit von verkoppelten Deskriptorsystemen

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik
der Universität Paderborn

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Carsten Balewski

Erster Gutachter: Prof. Dr. techn. Felix Gausch

Zweiter Gutachter Prof. Dr. techn. Martin Horn

Tag der mündlichen Prüfung: 29.06.2016

Paderborn 2016

Diss. EIM-E/327

Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik

Carsten Balewski

**Realisierbarkeit von
verkoppelten Deskriptorsystemen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4654-0

ISSN 0945-1005

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Heutzutage ist es in vielen Bereichen üblich, dass große umfangreiche Systeme in viele kleine Teilsysteme zerlegt, modelliert und über Verkopplungsgleichungen wieder zu einem Gesamtsystem zusammengefügt werden. Dieses hat den Vorteil, dass sehr oft schon auf vorhandene Modellierungen für die Teilsysteme zurückgegriffen werden kann oder aber auch entsprechende Software, wie Computer-Algebra-Systeme, hinzugezogen werden können. Allerdings treten dabei unter Umständen Probleme auf.

Teilsysteme, die vor der Verkopplung mit anderen Teilsystemen realisierbar waren, mutieren eventuell durch die Verkopplung zu nicht realisierbaren Systemen. Diese Eigenschaftsänderung muss zwangsläufig nicht auffallen, weil das Ergebnis, also das entstandene Gesamtsystem, augenscheinlich realisierbar sein kann. Dadurch kann es z.B. bei Simulationen zu Fehlern oder zu interessanten, nicht erwarteten Ergebnissen kommen.

Die Systembeschreibung der Teilsysteme, aber auch des Gesamtsystems über Zustandsdifferentialgleichungssysteme erweist sich sehr oft als nicht vorteilhaft, da dort nicht alle Eigenschaften dieser Systeme, wie z.B. Beschränkungen und Zwangsbedingungen, berücksichtigt werden. Bei der Systembeschreibung in Deskriptorform werden diese Eigenschaften im Rahmen von differential-algebraischen Gleichungen mit berücksichtigt. Ebenso geben viele der zur Modellierung benutzten Computer-Algebra-Systeme, wie z.B. Dymola, ihre Ergebnisse in Deskriptorform aus, so dass diese direkt für weitere Betrachtungen verwendet werden können.

In dieser Arbeit soll ein Kriterium formuliert werden, mit welchem die interne Realisierbarkeit verkoppelter Deskriptorsysteme überprüft werden kann. Dazu wird zunächst von regulären und realisierbaren semi-expliziten Index-1-Deskriptorsystemen ausgegangen, diese werden statisch verkoppelt und dann nach der Verkopplung auf ihre Realisierbarkeit überprüft. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen in einem ersten Schritt auf das verkoppelte Gesamtsystem, welches in expliziter Deskriptorform vorliegt, angewendet und als hinreichendes und notwendiges Kriterium formuliert werden. Im zweiten Schritt wird das formulierte Kriterium auf das dem expliziten Gesamtsystem zugrundeliegende semi-explizite Gesamtsystem in Deskriptorform erweitert; es ergibt sich hierfür ein weiteres Kriterium.

Weiterhin wird die Verkopplung von höher indizierten Deskriptorsystemen untersucht. Dazu werden einige Verfahren zur Indexreduktion angegeben, damit das Problem wieder auf Index-1-Systeme zurückgeführt werden kann. Anschließend kann schon das bekannte Verfahren zur Überprüfung der internen Realisierbarkeit angewendet werden.

Abschließend werden einige Beispiele von Deskriptorsystemen angegeben, auf die das entwickelte Verfahren erfolgreich angewendet wird.

Abstract

Today it is common practice in many industries to split large and extensive systems into numerous small subsystems, model them and then use coupling equations to re-assemble the subsystems into a complete system. The advantage of this approach is that already existing models or models delivered by appropriate software such as computer algebra systems can be used. However, problems may occur under certain circumstances.

Subsystems that were proper before coupling with other subsystems, may afterwards mutate to systems which are no longer be proper. This modification of system characteristics does not necessary become immediately apparent because the outcome, i.e. the resulting overall system, seems to be proper at first sight. Thus it is possible for example with simulations, that errors or interesting, unexpected results are the consequence of the process.

The description of the subsystems as well as the description of the overall system using state-space differential equations often turns out to be unfavorable because the equations do not take into account all the characteristics of the systems such as restrictions and constraints. A system description in the form of descriptor systems, on the other hand, includes such characteristics within the scope of differential-algebraic equations. Similarly, many computer algebra systems used for modeling such as Dymola output their results in the form of descriptors systems which can be used directly for further investigations.

The aim of this study is to formulate a criterion which can be applied to verify the internal properness of coupled descriptor systems. To this end, the following investigations based on regular and proper semi-explicit index-1-descriptor systems. Then these systems are statically coupled, and their properness is verified after coupling. In the first step the findings gained from this approach are to be applied in explicit descriptor form to the coupled overall system available, and then formulated as a sufficient and necessary criterion. The criterion thus formulated will then be extended in descriptor form to the semi-explicit overall system underlying the explicit overall system. This results in an additional criterion. In addition the coupling of descriptor systems with a higher index will be investigated. Several procedures for index reduction will be specified to this purpose, to be able refer the problem back to index-1-systems. The known procedure can subsequently be used to check the internal properness.

Finally, some examples for descriptor systems will be provided, and the procedure previously developed can successfully be applied to them.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik des Instituts für Elektrotechnik und Informationstechnik an der Universität Paderborn.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. techn. Felix Gausch für anregende Diskussionen und stetige Förderung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. techn. Martin Horn danke ich für das Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Korreferats.

Ebenfalls bedanke ich mich bei meinem Kollegen Dipl.-Ing. Robel Besrat für manch anregendes Gespräch und die sehr gute Zusammenarbeit.

Schließlich gebührt mein ganz besonderer Dank meiner Frau Stefanie Balewski für ihre restlose Unterstützung.

Diese Arbeit widme ich meiner viel zu früh verstorbenen Mutter Heidi Balewski.

Paderborn, im Juni 2016

Carsten Balewski

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
2 Nichtlineare Deskriptorsysteme	5
2.1 Systembeschreibungen von nichtlinearen Deskriptorsystemen	5
2.1.1 Implizites Deskriptorsystem	6
2.1.2 Semi-explizites Deskriptorsystem	6
2.1.3 Explizites Deskriptorsystem	7
2.2 Differentieller Index	7
2.3 Transformation eines semi-expliziten Deskriptorsystems in ein explizites Deskriptorsystem	12
2.4 Regularität und Realisierbarkeit	13
2.5 Modifizierter Shuffle-Algorithmus	15
2.6 Indexreduktion	21
2.7 Existenz und Eindeutigkeit der Lösung	23
2.7.1 Konsistente Anfangsbedingungen	24
2.8 Abschließendes Beispiel	25
3 Verkopplung von Index-1-Deskriptorsystemen	29
3.1 Interne Realisierbarkeit verkoppelter semi-expliziter Deskriptorsysteme	30
3.2 Verkopplung dynamischer Mehrgrößensysteme	35
3.2.1 Vergleich existierender Verfahren	39
3.3 Verkopplung von semi-expliziten Index-1-Deskriptorsystemen	40
3.3.1 Systembeschreibungen der zu verkoppelnden semi-expliziten Deskriptorsysteme	41
3.3.2 Betrachtung der Auswirkungen der Verkopplung auf die Deskriptor-Teilsysteme	43
3.3.3 Realisierbarkeit der Deskriptor-Teilsysteme nach der Verkopplung	55
3.3.4 Berechnung des verkoppelten expliziten Deskriptor-Gesamtsystems	56
3.3.5 Interne Realisierbarkeit des verkoppelten Deskriptor-Gesamtsystems	63

4	Verkopplung von höher indizierten Deskriptorsystemen	67
4.1	Höher indizierte semi-explizite Deskriptorsysteme	68
4.1.1	Indexreduktion durch den modifizierten Shuffle-Algorithmus	68
4.1.2	Indexanpassung durch strukturelle Analyse und angepasste Umstrukturierung	70
4.2	Höher indizierte implizite Deskriptorsysteme	70
4.2.1	Indexreduktion durch Substitution unerwünschter Variablen	71
4.2.2	Indexreduktion durch Anpassung der Topologie für die Schaltkreis-Simulation	71
4.2.3	Indexanpassung durch „geschickte“ Modellierung	71
4.3	Abschließende Bemerkungen	72
5	Untersuchung einer alternativen Verkopplungsstruktur	73
6	Beispiele	81
6.1	Verkopplung von Index-1-Deskriptorsystemen	81
6.1.1	Beispiel zur Verkopplung linearer Index-1-Deskriptorsysteme	81
6.1.2	Beispiel zur Verkopplung nichtlinearer Index-1-Deskriptorsysteme	85
6.2	Alternative Verkopplung von linearen Index-1-Deskriptorsystemen	90
7	Zusammenfassung und Ausblick	93
A	Anhang	97
A.1	Definitionen und Sätze zur Deskriptortheorie in Kapitel 2	97
A.2	Ausführliches Ergebnis zu Gleichung (3.45)	100
	Literatur	101

Abbildungsverzeichnis

3.1	Realisierbares explizites Deskriptorsystem D_e	30
3.2	Allgemeine Darstellung statisch verkoppelter expliziter Deskriptorsysteme $D_{e,i}$	31
3.3	Betrachtungen der Lösungen von Deskriptorsystemen	34
3.4	Struktur der statisch verkoppelten nichtlinearen Mehrgrößensysteme	36
3.5	Beispielsystem	40
3.6	Vergleich der Ergebnisse für das Beispiel von [2, 14]	40
3.7	Struktur der verkoppelten Deskriptorsysteme	44
3.8	Mögliche Ergebnisse der Jacobi-Matrix $\frac{\partial \hat{\mathbf{g}}_i}{\partial \mathbf{z}_i}$	47
5.1	Alternative Struktur der verkoppelten Deskriptorsysteme	73
6.1	Beispiel von verkoppelten Deskriptorsystemen	82
6.2	Verkoppeltes Feder-Masse-System	90
A.1	Zur Definition einer Mannigfaltigkeit	97