

Reihe 8

Mess-,  
Steuerungs- und  
Regelungstechnik

Nr. 1271

Dipl.-Ing. Holger Zipper,  
Magdeburg

## Verfahren zur Synchronisation betriebsparalleler Simulationen durch Online- Parameterschätzung





OTTO VON GUERICKE  
UNIVERSITÄT  
MAGDEBURG

EIT

FAKULTÄT FÜR  
ELEKTROTECHNIK UND  
INFORMATIONSTECHNIK

# Verfahren zur Synchronisation betriebsparalleler Simulationen durch Online-Parameterschätzung

## Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Holger Zipper  
geboren am 17.10.1986 in Gera

genehmigt durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christian Diedrich  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich

Promotionskolloquium am 19.02.2021



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 8

Mess-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik

Dipl.-Ing. Holger Zipper,  
Magdeburg

Nr. 1271

Verfahren zur  
Synchronisation  
betriebsparalleler  
Simulationen  
durch Online-  
Parameterschätzung

VDI verlag

Zipper, Holger

## **Verfahren zur Synchronisation betriebsparalleler Simulationen durch Online-Parameterschätzung**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 08 Nr. 1271. Düsseldorf: VDI Verlag 2021.

104 Seiten, 40 Bilder, 22 Tabellen.

ISBN 978-3-18-527108-3 ISSN 0178-9546,

€ 43,00/VDI-Mitgliederpreis € 38,70.

**Für die Dokumentation:** Betriebsparallele Simulationen – Synchronisation – Optimierung – Co-Simulation – Digitaler Zwilling

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung der Zustandssynchronisierung, welche eine betriebsparallele Simulation an eine industrielle Anlage kontinuierlich angleicht. Die betrachteten Simulationsmodelle liegen als Co-Simulation nach dem FMI Standard vor. Die Zustandssynchronisierung funktioniert nach dem Prinzip der Signal-Rückkopplung der Differenz zwischen betriebsparalleler Simulation und physischer Anlage. Die Synchronisation wird durch einen Optimierungsalgorithmus online erreicht, welche den Unterschied zwischen physischer Anlage und Simulation minimiert. Dabei wird der Einsatz von statischen und dynamischen Optimierungsalgorithmen untersucht. Es werden weiterhin Möglichkeiten zur Gewährleistung der Echtzeitfähigkeit sowie zur Zeitsynchronisation erarbeitet. Die entwickelten Methoden und Algorithmen werden anschließend an unterschiedlichen technischen Systemen erfolgreich validiert.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9546

ISBN 978-3-18-527108-3

# Danksagung

Ich danke Prof. Christian Diedrich für die gute Betreuung während der Promotion sowie Prof. Michael Weyrich für seinen Einsatz als Zweitgutachter.

Für Ihre Unterstützung während der Zeit meiner Promotion danke ich meiner Frau, Darina Schulze-Zipper, und meiner Familie.

Darüber hinaus gilt mein Dank den Kolleginnen und Kollegen sowie dem Institut ifak e.V. Magdeburg, welche mir das Umfeld zur Erstellung der Promotionsarbeit gegeben haben.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Glossar</b>	<b>VII</b>
<b>Symbole</b>	<b>VIII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XI</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Erklärung an einem Beispiel . . . . .	2
1.3. Struktur der Arbeit . . . . .	4
<b>2. Stand der Wissenschaft</b>	<b>5</b>
2.1. Überblick . . . . .	5
2.2. Schlussfolgerung . . . . .	11
2.3. Formulierung der wissenschaftlichen Fragestellung . . . . .	12
<b>3. Formale Beschreibung der Blackbox Co-Simulation</b>	<b>13</b>
3.1. Einführung Co-Simulation . . . . .	13
3.1.1. Technischer Hintergrund . . . . .	13
3.1.2. Simulationskomponenten . . . . .	13
3.1.3. Co-Simulationsmaster . . . . .	15
3.2. Modell einer Co-Simulation . . . . .	15
3.2.1. Repräsentation einer Co-Simulation als Graph . . . . .	17
3.3. Sequenzdiagramm einer Co-Simulation . . . . .	18
<b>4. Synchronisierungskonzept</b>	<b>20</b>
4.1. Prinzip der Zustandssynchronisierung . . . . .	20
4.2. Realisierung der Zustandssynchronisierung mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus . . . . .	22
4.3. Einbetten der Optimierung in den Co-Simulationsmasteralgorithmus . . . . .	24

4.4.	Verbesserung der Performance der Zustandssynchronisierung . . . . .	28
4.4.1.	Ansatz 1: Unter welchen Bedingungen kann die Ausführung einer Simulationskomponente das Ergebnis der Optimierung beeinflussen? . . . . .	30
4.4.2.	Ansatz 2: Unter welchen Bedingungen liefern zwei Ausführungen einer Simulationskomponente das identische Ergebnis? . . . . .	31
4.4.3.	Kombination von Ansatz 1 und Ansatz 2 . . . . .	35
4.4.4.	Anwendung von Ansatz 1 und Ansatz 2 . . . . .	36
4.5.	Integration der Performanceverbesserungen in den Algorithmus . . . . .	37
4.6.	Zeitliche Synchronisierung . . . . .	37
4.7.	Diskussion der Methodik . . . . .	42
<b>5.</b>	<b>Validierung</b>	<b>44</b>
5.1.	Umsetzung des Co-Simulationsmasters . . . . .	44
5.2.	Simulationskomponente Optimierung . . . . .	45
5.3.	Metriken für die Auswertung der Validierung . . . . .	46
5.3.1.	Anzahl Iterationen der Simulationskomponenten . . . . .	47
5.3.2.	Mittlere quadratische Abweichung . . . . .	47
5.3.3.	Maximale absolute Abweichung . . . . .	48
5.4.	Wertekontinuierliches System: Motorsystem . . . . .	48
5.4.1.	Beschreibung des Systems . . . . .	48
5.4.2.	Aufbau der Co-Simulation . . . . .	50
5.4.3.	Parametrierung der Simulationsmodelle und der Optimierung . . . . .	52
5.4.4.	Formulieren von Szenarien für die Validierung . . . . .	53
5.4.5.	Auswertung . . . . .	54
5.5.	Hybrides System: Transportsystem . . . . .	61
5.5.1.	Beschreibung des Systems . . . . .	61
5.5.2.	Aufbau der Co-Simulation . . . . .	64
5.5.3.	Parametrierung der Simulationsmodelle und der Optimierung . . . . .	64
5.5.4.	Auswertung . . . . .	66
5.6.	Hybrides System: Zylindersystem . . . . .	69
5.6.1.	Beschreibung des Systems . . . . .	69
5.6.2.	Aufbau der Co-Simulation . . . . .	71
5.6.3.	Parametrierung der Simulationsmodelle und der Optimierung . . . . .	73
5.6.4.	Auswertung . . . . .	75
5.7.	Simulative Validierung der zeitlichen Synchronisation . . . . .	77
5.8.	Auswertung der Validierung . . . . .	81
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>82</b>
6.1.	Zusammenfassung . . . . .	82

6.2. Lessons-Learned . . . . .	84
6.3. Ausblick . . . . .	85
<b>Anhang A Überblick über die im Rahmen der Arbeit erstellten Implementierungen</b>	<b>86</b>
<b>Eigene Publikationen</b>	<b>87</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>89</b>

# Glossar

Co-Simulation	beschreibt die Simulation eines Gesamtsystems bestehend aus mehreren, gekoppelten Simulatoren. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein einzelner Simulator als Simulationskomponente bezeichnet (Gomes u. a., 2017).
Distanz	beschreibt die minimale Anzahl von Iterationen der Co-Simulation für die Zustandssynchronisierung
Horizont	beschreibt die Anzahl von Iterationen der Co-Simulation, welche von der Zustandssynchronisierung betrachtet werden. Diese kann über die minimale Anzahl der Iterationen der Co-Simulation hinausgehen.
Regelungs- und Steuerungsfunktion	beschreibt die den Regelungs- oder Steuerungsalgorithmus umsetzende Komponente in der physischen Anlage.
Simulation	bezeichnet die Ausführung einer parametrisierten Instanz Simulationsmodells.
Simulationskomponente	beschreibt einen einzelnen Simulator als Teil einer gekoppelten Co-Simulation. Jede Simulationskomponente enthält ein Simulationsmodell und einen ausführbaren Algorithmus, welcher das Simulationsmodell simulieren kann.
Simulationsmodell	bezeichnet ein simulierbares Modell einer mechatronischen Komponente.
Simulierte Anlage	bezeichnet das durch eine Co-Simulation ermöglichte digitale Abbild einer physischen Anlage.

# Symbole

$A$	Index des Aktors
$\alpha$	Verzögerung
$C$	Index des Kommunikationssystems
$f$	zeitvariantes, internes Verhalten einer Simulationskomponente
$\alpha_1 * \alpha_2$	Faltung von $\alpha_1$ und $\alpha_2$
$h$	Abbildung von internen Zuständen einer Simulationskomponente auf deren Ausgänge
$\hat{[]}$	von der physischen Anlage gemessene Variable
$i$	Index eines Simulationsschritt
$k$	Index einer Simulationskomponente
$K$	Gesamtzahl von Simulationskomponenten
$N_{\text{ges}}$	Gesamtzahl der Iterationen aller Simulationskomponenten
$n$	Gesamtzahl der Simulationsschritte
$\alpha^n$	$n$ -fache Faltung von $\alpha$ mit sich selbst
$c$	Weglänge
$\tilde{c}$	kürzeste Weglänge
$R$	Index der Regelungs- und Steuerungsfunktion
$S$	Index der Simulation
$\tau_{\bullet}$	Totzeit von $\bullet$
$\theta_{\bullet}$	Zykluszeit von $\bullet$

## Symbole

$T_S$	Makroschrittweite
$u$	Eingang
$\mathcal{U}$	Gesamtheit der Eingänge aller Simulationskomponenten
$\alpha_{\bullet \circ}$	Verzögerung $\bullet \rightarrow \circ$
$x$	interner Zustand
$y$	Ausgang
$\mathcal{Y}$	Gesamtheit der Ausgänge aller Simulationskomponenten

# Kurzfassung

Die Digitalisierung der Industrie schreitet durch Initiativen wie Industrie 4.0 voran. Dabei kommen zunehmend Methoden in den Fokus, welche auf Basis von Simulationsmodellen Online-Analysen und Online-Optimierungen industrieller Anlagen durchführen sollen.

Als Konsequenz nimmt die Bedeutung der betriebsparallelen Simulation zu. Die betriebsparallele Simulation muss jedoch stetig an die physische Anlage angepasst werden, da die physische Anlage Änderungen unterliegt. Hervorgerufen werden diese beispielsweise durch Alterung oder Umbauten aufgrund von Produktupdates. Um diese Anpassung zu erreichen, wird in der vorliegenden Arbeit die Methode der *Zustandssynchronisierung* entwickelt. Diese dient zur Synchronisation zwischen betriebsparalleler Simulation und der entsprechenden physischen Anlage.

Dazu wird zunächst der Stand der Wissenschaft untersucht und diese Arbeit eingeordnet. Als Grundlage für die weiteren Arbeiten wird anschließend ein formales Modell der Co-Simulation aufgestellt. Dieses richtet sich nach der Funktionsweise des *FMI*-Standards, wie er aktuell für Simulationen in der virtuellen Inbetriebnahme industrieller Anlagen eingesetzt wird.

Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung der Zustandssynchronisierung, welche ohne zusätzliche Steuerungskomponenten auskommt. Sie funktioniert nach dem Prinzip der Signal-Rückkopplung der Differenz zwischen betriebsparalleler Simulation und physischer Anlage. Die Synchronisation wird durch einen Optimierungsalgorithmus auf Basis dieses Unterschieds online durchgeführt. Dabei wird der Einsatz von statischen und dynamischen Optimierungsalgorithmen untersucht. Es werden weiterhin Möglichkeiten erarbeitet, mit denen sich die Anzahl der Ausführungen der Co-Simulation deutlich verringern lassen, ohne dass dies einen Einfluss auf die Funktionsweise der Zustandssynchronisierung hat. Zudem werden Aspekte der zeitlichen Synchronisation erläutert.

Die entwickelten Methoden und Algorithmen werden anschließend validiert. Dazu wird ein Co-Simulationsmasteralgorithmus nach dem *FMI*-Standard implementiert, welcher die Zustandssynchronisierung umsetzen kann. Zur Durchführung der Optimierung kommen unterschiedliche Optimierungsalgorithmen zum Einsatz. Zur Validierung wird die Zustandssynchronisierung im Hardware-in-the-Loop Betrieb an drei unterschiedliche Demonstratoren eingesetzt.

Mit Hilfe der Demonstratoren kann das erfolgreiche angleichen der betriebsparallelen Simulation an die physische Anlage durch die Zustandssynchronisierung nachgewiesen

## *Kurzfassung*

werden. Weiterhin wird gezeigt, dass sich die Simulation dabei in Echtzeit durchführen lässt.

# Abstract

The implementation of industry digitization is progressing through initiatives such as Industry 4.0. The focus is increasingly on methods that use simulation models to perform online analyses and online optimization of industrial plants.

As a consequence, the importance of online simulation in parallel to plant operation is increasing. However, the online simulation has to be constantly adapted to the physical plant, since the physical plant is subject to changes, caused for example by aging or changes due to product updates. To achieve this adaptation, the method of *state synchronization* is developed in this thesis. This method is used to synchronize the simulation with the corresponding physical plant.

For this purpose, the state of the art is first examined and this thesis is categorized. As a basis for the further work a formal model of the co-simulation is then established. This model is based on the functionality of the *FMI* standard, as it is currently used for simulation in the virtual commissioning of industrial plants.

The main part of the work deals with the development of the state synchronization, which does not require additional control components. It works according to the principle of signal feedback of the difference between online simulation and physical plant. The synchronization is performed online by an optimization algorithm based on this difference. The use of static and dynamic optimization algorithms is investigated. Furthermore, possibilities are being developed to significantly reduce the number of co-simulation runs without affecting the functionality of the state synchronization. In addition, aspects of time synchronization are explained.

The developed methods and algorithms are then validated. For this purpose, a co-simulation master algorithm according to the *FMI* standard is implemented, which can perform the state synchronization. Different optimization algorithms are used to perform the optimization. For validation purposes, state synchronization in hardware-in-the-loop operation is applied to three different demonstrators.

With the help of the demonstrators, the successful alignment of the online simulation with the physical plant by the state synchronization is proved. Furthermore, it is shown that the simulation can be performed in real time.

