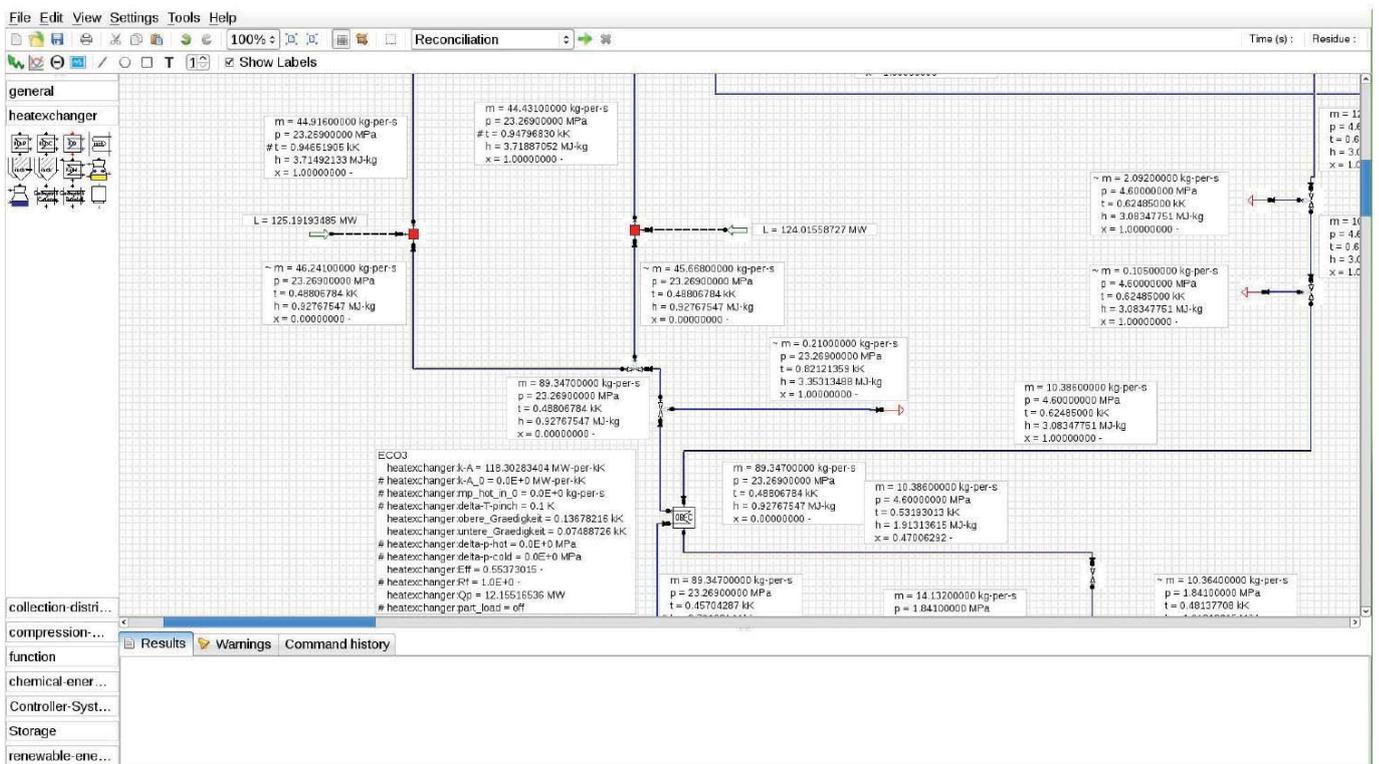


# Messdatenvalidierung energie- und verfahrenstechnischer Prozesse





## Messdatenvalidierung energie- und verfahrenstechnischer Prozesse





# Messdatenvalidierung energie- und verfahrenstechnischer Prozesse

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Von: Dipl.-Ing. Andreas Hauschke  
aus (Geburtsort): Braunschweig

eingereicht am: 18.10.2013  
mündliche Prüfung am: 20.12.2013

Gutachter:

Prof. Dr. techn. Reinhard Leithner	(Gutachter)
Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heimo Walter	(Gutachter)
Dr. rer. nat. Elmar Zander	(Gutachter)
Prof. Dr.-Ing. Jens Friedrichs	(Vorsitzender)

2013



### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2014

Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2013

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2014

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2014

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-95404-875-7

eISBN 978-3-7369-4875-4



# Vorwort

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. techn. Reinhard Leithner, dem ehemaligen Institutsdirektor und meinem Doktorvater, dafür bedanken, dass er mir die Gelegenheit gegeben hat, an seinem Institut, dem IWBT, zu promovieren. Ich danke Ihm für die große Freiheit, die er mir und allen seinen Mitarbeitern eingeräumt hat, und seine tatkräftige und fachlich ausgezeichnete Unterstützung. Er ist ein großes Vorbild für mich.

Zudem bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. techn. Heimo Walter vom Institut für Energietechnik und Thermodynamik der TU Wien für die Übernahme der Co-Berichterstattung und Dr. rer. nat. Elmar Zander für die Übernahme der weiteren Berichterstattung. Ich bedanke mich bei Prof. Dr.-Ing. Jens Friedrichs vom Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wärme- und Brennstofftechnik der TU Braunschweig und später am Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik. An dieser Stelle danke ich dem Land Niedersachsen für die erbrachten Landesmittel und bei Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Krewer vom Institut für Systeme der Energie- und Verfahrenstechnik für das gute Arbeitsverhältnis im InES.

Ich bedanke mich auch bei meinen Kollegen und ehemaligen Kollegen des Instituts, besonders bei Dr. Müller, Martin, Christian, Henning, Lasse, Adrian, Niels, Paul, Daniel, Fridolin, Bernhard, Uwe, Wilfried, Ina, Nina, Shaofei, Christian, Rune, Wolf, Daniel, Georg und Christine die mir stets mit gutem Rat und schneller Tat zur Seite standen und für eine außerordentlich gute Arbeitsatmosphäre im Institutsalltag gesorgt haben.

Ich bedanke mich bei Heimo, Elmar, Niels, Axel und Kathrin für die Unterstützung.

Ebenso möchte ich mich bei allen Studenten bedanken, die mit den Kollegen und mir zusammen am Programmsystem ENBIPRO intensiv gearbeitet haben. Es hat mir viel Freude bereitet. Speziell bedanke ich mich bei Bernhard, Niels, Phillip, Raoul, Christian, Malte und Fridolin.

Ich bedanke mich bei meiner Mutter Sieglinde und meine Brüdern Peter-Paul und Matthias, die mich von Beginn an begleitet haben und mich stets in meinen Entscheidungen unterstützt haben.



Ich bedanke mich bei meinen Freunden, die immer für mich da waren, auch wenn die Zeit nicht ganz einfach für mich war und den Menschen, die mich unterstützt haben.

Danke!



# Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit Kreislaufsimulationsprogrammen und der Implementierung der Messdatenvalidierung in das bestehende Kreislaufsimulationsprogramm ENBIPRO. Die Messdatenvalidierung ist eine Methode, die bei Abnahmeversuchen und zum Monitoring von Anlagen eingesetzt wird und beschrieben ist in der VDI-Richtlinie 2048 „Messunsicherheiten bei Abnahmemessungen an energie- und kraftwerkstechnischen Anlagen“ [VDI2048-1 2012]. Bei Abnahmeversuchen werden meistens mehr Messwerte aufgenommen als zur eindeutigen Bestimmung der Anlage notwendig sind. Das entstehende Gleichungssystem ist daher überbestimmt. Aufgrund der Messfehler entstehen Widersprüche beim Lösen des Gleichungssystems, d.h. werden Messwerte in das Gleichungssystem eingesetzt, sind die Erhaltungsgleichungen meistens nicht erfüllt. Die Messdatenvalidierung berechnet den wahrscheinlichsten Zustand der Anlage, in dem möglichst wenig korrigierte Messwerte die Erhaltungsgleichungen erfüllen.

Zur näheren Analyse der aktuell verfügbaren Kreislaufsimulationsprogramme werden Auswahlkriterien, wie Eigenschaften und Funktionen dieser Programme, vorgestellt. Ein besonderer Fokus wird dabei auf die Hauptaufgaben gelegt, die im kraftwerkstechnischen Bereich von Interesse sind, nämlich die stationäre und die dynamische Simulation, die Validierungs- und die Auslegungsrechnung. Es wird die Funktionalität des Kreislaufsimulationsprogramm ENBIPRO vorgestellt, in welchem der Z-Algorithmus im Zuge dieser Arbeit implementiert wurde.

Der Z-Algorithmus ist ein neuer, effektiver Algorithmus zur Validierungsrechnung. Weitere mögliche Algorithmen zur Validierung sind der Eliminationsalgorithmus und der Epsilon-Algorithmus. Diese haben aber Nachteile, die mit dem Z-Algorithmus nicht auftreten. Darüber hinaus kann der Z-Algorithmus neben der Validierungsrechnung auch die stationäre Simulation lösen. Zur Demonstration wird mit dem Z-Algorithmus ein in der VDI-Richtlinie 2048 angeführtes Rechenbeispiel nachgerechnet.

Der Z-Algorithmus bietet weiterhin die Möglichkeit auf einfache Weise Messungen auf systematische Mess- und Modellierungsfehler zu untersuchen. Diese Methoden werden ebenfalls an einem Beispiel erläutert.

Die vorliegende Dissertation ist auch eine Art Anleitung, den Z-Algorithmus in andere gleichungsbasierte Kreislaufsimulationsprogramme (z.B. EBSILON, Gate Cycle, Thermoflex,



Aspen etc.) zu implementieren und diese Programme um das Aufgabenfeld der Validierung zu erweitern.



# Abstract

This thesis deals with cycle simulation programs and the implementation of data validation into the existing cycle simulation program ENBIPRO. Data validation is a method that is used for acceptance tests and monitoring of systems and is described in VDI Guideline 2048 “Uncertainties of measurement during acceptance tests on energy-conversion and power plants” [VDI2048-1 2012].

For acceptance tests, usually more values are measured than necessary to determine the equation system. As a consequence, the resulting equation system is overdetermined. Due to measurement errors contradictions arise when solving the system of equations. When measured values are used to solve the equationsystem the conservation equations are usually not fulfilled. Data validation gives the most probable state of a plant, in which the balance equations are satisfied and the corrections to the initial measured values are the smallest.

For a more detailed analysis of used cycle simulation programs, selection criteria, properties and functions of these programs are presented. A special focus is given on the main tasks in the area of interest in power plant technology, which are steady state and dynamic simulation, the validation and the design calculation. The functionality of the cycle simulation program ENBIPRO is presented in which the Z-algorithm was implemented within this work.

The Z-algorithm is a new, more effective algorithm for data validation. Other possible algorithms for data validation are the elimination algorithm and the epsilon algorithm. However, they have disadvantages compared with the Z-Algorithm. In addition, the Z-algorithm can be used to solve steady state simulations as well as validations. To demonstrate the effectiveness of the Z-algorithm one example of the VDI guideline 2048 is recalculated. Statistical measurement errors are discussed in this example.

The Z-algorithm offers in addition the possibility to investigate systematic errors in measurements and modeling errors easily. These two methods developed in this thesis are demonstrated also within the mentioned example.

This thesis can also be seen as an instruction to implement the Z-algorithm to other equation-based cycle simulation programs (e.g. EBSILON, Gate Cycle, Thermoflex, Aspen, etc.) and to expand these programs by the task of validation.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Kreislaufsimulationsprogramme . . . . .	3
2.1.1 Benutzer-Anforderungen an Kreislaufsimulationsprogramme . . . . .	7
2.2 ENBIPRO . . . . .	10
2.2.1 Grundgedanke . . . . .	11
2.2.2 Entwicklung . . . . .	14
2.2.3 Aufbau . . . . .	15
2.2.4 Anwendungsfeld . . . . .	16
2.2.5 Lösung des Gleichungssystems zur stationären Simulation . . . . .	19
2.2.5.1 Nullstellensuche . . . . .	19
2.2.5.2 Extremalwertsuche . . . . .	21
2.2.6 Residuum des Gleichungssystems . . . . .	22
2.2.7 Bildung der Funktionalmatrix . . . . .	23
2.2.8 Validierbares System . . . . .	25
2.3 Bestehende Mathematikbibliotheken . . . . .	27
2.4 Übersicht der Richtlinien und Regelwerke zur Messdatenvalidierung und Abnahmetests . . . . .	27
<b>3 Validierung</b>	<b>30</b>
3.1 Begriffe zur Validierung . . . . .	30
3.2 Grundlagen . . . . .	41
3.2.1 Einsatzgebiete der Validierung . . . . .	41
3.2.2 Prozesssimulation . . . . .	43
3.3 Arten der Validierung . . . . .	46
3.3.1 Einfluss der Minimierungsfunktion . . . . .	46
3.3.2 Stationäre und dynamische Validierung . . . . .	48



3.4	Einteilung der Algorithmen in der Validierung . . . . .	50
3.4.1	Algorithmen zur Validierungsrechnung . . . . .	51
3.4.1.1	Z-Algorithmus . . . . .	53
3.4.1.2	Epsilon-Algorithmus . . . . .	57
3.4.1.3	Eliminationsalgorithmus . . . . .	57
3.4.2	Vergleich zwischen stationärer Simulation und stationärer Validierung .	58
3.4.3	Wichtungsfaktor bei der Verbesserung $v$ . . . . .	60
3.5	Programmablauf der Validierungsalgorithmen . . . . .	60
3.5.1	Ablaufschema Eliminationsalgorithmus . . . . .	61
3.5.2	Ablaufschema Z-Algorithmus und Epsilon-Algorithmus . . . . .	63
3.6	Fehlerquellen . . . . .	66
3.6.1	Fehler im Messvorgang . . . . .	66
3.6.2	Validierungsvorgang . . . . .	66
3.6.2.1	Kriterium Qualitätskontrolle . . . . .	67
3.6.2.2	Kriterium grobe Fehler . . . . .	68
3.6.2.3	Kriterium der Nebenbedingungen . . . . .	69
3.6.2.4	Kriterium der Konvergenz . . . . .	69
3.6.2.5	Kriterium der stetigen Funktion . . . . .	70
3.6.3	Untersuchung von Messabweichungen mit dem Z-Algorithmus . . . . .	70
3.6.3.1	Fehleranalyse grobe Fehler, Fehler in $\mathbf{S}$ . . . . .	71
3.6.3.2	Fehleranalyse Modellierungsfehler, Fehler in $\mathbf{F}$ . . . . .	71
3.6.3.3	Fehleranalyse falsch gemessener Wert, Fehler in $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ . . . . .	72
<b>4</b>	<b>Beispiel zur Messdatenvalidierung der VDI-Richtlinie 2048</b>	<b>73</b>
4.1	Beispiel der Richtlinie [VDI2048-1 2012] gerechnet mit dem Z-Algorithmus .	73
4.2	Beispiel zur Fehleranalyse zum Modellierungsfehler, Fehler in $\mathbf{F}$ . . . . .	77
4.3	Beispiel zur Fehleranalyse zum falsch gemessenen Wert, Fehler in $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ . . . . .	81
4.4	Vergleich der Ergebnisse . . . . .	85
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>87</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>89</b>
<b>Anhang</b>		<b>89</b>
6.1	Beispiel zum Z-Algorithmus . . . . .	89
6.1.1	Validierung einer Rohrstrecke . . . . .	89



*Inhaltsverzeichnis*

6.2 Fehleruntersuchung, einfaches Beispiel - Massenstrommessungen in einem Rohr . . . . .	92
6.2.1 Falsch angenommenes System (Leckage, Zustrom), Fehler in $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ .	93
6.2.2 Messfehler, Fehler in $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ . . . . .	94
6.3 Zusammenfassung der erweiterten Fehleranalyse . . . . .	95
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>