

Andreas Kubis

Methodik zur Bewertung und Verbesserung
von Systemen zur thermischen
Überwachung von Freileitungen

Band 2



Methodik zur Bewertung und Verbesserung von Systemen zur thermischen Überwachung von Freileitungen

Der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund vorgelegte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von

Andreas Kubis

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch

Tag der mündlichen Prüfung: 21. November 2017

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen, Energieeffizienz und
Energiewirtschaft

Band 2

Andreas Kubis

**Methodik zur Bewertung und Verbesserung
von Systemen zur thermischen Überwachung
von Freileitungen**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5710-2

ISSN 2567-2908

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

Danksagung

Schreiben musste ich diese Arbeit zwar allein - doch an ihrem guten Gelingen waren viele mir nahestehender Menschen beteiligt, denen ich meinen Dank aussprechen möchte.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Professor Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz für das in mich gesetzte Vertrauen. Seine Ratschläge und wissenschaftliche Weitsicht haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Für die freundliche Übernahme des Koreferates bedanke ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Holger Hirsch vom Fachgebiet Energietransport und -speicherung der Universität Duisburg-Essen.

Zudem danke ich allen Kolleginnen und Kollegen des Institutes für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft sowie der DFG Forschergruppe 1511 für die sehr gute Zusammenarbeit und die stets konstruktive Kritik. Für diese Ehrlichkeit und Kollegialität bin ich euch sehr dankbar. Für die Durchsicht des Manuskriptes danke ich Christopher Spieker, Dennis Klein, Markus-Oliver Maitz, Marie-Luise Kloubert, Björn Matthes, Markus Küch, Sebastian Stepanescu, Björn Keune und Annika Kubis.

Mein größter Dank gebührt meiner Frau Annika und unserer Tochter Emilia. Wenn ich mit dem Kopf nicht zuhause, sondern bei der Arbeit war, seid ihr es gewesen, die mich wacherüttelt haben - und mich dabei immer unterstützt und motiviert haben. Dieser Beistand ist für mich nicht gottgegeben, sondern den habe ich nur euch und eurer unendlichen Geduld zu verdanken. Herzlich danke ich auch meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, meiner Schwester sowie meinen Freunden für ihre Unterstützung in den verschiedenen Phasen meines gesamten Ausbildungsweges.

Sowohl dem VDE als auch dem DK CIGRE danke ich für die vielfältigen Entfaltungsmöglichkeiten während meiner akademischen Ausbildung. Namentlich möchte ich mich insbesondere bei Herrn Stephan Pillmann von der VDE YoungNet Geschäftsstelle für die jahrelange fruchtbare und erfrischende Zusammenarbeit bedanken.

Herzlichen Dank!

Dortmund, November 2017

Andreas Kubis

Kurzfassung

Die Transformation des elektrischen Energiesystems in ein zunehmend witterungsabhängiges Gesamtsystem erfordert eine effiziente Nutzung bestehender Netzinfrastrukturen. In diesem Zusammenhang ist die Anwendung von Verfahren, welche die thermische Belastbarkeit von Freileitungen optimal nutzen, vor ökonomischen und regulatorischen Gesichtspunkten vorteilhaft. Weltweit beginnen Netzbetreiber das Konzept des witterungsabhängigen Freileitungsbetriebes verstärkt anzuwenden, gleichwohl die Betriebserfahrungen gering sind und erfolgreich getestete Methoden auf divergenten Ansätzen basieren. Der Vergleich und die Bewertung dieser Ansätze verlangt zeitlich und räumlich detaillierte Referenzmessungen von Freileitungstemperaturen, die allerdings aufgrund der weiträumigen Ausdehnung von Freileitungen und des damit einhergehenden örtlich und zeitlich wechselhaften Witterungseinflusses nicht verfügbar sind.

In dieser Dissertation wird eine Simulationsumgebung zur Bereitstellung einer reproduzierbaren Temperaturreferenz mit exakter Orts- und Zeitkenntnis auf Basis einer elektro-thermischen Freileitungsmodellierung entwickelt. Mit ihr werden sowohl wettergestützte als auch auf der kontinuierlichen Schätzung von Leitungsparametern basierende Messsysteme systematisch untersucht und ihre Genauigkeit evaluiert. Im Gegensatz zu konventionellen direkten Temperaturmesssystemen bieten diese den Vorteil der minimal invasiven Integrierbarkeit in Bestandsnetze. Weiterhin wird eine Kombination dieser Messsysteme vorgestellt und gezeigt, dass dieses eine räumlich flexiblere und präzisere Messung von Leitungstemperaturen, im Vergleich zu den jeweiligen Einzelsystemen, ermöglicht.

Abstract

The transformation of electrical energy systems towards a weather-dependent system requires the efficient use of existing grid infrastructures. In this context, the application of methods which optimally utilize the thermal loadability of overhead lines is advantageous from an economic and regulatory point of view. Worldwide, network operators are increasingly applying the concept of dynamic line rating, although the operating experience is low and successfully tested methods rely on divergent approaches. The comparison and evaluation of these approaches requires detailed reference measurements of overhead line temperatures over time and space, which however are not available due to the extensive length of overhead lines and its associated local and temporal frequently changing weather conditions.

In this dissertation, a simulation environment providing a reproducible temperature reference with exact knowledge of space and time is proposed. The simulation is based on an electro-thermal overhead line modelling approach, which enables the systematic examination of weather-based measurement systems as well as measurements relying on the continuous estimation of line impedance parameters with PMUs. In contrast to conventional direct temperature measurement systems, the aforementioned systems offer the possibility of minimal invasive integration into existing networks. Furthermore, a combination of these systems is originally presented. It is shown how this approach enables more flexible and more precise temperature measurements, than the original stand-alone systems.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Kurzfassung	V
Abstract	VII
1 Einleitung	1
2 Belastbarkeit von Freileitungen	5
2.1 Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitungsparameter	5
2.1.1 Gleichstromwiderstand	5
2.1.2 Wechselstromwiderstand	8
2.1.3 Induktivität	8
2.1.4 Kapazität	10
2.2 Auswirkungen eines temperaturerhöhten Leitungsbetriebes	11
2.2.1 Ausdehnung	11
2.2.2 Festigkeit	14
2.2.3 Verbinder	14
2.3 Stromtragfähigkeit von Freileitungen	15
2.3.1 Thermische Dauerstrombelastbarkeit	16
2.3.2 Zulässiger Spannungsabfall	16
2.3.3 Gewährleistung der Systemstabilität	17
2.3.4 Stromtragfähigkeitskurve	18
2.4 Dynamische Bestimmung der Strombelastbarkeit	19
2.4.1 Witterungsabhängige Strombelastbarkeit	19
2.4.2 Notfall-Strombelastbarkeit	24
3 Thermische Überwachung von Freileitungen	27
3.1 Direkte Methoden	27
3.1.1 Lokale Leitertemperaturmessungen	27
3.1.2 Faseroptische Leitertemperaturmessungen	28
3.1.3 Seilzugspannungsmessungen	28
3.1.4 Vibrationsmessungen	30
3.2 Indirekte Methoden	31
3.2.1 Seildurchgangsmessungen	31
3.2.2 Temperaturmessung mit Wetterinformationen	33

3.3	Messung der Leitungsparameter	35
3.3.1	Machbarkeitsuntersuchungen mit positiven Beurteilungen	36
3.3.2	Machbarkeitsuntersuchungen mit negativen Beurteilungen	38
3.3.3	Innovative Forschungsansätze	41
3.3.4	Bewertung	42
3.4	Zusammenfassung	43
4	Elektro-Thermische Simulationsumgebung	45
4.1	Freileitungsmodellierung	45
4.1.1	Thermische Freileitungsmodellierung	46
4.1.2	Elektro-Thermische Freileitungsmodellierung	49
4.1.3	Modellierung des elektrischen Netzes	51
4.2	Modellierung der Wetterinformationen	54
4.2.1	Referenzszenario	54
4.2.2	Messintervall	57
4.2.3	Wettermessungen	58
4.2.4	Wetterprognosen	59
4.3	Modellierung der Zeigermessungen	60
4.3.1	Ideale Zeigermessungen	61
4.3.2	Fehlerbehaftete Zeigermessungen	61
4.4	Evaluationsgrößen	63
4.5	Zusammenfassung	65
5	Evaluation wettergestützter Messungen der Leitertemperatur	67
5.1	Modellierung und Methodik	67
5.2	Untersuchungen mit Wettermessungen	68
5.3	Untersuchungen mit Wetterprognosen	70
5.4	Bewertung und Diskussion	72
6	Evaluation von Messungen der Leitertemperatur mit Leitungsparametern	75
6.1	Modellierung und Methodik	75
6.2	Untersuchungen mit stationärer Leitertemperatur	76
6.2.1	Analyse systematischer Zeigermessfehler	77
6.2.2	Analyse zufälliger Zeigermessfehler	79
6.2.3	Einfluss eines ungenauen Referenzwiderstandes	81
6.3	Untersuchungen mit dynamischer Leitertemperatur	82
6.3.1	Ideale Zeigermessungen	83

6.3.2 Fehlerbehaftete Zeigermessungen	85
6.4 Bewertung und Diskussion	87
7 Vorstellung und Evaluation einer kombinierten hybriden Temperaturmessung	89
7.1 Modellierung und Methodik	89
7.2 Untersuchungen mit Wettermessungen	93
7.2.1 Ideale Zeigermessungen	93
7.2.2 Zeigermessungen mit 0,1 % TVE	96
7.2.3 Zeigermessungen mit 1,0 % TVE	98
7.3 Untersuchungen mit Wetterprognosen	100
7.3.1 Ideale Zeigermessungen	100
7.3.2 Zeigermessungen mit 0,1 % TVE	103
7.3.3 Zeigermessungen mit 1,0 % TVE	105
7.4 Bewertung und Diskussion	108
7.4.1 Untersuchung der Messgenauigkeit	108
7.4.2 Aspekte der Sekundär- und Leittechnik	109
8 Schlussfolgerungen	115
8.1 Zusammenfassung	115
8.2 Weiterer Forschungsbedarf	121
Literaturverzeichnis	XIII
Abkürzungen und Formelzeichen	XXVII
Wissenschaftlicher Werdegang des Autors	XXXIII