

Tobias Ehlenz

**Multiphysikalische
Betrachtung von Kabeln
und Leitungen unter
mechanisch-dynamischer
Belastung**

Multiphysikalische Betrachtung von Kabeln und Leitungen unter mechanisch- dynamischer Belastung

**Der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg**

**zur Erlangung des Doktorgrades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)**

vorgelegt von

Tobias Ehlenz aus Trier

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 21.10.2019

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fröba

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Georg Fischer
Prof. Dr.-Ing. Armin Wittmann
Prof. Dr.-Ing. Klaus Helmreich

Berichte aus der Elektrotechnik

Tobias Ehlenz

**Multiphysikalische Betrachtung von Kabeln und
Leitungen unter mechanisch-dynamischer Belastung**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7137-5

ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Zusammenfassung

Im Rahmen einer kooperativen Promotion an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg zusammen mit der Hochschule Trier wurden Kabel und Leitungen, die Anwender in erster Linie als elektrisches Bauteil wahrnehmen, im Sinne der Versagens- und Dimensionierungssystematik eines Maschinenelementes erforscht. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erforschung mechanisch beanspruchter Kabel und Leitungen und deren multiphysikalischer Beschreibung. Ihr Einsatz soll zuverlässiger und der Austausch dauerbelasteter Leitungen optimiert werden. An Leitungen in bewegten Anwendungen bestehen hochkomplexe elektrische und mechanische Anforderungen, die derzeit unzureichend erforscht sind. Eine Betriebsdauer lässt sich nicht, wie bei anderen Maschinenelementen üblich, berechnen. Gerade im Hinblick auf Industrie 4.0 und autonomes Fahren könnten außerplanmäßige Maschinenstillstände kritisch werden. Mit beschleunigten Alterungstests versuchen Hersteller und Anwender in einer immer kürzer werdenden *Time-To-Market* ihre Produkte zu erproben. Sie nutzen die in der Europäischen Norm DIN EN 50396 beschriebene Wechselbiegeprüfung zur Verifizierung ihrer Leitungen. Während der Arbeit hat sich herausgestellt, dass die Vorgaben dieser Norm unzureichend beschrieben sind. Nach Verbesserungen der Prüfbedingungen, vor allem hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit, wird die Wechselbiegeprüfung als Belastungssituation der multiphysikalischen Lebensdaueruntersuchungen genutzt. Aus den Erkenntnissen der Parameterstudien wurde dem zuständigen Gremium ein Normenvorschlag zur Verbesserung der Prüfnorm DIN EN 50396 eingereicht. Mit der multiphysikalischen Erfassung des Schädigungsverlaufes in den Dauerprüfungen können für bewegte Leitungen relevante Verschleißindikatoren herausgestellt werden. Sie bilden ein neuartiges Phasenmodell der Lebensdauer von mechanisch-dynamisch belasteten Leitungen. Die Untersuchungen zeigen, dass es unter anhaltender mechanischer Belastung vor einem Bruch der Probanden zu Gefügeveränderungen und Oberflächenrauheiten des Kupferwerkstoffes kommt. Veränderungen des elektrischen Werkstoffes können mit dem so genannten Skineffekt gemessen werden. In Leitern, die von hochfrequenten Wechselströmen durchflossen werden, konzentriert sich die Stromdichte am Randbereich des Leiterquerschnittes. Die einsetzende Rauheit des Leiters führt zu einer Veränderung der Dämpfung eines zu übertragenen Signals. Im Vorfeld empirischer Versuche bestätigen entsprechende elektrotechnische Simulationen an modulierten Leitern die Annahme. Sie zeigen die erhöhte Stromdichte im Randbereich eines entsprechend gealterten, rauen Leiters. In anschließenden Versuchen kann mit einer in-situ Hochfrequenzdämpfungsmessung ein Austauschzeitpunkt von Versuchsleitungen detektiert werden. Die Hochfrequenzdämpfungsmessung ist eine zerstörungsfreie in-situ Diagnosemöglichkeit des mechanischen Kabelverschleißes. Das Messverfahren eignet sich zum gewerblichen Einsatz eines späteren Kabelmonitoringsystems, in dem Leitungen während ihres Betriebes hinsichtlich einer verbleibenden Lebensdauer bewertet werden können. Die Forschungsergebnisse tragen zu einer vorhersehbaren Produktlebensdauer der mechanisch eingesetzten elektrischen Produkte und somit zu einer erhöhten Zuverlässigkeit in vielen Branchen bei.

Abstract

As part of a cooperative doctorate between the Friedrich-Alexander University of Erlangen Nuremberg and the University of Applied Sciences Trier, cables and transmission lines that users primarily perceive as electrical components have been researched similar to the established failure and dimensioning scheme of a machine element. The current work deals with the investigation of mechanically stressed cables and lines. Their use should get more reliable and the point of time for exchange of permanently moved lines be optimized. Cables in moving applications have highly complex electrical and mechanical requirements that are currently under-researched or insufficiently standardized. As it is common with other machine elements, operating time cannot be calculated. Especially with regard to Industry 4.0, unscheduled machine downtimes could become critical. With accelerated aging tests, manufacturers and users try to test their products in an increasingly shorter time-to-market. They use the alternating bending test, described in DIN EN 50396 to verify the cables' conformance. The research shows that the requirements of the standard are insufficiently described. After improvements of the test operations, which focused on the reproducibility, the alternating bending test defines the starting point of the multiphysical lifetime tests. Based on the findings of the parameter studies, a proposed standard for improving the test standard DIN EN 50396 was submitted to the responsible parent body. With the multiphysical recording of the course of damage during endurance tests, relevant wear patterns for moving lines can be identified. They form a novel phase model of the service life of mechanically dynamic loaded cables. The investigations show that structural changes and surface roughness of the copper material occur under prolonged mechanical stress before fracturing of the probands. Changes in the edge regions of the electrical material can be measured, making use of the skin effect. In conductors that are carrying high-frequency currents, the current density concentrates at the peripheric region of the conductor. An incipient roughness of the conductor leads to a change in the attenuation of a signal to be transmitted. In the run-up to empirical experiments, corresponding electrodynamical simulations on modelled conductors confirm the assumption. They show the increased current density at the peripheric area of a correspondingly aged, rough conductor. In subsequent empirical tests, an exchange time of test lines can be detected with in-situ high-frequency attenuation measurement. The high-frequency measurement is a nondestructive, in-situ diagnostic option for mechanical cable wear. The measurement method is suitable for the commercial use of a later cable monitoring system, in which lines can be evaluated during their operation with regard to estimated remaining lifetime. The research results contribute to a predictable product life of the mechanically loaded electrical lines and thus to increased reliability in many industries.

Inhalt

Zusammenfassung	I
Abstract	II
Abbildungsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik bei der Konzeption, im Einsatz und in der Prüftechnik	3
3 Ziele und Vorgehensweise	7
4 Vorbereitung der Parameterstudie und Auswahl einer geeigneten Prüfeinrichtung	11
4.1 Reproduzierbarkeit der ausgewählten Normbelastung	12
4.1.1 Verwendete Leitungsprobanden	13
4.2 Analyse der verwendeten Prüfeinrichtung	15
4.2.1 Einbau der Probanden und Ausrichtung der Anlage	15
4.2.2 Prüfkinematische Einflüsse der vorgeschriebenen Begrenzungsschellen	17
4.2.3 Diskontinuierliche Belastung	20
Längenzunahme der Leitung während der Biegeprüfung	21
4.2.4 Steifigkeitsabnahme der Leitung	25
4.3 Zwischenergebnis Normeneinreichung	26
5 Multiphysikalische Untersuchung und Parameterstudien von Kabeln und Leitungen unter mechanischer Belastung	27
5.1 Mechanische Untersuchungen der Wechselbiegeprobanden	28
5.1.1 Radialkraftmessung der Biegerollenkräfte in zwei Messachsen	29
5.1.2 Automatisierter Längenausgleich und in-situ Längenmessung der Probanden	40
5.1.3 Beschreibung des Steifigkeitsverhaltens von Leitungen während der Wechselbiegeprüfung	44
5.2 Elektrotechnische Untersuchungen der Leitungsprobanden	52
5.2.1 Grundlagen der Leitungstheorie	52
5.2.2 Elektrische Messungen der Probanden mit komplexen Wechselströmen	58
5.2.3 Untersuchung der Leitungsparameter Induktivität, Kapazität und Realwiderstand während der Wechselbiegeprüfung	61
5.2.4 Lissajous-Versuch an Wechselbiege- und Zugprüfmaschine	66
5.2.5 Untersuchung der Leitung mittels Impulsreflektometrie	70
5.3 Werkstofftechnische Untersuchungen	78

5.3.1	Härtemessung nach Rollenprüfung	85
5.3.2	Ausbildung von Fehlstellen im elektrischen Werkstoff	86
5.3.3	Spektralanalyse an den Untersuchungsobjekten	91
5.3.4	Gefügeuntersuchung des elektrischen Werkstoffes.....	92
5.3.5	Werkstoffbruch „mit Oberflächeneinfluss“ und „ohne Oberflächeneinfluss“	95
6	Analyse des Phasenmodells der Rauheitsbildung und mögliche Verwertung als Kabelmonitoringsystem	99
6.1	Phasenmodell der Rauheitsbildung und Probandenzerstörung	99
6.2	Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften eines Leiters	106
7	Fazit und Ausblick	111
8	Literaturverzeichnis	113
9	Betreute studentische Arbeiten	115
10	Eigene Publikationen und Patente	116
	Lebenslauf.....	118
	Anhang.....	119

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Anschlagklemmen nach Redesign der Biegeanlage</i>	<i>5</i>
<i>Abbildung 2: Modelleitungsvariation zur Durchführung der Versuchsreihen</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 3: Mangelnde Ausrichtung der Prüfmaschine führt zu Torsionsbelastungen</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 4: Rissausbreitungswachstum an einem starren H07V-U Leiter</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 5: Biegegerät aus DIN EN 50396.....</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 6: Aufzeichnung des Radialkraftmessers über zwei Zyklen (H07V-K; 1,5 mm²).....</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 7: Zugkraftverlauf einer Biegeprüfung (H07V-K; 1,5 mm²) Phasen 1,2,3 (Erklärung im Text)</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 8: Degressive Längenzunahme aus manueller Nachstellung (H07V-U; 1,5 mm²) ..</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 9: Längenzunahme bei Entlastung nach 4250 Biegezyklen (H07V-K; 1,5 mm²) ...</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 10: Längenzunahme bei Entlastung nach 6000 Biegezyklen (H07V-K; 1,5 mm²) .</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 11: Leiterkantenerkennung der in-situ Videoanalyse (RG 58 C/U)</i>	<i>25</i>
<i>Abbildung 12: Übersicht der multiphysikalischen Untersuchung der Leitungsprobanden</i>	<i>27</i>
<i>Abbildung 13: Radialkraftmessung mit Anschlagklemmen (H07V-U; 1,5 mm²)</i>	<i>31</i>
<i>Abbildung 14: Auftretende Kräfte an der oberen Biegerolle bei Fahrt in die linke, hintere Endlage bzw. der unteren Biegerolle bei Fahrt in die rechte, vordere Endlage (H07V-U; 1,5 mm²).....</i>	<i>32</i>
<i>Abbildung 15: Radialkraftmessung mit automatisiertem Anschlag (H07V-U; 1,5 mm²)</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 16: Abnahme des Probendurchmessers während mechanischer Biegeprüfung.....</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 17: Smith- Diagramm bei Prüfbeginn bzw. Prüfende (H07V-U; 1,5 mm²)</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 18: Klemmmechanismus des Biegegerätes nach dem Redesign.....</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 19: Vergleich der Längenzunahmen von Probanden mit und ohne automatisierte Klemmung (H07V-K; 1,5 mm²).....</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 20: Qualitative Längung von Einzeladern während der Wechselbiegeprüfung.....</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 21: Krümmung der Leitung zur Biegerolle.....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 22: Installation und Aufnahmebereich der Industriekamera an der Prüfanlage ...</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 23: Löschen irrelevanter Bildpunkte für die automatisierte Auswertung</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 24: Bildmatrix des Video-Tracking-Auswertealgorithmus</i>	<i>48</i>

<i>Abbildung 25: Graustufenaufnahme zur Kantendetektion des Leiterprobanden.....</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 26: Binärbild eines Leitungsprobanden in der Mehrfachrollenbiegeanlage</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 27: Schematischer Funktionsablauf des Videotrackings</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 28: Schadstellen an einem Litzenstück</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 29: Auswertungspositionen der Lageänderung des Leiters.....</i>	<i>51</i>
<i>Abbildung 30: Abhebung a [mm] der Probanden zur Horizontalen in Abhängigkeit der Biegezyklenzahl.....</i>	<i>51</i>
<i>Abbildung 31: Schematische Verringerung der Eindringtiefe (δ) unter Skineffekt</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 32: Vereinfachte Darstellung des Skineffekts</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 33: Betrachtung der äquivalenten Leiterschichtdicke eines Koaxialleiters links ohne Skineffekt, rechts mit Skineffekt.....</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 34: Komplexe Zeigerdarstellung der komplexen Wechselstromrechnung</i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 35: CCS-Innenleiter des verwendeten Koaxialkabels mit Bemaßung</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 36: Realwiderstandsmessung Innenleiter Koaxialleitung (RG 58 C/U).....</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 37: Theoretische Betrachtung von Lissajous-Figuren unterschiedlicher Leitungszustände.....</i>	<i>66</i>
<i>Abbildung 38: Schematischer Anschlussplan des Lissajous-Versuches</i>	<i>67</i>
<i>Abbildung 39: Zugversuch an Koaxialleitung (RG 58 C/U) mit spezieller Einspannvorrichtung</i>	<i>68</i>
<i>Abbildung 40: Abgeglicherer Zustand der Lissajous- Figur vor Leiterbruch (RG 58 C/U) ...</i>	<i>69</i>
<i>Abbildung 41: Ausfall der Leitung nach geringer Wegvergrößerung (RG 58 C/U).....</i>	<i>69</i>
<i>Abbildung 42: Versuchsaufbau der Impulsreflektometrie.....</i>	<i>71</i>
<i>Abbildung 43: Reflexion des Messimpulses bei offenem Leitungsende (RG 58 C/U).....</i>	<i>72</i>
<i>Abbildung 44: Reflexion des Messimpulses bei kurzgeschlossenem Leitungsende (RG 58 C/U).....</i>	<i>72</i>
<i>Abbildung 45: Impulsabsorption bei abgeschlossenem Leitungsende (RG 58 C/U)</i>	<i>73</i>
<i>Abbildung 46: Reflexion beim unbelasteten Koaxialkabel (RG 58 C/U)</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 47: Veränderung der Messung nach 20.000 Biegezyklen</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 48: „Distance To Fault-Messung“ mit Rhode und Schwarz ZVH8 (RG 58 C/U)..</i>	<i>77</i>

Abbildung 49: Fließfigur auf Einzelader einer Kupferlitze nach Probandenbeanspruchung (Profibusleitung)	78
Abbildung 50: Untersuchungsobjekte nach Biegezyklen (H07V-U; 1,5 mm ²)	79
Abbildung 51: Oberflächenveränderung der Untersuchungsobjekte (H07V-U; 1,5 mm ²), links: im Neuzustand; rechts: nach Leiterbruch	80
Abbildung 52: Axiale Rauheitsmessung am Untersuchungsobjekt H07V-U; 1,5 mm ²	81
Abbildung 53: Parameter des Rauheitsprofils (H07V-U; 1,5 mm ²)	82
Abbildung 54: Darstellung der Rauheitsparameter Ra und Rv	82
Abbildung 55: Rauheitsparameter Ra in Abhängigkeit der Zyklenzahl (H07V-U; 1,5 mm ²) ..	83
Abbildung 56: Rauheitsparameter Rv in Abhängigkeit der Zyklenzahl (H07V-U; 1,5 mm ²) ..	84
Abbildung 57: Änderung der Härte über die Lebensdauer (H07V-U; 1,5 mm ²)	85
Abbildung 58: Schliffprobe H07V-U 1,5 mm ² , in unbelastetem Zustand	87
Abbildung 59: Schliffprobe H07V-U 1,5 mm ² , in belastetem Zustand	87
Abbildung 60: Fehlstellen im Kupferleiter (H07V-U; 1,5 mm ²) im unbelasteten Untersuchungsobjekt (links) und nach mechanischer Belastung (rechts)	88
Abbildung 61: Poren im Kupfer unter Einwirkung von Kupferoxydul	88
Abbildung 62: Kupferoxydulkristalle im Untersuchungsobjekt (H07V-U; 1,5 mm ²) nach 40 Biegezyklen	89
Abbildung 63: REM-Aufnahme eines belasteten Leiters (H07V-K; 1,5 mm ²)	90
Abbildung 64: Gebrochener Kupferdraht durch Cu ₂ O Einschlüsse	90
Abbildung 65: Schliffbilder Körnung 320 (links) und 2000 (rechts), 100-fache Vergrößerung	92
Abbildung 66: Gefügeveränderung des Kupfers, links unbelastet, rechts nach Bruch (H07V-K; 1,5 mm ²)	93
Abbildung 67: Gefügeveränderung belasteter Untersuchungsobjekte (H07V-U; 1,5 mm ²)	94
Abbildung 68: Bruchbild H07V-K; 1,5 mm ²	96
Abbildung 69: Bruch durch Lochbildung und Vereinigung (H07V-K; 1,5 mm ²)	97
Abbildung 70: Bruch ohne Oberflächeneinfluss (links) und zugehöriger Rasterelektronenmikroskopaufnahme (rechts) (H07V-K; 1,5 mm ²)	98
Abbildung 71: Phasenmodell der Rauheitsbildung und Probandenzerstörung	99
Abbildung 72: Dreiecksform der vier am dichtesten gepackten Hauptgleitebenen	100

<i>Abbildung 73: Schematische Ausrichtung eines Kupferkristalls unter Zugbelastung</i>	<i>101</i>
<i>Abbildung 74: Intrusionen und Extrusionen an der Leiteroberfläche nach mechanisch- dynamischer Prüfung (H07V-U; 1,5 mm²)</i>	<i>102</i>
<i>Abbildung 75: Gleitebenenmodell am belasteten Kupferleiter</i>	<i>103</i>
<i>Abbildung 76: Kabelproband im Mehrfachgleitbereich (H07V-K; 1,5 mm²)</i>	<i>105</i>
<i>Abbildung 77: Stromdichteverteilung unter Messfrequenz und korrespondierender Rauheit</i>	<i>107</i>
<i>Abbildung 78: Beispielhafte Darstellung der Stromdichte des Skineffekts mit Überlagerung des Proximityeffektes einer Zweidrahtleitung</i>	<i>108</i>
<i>Abbildung 79: Dämpfungsmessung unter Messfrequenz von 1 GHz zur Erkennung einer relevanten Oberflächenrauheit</i>	<i>109</i>
<i>Abbildung 80: Mehrere Bruchstellen nach mechanischer Prüfung in einer Busleitung</i>	<i>109</i>
<i>Abbildung 81: Rauheitszunahme der einzelnen Bruchstellen nach mechanischer Prüfung und Leitungsbruch in einer Busleitung</i>	<i>110</i>

Abkürzungsverzeichnis

Einheiten

A	Ampere
V	Volt
dB	Dezibel
HV	Härte nach Vickers
N	Newton
kg	Kilogramm
S/m	Siemens pro Meter
°	Winkelgrad
°C	Grad Celsius
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
m	Meter
mm	Millimeter
µm	Mikrometer
min	Minuten
s	Sekunden
ms	Millisekunden
ns	Nanosekunden

Abkürzungen

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
DC	Direct Current (Gleichstrom)
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ε_{mech}	mechanische Dehnung
I	Elektrischer Strom
U	Elektrische Spannung
σ_0	mechanische Spannung
EN	Europäische Norm
DIN	Deutsches Institut für Normung
FEM	Finite Elemente Methode
HD	Harmonisation Document
BNC	Bayonet-Neill Concelman, Koaxialer Steckverbinder
USB	Universal Serial Bus
LAP	Labor für angewandte Produktionstechnik
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
IEC	International Electrotechnical Commission
UK	Unterkomitee
CCS	Cooper Clad Steel (engl. kupferbeschichteter Stahldraht)
PVC	Polyvinylchlorid
max.	maximal
min.	minimal