

# Komplexitätsreduktion von ausgedehnten elektrischen Systemen für Laboraufbauten am Beispiel von Energieübertragungsleitungen

Patrick Möbius\*, Johannes Schröder, Jirko Tegeler, Detlef Schulz

*Elektrische Energiesysteme*

*Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr*

Hamburg, Deutschland

\*patrick.moebius@hsu-hh.de

**Kurzfassung** – Die Untersuchung physisch großer oder ausgedehnter Systeme in Laborumgebungen erfordert häufig eine Reduktion ihrer Komplexität und Dimension, um den räumlichen Kapazitäten gerecht zu werden. Die Reduktionen und Anpassungen müssen system- und untersuchungsspezifisch gewählt werden, um das relevante Verhalten nicht unproportional zu verändern. Es wird dargestellt, welchen Einfluss die Anordnung langer Energieübertragungskabel auf deren elektrische Eigenschaften hat und inwiefern an Labormaßstäbe angepasste Untersuchungen in Laborumgebungen valide Rückschlüsse auf Realsysteme zulassen. Dazu wurden zwei 500 m lange Koaxialkabel unter Berücksichtigung von drei unterschiedlichen Aufbauarten vermessen. Dabei wurde festgestellt, dass die aufbauabhängigen Systemeigenschaften vorrangig durch die Veränderung der Gegeninduktivität und Systemgeometrie beeinflusst wurden. Die Frequenz der Resonanzstelle und deren Höhe haben sich durch diese Einflüsse verändert. Die qualitative Beschreibung der gemessenen Effekte liefert wichtige Hinweise für die valide Abbildung von Realsystemen in Laborumgebungen.

**Stichworte** – Komplexitätsreduktion, ausgedehnte Systeme, proportionales Systemverhalten, Kabelstrecke, Laboruntersuchung

## NOMENKLATUR

$G'$ in S/km	Ableitwertsbelag
$L'$ in H/km	Induktivitätsbelag
$C'$ in F/km	Kapazitätsbelag
$R'$ in $\Omega$ /km	Leiterwiderstand
$r$ in mm	Leiter- bzw. Schirmradius

## I. EINLEITUNG

Direkte Untersuchungen an Realsystemen sind oft aus pragmatischen Gründen nicht möglich. Die Herausforderung, ausgedehnte Realsysteme in Laborumgebungen realitätsgetreu abzubilden, ist eine komplexe Aufgabe, die einerseits ein Verständnis des Systems voraussetzt und andererseits die Anpassung der Untersuchungsmethodik erfordert. Zu den Problemen zählen u.a., dass einzelne Parameter nicht isoliert eingestellt bzw. variiert werden können, dass unkontrollierte externe Faktoren auftreten können, welche die Ergebnisse unplanbar beeinflussen, und dass die Zugänglichkeit bzw. die Verfügbarkeit des Systems nicht immer gegeben ist. Aufgrund dessen müssen

Untersuchungen häufig in Laborumgebungen oder im reduzierten Labormaßstab durchgeführt werden. In solchen Umgebungen steht oft nur begrenzter Raum zur Verfügung, was eine substanzielle Reduktion der Komplexität und Dimension erfordert. Dabei müssen die zu untersuchenden Aspekte des Systemverhaltens unverändert bleiben oder mindestens einer Proportionalität folgen.

Ein Beispiel für ein solches Realsystem sind Energieübertragungskabel. Diese zeichnen sich durch ihre ausgedehnte Form aus. Viele existierende Modelle und Untersuchungen beschreiben solche langen Leitungen mit relativ kleinen Querschnitten. Wenn die Verlegeart jedoch aufgrund von begrenzten Laborkapazitäten verändert werden muss, muss verifiziert werden, dass es zu keinen signifikanten Abweichungen in den Systemeigenschaften kommt. Diese Arbeit zielt darauf ab, die Untersuchung langer Energieübertragungskabel in räumlich begrenzten Laborumgebungen zu thematisieren. Dabei gibt es zwei plausible Ansätze zur Reduktion des Systems.

Der erste Ansatz ist es, lange Kabel zu kürzen. Dies ist allerdings nicht immer sinnvoll, insbesondere wenn längenabhängige Effekte, wie z.B. Resonanzstellen, untersucht werden sollen. Diese treten erst bei hinreichend großen Betriebskapazitäten in praktisch messbaren Frequenzbereichen auf.

Der zweite Ansatz ist es, das Kabel aufzuwickeln oder aufzutrommeln. Das führt jedoch dazu, dass sich aufgrund der Krümmung die relative Kabelgeometrie in diesen Abschnitten ändert. Außerdem werden Kabelabschnitte den jetzt räumlich nahen Feldern benachbarter Abschnitte ausgesetzt. Dieser Effekt ist vergleichbar mit dem Modell eines Transformators oder einer isolierten Spulenordnung. Die damit verbundenen Einflüsse müssen sowohl experimentell als auch analytisch näher untersucht werden, um die Abweichungen zum Realsystem abschätzen zu können.

Der vorliegende Beitrag wird systematisch in verschiedene Abschnitte unterteilt: Zunächst wird ein Systemmodell von Energieübertragungskabeln vorgestellt, welches als Basis für alle weiteren Untersuchungen dient. Anschließend werden verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten für lange Energieübertragungskabel vorgestellt und deren Vor- und Nachteile diskutiert. Der darauffolgende Messaufbau gibt einen detaillierten Einblick in die praktische Umsetzung. Die Messergebnisse werden präsentiert, analysiert und

anschließend in einer Diskussion der Ergebnisse reflektiert. Abschließend bietet der Beitrag einen Ausblick auf weiterführende Untersuchungen und mögliche Anwendungsgebiete.

## II. SYSTEMMODELLE VON ENERGIEÜBERTRAGUNGSKABELN

Energieübertragungskabel sind integraler Bestandteil des Energieversorgungsnetzes. Je nach Spannungsebene, Leistungsbereich und Anwendungsgebiet existiert eine Vielzahl von Geometrien, Bündelungen, Leiterquerschnitten und Isolationsvarianten. Die jeweilige Modellbildung erfolgt unter Berücksichtigung des konkreten Kabels, der relevanten äußeren Einflussfaktoren und der avisierten Zielgrößen. Diese Zielgrößen können die Grundlage physischer Planungsarbeiten sein oder die Einhaltung elektromagnetischer Eigenschaften oder thermischer Restriktionen verifizieren. Gängige Kabelmodelle beschreiben vorrangig lange Leitungen mit relativ kleinen Querschnitten. Das entspricht zum einen dem gängigsten Anwendungsfall, Leitungen sollen inhärent direkte Verbindungen zwischen zwei entfernten Potentialen herstellen, es erlaubt jedoch zusätzlich, dass substantielle Vereinfachungen bei der elektromagnetischen Feldberechnung hinsichtlich der Homogenität und der Symmetrieeigenschaften angenommen werden können. Wesentliche Voraussetzung für diese Modelle ist, dass das Kabel selbst und die äußeren Einflüsse konstant über die Länge des Kabels sind. Es gibt eine Vielzahl von Gründen, weshalb diese Kontinuitätsbedingung nicht vollständig erfüllt wird. Kabelmuffen, Quetschungen, Biegungen oder auch Änderungen in der unmittelbaren Umgebung des Kabels können zu Variationen in den Modellparametern führen. Wesentlich ist jedoch, dass diese Einflüsse räumlich und in ihrer Signifikanz so begrenzt sind, dass die Systemparameter nicht wesentlich beeinflusst werden. Gänzlich abgeänderte Verlegungsarten für Laborumgebungen, wie zum Beispiel gewinkelte oder getrommelte Anordnungen, unterliegen veränderten physikalischen Gegebenheiten. Die fundamentalen Modelle müssen folglich angepasst werden, um das Erfüllen der Kontinuitätsbedingung und der korrekten Parametrisierungen zu gewährleisten.

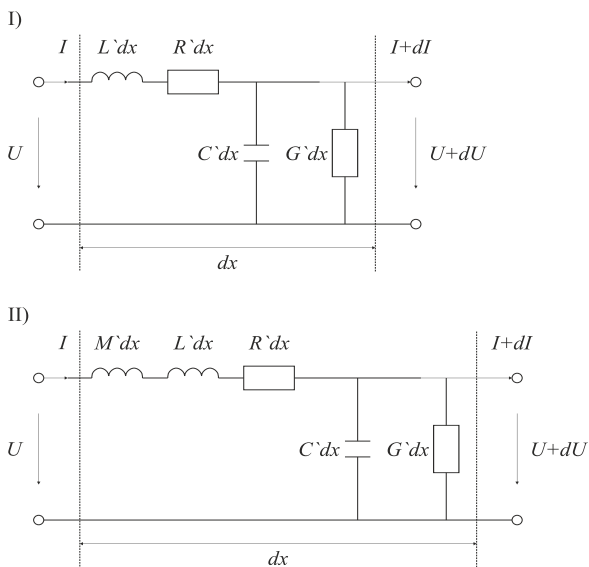


ABBILDUNG 1: I) VERTEILTES PARAMETERMODEL UND II) VERTEILTES PARAMETERMODEL MIT ZUSÄTZLICHER GEGENINDUKTIVITÄT.

Klassische elektrische Modelle basieren auf der Leitungstheorie, den Telegraphengleichungen und dem zugrundeliegenden verteilten Parametermodell, siehe ABBILDUNG 1 I. Dieses Modell berücksichtigt die resistiven und induktiven Eigenschaften des Leiters ( $R$  resp.  $L$ ) und die Kapazität und den Ableitwiderstand des Dielektrikums ( $C$  resp.  $G$ ) von einzelnen, konzentrischen geschirmten Leitern mit konstanten Geometrien. Die Notation  $R'$  beschreibt längenbezogene Beläge, welche für das Längenelement  $dx$  absolute Werte darstellen.

Dabei wird die Strom-Spannungs-Relation durch die Gleichungen (1) und (2) jeweils im Zeit- und Frequenzbereich ausgedrückt. Der Parameter  $\omega = 2\pi f$  beschreibt die Kreisfrequenz.

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = R' i(x, t) + (L' + M') \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{dU}{dx} = (R' + j\omega L' + j\omega M') I$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = G' u(x, t) + C' \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dx} = (G' + j\omega C') U$$

Die Verknüpfung dieser orts- und zeitabhängigen Differentialgleichungen erlaubt es u.a. die Wellenausbreitung und den Wellenwiderstand zu beschreiben.

Darüber hinaus gibt es Weiterentwicklungen in aktuellen Modellen. Dazu zählen u.a. Überlegungen zu Komplexitätsreduktionen [1], zur Frequenzabhängigkeit der Parametern [2], zur Beschreibung von Mehrleitersystemen [3] und zu abweichenden verteilten Ersatzschaltbildern, wie zum Beispiel Pi-ESB [4].

Die folgenden Untersuchungen beschreiben das Systemverhalten im supraharmischen Bereich bis 150 kHz. Um die klassischen Modelannahmen beizubehalten, werden die Parameter dieser Modelle selbst frequenzabhängig dargestellt. Die Berechnung dieser Parameter erfolgt mit separaten Modellen, welche die frequenzabhängige Veränderung der Stromdichte über die Leiterquerschnittsfläche berücksichtigen [5].

$$L, C, R \sim f \quad (3)$$

Die Anteile der Induktivitäts- und Kapazitätsbeläge, welche durch die Leiter-Schirm-Relation beeinflusst werden, korrelieren auf unterschiedliche Weise mit dem Verhältnis der Radien des Leiters  $r_{\text{Leiter}}$  und des inneren Schirmes  $r_{\text{Schirm}}$ , siehe Relationsverhältnis (4).

$$L' \sim \frac{r_{\text{Schirm}}}{r_{\text{Leiter}}}, C' \sim \frac{1}{r_{\text{Leiter}}} \quad (4)$$

Ist die Ausgangsgeometrie nicht mehr konzentrisch, müssen die Beläge geometrieabhängig individuell berechnet werden [5].

## III. SIMULATION DER EINFLUSSGRÖßEN

Die Kontinuitätsbedingung realer langer Leitungen wird bei Laboruntersuchungen durch zwei Einflussgrößen verletzt. Zum einen wird die Gegeninduktivität wesentlich, wenn Leitungen bzw. Leiterschleifen von veränderlichen Magnetfeldern durchsetzt werden. Zum anderen verändern die

Biegungen der Leitungen die relative Geometrie und damit die Feldverteilung der Leitung. Beide Einflüsse werden im Folgenden beschrieben.

Der Einfluss externer Felder, welche z. B. durch benachbarte Leiterschleifen eines aufgetrommelten Kabels hervorgerufen werden, sind vor allem dann relevant, wenn Leitungen ohne geerdeten Schirm ausgeführt sind [6]. Das gilt auch für mehrphasige Kabel, bei denen zwar das gesamte System geschirmt ist, jedoch die individuellen Phasen nicht. In beiden Fällen haben die erzeugten Gegenfelder eine frequenzabhängige Auswirkung auf den betrachteten Leiter. Dieser Einfluss variiert geometrie- und betriebsgrößenabhängig. Das klassische verteilte Parametermodell kann um die Gegeninduktivität  $M$  erweitert werden, um den Einfluss der magnetischen Felder anderer Leitungsabschnitte, bzw. andere Phasen, auf das betrachtete Segment zu beschreiben, siehe ABBILDUNG 1 II. Diese Größe stellt dabei einen Mittelwert über den Leitungsverlauf dar, welcher die Systemeigenschaften des gesamten Laboraufbaus zusammenfasst. Real sind die einzelnen Abschnitte unterschiedlichen Feldstärken ausgesetzt, weil ihre Position im Raum mit inhomogenen Feldstrukturen variiert. Die Gegeninduktivität wird bereits zur Beschreibung von Transformator- und Maschinenmodellen verwendet. Sind Systeme jedoch individuell geschirmt, und diese Schirmungen geerdet, treten drei parallele Effekte auf, welche das elektromagnetische Feld außerhalb der Schirmung begrenzen. Durch die beidseitige Erdung wird ein Ladungsträgeraustausch über die Erdschleife ermöglicht und damit das elektrische Feld begrenzt [6]. Das Material des Schirms selbst wirkt bei sehr niedrigen Frequenzen begrenzend auf das Magnetfeld [6]. Außerdem wird durch die Induktion im Schirm ein, im Idealfall invertiertes, Gegenfeld erzeugt. Die Interferenz dieser Felder sorgt für einen nahezu feldfreien Raum außerhalb des Schirmes [6]. Bei Testobjekten mit dieser Geometrie ist die Gegeninduktivität vorrangig bei sehr niedrigen Frequenzen ausschlaggebend.

Zusätzlich beeinflusst die Biegung des Kabels die relative Geometrie. Bei ungeschirmten einzelnen Leitern wird der Leiter in der Biegung im Innenradius gestaucht und im Außenradius gestreckt. Der vom Hersteller angegebene minimale Biegeradius garantiert, dass die Materialverformung im elastischen Bereich bleibt. Diese Verformung hat Auswirkungen auf die Feldkonzentration im jeweiligen Bereich. Dieser Effekt wird für geschirmte Kabel mit konzentrischem Aufbau noch deutlicher, da das vorher sehr homogene Feld durch die Biegung stark irregulär wird. Für mehrphasige Leiter wird der Effekt noch komplexer, da die einzelnen Phasen aufgrund ihrer Position im Kabel selbst auf unterschiedlichen Biegeradien liegen. Die Stauchungen bzw. Streckungen sind somit für jede einzelne Phase anders, wodurch wiederum die irregulären Feldkonzentrationen unterschiedlich werden und der Gegeninduktivitätseffekt selbst in symmetrisch belasteten Systemen Unterschiede verursacht. Während es auch bei Realsystemen zu Biegungen und den genannten Effekten kommt, sind die betroffenen Streckenabschnitte jedoch in der Regel kurz im Vergleich zur Gesamtlänge. Die Effekte von Biegungen in Realsystemen sind deshalb in der Regel klein und zu vernachlässigen. Wie einführend beschrieben ist es für die Untersuchung in Laborumgebungen jedoch notwendig die Kabelstrecken auf möglichst kleinem Raum untersuchen zu können. Das führt zu durchgehenden bzw. anteilig-dominierenden Biegungen, die

im Gesamtsystem nicht zu vernachlässigende Effekte hervorrufen können.

#### IV. KONFIGURATIONSANORDNUNGEN LANGER ENERGIEÜBERTRAGUNGSKABEL

Die weiterführenden Untersuchungen werden mit geschirmten einphasigen Kabeln durchgeführt. Durch die individuelle Schirmung kann der Einfluss von Fremdfeldern praktisch vernachlässigt werden. Die unterschiedlichen Konfigurationen dienen der Untersuchung von Effekten, die durch die Biegungen der Kabel selbst hervorgerufen werden. Der Einfluss dieser Biegungen soll anhand von drei Beispielanordnungen von jeweils zwei 500 m langen Koaxialkabeln gezeigt werden. Untersuchungskriterium ist die erste Resonanzstelle des Systems. Die drei Anordnungen werden in TABELLE I dargestellt und sind:

- eine räumlich ausgedehnte Verlegung mit einer minimalen Anzahl von Leiterschleifen als Referenzmessung,
- eine aufgetrommelte Variante mit konstanter Biegerichtung und abschnittsweise steigendem Biegeradius und
- eine antiseriell gewickelte Anordnung mit wechselnden Biegerichtungen.

TABELLE I: GEOMETRISCHE PARAMETER DER KONFIGURATIONSANORDNUNGEN.

	<i>ausgelegt</i>	<i>aufgetrommelt</i>	<i>aufgewickelt</i>
Kabellänge	2x 500 m	2x 500 m	2x 500 m
Raumbedarf in m [LxBxH]	1x 12x1x0,05	2x 0,35x0,35x0,27	1x 0,6x0,5x0,6
Anzahl von 90° Biegungen pro Kabelstrecke	78	3068	918
Biegeradius: • durchschnittlich • minimal	• 70 mm • 70 mm	• 104 mm • 46 mm	• 57,5 mm • 48,5 mm
Biegerichtung	wechselnd	konstant	wechselnd

Schematische Wicklungsverläufe und Bilder der Laboraufbauten sind im Folgenden mit einer qualitativen Beschreibung dargestellt.

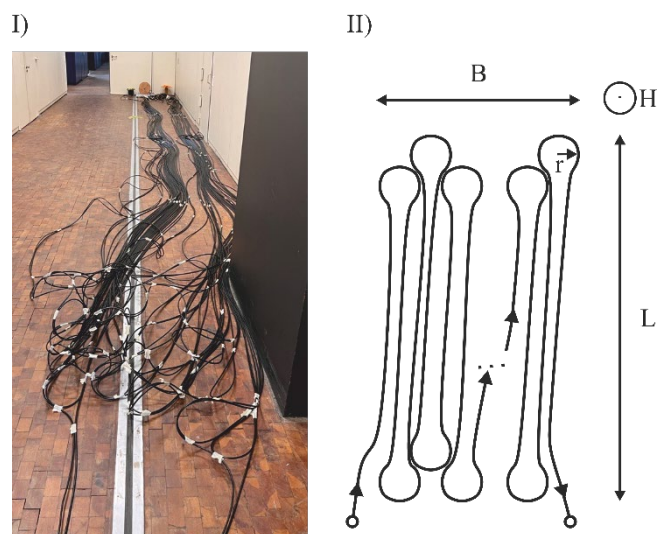


ABBILDUNG 2: I) REALE UND II) SCHEMATISCHE AUSFÜHRUNG DER AUSGELEGTE KONFIGURATION.

Biegungen verursachen Feldkonzentrationen, die zu veränderten elektromagnetischen Systemeigenschaften führen. Der folgende Aufbau, gem.

ABBILDUNG 2, wurde so gewählt, dass die Anzahl der Leiterschleifen für die vorhandenen Raumkapazitäten minimal wird. Dazu wurden kleine Randschleifen mit jeweils dem minimalen Biegeradius gebildet und die hin- und rücklaufenden Leiterabschnitte gradlinig nebeneinander verlegt. Dadurch wurde ein Aufbau mit einer minimalen Anzahl von Biegungen realisiert.

Die aufgetrommelte Konfiguration, gem. ABBILDUNG 3, entspricht der vom Hersteller direkt gelieferten Anordnung. Der prinzipielle Aufbau entspricht einer klassischen kurzen und dicken Spule. Die vorliegende Biegung wird durch die Position auf der Trommel und den entsprechenden Abstand zur Trommelmitte bestimmt. Dabei wird zunächst der innerste Radius über die gesamte Trommellänge belegt, um danach in die nächste Ebene zu wechseln. Das Prinzip wird für die Gesamtlänge des Kabels weitergeführt. Der Biegeradius ist abschnittsweise konstant und stufenförmig steigend. Die Biegerichtung ist über die jeweilige Trommel konstant.

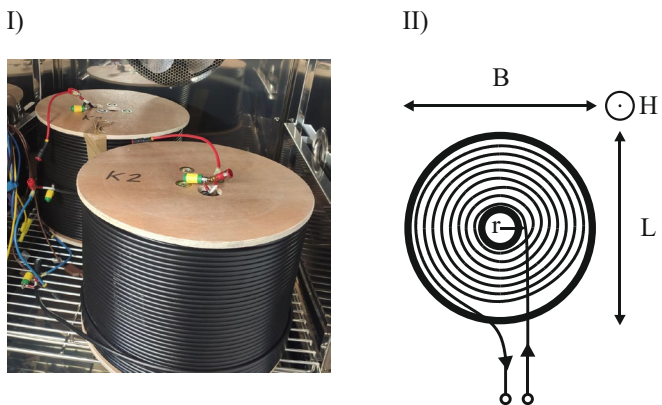


ABBILDUNG 3: I) REALE UND II) SCHEMATISCHE AUSFÜHRUNG DER AUFGETROMMELTEN KONFIGURATION.

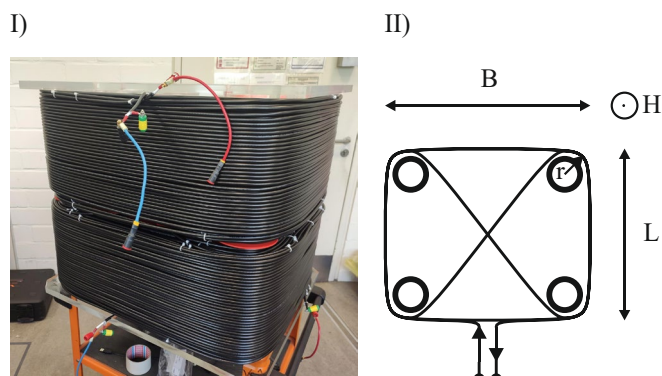


ABBILDUNG 4: I) REALE UND II) SCHEMATISCHE AUSFÜHRUNG DER AUFGEWICKELTEN KONFIGURATION.

Ein weiterer kompakter Aufbau wurde mit einem Wickelrahmen realisiert und in ABBILDUNG 4 dargestellt. Hier wurden die zwei 500 m langen Kabelstrecken in einer anderen, antiserialen Konfiguration aufgewickelt. Wie bei der getrommelten Ausführung wurde auch hier der innere Radius entlang der Höhe eines Halbrahmens aufgewickelt. Sobald die obere Kante erreicht wurde, wurde das Kabel quer durch den Körper geführt, um die Wickelrichtung zu wechseln. Die Biegerichtung variiert durch die antiserielle Wicklungsweise.

Zusätzlich sind die einzelnen Leiterschleifen durch den quadratischen Aufbau nicht konstant gebogen. Sie erfahren nach der Biegung an den Eckrohren einen langen bzw. kurzen geraden Auslauf.

## V. MESSAUFBAU

Ziel des Messaufbaus ist es, die frequenzabhängige Impedanz zu bestimmen und die konfigurationsabhängige Resonanzstelle zu ermitteln [7]. Dazu wurden die Testobjekte in Reihe mit einer Netzsimulationsanlage von Spitzenberger und Spies und einem Impedanzmessgerät von morEnergy geschaltet.

Die Testobjekte bestehen jeweils aus zwei 500 m langen Koaxialkabeln. Diese wurden aufgrund der vergleichbaren Geometrie mit Energieübertragungskabeln und der direkten Anwendbarkeit der theoretischen Modelle gewählt. Die Enden der Kabelschirme wurden an zwei entkoppelten Erdungspunkten angeschlossen, um die reale räumlich Dislokierung nachzubilden.

Die Kabel wurden mit 120 V bei 50 Hz belastet und über das Messgerät mittels eines rPWM-Verfahrens angeregt. Dabei wurde ein Betriebsstrom von ca. 5 A erreicht [7].

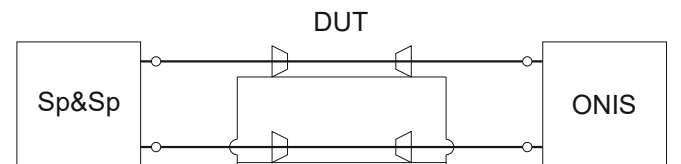


ABBILDUNG 5: MESSAUFBAU ZUR ERFASSUNG DER EINGANGSIMPEDANZ.

## VI. MESSERGEBNISSE

In ABBILDUNG 6 ist der Impedanzbetrag und der Phasenwinkel der drei Konfigurationen dargestellt. Im Bereich bis 150 kHz ist die erste Resonanzstelle deutlich zu erkennen. Diese befindet sich bei jeder der Konfigurationen im ähnlichen Frequenz- und Amplitudenbereich. Es gibt jedoch deutliche konfigurationsabhängige Unterschiede.

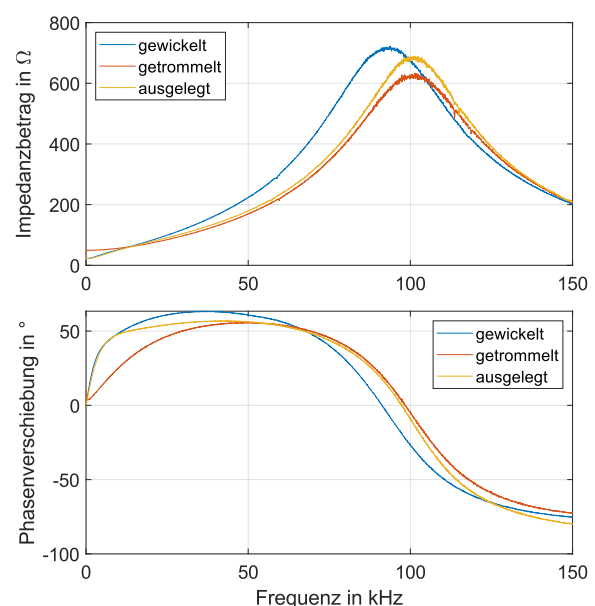


ABBILDUNG 6: BODE-DIAGRAMM DER EINGANGSIMPEDANZ DER DREI AUSFÜHRUNGSVARIANTEN.



Die gewickelte und die ausgelegte Konfiguration zeigen besonders im niederfrequenten Bereich eine starke Ähnlichkeit. Ihre Differenz nimmt erst bei Frequenzen zu, die größer als die ihres Schnittpunkts bei ca. 14 kHz sind. Die Charakteristik der aufgetrommelten Konfiguration nähert sich der aufgewickelten nach diesem Schnittpunkt an. Die aufgenommenen Resonanzen der drei Konfigurationen sind folgende:

- ausgelegt: 690  $\Omega$  bei rd. 101 kHz,
- aufgetrommelt: 620  $\Omega$  Ohm bei rd. 101 kHz und
- aufgewickelt: 720  $\Omega$  bei rd. 92 kHz.

Die Resonanzfrequenz der ausgelegten und aufgetrommelten Konfiguration liegen sehr nah beieinander. Die Varianten unterscheiden sich lediglich in ihren Amplituden. Die Resonanzstelle der aufgewickelten Konfiguration ist dahingegen sowohl in ihrer Amplitude als auch in der Frequenz verschoben.

## VII. DISKUSSION

In diesem Beitrag wurde die Untersuchung von ausgedehnten Systemen in begrenzten Laborumgebungen thematisiert. Die technische Umsetzung erfordert oft Dimensions- bzw. Komplexitätsreduktionen, welche das Systemverhalten maßgeblich beeinflussen können. Als Beispiel wurden 500 m lange Koaxialkabel in drei Konfigurationen theoretisch betrachtet und die jeweiligen Systemeigenschaften messtechnisch erfasst.

Es wurde herausgestellt, dass individuell geschirmte Leiter nur bei niedrigen Frequenzen Gegeninduktivitäten ausgesetzt sind, wenn beide Enden des Kabelschirms geerdet sind und somit Gegenfelder erzeugt werden können. Die beobachteten Unterschiede in den Ergebnissen im unteren Frequenzbereich bis ca. 20 kHz werden von den Gegeninduktivitäten beeinflusst. Die Veränderung der Resonanzstellen hingegen wird alleinig durch die biegebedingten Geometrieverformungen verursacht.

Die Dämpfung der Resonanzstelle der aufgetrommelten Ausführung resultiert aus geometriebedingten Veränderungen des Induktivitäts- und Kapazitätsbelages. Durch die abschnittsweise konstante Verformung ist das Verhältnis aus Schirm- und Leiterradius im Mittel kleiner geworden, siehe Korrelationen (4). Die aufgewickelte Konfiguration zeichnet sich durch eine insgesamt erhöhte Betriebskapazität aus. Aufgrund der geringeren Anzahl von durchschnittlich engeren Biegungen dominiert der Einfluss der Kapazität. Dadurch wird die erste Resonanzstelle niederfrequenter und erhöht.

Für Laboruntersuchungen ist es zweckmäßig technische Umsetzungen zu wählen, die möglichst direkte Korrelationen zwischen den Realsystemen und dem Laboraufbau zulassen. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass lineare konstante Verformungen irregulären vorzuziehen sind. Sowohl der Phasengang als auch die Amplitude der aufgetrommelten Konfiguration stimmen ab einer Frequenz von ungefähr 20 kHz deutlich stärker mit der ausgelegten Referenz überein.

## VIII. AUSBLICK

Die quantifizierte Korrelation zwischen dem Biegeradius, der Kabelgeometrie und der Feldlinienverzerrung ist relevant, um Modelle zu parametrisieren, in denen gebogene Kabelabschnitte relevant lange Strecken ausmachen. Dadurch können ausgedehnte Systeme auf kleineren Bereichen, z.B. in

Laborumgebungen, untersucht werden und die elektrischen Eigenschaften auf eine andere Verlegeart hochskaliert werden. Die Auswirkungen von Biegungen können simulativ bestimmt werden, indem einzelne kurze Kabel auf ganzer Länge gebogen werden. Mittels Finiter-Elemente-Methoden (FEM) können realitätsgetreue Feldberechnungen durchgeführt werden, um dann die diskretisierten Systemparameter auszuwerten. Die daraus abgeleiteten Werte können zukünftige Labormessungen auf real verlegte Systeme übertragbar machen.

Es ist davon auszugehen, dass im Fertigungsprozess der Kabel, trotz der Einhaltung von etwaigen Standards, Verunreinigungen und Lufteinschlüsse zwischen die Kabelschichten eingebracht werden. Die Konzentration und Relevanz dieser Einflüsse kann das Systemverhalten bereits maßgeblich beeinflussen. Sobald relative Geometrieänderungen durch das Biegen von signifikanten Kabelabschnitten verursacht werden, können diese Effekte intensiviert werden. Es ist zu untersuchen, ob das Biegen vorhandene Einschlüsse zusammenpresst und dadurch Bereiche, die ohnehin bereits stark irregulären Feldkonzentrationen ausgesetzt sind, mit einer weiteren Grenzschicht aus Luft oder Fremdmaterial belasten.

Die Ergebnisse aus den gesammelten Untersuchungen können dazu dienen, eine Korrelationsvorschrift zu entwickeln, mit der die veränderten Systemeigenschaften durch Komplexitäts- und Dimensionsreduktionen quantifiziert werden können.

## LITERATUR

- [1] H.-G. Unger, *Elektromagnetische Wellen auf Leitungen*. Heidelberg: Hüthig, 1980.
- [2] J. Marti, "Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-101, no. 1, pp. 147–157, 1982, doi: 10.1109/TPAS.1982.317332.
- [3] A. Morched, B. Gustavsen, and M. Tartibi, "A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1032–1038, 1999, doi: 10.1109/61.772350.
- [4] A. Hoshmeh, "Entwicklung eines frequenzabhängigen Kabelmodells unter Verwendung einer komplexen  $\pi$ -Ersatzanordnung," Dissertation.
- [5] S. A. Schelkunoff, "The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields," *Bell System Technical Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 532–579, 1934, doi: 10.1002/j.1538-7305.1934.tb00679.x.
- [6] K.-H. Gonschorek and R. Vick, Eds., *Electromagnetic Compatibility for Device Design and System Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [7] M. Jordan, H. Langkowski, T. D. Thanh, and D. Schulz, "Frequency dependent grid-impedance determination with pulse-width-modulation-signals," in *2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE 2011): Tallinn, Estonia, 1 - 3 June 2011*, Tallinn, Estonia, 2011, pp. 131–136.