

Bernhard Mund

Kabel-Mikrofonie – exakt gemessen

Bekannt ist der „Mikrofonieeffekt“ u.a. von Mikrofon-Anschlußkabeln, wo sich diese als „Mikrofoniespannung“ bezeichnete Rauschspannung beim Bewegen des Kabels als „Knacken“ und „Rumpeln“ im Lautsprecher äußert. Die Frequenzen der Anregung solcher elektrisch-mechanischer Wandlungen in Koaxialkabeln reichen bis zu 20 kHz. (In der Literatur werden Mikrofonieeffekte an Koaxialkabeln als „fast pulse microphony“ bis in den GHz-Bereich beschrieben. Hier wird nur der Frequenzbereich bis ca. 20 kHz untersucht.) Zur einfachen Einteilung von Kabeln mit unterschiedlichem Rauschverhalten in verschiedene Klassen wird als Maßeinheit für das Rauschverhalten eines Kabels der Ladungspegel in dB Mikro-Coulomb/Meter dB ($\mu\text{C}/\text{m}$) mit $0 \text{ dB} = 1 \text{ Mikro-Coulomb/Meter}$, eingeführt.

Zur Unterdrückung dieser Mikrofonieeffekte bieten Kabelhersteller besonders ausgerüstete Kabel an. Zu diesen „besonderen Ausrüstungen“ gehören Schmiermittel auf den Innen- und Außenleitern, leitfähige Kunststoffschich-

ten oder leitfähige Vliese zwischen Isolierung und Außenleiter sowie eine sorgfältige Auswahl der Isolationswerkstoffe.

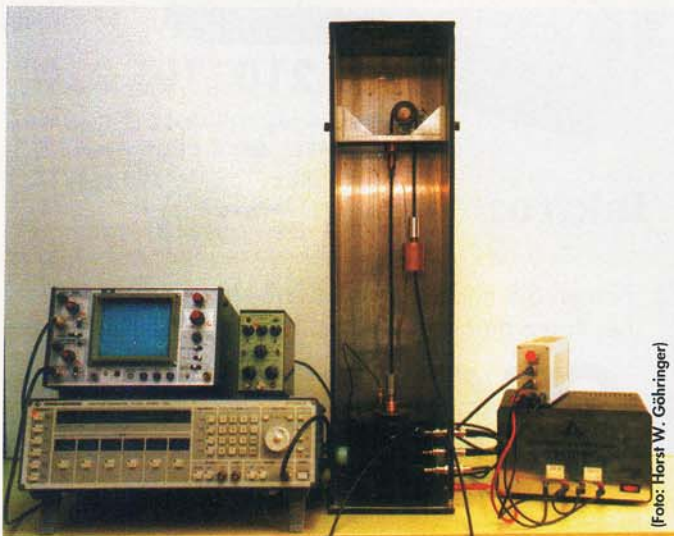
Um das Rauschverhalten solcher Kabel unterschiedlicher Bauformen oder verschiedener Hersteller miteinander vergleichen zu können, ist die Kenntnis der Höhe der Mikrofoniespannung bzw. des Ladungspegels dieser Kabel erforderlich. Herstellerangaben über das Rauschverhalten weichen bisher z.T. deutlich voneinander ab, da mit unterschiedlichen Meßverfahren gearbeitet wird. Die beiden z.Zt. genormten Meßverfahren nach der amerikanischen Militärnorm, MIL-C-17-G, und nach IEC 96-4-1 liefern nur schlecht reproduzierbare Ergebnisse. Im Verlauf von zwei Studienarbeiten wurden deshalb an der TH Darmstadt in Zusammenarbeit mit der Firma bedea die Mikrofonieeffekte an Kabeln untersucht und ein neues Verfahren zur Messung dieser Effekte entwickelt.

Der Effekt ist klar: Piezo- und Triboelektrizität

Koaxialkabel bestehen aus zwei konzentrischen, leitenden Zylindern (Innen- und Außenleiter), die durch eine isolierende Kunststoffschicht, das Dielektrikum, voneinander getrennt sind (Bild 1). Zum Schutz vor Umwelteinflüssen ist das Koaxialkabel außen mit einer weiteren Kunststoffschicht, dem Mantel, umgeben. Im elektrischen Ersatzschaltbild stellt sich das Kabel als Vierpol mit längenbezogenen Größen (Belägen) dar. Der Mikrofonieeffekt des Kabels wird durch die Stromquelle I_m beschrieben. Der Strom dieser Quelle bestimmt sich durch den Leitwert G_k sowie durch die Leitungskapazität C_k ; d.h. G_k und C_k können im mechanisch angeregten Teil des Kabels als Innenwiderstand der Quelle betrachtet werden.

Als Ursache der Mikrofoniespannung in Koaxialkabeln sind sowohl piezoelektrische als auch triboelektrische Effekte zu betrachten (siehe Kasten „Piezo- und Triboelektrizität“). Weitere Effekte werden vermutet, wurden bisher

In Koaxialkabeln, welche mechanischen Belastungen wie Zug, Druck, Quetschung usw. ausgesetzt sind, werden elektrische Ladungen erzeugt, die sich als Störstrom oder Störspannung auf dem Kabel bemerkbar machen. Diese als Mikrofoniespannung oder Rauschspannung bezeichneten Störungen überlagern sich den Nutzsignalen und können diese erheblich verfälschen. Hier nun die Grundlagen dieser Mikrofonieeffekte und die Erläuterung der zu ihrer Verifizierung dienenden, neu entwickelten Meßtechnik-Verfahren.



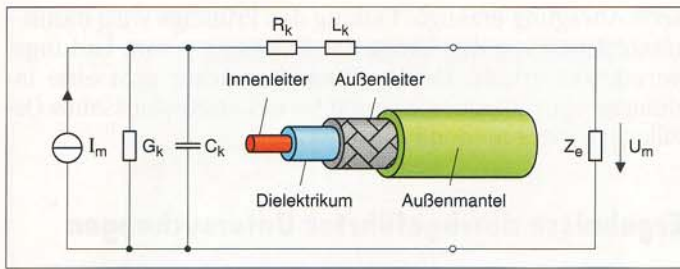


Bild 1. Aufbau eines Koaxialkabels und Kabelersatzschaltbild.

aber nicht nachgewiesen. Piezoelektrische Effekte bewirken eine Ladungsverschiebung zwischen der Innen- und Außenseite des Dielektrikums, welches durch die Leiterelemente (Innen- und Außenleiter) kontaktiert wird. Triboelektrische Effekte zwischen den Leitern und dem Dielektrikum oder zwischen dem Außenleiter und dem Kabelmantel führen zur Ladungstrennung, wenn sich die Leiter kurzzeitig vom Kunststoff lösen (oder aneinander reiben). Am fertigen Kabel können piezo- und triboelektrische Effekte bisher nicht getrennt nachgewiesen werden.

Bekanntes Meßverfahren für die Mikrofoniespannung

Die z.Zt. international genormten Meßverfahren zur Bestimmung der Mikrofoniespannung sind das Verfahren nach der amerikanischen Militarnorm MIL-C-17-G, 4.8.14 (Mechanically induced noise) und das Verfahren nach IEC 94-4-1, Appendix B (Test Method for cable microphony). Beim erstgenannten Verfahren (Bild 2) wird ein Kabel zwischen zwei Befestigungspunkten durchhängend eingespannt. Eine Seite des Kabels ist an einen hochohmigen

Verstärker angeschlossen, die andere Seite stellt einen abgeschirmten Leerlauf dar. Das Kabel wird in der Mitte mit einem Gewicht belastet, um 90° aus der Ruhelage ausgelenkt und anschließend losgelassen. Die so erzeugten Schwingungen können als Mikrofoniespannung am hochohmigen Oszilloskop dargestellt werden. Die Messung ist mehrfach zu wiederholen, und der Mittelwert daraus ist zu bilden. Der Vorteil dieses Verfahrens ist der einfache Aufbau; nachteilig ist die geringe Empfindlichkeit, die nicht praxistgerechte, bleibende Verformung des Kabels und die durch die undefinierte mechanische Anregung hervorgerufene schlechte Reproduzierbarkeit der Meßwerte.

Das Verfahren nach IEC 96-4-1 ist auf die Messung von hochgeschirmten, wenig flexiblen Kabeln zugeschnitten. Prinzip: Auf dem beidseitig fixierten Kabel (ein Ende Leerlauf, am anderen Ende ein Verstärker mit Oszilloskop) wird ein Rollenwagen hin- und herbewegt. Das Kabel läuft über die Oberseite der ersten Rolle, dann über die Unterseite der zweiten Rolle und wird durch die Bewegung des Wagens entlang des Kabels in die eine, und anschließend sofort in die andere Richtung gebogen.

Neben den beiden genormten Meßverfahren wurde eine Reihe weiterer Verfahren zur Messung der Mikrofoniespannung mit unterschiedlicher Anregung und verschiedenen Aufnehmern untersucht. Alle untersuchten Verfahren haben den Nachteil der schlechten Reproduzierbarkeit und der ungleichmäßigen und undefinierten Anregung des Prüflings.

Neues Meßverfahren arbeitet mit definierter Anregung

Ein neues Meßverfahren soll im Gegensatz zu den eben skizzierten Verfahren einfacher zu erfassen und besser

Piezo- und Triboelektrizität

Als piezoelektrischen Effekt bezeichnet man die Eigenschaft bestimmter Werkstoffe, durch mechanische Krafteinwirkung wie z.B. Druck, Zug, Torsion usw. ein elektrisches Feld zu erzeugen bzw. sich unter der Einwirkung elektrischer Felder zu verformen. Bei mechanischer Belastung von außen werden die Moleküle eines solchen Materials so verformt, daß sie nach außen nicht mehr elektrisch neutral sind, sondern Dipolcharakter aufweisen. An den Grenzflächen entstehen so elektrische Ladungen mit entgegengesetztem Vorzeichen. Piezoelektrizität entsteht im allgemeinen in Werkstoffen mit kristalliner Struktur mit min-

destens einer polaren Achse. Zu diesen Werkstoffen gehören auch Polymere mit einer bestimmten Anordnung der kettenförmig zusammengesetzten Polymermoleküle, wie sie auch für Kabelisolationen verwendet werden. Das Auftreten der Triboelektrizität, meist fälschlicherweise als Reibungselektrizität bezeichnet, gehört zu den ältesten elektrophysikalischen Beobachtungen der Menschheit. Ein bekanntes Experiment ist das Reiben eines Glasstabes an einem Stofftuch, worauf beide Materialien gegensätzlich elektrisch aufgeladen sind. Die elektrische Ladungsverschiebung entsteht dabei nicht durch die Reibung, son-

dern durch das Verbinden und Trennen zweier Materialien. Durch Reiben wird lediglich die Oberfläche an denen sich die Werkstoffe berühren, vergrößert. Erklären läßt sich der Effekt durch die materialspezifische Austrittsarbeit. Werden zwei Materialien unterschiedlicher Austrittsarbeit an ihren Grenzflächen in Verbindung gebracht, so gibt das Material mit der niedrigeren Austrittsarbeit so lange Elektronen ab, bis das Energieniveau an beiden Oberflächen gleich groß ist. Werden die Materialien nun wieder getrennt und haben die Elektronen keine Möglichkeit, abzufließen, so bleibt das Material, welches wäh-

rend der Berührung Elektronen abgegeben hat, positiv das andere negativ geladen. Dieser Vorgang findet bei Koaxialkabeln unter Bewegung sowohl zwischen Innenleiter und Isolierung als auch zwischen Außenleiter und Isolierung statt. Für polymere Kunststoffe läßt sich eine Triboelektrische Reihe (TER) angeben, welche das triboelektrische Verhalten der Kunststoffe beschreibt und eine Auswahl geeigneter Isolationswerkstoffe für rauscharme Kabel ermöglicht. Kunststoffe aus der Mitte dieser Reihe weisen gegenüber Metallen geringere Triboelektrizität auf als Kunststoffe vom Anfang und vom Ende dieser Reihe.

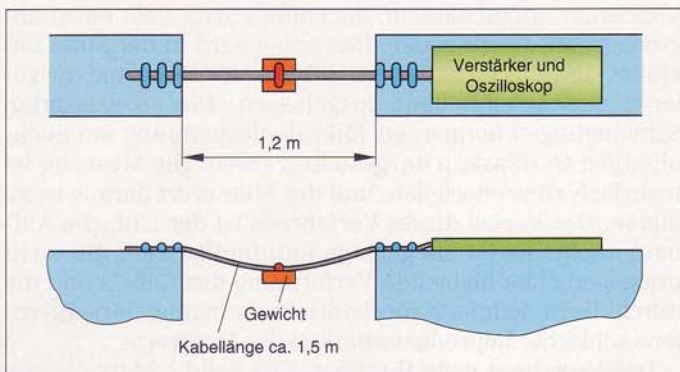


Bild 2. Messung der Mikrofoniespannung nach MIL-C-17-G.

reproduzierbare Meßergebnisse bei einfachem Meßaufbau liefern. Dabei wird das zu prüfende Kabel mit einem Ende an der Membran eines Schwingerreger befestigt und am Ende der zu prüfenden Länge mit einem definierten Gewicht gespannt (Bild 3). Die Einspannhülse am offenen Ende des Kabels dient dabei gleichzeitig als Abschirmung gegen Einstrahlung von außen. Das freie Ende des Prüflings wird an einen Ladungsverstärker angeschlossen. Als Schwingerreger zur mechanischen Anregung der Kabelprobe dient ein Rütteltisch (Lautsprecherprinzip), dessen Auflage durch ein verstärktes Signal in sinusförmige Schwingungen versetzt wird. Durch den Schwingerreger wird die Kabelprobe in axialer Richtung periodisch gedehnt und gestaucht.

Da die Auslenkung des Schwingerreger und damit die Anregung des Kabels über den betrachteten Frequenzbereich nicht konstant ist, wird die Auslenkung mit einem an dem Schwingerreger befestigten Beschleunigungsaufnehmer erfaßt und über den (mit einem Rechner gekoppelten) NF-Verstärker entsprechend nachgeregelt. Der Beschleunigungsaufnehmer erzeugt eine der Beschleunigung proportionale Spannung, welche über den angeschlossenen Ladungsverstärker durch zweifaches Differenzieren in eine längenproportionale Spannung umgewandelt wird.

Der Zusammenhang zwischen der gemessenen Beschleunigung a und der Auslenkung s des Prüflings ist:

$$s = s_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta)$$

$$a = \frac{d^2s}{dt^2} = -s_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta) \quad (1)$$

$$a_0 = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot s_0$$

Die Belastung des Prüflings soll dabei innerhalb seines elastischen Bereiches liegen, um praktische Verhältnisse nachzubilden und das Kabel während der Prüfung nicht zu zerstören.

Das zu prüfende Kabel ist an einen weiteren Ladungsverstärker angeschlossen. Dieser Ladungsverstärker hat einen Eingangswiderstand R_e gegen Null; Innen- und Außenleiter des Kabels sind somit am Eingang des Ladungsverstärkers kurzgeschlossen. Die gesamte, durch die mechani-

sche Anregung erzeugte Ladung des Prüflings wird damit – unabhängig von der Länge der Zuleitung – vom Ladungsverstärker erfaßt. Der Ladungsverstärker gibt eine ladungsproportionale Spannung an ein angeschlossenes Oszilloskop (oder an den PC) weiter.

Ergebnisse durchgeführter Untersuchungen

Während verschiedener Versuchsreihen wurde mit dem neuen Meßaufbau die Abhängigkeit der gemessenen Ladung von den Parametern Anregungsfrequenz, Meßlänge, Auslenkung bzw. Dehnung sowie definierter mechanischer Vorspannung und Torsion des Prüflings untersucht. Dabei standen während der zweiten Studienarbeit der TH Darmstadt die Meßaufbauten der Firmen kabelmetal (Nürnberg) und bedea (Asslar) sowie der Meßaufbau der TH Darmstadt zur Verfügung, so daß ein direkter Vergleich der Meßergebnisse zwischen verschiedenen Meßeinrichtungen möglich war.

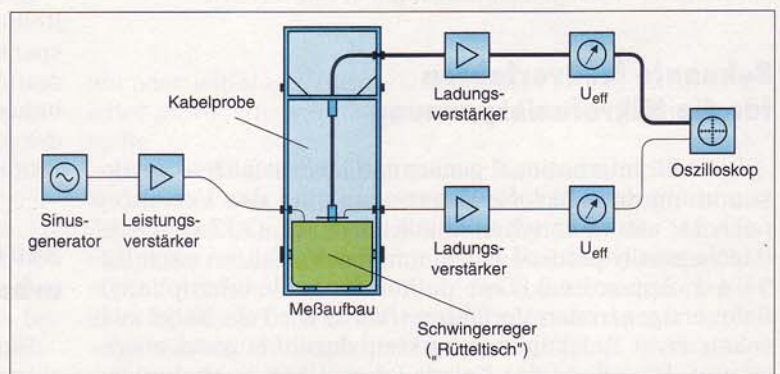


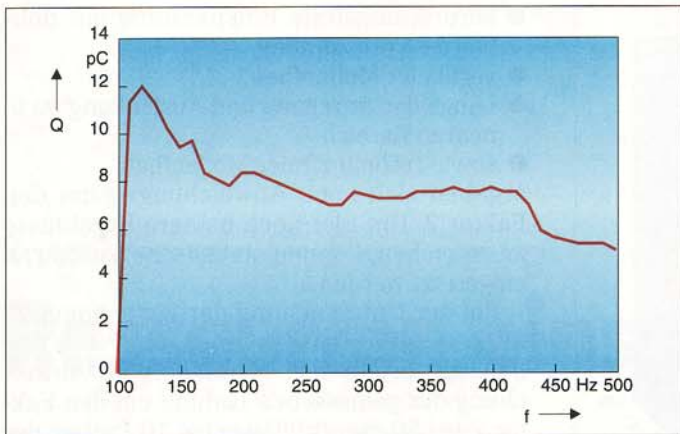
Bild 3. Meßaufbau: Der Rütteltisch beaufschlagt das Kabel mit definierten Axial-Zugbelastungen.

Bei der Untersuchung der Anregungsfrequenz ergaben sich zunächst Probleme durch mechanische Resonanzen der Meßaufbauten. Nachdem diese Resonanzen durch verschiedene Maßnahmen beseitigt wurden, ergab sich im Bereich von 50 Hz bis 200 Hz bei allen Meßplätzen ein nahezu linearer Verlauf der gemessenen Werte bei Auslenkungen ($\Delta l/l$ im Bereich von 0,4 %).

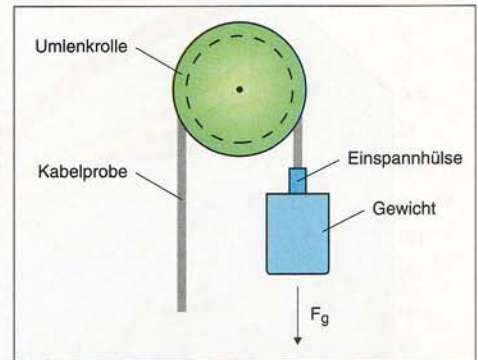
Zur Vermeidung mechanischer Resonanzen ist zu beachten, daß Schwingerreger und Einspannung des Kabels unter Verwendung weniger Bauteile und kurzer Hebelwege fest montiert werden. Eine Grundplatte aus massivem Stahl hat sich als vorteilhaft erwiesen. Ein Meßbeispiel zeigt Bild 4.

Bei den Auslenkungen ergab sich im Bereich von 0,1 bis 0,6 % ein linearer Anstieg der gemessenen Ladung. Bei größeren Auslenkungen treten Unregelmäßigkeiten und schließlich bei Werten über 1 % die Begrenzung der Meßwerte auf.

Bei der Untersuchung der Einspannlänge ergaben sich ebenfalls lineare Zusammenhänge zwischen Einspannlänge und Meßwert (Ladung steigt linear mit zunehmender Einspannlänge). Die maximale Meßlänge hängt dabei von der Größe bzw. der Leistung des Schwingerreger ab. Mit



▷ **Bild 5. Erzeugen einer definierten mechanischen Vorspannung durch Umlenkrolle und Gewicht.**



◁ **Bild 4. Ladung Q in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz mit Resonanz bei 125 Hz.**

den Meßaufbauten der Fa. bedea und der TH Darmstadt können Längen von max. 0,3 m, mit dem Meßplatz der Fa. kabelmetal Längen von max. 0,5 m gemessen werden. Zu beachten ist, daß sich bei größerer Kabellänge, speziell im Falle weicher Prüflinge, mechanische Resonanzen des Prüflings einstellen können.

Zur Aufnahme des Kabels in die Prüfvorrichtung wurden spezielle Spannhülsen nach Art eines Bohrfutters konstruiert. Mit dieser Konstruktion ist es möglich, den Prüfling verdrehungsfrei einzuspannen. Abhängig von der Torsion und der Vorspannung des Prüflings ergaben sich unterschiedliche Meßwerte. Unter Umständen kann es auch vorkommen, daß der Prüfling gestaucht in die Vorrichtung eingebaut wird und die Ergebnisse dadurch verfälscht werden. Zum Erreichen reproduzierbarer Werte ist daher eine definierte Vorspannung des Prüflings erforderlich. Dazu wird der Prüfling über eine Umlenkrolle mit einem Gewicht, welches mit der Spannhülse verbunden ist, belastet (Bild 5). Für Kabel im Bereich bis ca. 5 mm Außendurchmesser hat sich ein Gewicht von 500 g bewährt. Gleichzeitig ergab sich

während dieser Untersuchung, daß ein vertikaler Meßaufbau zu bevorzugen ist, da bei horizontalem Aufbau die Kabelprobe durchhängen kann. Die am Rütteltisch befestigte Spannhülse wirkt gleichzeitig als statischer Schirm, um NF-Einkopplungen aus der Umgebung auszuschalten.

Zur Untersuchung des Temperaturverhaltens von Meßkabeln wurde der Meßaufbau mit einem Kanal versehen, über welchen erwärmte Luft zum Prüfling gelangen kann. Die erwärmte Luft wird über einen Temperaturfühler gemessen und über eine entsprechende Regelung konstant gehalten. Der Prüfling wurde bei jeder Temperaturstufe für eine ausreichende Zeit konditioniert. Untersucht wurde ein Kabel 0,5L/2,95z-TPK mit Isolations- und Mantelmaterial aus thermoplastischem Kunststoff, der für Dauertemperaturen von ca. 135 °C geeignet ist. Bei Anregungsfrequenzen zwischen 50 Hz und 150 Hz ergab sich ein nahezu linearer Anstieg der Rauschladung mit der Temperatur (Bild 6). Oberhalb dieser Frequenzen sind Resonanzerscheinungen zu beobachten, die auf das Erweichen des Kunststoffes zurückzuführen sind.

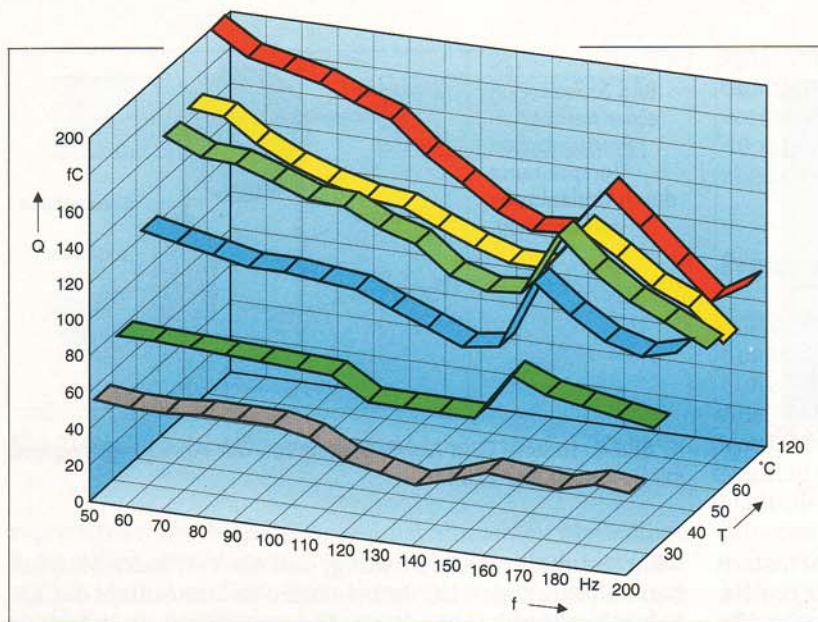


Bild 6. Ladungsverschiebung Q in Abhängigkeit von der Temperatur.

Auswertung und Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse

Die gemessene Ladung hängt sowohl von der Höhe der Anregung als auch von der angeregten Meßlänge ab. Diese Abhängigkeit kann bis zu einer vom jeweiligen Meßplatz abhängigen maximalen Länge sowie bis zu einer maximalen Auslenkung als linear angenommen werden. Die Meßergebnisse können daher im linearen Bereich einfach auf die Auslenkung Δ/l bezogen werden. Damit ergibt sich der Rauschladungsquotient Q_R zu:

$$Q_R = Q_{\text{mess}} / (l \cdot \Delta / l) = Q_{\text{mess}} / \Delta l$$

mit

$$\begin{aligned} Q_{\text{mess}} &= \text{gemessene Ladung in Mikro-Coulomb} \\ l &= \text{Länge der Anregung in m} \\ \Delta l &= \text{Auslenkung der Kabelprobe in m} \\ \Delta l / l &= \text{relative Auslenkung der Kabelprobe} \end{aligned} \quad (2)$$

Zur einfachen Klassifizierung der Kabel wird dieser Wert auf der Basis $0 \text{ dB} = 1 \text{ Mikro-Coulomb/Meter } (\mu\text{C}/\text{m})$ logarithmiert und mit dem Faktor 20 multipliziert. Damit ergibt sich das logarithmische Rauschverhältnis bzw. der Ladungspegel Q [db($\mu\text{C}/\text{m}$)] zu:

$$Q = 20 \log \left[(Q_R / (1 \mu\text{C}/\text{m})) \right] \quad (3)$$

Dieser Wert kann auch als Rauschunterdrückungs-Faktor bzw. als Mikrofoniedämpfung betrachtet werden. Rauscharme Kabel sind im allgemeinen mehr als 30 dB besser als Standardkabel.

Bei allen untersuchten anderen Meßverfahren ergaben sich erhebliche Abweichungen der Meßergebnisse bei wiederholter Messung der gleichen Probe, z.T. größer als um den Faktor 10. Bei dem neuen Meßplatz wurde daher der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse große Bedeutung zugemessen. Unter Beachtung der Faktoren

- verdrehungsfreie Einspannung mit definierter Vorspannung,
 - vertikaler Meßaufbau,
 - Länge der Anregung und Auslenkung im linearen Bereich
 - sowie resonanzfreier Meßaufbau
- ergaben sich max. Abweichungen um den Faktor 2. Um hier noch bessere Ergebnisse zu erreichen, können statistische Verfahren eingesetzt werden.

Bei der Untersuchung der Längshomogenität des Rauschverhaltens über die Kabellänge ergab sich ebenfalls eine Abweichung der gemessenen Ladung um den Faktor 2 bei 50 mm Prüflänge bei 10 Proben des Kabels RG 58 über eine Länge von 15 m verteilt. Um hier mehr Sicherheit über die Verteilung des Rauschverhaltens über die Kabellänge zu erhalten, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Diese Untersuchungen sind jedoch nur sinnvoll bei eindeutig reproduzierbaren Einzelergebnissen. *ha*

Das beschriebene Meßverfahren befindet sich als neuer Normenvorschlag bei IEC als 46A/260/NP in der internationalen Normung.

Literatur

- [1] Bickel, Z.; Erlitz, G.: Untersuchung von Koaxialkabeln und Kabelkomponenten zur Erfassung und Reduzierung von Mikrofoniekomponenten. Studienarbeit, TH Darmstadt 1995.
- [2] Brück, R.: Elektrostatische Eigenschaften von Polymeren. Kunststoffe 71 (1981) 4. S. 234 bis 239.
- [3] Fowler, E.: Microphony of coaxial cables. Proc. IEE, Vol 123, No. 10, Okt. 1976. S. 1043 bis 1046.
- [4] Hähner, T.: Mechanically induced noise, cable microphony. 46A/WG5 (Nürnberg/Hähner)1, Oktober 1995.
- [5] Hirschfeld, J.; Irrgang, B.: Zur Messung von Störspannungen an schwingungsbeanspruchten Kabeln. Hochfrequenztechnik und Elektroakustik 76/1967, S. 113 bis 119.
- [6] IEC 96-4-1, Radio frequency cables, Part 4: Specification for superscreened cables. Section 1 – General requirements and test methods, Appendix B, Test method for cable microphony.
- [7] Kraft, B; Pistor, M.: Untersuchung piezoelektrischer und triboelektrischer Effekte in Polymeren zur Reduzierung von Mikrofoniespannungen auf Koaxialkabeln. Studienarbeit, TH Darmstadt 1990.
- [8] MIL-C-17-G, 4.8.14: Mechanical induced noise.
- [9] Sessler, G. et al.: Electrets, Topics in Applied Physics. Springer Verlag 1987.
- [10] Styles, D.: Low noise cables. Elektron 1976, S. 31 bis 35.

Dipl.-Ing. Bernhard Mund ist seit über 11 Jahren als Entwicklungsingenieur in einem Kabelwerk in Asslar beschäftigt. Neben dieser Entwicklungstätigkeit ist er Obmann der Normengremien UK 412.3, HF-Kabel und Leitungen im DIN und VDE (DKE) sowie des NEA 412.3 HF-Kabel und Leitungen, Hohlleiter der Normenstelle Elektrotechnik sowie Mitglied weiterer nationaler und internationaler Gremien und Arbeitskreise bei IEC und CENELEC.

