

**Zeitschrift:** Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft  
**Herausgeber:** St. Gallische Naturwissenschaftliche Gesellschaft  
**Band:** 87 (1994)

**Artikel:** Zerstörungsfreie Diagnose von Korrosion an Spannkabeln und Stahlankern mittels reflektometrischer Impulsmessung RIMT  
**Autor:** Kapp, Hans / Markees, Alf  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-832729>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 14.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Zerstörungsfreie Diagnose von Korrosion an Spannkabeln und Stahlankern mittels reflektometrischer Impulsmessung RIMT

Hans Kapp und Alf Markees

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	291
1. Einleitung .....	292
2. Die Vorspanntechnik .....	292
3. Die reflektometrische Impulsmessung .....	293
4. Stand der Technik .....	298
Literaturverzeichnis .....	299

## Zusammenfassung

Mit der reflektometrischen Impulsmessung RIMT wird hier eine zerstörungsfreie Prüfmethode vorgestellt, welche dazu dient, Korrosionsschäden an Spannkabeln und Stahlankern lagemässig zu orten und qualitativ zu diagnostizieren. Die physikalischen Grundlagen der RIMT-Technologie sind ausserordentlich komplex; zur Zeit laufen deshalb verschiedene Forschungsprojekte, deren eines durch das Bundesamt für Strassenbau finanziell unterstützt und am IBWK der ETH-Z abgewickelt wird.

Der vorliegende Bericht gibt einen Einblick in die Physik der RIMT-Technologie, soweit sie heute bereits überschaubar ist. Unter dem Titel «Stand der Technik» wird anschliessend über die praktische Anwendbarkeit der RIMT-Methode an Brückenbauwerken, Hochbauten und Verankerungen etc. berichtet.

## 1. Einleitung

Brückenbauwerke und andere Stahlbetonbauten sind während ihrer Lebensdauer vielfältigen Einflüssen wie der ständig zunehmenden Verkehrsbelastung, der Witterung, aggressiven physikalisch-chemischen Einwirkungen (Schadstoffbelastung der Luft, Streusalzeinsatz) u.a.m. ausgesetzt. Alle diese Faktoren gefährden die Korrosionsbeständigkeit der im Bauwesen verwendeten Bau- und Werkstoffe und tragen dazu bei, dass Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks nur durch periodisch durchgeführte, meist aufwendige Unterhalts- und Sanierungsarbeiten sichergestellt werden können. Der Zeitpunkt für die Notwendigkeit solcher Arbeiten kann nur aufgrund verlässlicher Entscheidungskriterien über den Gesamtzustand des Bauwerks bestimmt werden. Daher ist die Erfassung des Korrosionszustandes der metallischen Komponenten eines Stahlbetontragwerkes (Armierung, Befestigungselemente, Spannglieder etc.) von entscheidender Bedeutung.

Untersuchungen über Schäden an Stahlbetonbauwerken zeigen klar, dass es dringend notwendig ist, geeignete Prüfverfahren zur Zustandsermittlung an Spanngliedern und Stahlankern zu entwickeln. Eines von nur sehr wenigen in der Praxis anwendbaren Verfahren ist die sogenannte reflektometrische Impulsmessung RIMT (Reflectometric Impulse Measurement Technique), welche in Zusammenarbeit mit einem italienischen Partner durch die Unterzeichneten entwickelt und zur praktischen Anwendung gebracht wurde. Allerdings blieben die physikalischen Grundlagen der RIMT-Methode bis vor kurzem weitgehend im Dunkeln. Seit Mitte 1993 läuft deshalb ein Forschungsprojekt, welches vom Bundesamt für Straßenbau mitfinanziert und gefördert wird und an welchem einerseits der Lehrstuhl für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion an der ETH-Z und die Gruppe für Hochspan-

nungstechnik, andererseits die Grundbauberatung AG, St. Gallen, beteiligt sind. Parallel dazu laufen Forschungsprogramme in Kanada und Italien, ebenfalls mit Beteiligung der Verfasser. Der vorliegende Artikel nimmt deshalb für sich in Anspruch, umfassend über den derzeitigen Stand der RIMT-Technologie zu berichten.

## 2. Die Vorspanntechnik

Neben Boden- und Felsankern wird die RIMT-Methode vor allem und vorrangig zur Diagnose von Korrosionsschäden an Spannkabeln verwendet. Es ist deshalb sinnvoll, vorerst einen kurzen Überblick über die wesentlichsten Aspekte der Vorspanntechnik zu geben.

Die Spannbetonbauweise nimmt vor allem im Brücken- und Behälterbau, in Nordamerika aber auch im Hochbau eine sehr bedeutende Stellung ein. Hierfür sind entscheidende technische und wirtschaftliche Vorteile verantwortlich. Die wesentlichsten Vorteile des Spannbetons sind:

- Im Vergleich zu Stahlbeton kann erheblich Stahl und Beton eingespart werden, weil der gesamte Betonquerschnitt an der Statik bzw. an der Tragfunktion beteiligt wird, was u.a. auch schlankere Bauten ermöglicht.
- Im Vergleich zu Stahl und Stahlbeton ergibt sich eine geringere Durchbiegung.
- Ein Bauwerk ist auch nach einer temporären Überbelastung immer noch gebrauchsfähig, weil sich kurzzeitig entstehende Risse nach dem Verschwinden der Überbelastung wieder schliessen.
- Spannbeton weist eine hohe Ermüdungsfestigkeit auf, da bei Wechselbeanspruchung nur relativ kleine Spannungsamplituden auftreten.
- Bauzeiten können erheblich verkürzt werden, da sich Decken rascher ausschalen lassen.

Damit waren die Voraussetzungen gegeben, dass die Vorspanntechnik auch im Hochbau Eingang finden konnte. Heute kommen Vorspannelemente verschiedenster Konstruktion, aber auch verschiedene Vorspanntechniken zum Einsatz:

- *Die Vorspanntechnik mit Verbund.* Sie besteht darin, ein Spannkabel mit mehreren Einzellitzen in einem Metall- oder Kunststoff-Hüllrohr zu verlegen und nach dem Spannvorgang durch Injektion einer Zementsuspension mit dem umgebenden Beton in Verbund zu bringen. Die injizierte Betonsuspension ist hochalkalisch und gewährleistet damit einen gewissen Schutz gegen Korrosion, vorausgesetzt, der Injektionsmörtel ist kompakt und undurchlässig.
- *Die Vorspanntechnik ohne Verbund.* Sie wird seit den Anfängen der Entwicklung der Vorspanntechnik in Europa in den 30er Jahren verwendet und wird auch heute noch ständig weiterentwickelt. In den Anfängen wurde der Spannstahl speziell in den USA gefettet und mit Kraftpapier umwickelt, um die Längsbeweglichkeit beim Spannen zu gewährleisten. Heute wird das Kabel in einem kontinuierlichen Vorgang im Werk zunächst mit einem durchgehenden Film aus Dauerkorrosionsschutzfett versehen. Anschliessend wird darüber i.a. ein Kunststoffrohr von mindestens 1 mm Wandstärke aus Polyäthylen oder Polypropylen extrudiert. Damit erhält man einen primären und einen sekundären Korrosionsschutz, der aber ebenfalls nur so lange hält, als die Fett- und Kunststoffumhüllung nicht verletzt wird.

Spannglieder aus Stahl üben im allgemeinen eine für die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks entscheidende Funktion aus – ein Versagen, z.B. infolge Korrosion, kann deshalb katastrophale Folgen haben.

### 3. Die reflektometrische Impulsmessung

#### 3.1 Allgemeines

Mit der reflektometrischen Impulsmessung ist es grundsätzlich möglich, Korrosionsschäden an Vorspannkabeln und Stahlankern frühzeitig zu erkennen und ihre Entwicklung in Funktion der Zeit zu verfolgen. Hierbei wird ein sehr kurzer Stromimpuls mit einer Pulsbreite im Bereich von 2–10 ns in das Vorspannkabel eingespeist. Dieser Impuls pflanzt sich wellenartig im Vorspannkabel bzw. auf der Kabeloberfläche, aber auch in dem das Spannglied umgebenden Beton fort. Das Spannglied als metallischer Leiter und der das Spannglied umgebende Beton als Dielektrikum bilden das System für den Transport des elektrischen Impulses. Diesem System kann ein komplexer Widerstand, d.h. eine Impedanz zugeordnet werden, die im wesentlichen durch die Materialeigenschaften des Vorspannkabels und des Betons bestimmt ist. Die Bestimmungsgrössen sind die Leitfähigkeit, die Dielektrizitätskonstante und die magnetische Permeabilität der beiden Materialien. Ebenso bestimmen diese beiden Grössen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Welle im System.

Solange das System homogen ist und somit überall die gleichen Materialeigenschaften besitzt, breitet sich der elektrische Impuls mit konstanter Geschwindigkeit aus, wird am Ende des Vorspannkabels reflektiert und läuft wieder zum Ausgangspunkt zurück, wo er registriert werden kann. Im Moment, da sich längs des Kabels die Materialgrössen verändern, z.B. infolge einer korrosionsbedingten Querschnittsverminderung, ändert sich örtlich auch die Impedanz. An solchen Impedanzübergängen wird ein Teil des Impulses reflektiert und läuft ebenfalls zum Ausgangspunkt zurück, wo er registriert werden kann.

Über die Laufzeit sind die Zeitdifferenz zwischen der Emission des Impulses und dem Eintreffen der Reflexion am Aus-

gangspunkt und damit der Ort, wo die Reflexion stattfindet, miteinander korelliert. Damit können mit der reflektometrischen Impulsmessung örtliche Impedanzänderungen bzw. Korrosionsschäden am Vorspannkabel festgestellt, d.h. lagemässig geortet und qualitativ diagnostiziert werden.

### 3.2 Physikalische Grundlagen

Grundlage der reflektometrischen Impulsmessung sind die Maxwellschen Gleichungen der Elektrodynamik. Um die Theorie zu formulieren, ist es allerdings notwendig, die Anfangs- und Randbedingungen des Problems möglichst realitätsnah zu bestimmen. In der Theorie der elektromagnetischen Wellen gibt es verschiedene theoretisch mögliche Ansätze zur Modellbildung:

- Der *Koaxialkabelansatz*. Grundsätzlich wird in dieser Theorie von einem metallischen Leiter ausgegangen, der in ein Dielektrikum eingebettet ist, das wiederum vom einem elektrischen Leiter umgeben ist, der die Funktion des Rückleiters übernimmt. Solange das den metallischen Leiter umgebende Dielektrikum als homogen vorausgesetzt werden kann, ist das Problem zwar mathematisch geschlossen lösbar, aber da der äussere elektrische Leiter des Koaxialkabels bei Vorspannkabeln normalerweise nicht vorhanden ist, entsprechen diese Randbedingungen nicht der Realität.
- Der Ansatz der *Übertragungsleitungen*. Dieser Ansatz wird in der Theorie der Hochspannungsübertragungsleitungen verwendet, ist mathematisch komplizierter und führt nicht in allen Fällen zu mathematisch geschlossenen Lösungen. Darüberhinaus wird im allgemeinen auch in dieser Theorie von der Existenz eines Rückleiters ausgegangen. Ein spezielles Modell von Sommerfeld aber, das einen in ein Dielektrikum eingebetteten Eindrahtleiter mit räumlich

strukturierter Oberfläche behandelt, liefert einen vielversprechenden Ansatz zur Klärung der Sachverhalte.

- Der *Antennenansatz*. Dieser entspricht am ehesten den Gegebenheiten der Spanntechnik. Speziell die Behandlung des Problems der in Materie eingebetteten Antenne kommt der Realität bei Vorspannkabeln am nächsten.

Um die Ausbreitungsvorgänge elektromagnetischer Wellen vollständig zu beschreiben, müssen die Maxwellschen Gleichungen der Elektrodynamik mit den entsprechenden Randbedingungen gelöst werden. Diese Aufgabe ist schwierig. In diesem Artikel ist nicht Raum genug, um das Problem in seiner vollen Breite darzustellen. Wir begnügen uns deshalb mit der Veranschaulichung einiger allgemeiner Zusammenhänge.

Während die Maxwellschen Gleichungen die physikalischen Zusammenhänge detailliert beschreiben, werden in der Elektrotechnik die Differentialgleichungen der elektrischen Leitung hergeleitet. Gewöhnlich werden diese aus dem sogenannten Ersatzschaltbild für den elektrischen Leiter gewonnen. Dieses Ersatzschaltbild eines elektrischen Leiters beschreibt die elektrische Struktur eines Leiters mittels bekannter elektrischer Komponenten wie Ohmsche Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten. Die Kombination dieser Schaltelemente, d.h. Parallel- und Serienschaltung der einzelnen Elemente, ist letztlich entscheidend für die Beschreibung der physikalischen Größen wie Ausbreitungsgeschwindigkeit, Gruppen geschwindigkeit, Dispersion und Wellen widerstand des untersuchten Systems etc. Diese Elemente sind andererseits aber auch direkt mit den physikalischen Materialkonstanten des Leiters wie Dielektrizitätskonstanten, magnetischen Permeabilitäten und Leitfähigkeiten verknüpft.

Das Ersatzschaltbild eines Leitungselementes kann aus dem in Figur 1 dargestell-

ten Ersatzschaltbild eines infinitesimalen Leitungsstückes dargestellt werden:

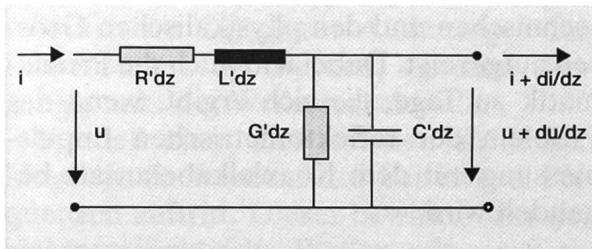


Abb. 1: Ersatzschaltbild eines Leiterstücks mit Verlusten

Die Größen  $R'$ ,  $L'$ ,  $C'$  und  $G'$  sind der Widerstandsbelag oder der Längswiderstand, der Induktivitätsbelag oder die Längsinduktivität, der Kapazitätsbelag oder die Querkapazität sowie der Leitwertsbelag oder der Querleitwert des betrachteten infinitesimalen Leiterstücks.

Damit wird klar, dass diese Größen Funktionen des Ortes längs des Leiterstücks und der Zeit sind.

Die zu diesem Leiterstück gehörenden Differentialgleichungen für die Spannung und den Strom sind:

$$\begin{aligned}\delta u / \delta z &= -(R' + L' \delta / \delta t) i \\ \delta i / \delta z &= -(G' + C' \delta / \delta t) u\end{aligned}$$

Für diese beiden gekoppelten, partiellen Differentialgleichungen erster Ordnung in der Zeit und im Ort für den Strom und die Spannung müssen nun alle Lösungen gefunden werden. Die Linearkombination aller Lösungen ergibt sodann die vollständige Lösung des Systems dieser Differentialgleichungen. Es würde hier zu weit führen, alle möglichen Lösungen aufzuzeigen. Schon allein aus der Lösung für den eingeschwungenen Zustand können aber wichtige Erkenntnisse für die reflektometrische Impulsmessung gewonnen werden. Mit der Annahme, dass im Kabel mit einer einzigen Schwingung die Kreisfrequenz angeregt werde, können die beiden gekoppelten Differentialgleichungen in eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung für die Spannungen ver-

wandelt werden. Mit dem Ansatz

$$\begin{aligned}i &= \sqrt{2} \operatorname{Re}(I_0 e^{i\omega t}) \\ \text{und } u &= \sqrt{2} \operatorname{Re}(U_0 e^{i\omega t})\end{aligned}$$

ergibt sich:

$$d^2 U_0 / dz^2 = (R' + i\omega L')(G' + i\omega C')U_0$$

Dies ist die Wellengleichung der Leitung. Diese Gleichung ist für die folgende Diskussion der Phänomene, die hinsichtlich der RIMT-Methode zu beachten sind, insoweit nützlich, als alle Signale, welche in die zu untersuchenden Objekte eingespeist werden, mathematisch als Fourier-Reihen, d.h. als Summen von Schwingungen verschiedener Frequenzen beschrieben werden können. Diskutiert man also die Lösung für eine Schwingung einer bestimmten Frequenz, können daraus Schlussfolgerungen für alle Schwingungen gezogen werden. Als erstes ist der Ausdruck

$$\gamma^2 = (R' + i\omega L')(G' + i\omega C')$$

zu betrachten. Dieser Ausdruck stellt das Quadrat des Ausbreitungskoeffizienten oder der Ausbreitungskonstanten auf der Leitung dar und hat die Dimension von  $1/\text{Länge}^2$  und gibt einerseits Auskunft über die Dämpfung, mit der eine bestimmte Frequenz längs des zu untersuchenden Objektes abgeschwächt wird, und andererseits über die Phasenänderung, die eine Oszillation längs der Leitung erleidet. Die Periodenlänge einer Schwingung auf dem Kabel ergibt sich aus obiger Gleichung zu

$$\lambda = 2\pi/\beta$$

wobei  $\beta = \operatorname{Im}(\gamma)$ . Weiter ergibt sich die Geschwindigkeit, mit der sich die Welle auf dem Kabel ausbreitet, zu

$$v = \omega/\beta$$

Hieraus resultiert, dass sowohl die Ausbreitungsgeschwindigkeit als auch die Wellenlänge, mit der sich die Schwingungen auf dem Kabel ausbreiten, einerseits frequenzabhängig, aber auch stark durch die

Materialkonstanten des gesamten Systems bestimmt sind.

Aus der Festkörperphysik sowie aus neueren Untersuchungen über die Leitfähigkeit von Beton weiß man, dass die Materialkonstanten ihrerseits frequenzabhängig sind.

Der Wellenwiderstand  $Z$  des Systems Kabel/Beton kann ebenfalls aus den Lösungen der obigen Differentialgleichungen errechnet werden:

$$Z = \sqrt{(R' + i\omega L') / (G' + i\omega C')}$$

Damit wird auch diese Größe einerseits frequenzabhängig, aber auch stark abhängig von den Materialkonstanten; sie wird damit zu einer Orts-Funktion längs des untersuchten Objekts.

Bevor die Theorie der reflektometrischen Impulsmessung weiter entwickelt werden kann, müssen hier nun einige Betrachtungen zu den materialspezifischen Größen angestellt werden. Wir legen diesen die Struktur eines normalen Koaxialkabels zugrunde, da anhand dieses Modells die sich stellenden Probleme am einfachsten veranschaulicht werden können. Der Aufbau eines Koaxialkabels kann wie folgt dargestellt werden:

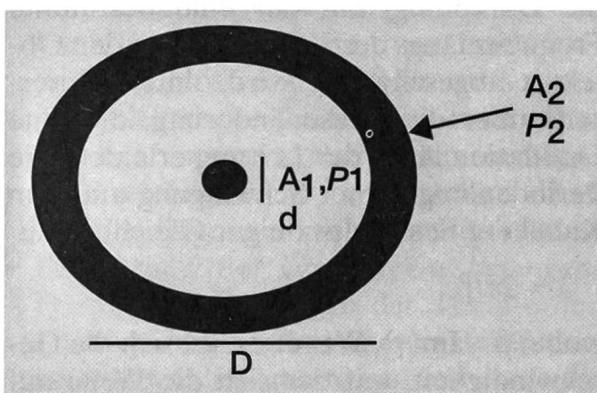


Abb. 2: Aufbau eines Koaxialkabels

Die Größen  $A_1$  und  $A_2$  sind die Querschnittsflächen des Innen- resp. des Außenleiters,  $\rho_1$  und  $\rho_2$  deren spezifische Widerstände,  $d$  der Durchmesser des Innenleiters und  $D$  der Durchmesser des zwischen dem Innen- und Außenleiter lie-

genden Dielektrikums. In der folgenden Tabelle werden die für diesen Fall gelgenden Beziehungen zwischen den elektrotechnischen und den physikalischen Größen aufgezeigt. Dabei tritt auch die Problematik zu Tage, die sich ergibt, wenn das Problem der reflektometrischen Impulsmessung mit dem Koaxialkabelansatz behandelt wird.

*Formeln für die primären Leitungskonstanten der Koaxialleitung*

	Frequenz	
	niedrig	hoch
$R'$	$\rho_1/A_1 + \rho_2/A_2$	$(\rho_1/dt_1 + \rho_2/Dt_2)/\pi$ t=Eindringtiefe des Skineffekts $s = \sqrt{(2\rho/\mu_0\omega)}$
$L'$	$\mu_0/2\pi(\ln(D/d) + 1/4)$ dabei ist die innere Induktivität des Aussenleiters ver- nachlässigt	$\mu_0/2\pi\ln(D/d)$ keine innere Induktivität
$G'$	$\approx 0$ der Isolations- widerstand ist sehr hoch	$2\pi\omega\epsilon_0\tan\delta/\ln(D/d)$
$C'$	$2\pi\epsilon_r\epsilon_0/\tan\delta/\ln(D/d)$	$2\pi\epsilon_r\epsilon_0/\ln(D/d)$

Dabei zeigt sich, dass in diesem Fall der Kapazitätsbelag und der Induktivitätsbelag nahezu frequenzunabhängig sind, während der Widerstands- und der Leitwertsbelag stärker von der Frequenz abhängen. Weiter zeigt sich, dass der Längswiderstand und der Induktivitätsbelag eng mit den Querschnittsdimensionen, dem spezifischen Widerstand und der magnetischen Permeabilität der metallischen Leiter, der Leitwertsbelag und der Kapazitätsbelag dagegen mit den Dimensionen des Dielektrikums und dessen Dielektrizitäts-

konstanten verknüpft sind. Änderungen dieser Größen längs des Kabels führen somit zu örtlichen Impedanzänderungen, wodurch am Ort dieser Änderungen Reflexionen erzeugt werden, die zum Ausgangspunkt der Welle zurücklaufen.

Speziell muss hier auf den Skineffekt hingewiesen werden, der bei hohen Frequenzen auftritt. Dieser bewirkt, dass sich elektromagnetische Wellen mit einer gewissen Eindringtiefe nur noch auf der Oberfläche des metallischen Leiters bewegen. Korrosion des Leiters führt zu einer Querschnittverminderung, aber in Folge der Oxidation auch zu einer Änderung der Dielektrizitätskonstanten, wodurch sich alle primären Leitungskonstanten verändern. Damit sind Korrosionen mit der reflektometrischen Impulsmessung grundsätzlich detektierbar. Örtlich unterschiedliche Strukturen des Betons wirken sich nur in veränderten Dielektrizitätskonstanten aus, wodurch sich nur der Leitwertsbelag und der Kapazitätsbelag ändern. Deshalb ist es schwieriger, mit der reflektometrischen Impulsmessung Aussagen über strukturelle Änderungen des das Spannkabel umgebenden Betons zu machen.

Bisher wurden nur Betrachtungen zu infinitesimalen Leitungsstücken angestellt. Um das Problem gesamtheitlich zu formulieren, muss das ganze Kabel betrachtet und die einzelnen Kabelstücke müssen mit veränderten Materialkonstanten und veränderten Dimensionen in die Rechnungen miteinbezogen werden. Dies kann durch Hintereinanderschalten verschiedener infinitesimaler Leitungsstücke realisiert werden. Eine Möglichkeit, das Problem zu lösen, ergibt sich aus einem Verfahren, wie es bei der Berechnung von Kettenleitern angewendet wird. Ausgegangen wird dabei von der Darstellung eines infinitesimalen Leitungsstücks als Vierpol. Dieses Verfahren führt auf die Hillsche Differentialgleichung zurück. Um die Lösungen zu gewinnen, müssen Fourier-Reihen angesetzt

werden, die ihrerseits in Differentialgleichungen eingesetzt werden. In der Folge ergibt sich ein homogenes lineares System von Gleichungen, dessen Eigenwertgleichung gelöst werden muss.

Dieses Verfahren kann aber zu Schwierigkeiten führen, da genau genommen unendlich viele Gleichungen existieren, so dass man sich für numerische Lösungsverfahren auf eine endliche Zahl von Gleichungen beschränken muss. Dabei müssen aber alle Beiträge berücksichtigt werden, die sich in der Lösung noch bemerkbar machen, was zu sehr langen Rechenzeiten führen kann.

Ein besseres Verfahren bietet sich in der allgemeinen Lösung der Wellengleichung nach D'Alembert an. Dabei müssen zur Lösung Fourier-Integrale respektive Fourier-Reihen verwendet werden. Die Dämpfungskonstante  $\alpha$  des Systems ergibt sich bei kleinen Verlusten zu

$$\alpha = R'/2Z + G'Z/2$$

und die Phasenkonstante  $\beta$  zu

$$\beta = \omega\sqrt{(L'C')}$$

Wird am Anfang der Leitung eine Spannung angelegt, bestimmt diese die vorlauende Welle. Diese Spannung kann in Form einer Fourier-Reihe in ihrer Zeitabhängigkeit wie folgt dargestellt werden:

$$u(0,t) = \sum U_n(0) e^{in\omega t} \quad (-\infty \leq n \leq +\infty)$$

Die Lösung des Problems ergibt sich dann zu

$$u(z,t) = e^{-\alpha z} \sum U_n(0) e^{in\omega(t-z/v)} \quad (z = \text{Koordinate längs der Leitung})$$

Zur Untersuchung des Problems der reflektometrischen Impulsmessung können Leitungen mit verschiedenen physikalischen Eigenschaften hintereinander geschaltet werden. Die Randbedingungen lassen sich einfach formulieren, da für jedes Leiterstück gelten muss:

$$u_i(l) = u_{i+1}(l) \quad \text{und } i_i(l) = i_{i+1}(l)$$

Läuft auf dem Leiterstück  $i$  eine hinlauende Welle der Spannung  $u_h = f_h((t-z)/v)$  und des Stromes  $i_h = f_h(t-z/v)/Z_i$ , wird an der Stossstelle eine reflektierte Welle entstehen, die auf dem Leiterstück  $i$  zurückläuft, und eine gebrochene Welle, die auf dem Leiterstück  $i+1$  weiterläuft. Für die reflektierte und die gebrochene Welle ergibt sich:

$$f_r(t+l/v_i) = (Z_{i+1}-Z_i)/(Z_{i+1}+Z_i)f_h(t-l/v_i)$$

$$f_g(t+l/v_i) = 2Z_{i+1}/(Z_{i+1}+Z_i)f_h(t-l/v_i)$$

Den Faktor  $r = (Z_{i+1}-Z_i)/(Z_{i+1}+Z_i)$ , der Reflexionsfaktor, bestimmt den Anteil der Welle, die auf dem Leiterstück  $i$  zurückläuft, der Übertragungsfaktor  $g = 2Z_{i+1}/(Z_{i+1}+Z_i)$  denjenigen Anteil, der als gebrochene Welle weiterläuft. In Realität sind die Verhältnisse allerdings komplizierter als hier dargestellt.

#### 4. Stand der Technik

Bereits anfangs der 80er Jahre hat G. Nava in Italien mit der Entwicklung der reflektometrischen Impulsmessung bzw. mit deren Anwendung auf dem Gebiet der Korrosions-Diagnose begonnen. Damals wurden die Impulse noch mittels photographischer Aufnahmen auf einem Oszillographen festgehalten und ausgewertet. Mit der Entwicklung der digitalen Technik ist man dann dazu übergegangen, die Signale digitalisiert abzuspeichern. Gleichzeitig verlagerte sich ein grosser Teil der RIMT-Forschung in die Schweiz, wo die Methode vorerst auf privater Basis durch Versuche im Massstab 1:1 weiterentwickelt wurde.

In den Jahren 1990/91 folgte dann ein erstes ‹offizielles› Forschungsprojekt, welches finanziell durch das Bundesamt für Strassenbau unterstützt wurde und dessen Ergebnisse 1992 unter dem Titel ‹Integritäts- und Korrosionsprüfungen an Vorspannkabeln in Brückenbauwerken: Die reflektometrische Impulsmessung› veröffentlicht worden sind. Im Rahmen dieses

Projektes konnte u.a. die Messapparatur wesentlich verbessert werden, so dass heute die Signale direkt in einem tragbaren Computer eingelesen und EDV-mässig verarbeitet werden können.

Die praktische Anwendung der RIMT-Technologie auf korrosionsgefährdete Brückenbauwerke, Hochbauten und Stahlanker hat dann gezeigt, dass es zwar grundsätzlich möglich ist, Korrosionsschäden an Stahlgliedern sowohl lagemässig als auch – bis zu einem gewissen Grad – qualitativ zu diagnostizieren. Dabei musste aber auch zur Kenntnis genommen werden, dass das RIMT-Signal durch zahlreiche externe Störeinflüsse ‹verschleiert› wird, was eine zuverlässige Diagnose unter Umständen stark erschweren kann. Dies trifft insbesondere auf alte Bauwerke zu, wogegen RIMT-Messungen, welche auf einer Null- oder Eichmessung am neuen Objekt basieren und beispielsweise alle 2–3 Jahre wiederholt werden, bereits heute durchaus brauchbare Ergebnisse liefern.

In der Meinung, dass eine funktionsfähige RIMT-Technologie nach wie vor die einzige derzeit vorhandene, zerstörungsfreie Prüfmethode zur integralen Diagnose von Korrosionsschäden an Spannkabeln u.ä. darstellt, hat sich das Bundesamt für Strassenbau 1993 entschlossen, ein weiteres Forschungsprojekt zu lancieren und finanziell zu unterstützen. Die Forschungsgruppe setzt sich aus dem Lehrstuhl für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, IBWK an der ETH-Z, der Gruppe für Hochspannungstechnik sowie der Grundbauberatung AG, St. Gallen, zusammen, wobei letztere neben einem Grossteil des know-hows auch die Messapparaturen zur Verfügung stellt. Im Rahmen dieses zweiten Forschungsprojektes sollen einerseits die Übertragungseigenschaften von Spannkabeln abgeklärt und dabei auch der Einfluss des Betons bzw. der Struktur des Bauwerks auf die Übertragungsfunktion untersucht werden; andererseits sollen die physikalischen Grundlagen vertieft bear-

beitet werden, im speziellen u.a. auch der Einfluss des fehlenden Rückleiters.

Auf theoretischem Gebiet zeigt sich ein vielversprechender Ansatz in der Behandlung des Systems als eine in Materie eingebettete Antenne. Durch die Behandlung des Problems mit diesem Ansatz haben sich grundlegende und erfolgversprechende Erkenntnisse ergeben. Die theoretischen Arbeiten sind zur Zeit noch nicht abgeschlossen. Speziell müssen numerische Simulationen durchgeführt und die Unterschiede im Verhalten von Antennen und Koaxialkabeln studiert werden. Gleichzeitig laufen praktische Untersuchungen an Testobjekten in Italien und Kanada, wo RIMT-Diagnose und effektiver Befund direkt-visuell verglichen werden können. Zielsetzung ist es, das Forschungsprojekt bis Ende 1994 mit einem Bericht an das Bundesamt für Strassenbau abzuschliessen, um dann möglichst endgültig über die Tauglichkeit der reflektometrischen Impulsmessung RIMT als Methode zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung entscheiden zu können.

## Literaturverzeichnis

- FLÜGGE, S. (1958): Handbuch der Physik Bd XVI, Elektrische Felder und Wellen. – Springer Verlag.
- KAPP, H. (1987): Korrosionsprüfungen an Vorspannkabeln und Injektionsankern. – Sonderdruck SIA/ASIC.
- KAPP, H., NAVA, G. & SEIFERT, N. (1992): Integritäts- und Korrosionsprüfungen an Vorspannkabeln in Brückenbauwerken – Die reflektometrische Impulsmessung. – Bundesamt für Strassenbau, Forschungsauftrag 83/88, 3408.1.
- KING, R.W.P., SMITH, G.S. (1981): Antennas in Matter. – MIT Press 1981.
- VOGEL, TH. (1994): Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 21, 19. Mai 1994.
- VSL INTERNATIONAL LTD. (1990): External Post-Tensioning. – VSL Report Series 1, Bern.

