

Einfluß von DOYMA - Dichtungssätzen auf koaxiale Nachrichtenkabel

- Gutachten von Prof. Dipl.-Ing. Helmut Dölecke-

1. Problemstellung:

Die Firma DOYMA GmbH & Co - Durchführungssysteme, Industriestraße 43 - 57 in 28876 Oyten fertigt Kabel- und Leitungsdurchführungen für Energie- und Nachrichtenkabel, um das Eindringen von Wasser in Gebäude zu verhindern bzw. Brandschutz zu gewährleisten.

Das DOYMA - System gestattet die Kabel- bzw. Leitungsführung durch Kernbohrungen oder durch ein eingesetztes Futterrohr. In das Futterrohr aus Spezialfaserzement (Bild 1) oder in die Kernbohrung wird der

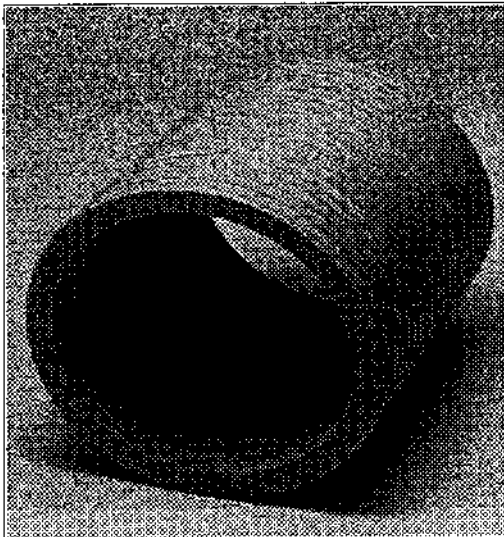


Bild 1: Futterrohr

Dichtungseinsatz (Bild 2) eingesetzt, durch dessen Mitte das Kabel geführt wird. Es werden hier nur Einzeldurchführungen untersucht. Die Dichtung besteht aus Stahlringen, zwischen denen eine oder zwei Vollgummidichtungen liegen. Dieses Gummi wird durch Zusammenpressen der äußeren Stahlscheiben gequetscht. Das höchstzulässige Drehmoment der Schrauben wird vom Hersteller angegeben. Das herausgedrückte Gummi dehnt sich zum einen gegen das Futterrohr bzw. die Kernbohrung aus und stellt dort die notwendige Abdichtung dauerhaft sicher, zum anderen dehnt es sich gleichzeitig gegen das Kabel aus. Dieser Effekt ist einerseits gewünscht, um die Abdichtung herzustellen, jedoch besteht die Gefahr, daß die elektrischen Daten eines Koaxialkabels unzu-

lässig verändert werden. In dieser vorliegenden Arbeit sollten diese Veränderungen der elektrischen Daten abgeschätzt werden.

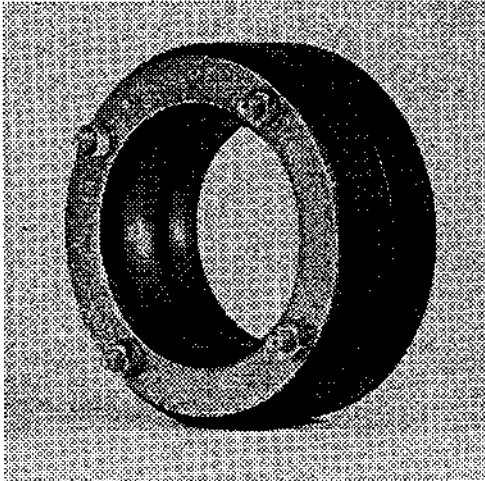


Bild 2: Dichtungseinsatz (Typ C)

2. Theoretische Betrachtung der möglichen Veränderungen

Üblicherweise werden koaxiale Leitungen durch die Durchführungen geführt. Der grundsätzliche Aufbau eines Koaxialkabels ist aus Bild 3 ersichtlich.

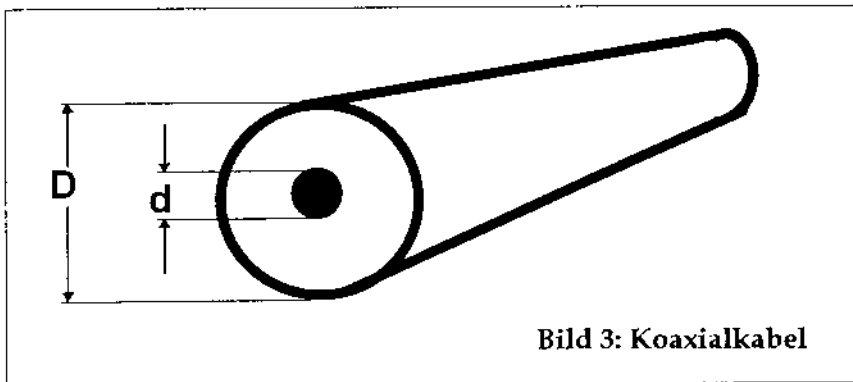
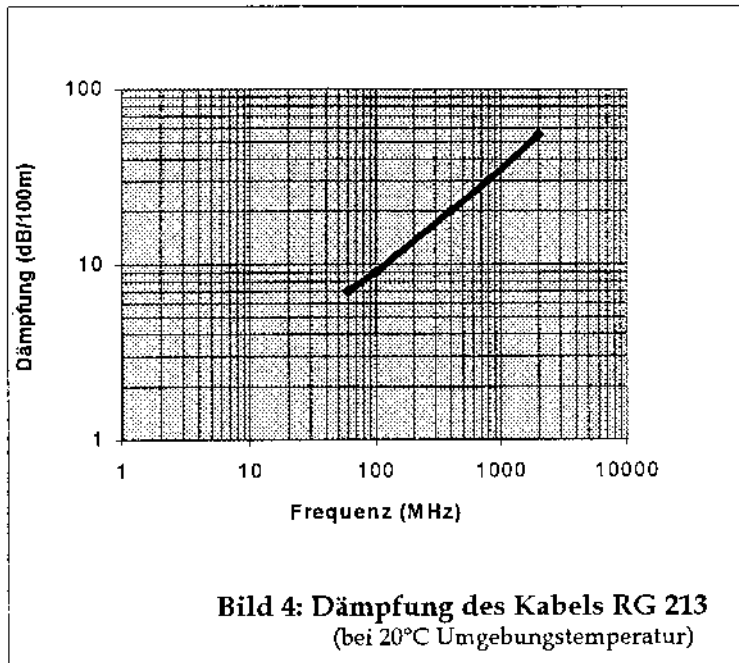


Bild 3: Koaxialkabel

Dieses Kabel hat einen Innenleiter und ist von einem konzentrischen Außenleiter umgeben. Der Zwischenraum wird durch Dielektrika unterschiedlicher Anordnung z.T. in Kombination mit einer Luftschicht ausgefüllt. Eingesetzt werden diese Kabel vom Bereich der Fernmeldetechnik bis in die Mikrowellentechnik. Bei diesen sehr hohen Frequenzen sind üblicherweise jedoch nur kurze Strecken zu überbrücken, da die Dämpfungen sehr hoch sind (Bild 4).



Die Dämpfung ist stark frequenzabhängig und sehr vom verwendeten dielektrischen Material sowie den verwendeten Leitermaterialien abhängig. Der Dämpfungsverlauf einer Koaxialkabels RG 213 hat den im Bild 4 dargestellten typischen Verlauf.

Bei der Übertragung von nachrichtentechnischen Signalen tritt im allgemeinen eine hinlaufende und eine reflektierte Welle auf, die sich überlagern. Der Wellenwiderstand ergibt sich nach dem Ohmschen Gesetz aus den zur Last hinlaufenden Spannungs- und Stromwellen oder den am Abschlußwiderstand reflektierten Spannungs- und Stromwellen. Bei hohen Frequenzen und kurzen Leitungslängen kann man die Dämpfung weitgehend vernachlässigen. In diesem Fall ist der Wellenwiderstand reell und nur noch abhängig von der Geometrie und dem verwendeten Material, d.h. allgemein vom elektrischen und magnetischen Feld.

Bei Anpassung, d.h. beim Abschluß der Leitung mit dem Wellenwiderstand, wird die Reflexion zu Null, d.h. es treten keine Reflexionen am Abschlußwiderstand auf.

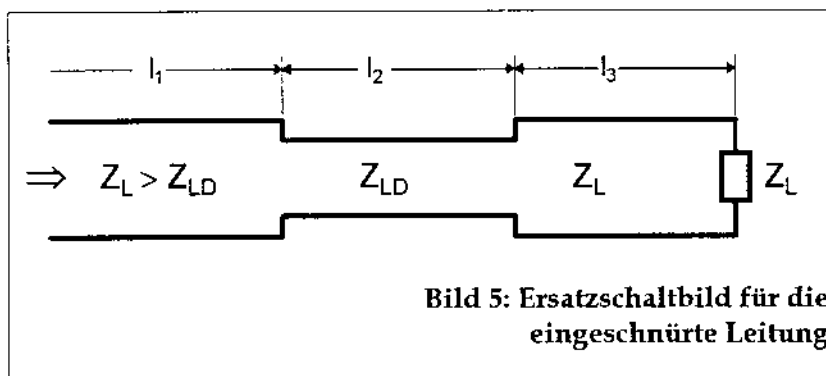
Wird nun ein Koaxialkabel durch die Dichtung unzulässig beansprucht, so müssen sich durch den äußeren Druck die geometrischen Daten verändern, d.h. der Durchmesser verringert sich.

Nimmt man zunächst vereinfachend ein verlustloses Koaxialkabel (s. Bild 3) an, so gilt folgende Beziehung für den Wellenwiderstand Z_L :

$$Z_L [\Omega] = 60 \Omega \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \quad (1)$$

- D = Außendurchmesser des Koaxialkabels
d = Innendurchmesser des Koaxialkabels
 ϵ_r = Relative Dielektrizitätskonstante

Bei einem kleineren Außendurchmesser wird der Wellenwiderstand also verkleinert. Für eine Übertragung ergibt sich nun der in Bild 5 vorgestellte Zustand:



- Z_L = Wellenwiderstand der unbeeinflussten Leitung
 Z_{LD} = Wellenwiderstand der eingeschnürten Leitung
 l_2 = Durch den Dichtungseinsatz eingeschnürte Koaxialleitung

Man erhält so eine Anordnung von Leitungen mit verschiedenen Wellenwiderständen, die mit dem Wellenwiderstand Z_L als Last abgeschlossen ist. Entsprechend der Theorie für Leitungen für transversale elektromagnetische Wellen, d.h. es dürfen keine Feldstärkekomponenten in Ausbreitungsrichtung vorhanden sein, tritt nun eine Fehlanpassung auf. Ohne Einschnürung, also bei gleichbleibendem Wellenwiderstand über die gesamte Leitung, wäre Anpassung vorhanden und unabhängig von der Leitungslänge wäre immer als Eingangswiderstand der Wellenwiderstand Z_L zu messen.

Auf dem Leitungsabschnitt l_2 tritt nun immer der gleiche Betrag des Reflexionsfaktors auf, hervorgerufen durch die Fehlanpassung $Z_{LD} \neq Z_L$. Nur die Phase des komplexen Reflexionsfaktors ändert sich. Dieser komplexe Reflexionsfaktor ist definiert als Quotient der Spannungen der hin- und rücklaufenden Welle. Der am Eingang der Leitung 1 gemessene komplexe Reflexionsfaktor ist von der Leitungslänge l_1 abhängig, d.h. es findet eine Impedanztransformation statt.

Von der Firma DOYMA GmbH & Co -Durchführungssysteme wurden folgende Kabel zur Untersuchung zur Verfügung gestellt:

Kabelbezeichnung		A-2Y0K2Y			RG 213
		1iKx	1nKx	1qKx	
Innenleiter	(mm)	1,1	2,2	3,3	2,25
Außenleiter	(mm)	7,8	9,3	14,0	8,1
Mantel	(mm)	11	12,5	17,0	10,3
Wellenwiderstand	(Ω)	75 \pm 2	75 \pm 2	75 \pm 1,5	50 \pm 2

Tabelle 1: Kabeldaten

Die aufgeführten Koaxialkabel mit 75 Ω Wellenwiderstand werden in CATV-Netzen verwendet. Die Anforderungen sowie die anzuwendenden Meß- und Prüfverfahren werden in der Norm DIN EN 50117-1 (Febr. 1996) festgelegt. Für die Anschlüsse werden Steckverbinder nach IEC 169 empfohlen. In DIN EN 50117-2 (Mai 1996) wird der nutzbare Frequenzbereich mit 30 MHz bis 862 MHz angegeben. Eingesetzt werden diese Kabel jedoch nur bis zu einer Frequenz von 470 MHz.

Bei Leitungsdämpfungen bis 18 dB/100m wird in der Norm im Frequenzbereich von 5 MHz bis 470 MHz eine Rückflußdämpfung von 23 dB verlangt, Bei höheren Leitungsdämpfungen soll die Rückflußdämpfung mindestens 20 dB betragen. Die Leitungsdämpfungen werden bei 800 MHz gemessen. Dabei sind jedoch im Frequenzbereich von 5 - 30 MHz bzw. im Intervall von 30 - 470 MHz jeweils drei Spitzenwerte mit bis zu 4 dB geringerer Rückflußdämpfung gegenüber den festgelegten Werten erlaubt. Die Rückflußdämpfung ist der logarithmische Wert des Reflexionsfaktors.

Für die theoretische Betrachtung muß zunächst die mögliche Größe der Einschnürung festgestellt werden. Diese wird hervorgerufen durch die beschriebenen Dichtungseinsätze. Hier sollen zwei Typen untersucht werden:

1. **Dichtungssatz A (K 100)**, der aus einer Vollgummidichtung besteht und bei nichtdrückendem Wasser eingesetzt wird, und
2. **Dichtungssatz C (K300)**, der aus zwei Vollgummidichtungen besteht und bei drückendem Wasser eingesetzt wird.

Die Firma DOYMA GmbH & Co -Durchführungssysteme hat Meßwerte zur Verfügung gestellt, die sie in ihrem Versuch 66/95 ermittelt hat. Das herausgequetschte Gummi ließ höhere Drehmomente als 5 Nm nicht zu. In den Einbauhinweisen zu den DOYMA - Dichtungseinsätzen werden

für den Gewindebolzen M5 für den Dichtungstyp A 4 Nm und für den Typ C 5 Nm angegeben. Dieses sind wohl die Maximalwerte. Ansonsten wird als Nenndrehmoment 2 Nm für den Typ A (K100) und 3 Nm für den Typ C (K300) angegeben.

Es wurden für den Dichteinsatz A jeweils zwei Messungen pro Gummi gemacht. Die Meßpunkte (MP) waren um 90° versetzt.

Drehmoment	IiKx		InKx		IqKx		RG 58	
	MP5	MP6	MP5	MP6	MP5	MP6	MP5	MP6
0 Nm	11,31	11,22	12,4	12,43	17,47	17,51	6,02	5,92
1 Nm	11,32	11,22	12,4	12,43	17,41	17,51	5,93	5,83
2 Nm	11,3	11,2	12,4	12,43	17,41	17,51	5,84	5,77
3 Nm	11,28	11,2	12,39	12,4	17,41	17,5	5,71	5,64
4 Nm	11,2	11,17	12,38	12,36	17,25	17,24	5,6	5,59
5 Nm	11,14	11,8	12,24	12,25	17,6	17,11	5,43	5,42

Tabelle 2a: Kabeleinschnürungen beim Dichtungseinsatz Typ A

Für den Dichteinsatz C wurden vom Hersteller auch jeweils zwei Messungen pro Gummi gemacht. Die Meßpunkte (MP) waren um 90° versetzt.

Drehmoment	IiKx				InKx				IqKx				RG 58			
	MP1	MP2	MP3	MP4	MP1	MP2	MP3	MP4	MP1	MP2	MP3	MP4	MP1	MP2	MP3	MP4
0 Nm	11,32	11,32	11,32	11,22	12,41	12,44	12,41	12,44	17,43	17,5	17,45	17,48	6,03	5,97	6,04	5,96
1 Nm	11,32	11,32	11,31	11,22	12,39	12,44	12,39	12,45	17,41	17,5	17,45	17,49	5,94	5,86	5,94	5,86
2 Nm	11,32	11,26	11,31	11,23	12,39	12,44	12,39	12,45	17,41	17,5	17,4	17,49	5,88	5,82	5,91	5,81
3 Nm	11,3	11,26	11,31	11,22	12,32	12,36	12,4	12,44	17,41	17,5	17,4	17,49	5,74	5,66	5,78	5,77
4 Nm	11,27	11,25	11,28	11,22	12,22	12,3	12,38	12,42	17,18	17,29	17,21	17,34	5,67	5,47	5,66	5,62
5 Nm	11,13	11,4	11,26	11,22	12,15	12,22	12,37	12,39	17,08	17,19	17,13	17,23	5,51	5,39	5,55	5,51

Tabelle 2b: Kabeleinschnürungen beim Dichtungseinsatz Typ C

Außerdem machte die Firma DOYMA GmbH & Co - Durchführungssysteme Angaben über die Einschnürung am Kupfermantel bzw. beim RG 58 am Kunststoffmantel:

Kabeltyp	Dichtungstyp A		Dichtungstyp C	
	0 Nm	5 Nm	0 Nm	5 Nm
1iKx	7,91	7,89	7,79	7,72
1nKx	9,33	9,15	9,36	9,14
1qKx	13,85	13,34	13,88	13,49
RG 58	3,78	3,5	3,77	3,53

Tabelle 3: Durchmesser des Außenleiters

Aus der Tabelle 3 ergibt sich eine maximale Einschnürung von 7,4% für den Dichtungstyp A; aus den Tabellen 2a und 2b ergeben sich ca. 9,8% für beide Dichtungstypen. Diese sehr großen Werte ergeben sich nur beim Koaxialkabel RG 58, während die anderen drei Kabel der Deutschen Telekom weniger als 3,7% Einschnürung zeigen, d.h. wesentlich druckfester sind.

Es ist außerdem zu beachten, daß der Hersteller als Nenndrehmoment 2 Nm für den Dichtungssatz K100 mit M5-Schrauben bzw. 3Nm für den Dichtungstyp C angibt.

Für die nachfolgenden Betrachtungen liegt also eine angenommenen Einschnürung von 10% deutlich über den realistischen Werten, die auch aus den o.a. Gründen praktisch, d.h.. ohne Drehmomentenschlüssel, kaum zu überschreiten sind.

Als Beispiel wird das Kabel RG 58 ausgewählt, da es das „weicheste“ Kabel ist. Bei dem empfohlenen Moment von 2 Nm hat es nach Angaben der Firma DOYMA GmbH & Co - Durchführungssysteme nur eine Einschnürung von etwa 3%. Bei der gewählten Einschnürung von 10% hat das Kabel einen Wellenwiderstand von $Z_{LD} = 45,9 \Omega$ (Leitung 2). Da diese Leitung mit 50Ω abgeschlossen ist, ergibt sich eine Fehlanpassung. Der auftretende Reflexionsfaktor $r = 0,0428$ (Rückflußdämpfung = 27,4 dB) ist konstant über die Leitungslänge l_2 .

Betrachtet man den Frequenzbereich von 30 MHz bis 470 MHz, so erhält man für die höchste Frequenz eine maximale elektrische Länge $l/\lambda = 0,047$ unter Berücksichtigung der Phasengeschwindigkeit dieses Kabels von 66% der Lichtgeschwindigkeit. Damit liegt der Eingangswiderstand der Leitung 2 bei einer eigenen Länge $l_2 = 2 \text{ cm}$ bei $(49,2 - j 2,3) \Omega$

Dieser Wert belastet nun die Leitung 1, die nun je nach Länge bzw. Frequenz verschiedene Impedanzen am Leitungseingang darstellt. Diese

Werte entsprechen einem Reflexionsfaktor von kleiner 0,03 bzw. einer Rückflußdämpfung von über 30 dB. Man liegt damit schon im Bereich der üblichen Kabeltoleranzen .

3. Meßtechnische Untersuchung

Untersucht wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Kabel jeweils mit den beiden Dichtungssätzen A (K100) und C (K300). Die 75 Ω - Kabel werden von der Deutschen Telekom entsprechend der Empfehlung der Norm (s. S. 5) mit Steckverbindern versehen. Für diese Untersuchungen wurden Prüfstecker der Firma Walter Rose eingesetzt wie sie auch von der Deutschen Telekom verwendet werden (s. Bild 6).

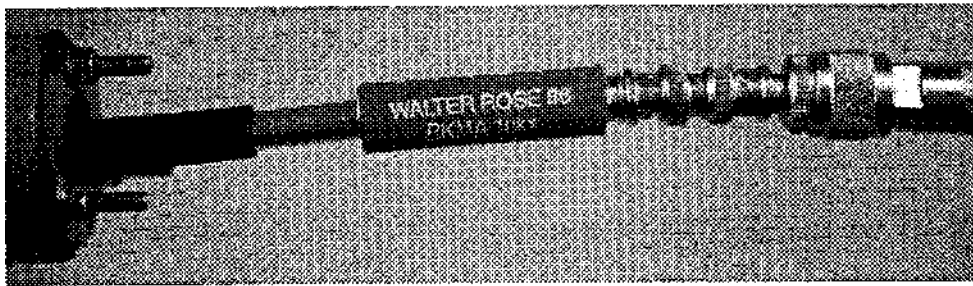


Bild 6: Meßaufbau für Kabel 1nKx

Über einen 75/50 Ω -Übergang wurden die Kabel an den Netzwerkanalysator 8510C der Firma Hewlett-Packard zur Messung der Rückflußdämpfung angeschlossen. Der Meßaufbau wurde zu Beginn so kalibriert, daß nur noch die Meßwerte des Prüflings dargestellt werden.

Da das Futterrohr nicht eingebaut werden konnte bzw. eine Kernbohrung nicht verfügbar war, wurde ein verzinktes Stahlrohr mit einem

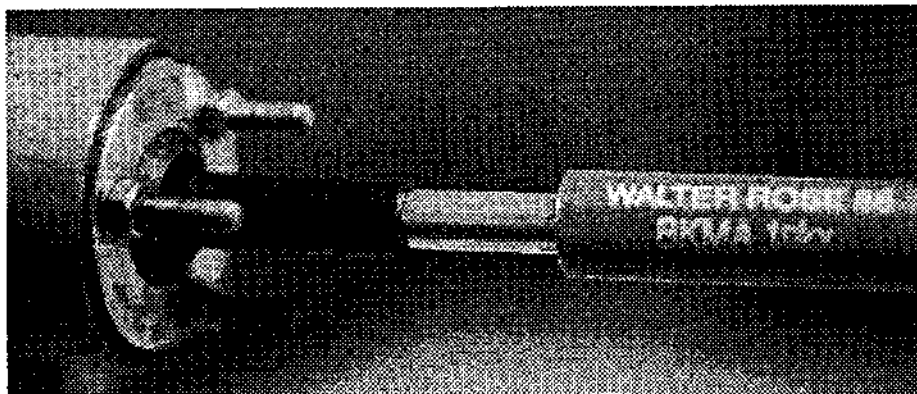


Bild 7: Einsatz des Dichtungssatzes in das Stahlrohr

Innendurchmesser von 50mm und einer Wandstärke von 1,5 mm eingesetzt In dieses wurden die Dichtungen eingeführt. Beim Anziehen der drei Schrauben (M5), die die beiden äußeren Stahlscheiben zusammenziehen und das zwischenliegende Vollgummi bis zum maximalen Drehmoment quetschen, zeigten sich keine äußeren Veränderungen am Rohr. Das Drehmoment wurde mit einem kalibrierten Drehmomentenschlüssel gemessen.

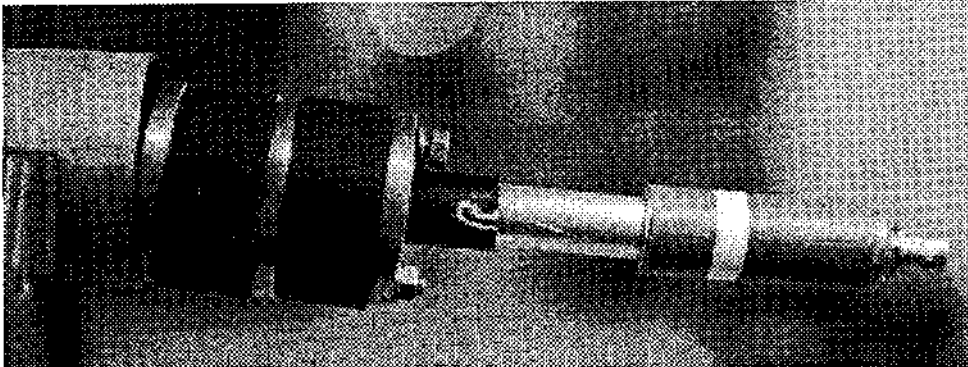


Bild8: Dichtungssatz K300 (C) auf 1qKx - Kabel

Außerdem wurde vereinzelt die Durchgangsdämpfung gemessen, da die Mitarbeiter der Deutschen Telekom nach dem Verlegen der Kabel ausschließlich diese Messung durchführen. Es sollte beobachtet werden, ob durch den Einschnürvorgang sich eine meßbare Dämpfungsveränderung einstellt.

Der Frequenzbereich wurde auf den für die Übertragung von Fernseh- und Rundfunksendungen genutzten Bereich bis 440 MHz begrenzt. Als untere Frequenzgrenze wurde 45 MHz festgelegt.

In den nachstehenden Meßblättern wurden folgende Abkürzungen verwendet:

Beispiel: NKX-0 TYP A

Es handelt sich hier um das Kabel mit der Bezeichnung A-2Y 0K 2Y NKX, das mit einem Drehmoment von 0 Nm geprüft wurde bei der Verwendung des Dichtungseinsatzes A.

Es wurden Messungen bis zu einem maximalen Drehmoment von 8 Nm durchgeführt.

Die verfügbaren Kabel hatten folgende Längen:

iKx	13 m	qKx	12,1 m
nKx	7 m.	RG 213	3,8 m

Da die eingeschnürten Stellen nach den Messungen mit dem Dichtungssatz A abgesägt werden mußten, sind bei den Messungen mit dem Dichtungssatz C die Kabellängen um ca. 30 cm kürzer.

Meßergebnisse:

1. Kabel iKx

1.1 Rückflußdämpfung

Dichtung A (Bilder 9 - 13)

Die Messungen der Rückflußdämpfung (s_{11}) wurden bei 0, 2, 4 und 8 Nm durchgeführt. Es ist keinerlei Veränderung an den einzelnen Diagrammen feststellbar. Eine genauere Auswertung der Daten zeigt im Bild 9 eine geringe Zunahme des Meßwertes, die jedoch unbedeutend ist.

Dichtung C (Bilder 14 - 18)

Diese Messungen der Rückflußdämpfung (s_{11}) wurden bei 0, 3, 5 und 8 Nm durchgeführt. Es ist auch hier keinerlei Veränderung in den Einzeldarstellungen feststellbar. Eine genauere Auswertung der Daten zeigt im Bild 14 jedoch eine geringe Zunahme des Meßwertes, die größer ist als bei der Dichtung A. Sie ist jedoch trotzdem unbedeutend

1.2 Durchgangsdämpfung (Bilder 19 - 20)

Bei beiden Dichtungstypen und dem größten Drehmoment von 8 Nm sind keine Unterschiede der Meßwerte erkennbar. Auch kann keine Leitungsstörung durch eine Querschnittsverengung erkannt werden

2. Kabel nKx

2.1 Rückflußdämpfung

Dichtung A (Bilder 21 - 24)

Es wurden Messungen bei den Drehmomenten 0, 2 Nm und 5 Nm gemacht und die Rückflußdämpfung von beiden Seiten gemessen. Es ergeben sich die gleichen Meßwerte, Abweichungen durch die Einschnürung sind nicht feststellbar.

Dichtung C (Bilder 25 - 30)

Es wurde bei den Drehmomenten 0, 2 Nm, 5 Nm und ca. 8 Nm gemessen. Die Kurven sind näherungsweise deckungsgleich, Störungen durch den Dichtungseinsatz nicht erkennbar.

2.2 Durchgangsdämpfung (Bild 31)

Wie man aus der Darstellung für s_{21} erkennt, nimmt der Dämpfungsverlauf mit steigender Frequenz zu. Besonderheiten sind nicht zu erkennen.

3. Kabel qKx

3.1 Rückflußdämpfung

Dichtung A (Bilder 32 - 36)

Die Messungen der Rückflußdämpfung (s_{11}) wurden bei 0, 2, 4 und 5 Nm durchgeführt. Es ist keinerlei Veränderung an den einzelnen Diagrammen feststellbar.

Dichtung C (Bilder 37 - 41)

Diese Messungen der Rückflußdämpfung (s_{11}) wurden bei 0, 3, 5 und 8 Nm durchgeführt. Es ist auch hier keinerlei Veränderung in den Einzeldarstellungen feststellbar.

3.2 Durchgangsdämpfung (Bilder 42 - 44)

Bei beiden Dichtungstypen und den jeweils größten Drehmomenten von 5 bzw. 8 Nm sind keine Unterschiede der Meßwerte erkennbar. Auch kann keine Leitungsstörung durch eine Querschnittsverengung erkannt werden

4. Kabel RG213

Da es sich hier um ein 50 Ω - Kabel handelt, konnte der 75/50 Ω - Übergang entfallen. Dieses wesentlich flexiblere Kabel zeigt erwartungsgemäß Veränderungen, da es nicht so steif ist wie die vorstehenden Kabel.

4.1 Rückflußdämpfung

Dichtung A (Bilder 45 - 49)

Die Messungen der Rückflußdämpfung (s_{11}) wurden bei 0, 2, 4 und 6 Nm durchgeführt. Es sind nur kleine Veränderung an den einzelnen Diagrammen feststellbar..

Dichtung C (Bilder 50 - 53)

Diese Messungen der Rückflußdämpfung (s_{11}) wurden bei 0, 3 und 5 Nm durchgeführt. Es ist in den Einzeldarstellungen eine Verschlechterung der Rückflußdämpfung von ca. 5 dB bei maximalem Drehmoment und der höchsten Frequenz von 450 MHz feststellbar. Beim Nenn-drehmoment sind die Schwankungen vernachlässigbar.

4.2 Durchgangsdämpfung (Bilder 54 - 55)

Bei beiden Dichtungstypen und den größten Drehmomenten sind keine wesentlichen Unterschiede der Meßwerte erkennbar. Auch kann keine Leitungsstörung durch eine Querschnittsverengung erkannt werden

5. Zusammenfassung

Nachdem die Kabel A-2Y0K2Y 1iKx/1nKx und 1qKx sowie die koaxiale Leitung RG 213 mehrfach entsprechend den vorstehenden Rahmenbedingungen vermessen wurden, sind die Ergebnisse als stabil anzusehen. Es wurden Messungen bis 450 MHz durchgeführt.

Man ersieht, daß beim Einhalten des vom Hersteller empfohlenen Drehmomente nur sehr kleine Einschnürungen entstehen, die einen Reflexionsfaktor erzeugen, der im Toleranzfeld der Stecker und Kabel liegt. Nachmessungen sind nach den vorliegenden Ergebnissen bei fachgerechtem Einbau der Dichtungselemente A und C für die Durchführung der 75 Ω - Kabel nicht notwendig.

Auf Grund dieser Untersuchungen ist nicht zu erkennen, daß bei Handhabung der Dichtungseinsätze K100 und K 300 entsprechend den Einbauvorschriften der Firma DOYMA GmbH & Co - Durchführungssysteme die elektrischen Werte des Koaxialkabels beeinträchtigt werden.

Es ist jedoch jederzeit nach der Montage eines Kabels feststellbar, ob ein Kabel durch unzulässige Krafteinwirkung im Durchführungsbereich seine elektrischen Werte verändert hat, wenn man eine Seite korrekt mit dem Wellenwiderstand abschließt und von der anderen Seite den Refle-

Gutachten DOYMA
Prof. Dipl.-Ing. H. Dölecke

22.08.1996

xionsfaktor mißt. Hierbei muß keineswegs mit einem sehr teuren Vektorellen Netzwerkanalysator der Reflexionsfaktor nach Betrag und Phase gemessen werden, sondern es genügt ein sehr viel preiswerteres Meßgerät, ein Skalarer Netzwerkanalysator, der nur den Betrag des Reflexionsfaktors messen kann. Zu beachten ist jedoch, daß der Abschlußwiderstand hochwertig ist, d.h. er sollte kaum Blindanteile aufweisen.

Dölecke