

# 1



## Wissenswertes über PTFE Koaxial-Kabel Teil 1

### **Zum Autor Stefan Burger**

erhielt 1986 sein Diplom als Ingenieur (FH) von der University of Applied Science, Offenburg. Bis 1990 blieb er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität und wechselte dann in die Forschungs- und Entwicklungsabteilung von Endress + Hauser in Maulburg.

Dort war er bis 2001 in die Entwicklung der Füllstandmessgeräte auf RADAR Basis eingebunden und unter anderem für die Betreuung der RADAR Module, die Entwicklung von Antennen und druckfesten HF-Durchführungen verantwortlich.

Danach arbeitete er von 2001 bis 2011 bei Panasonic Electronic Devices in Lüneburg an Filtern und Duplexern für Basis Stationen, SAW Filtern und war für die Life Time und Power Durability Simulation zuständig.

Im Jahr 2012 gründete er in Hampton, Australien, sein eigenes Unternehmen Delta Gamma Consultant ([www.delta-gamma.com](http://www.delta-gamma.com)). Seit 2014 ist er als exklusiver Berater im Bereich HF- und Mess-Technik für das Unternehmen el-spec GmbH, Geretsried tätig.

# 1.1

## Wissenswertes über PTFE Koaxial-Kabel

Dipl. Ing. (FH) Stefan Burger | DeltaGamma RF-Expert

### Inhalt

Einführung.....	5
Die Koaxial-Leitung .....	9
Impressum .....	11



*Koax Kabel mit Dielektrikum aus PTFE*

## Einführung

Die Zusammenhänge zwischen Material, Temperatur, Druck und Messgenauigkeit sind bei diesem häufig genutzten Material meist unbekannt.

Bei Koaxial-Kabel mit geringen Verlusten und weitem Temperaturbereich kommt im wesentlichen PTFE als Isolationsmaterial zum Einsatz. Die Anforderungen werden heutzutage immer höher – genauere und stabile Messungen sind unabdingbar. Auch bei elspec ist das meist geordnete Kernmaterial seit 32 Jahren neben Kupfer, Silber und Stahl der Isolationswerkstoff PTFE.

Deshalb ist es dem Geretsrieder HF-Spezialisten ein besonderes Anliegen, einmal den Stand der Forschung und Anwendung über PTFE rund um die Eigenschaften und die Grenzen des Materials hinsichtlich der Hochfrequenzeigenschaften aufzuzeigen und die verschiedenen Publikationen, die zu diesem Themenbereich existieren, zusammenzufassen.

Die Kombination versilberter Kupferdraht mit einer PTFE Umhüllung ist eine interessante Zusammenstellung. Beide Werkstoffe sind sehr unterschiedlich. PTFE ist der Isolationswerkstoff in der Hochfrequenztechnik, neben vieler Vorteile hat er auch einige spezielle Grundeigenschaften, die ein Verwender unbedingt kennen sollte – z.B das PTFE Knie oder das Voraltern bei phasenstabilen Messkabeln.

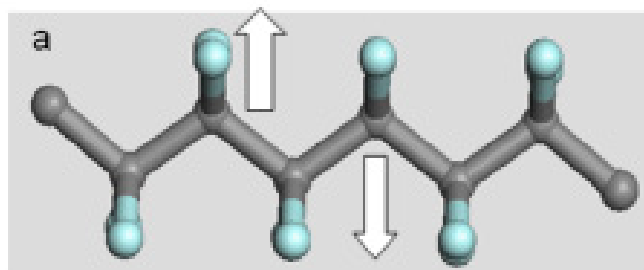
Polytetrafluoroethylen (PTFE) ist ein Kunststoff, der sich durch eine sehr gute chemische Beständigkeit und einen großen Temperaturbereich auszeichnet. Im Hochfrequenzbereich hat dieses Polymer nur geringe Verluste und wird deshalb gerne eingesetzt.

PTFE wurde 1938 von dem Chemiker Roy Plunkett entdeckt, als er an Kältemitteln für Kühlschränke arbeitete. Technisch wurde PTFE zuerst nicht verwendet, da die

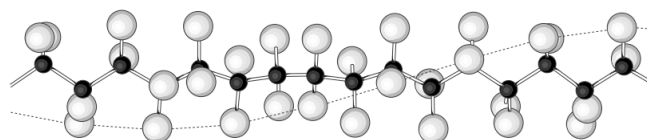
Herstellung sehr aufwendig und kostenintensiv ist. Es ist jedoch beständig gegen fast alle aggressive Medien. Es ist nur unbeständig gegen starke Reduktionsmittel wie elementares Fluor bei höheren Temperaturen. Technisch wurde es zuerst im Umfeld der Urananreicherung verwendet, um die Behälter vor dem korrosiven Uranhexafluorid zu schützen. Die Firma DuPont vermarktete es unter dem Namen Teflon. [1]

PTFE hat einen sehr geringen Reibungskoeffizient und bleibt elastisch bis zu kryogenen Temperaturen ( $-269^{\circ}\text{C}$ ), kann bis über  $250^{\circ}\text{C}$  verwendet werden und schmilzt bei etwa  $330^{\circ}\text{C}$ . [2,3]

Nachteilig ist seine hohe Viskosität wenn es geschmolzen ist. Damit ist es fast nicht möglich, PTFE für Spritzguss oder Blasformen zu verwenden. Es bleibt nur Extrudieren oder Sintern als formgebendes Verfahren übrig.



Beim PTFE Polymer ist jedes Kohlenstoffatom jeweils zu jeder Seite mit einem weiteren Kohlenstoff verbunden. Die restlichen zwei Orbitale werden von Fluor eingenommen. Die Fluoratome liegen fast symmetrisch zum Polymer Faden, wodurch sich die Dipolmomente gegenseitig kompensieren. Dies hat zur Folge, dass es nur eine geringe Abhängigkeit der Eigenschaften über die Frequenz hat. Im Vergleich dazu hat Wasser ein ausgeprägtes Dipolmoment und eine starke Abhängigkeit von der Frequenz. Was z.B. beim Erhitzen von Speisen ausgenutzt wird.



Bei Temperaturen unterhalb von  $19^{\circ}\text{C}$  liegen die Fluor Atome nicht gegenüber wie im obigen Bild sondern sind leicht versetzt und bilden entlang des Fadens eine Rotation von  $360^{\circ}$  innerhalb von 26 Kohlenstoffatomen über einer Länge von  $1,68\text{ nm}$ . Bei  $30^{\circ}\text{C}$  hat sich der Abstand auf  $1,95\text{ nm}$  vergrößert, was sich in einer starken Längenänderung sowie einer Reduzierung der Permittivität zeigt.

Unter atmosphärischem Druck verändert sich das Kristallgefüge in Abhängigkeit der Temperatur. Es hat bei tiefen Temperaturen ein gut orientiertes hexagonal Gefüge mit einer 360° Rotation. Bei 19°C ändert es sich zu einem teilweise hexagonalen Kristallgefüge und der Abstand der Kohlenstoffatome zueinander vergrößert sich. Dies führt zu einer relativ starken Ausdehnung und einem Ausdehnungskoeffizienten von bis zu  $920 \cdot 10^{-6}/K$  und geht bei 32°C in ein ungeordnetes Gefüge über. Zum Vergleich: der Temperaturkoeffizient von Kupfer ist  $16,5 \cdot 10^{-6}/K$

Anhand des Ausdehnungskoeffizienten ist ersichtlich, dass bei 32,3°C noch eine weitere Phasenänderung existiert. Diese ist aber im Vergleich wesentlich schwächer und wurde bei den Messungen 1953 noch nicht entdeckt. Dies wurde erst durch die verbesserte Messtechnik heutzutage möglich.

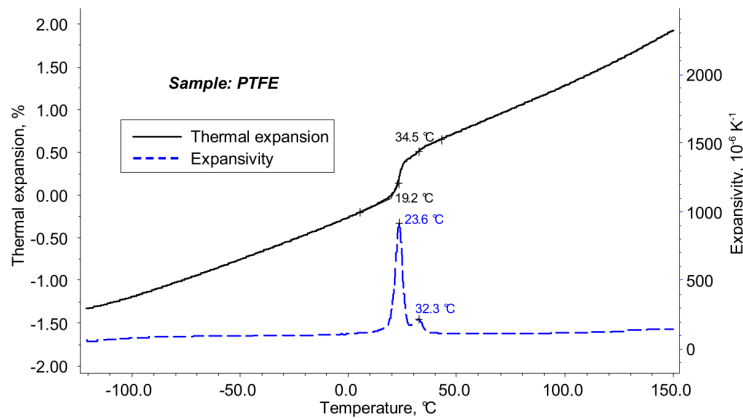


Abbildung 1: Relative Ausdehnung von PTFE über die Temperatur

Aus [2] ist obenstehende Abb. 1. Aus diesem Diagramm wurden die Messwerte extrahiert und für die weiteren Berechnungen verwendet.

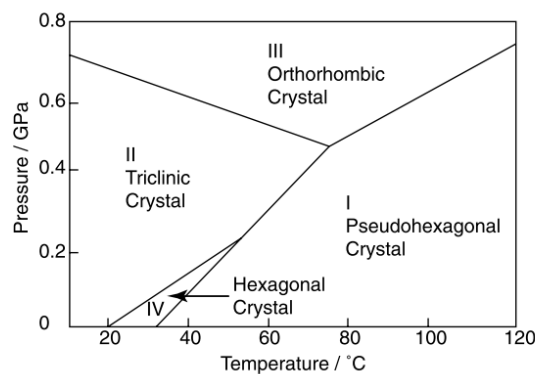


Abbildung 2: Phasendiagramm von PTFE

Aus [3] ist Abb. 2, das prinzipielle Phasendiagramm von PTFE. In dem Diagramm kann abgelesen werden, bei welcher Temperatur und bei welchem Druck welches Kristallgitter das PTFE hat. D.h. wenn auf das PTFE Druck einwirkt, verschieben sich

die Temperaturen, bei denen die Kristallgefüge sich ändern. Hierbei ist zu beachten, dass der Druck im GPa Bereich ist und damit recht hoch. Der Luftdruck in Meereshöhe ist als Vergleich nur 0,101MPa.

Weiterhin wird in den Publikationen gezeigt, dass die Eigenschaften von PTFE auch von seiner Vorgeschichte abhängig sind. Wurde z.B. PTFE auf der Drehmaschine bearbeitet und dann untersucht, kamen etwas andere Werte heraus, als wenn man das PTFE auf 300°C erhitzt und langsam abkühlen lässt, bevor man es vermisst.

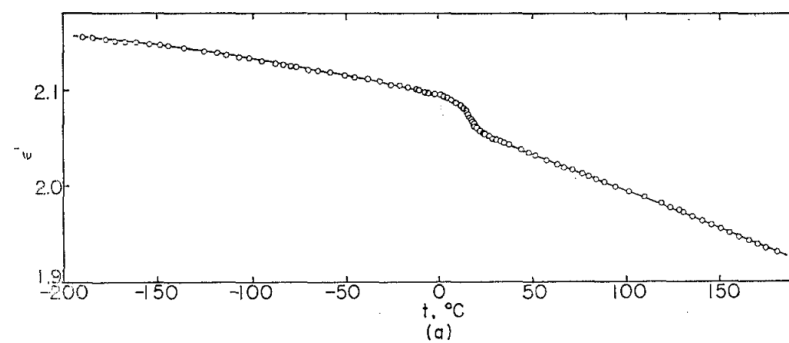


Abbildung 3: Dielektrizitätskonstante über die Temperatur

In [8] (Koizumi) wurde die Dielektrizitätskonstante von PTFE bei 100kHz gemessen, sowie die Abhängigkeit von der Frequenz. Aus dem Diagramm wurden die Werte extrahiert, die auch mit einem Fehler durch die Ablesegenauigkeit behaftet sind. Im Text wird weiter darauf hingewiesen, dass mit der Frequenz die Permittivität bei DC von 2,1462 sich auf 2,1436 bei Unendlich ändert. Dies entspricht 0,126%.



## Die Koaxial-Leitung

Der äußere Schirm der Koaxial-Leitung besteht aus Metall und dehnt sich weniger aus als das PTFE. Die Frage ist, wie stark wird der Schirm gedehnt, und welche Druckerhöhung bleibt übrig. Dieses wirkt dem Absinken der Permittivität entgegen und kann mit einer FEM Simulation berechnet werden. Das Ganze ist aber noch abhängig von der Zeit, da PTFE unter Druck anfängt zu fließen. D. h. kann die Änderung des Durchmessers nicht erfolgen, wird das Material versuchen sich in der Länge auszudehnen.

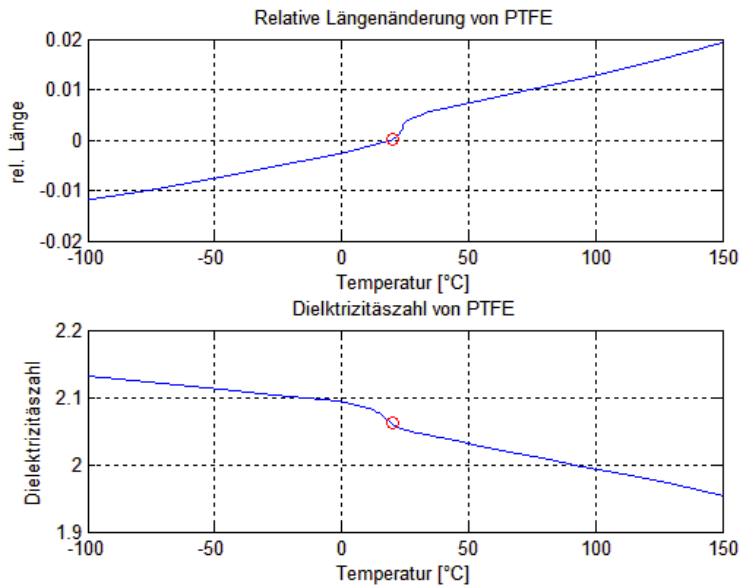


Abbildung 4: Ausdehnung und Dielektrizitätszahl aus den extrahierten Werten

Weiterhin ist die elektrische Länge, d.h. wie schnell sich die elektromagnetische Welle in der Leitung ausbreitet, abhängig von der Permittivität, die sich auch mit der Temperatur ändert.

Die elektrische Länge einer Leitung ergibt sich aus der Grafik rechts.

Wie zu sehen ist, expandiert PTFE mit zunehmender Temperatur, jedoch nimmt die Permittivität ab. Dies hat einen kompensierenden Effekt, der sich aber nicht gegenseitig aufhebt. Die Frage ist, welche elektrische Längenänderung wird sich schlussendlich ergeben?

In Teil 2 werden wir eigene Messungen und Berechnungen durchführen und mit den vorhandenen und hier bereits teilweise beschriebenen Veröffentlichungen vergleichen.

Teil 3 und gleichzeitig Abschluss der Information über PTFE beschäftigt sich mit einer FEM Simulation einer Koax-Leitung, bei der die Druckerhöhung durch den Schirm und damit das Verschieben der Kristallisation berücksichtigt ist. Hierbei werden die Werte mit denen von bereits gemessenen Koax-Leitungen verglichen. Wir planen ergänzend die Dämpfung darzustellen, sobald wir die Messtechnik bei -100°C zur Verfügung haben.



## Literaturverzeichnis:

- [1] Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluorethylen>
- [2] *Characterization of PTFE using Advanced Thermal Analysis Techniques*; J. Blumm, A. Lindenmann, M. Meyer, C. Strasse; Netzsch-Gerätebau GmbH
- [3] *The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression*; P. J. Rae, D. M. Datelbaum; *Polymer* 45 (2004) 7615 – 7625
- [4] *Molecular Mobility, Phase Transitions, Transformation Plasticity and Memory Effect in Poly(tetrafluoroethylene) (PTFE)*; *Journal de Physique III*, Volume 6, décembre 1996
- [5] *Transitions and Phase of Polytetrafluoroethylene (Teflon)*; C. E. Weir; *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 50, No. 2, February 1953
- [6] *Thermal Expansion of Polytetrafluoroethylene (Teflon) from -190° to +300°C*; R. K. Kirby, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 57, No. 2, August 1956
- [7] *Current Innovation in Phase Stable Coaxial Cable Design*; *Times Microwave Systems*; *Microwave Product Digest*
- [8] *Understanding Effect of Teflon Room Temperature Phase Transition on Coax Cable Delay in Order to Improve the Measurement of TE Signals of Deuterated Polarized Targets*; S. K. Dhawan; *IEEE Transactions on nuclear science*, Vol. 39, No. 5, October 1992
- [9] *Phase Drift Versus Temperature Measurements of Coaxial Cables*; K. Czuba, D. Sikora, *Warsawa University of Technology, ISE, Warszawa, Poland*
- [10] *Low-Temperature Properties of Polymers*, I. Perepechko, MIR Publishers, Moscow
- [11] *Microwave Measurement of Dielectric Properties of Low-Loss Materials by the Dielectric Rod Resonator Method*; Y. Kobayashi, M. Katho; *IEEE Transaction on microwave theory and techniques*, Vol. MTT-33, No. 7, July 1985
- [12] *Physical Properties of Fluon® unfilled and filled PTFE*, Technical Service Note F12/13, AGC Chemicals 2002

## Impressum

©copyright 2016 by el-spec GmbH

Konzept, Text, Zeichnungen: Stefan Burger, GammaDelta RF-Expert, Melbourne Australien

Layout und Gestaltung: Udo Klünsch | kpr kommunikation, Geretsried

Fotos: Udo Klünsch | kpr kommunikation

alle - außer Seiten: 8, 9 – ©Rohde und Schwarz

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung ist ohne Zustimmung der Firma el-spec GmbH unzulässig und strafbar. Insbesondere gilt dies für Vervielfältigungen, Übersetzungen und Einspeicherung in elektronische Systeme.

### el-spec GmbH

Lauterbachstr. 23c

82538 Geretsried-Gelting

T.: +49 81 71 43 57-21/-22

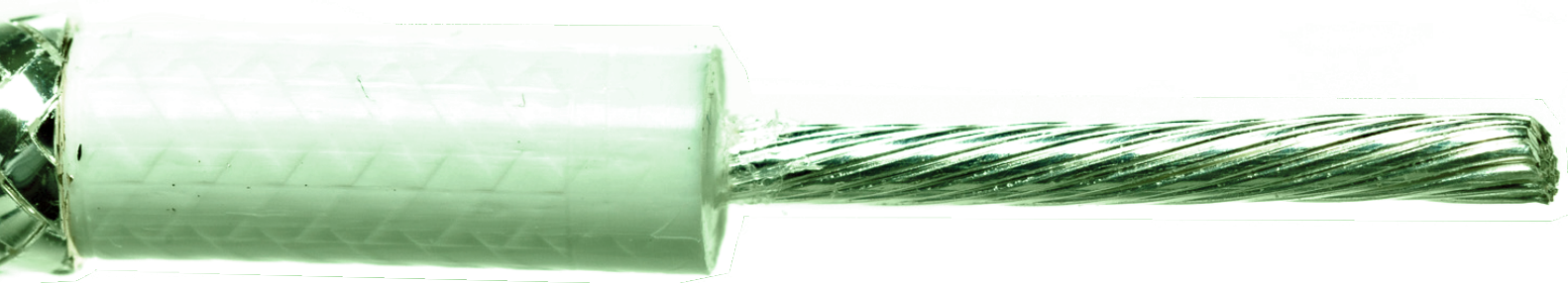
F.: +49 81 71 43 57-99

info@elspecgroup.de

Geschäftsführer: Thomas Weber

[www.elspecgroup.de](http://www.elspecgroup.de)

# 1



## Wissenswertes über PTFE im Koaxial-Kabel Teil 2

### **Zum Autor Stefan Burger**

erhielt 1986 sein Diplom als Ingenieur (FH) von der University of Applied Science, Offenburg. Bis 1990 blieb er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität und wechselte dann in die Forschungs- und Entwicklungsabteilung von Endress + Hauser in Maulburg.

Dort war er bis 2001 in die Entwicklung der Füllstandmessgeräte auf RADAR Basis eingebunden und unter anderem für die Betreuung der RADAR Module, die Entwicklung von Antennen und druckfesten HF-Durchführungen verantwortlich.

Danach arbeitete er von 2001 bis 2011 bei Panasonic Electronic Devices in Lüneburg an Filtern und Duplexern für Basis Stationen, SAW Filtern und war für die Life Time und Power Durability Simulation zuständig.

Im Jahr 2012 gründete er in Hampton, Australien, sein eigenes Unternehmen Delta Gamma Consultant ([www.delta-gamma.com](http://www.delta-gamma.com)). Seit 2014 ist er als exklusiver Berater im Bereich HF- und Mess-Technik für das Unternehmen el-spec GmbH, Geretsried tätig.

# 1.2

## Wissenswertes über PTFE Koaxial-Kabel

Dipl. Ing. (FH) Stefan Burger | DeltaGamma RF-Expert

### Inhalt

Einführung.....	5
Die Koaxial-Leitung .....	9
Impressum .....	11





## Einführung

Die Zusammenhänge zwischen Material, Temperatur, Druck und Messgenauigkeit sind bei diesem häufig genutzten Material meist unbekannt.

Bei Koaxial-Kabel mit geringen Verlusten und weitem Temperaturbereich kommt im wesentlichen PTFE als Isolationsmaterial zum Einsatz. Die Anforderungen werden heutzutage immer höher – genauere und stabile Messungen sind unabdingbar. Auch bei elspec ist das meist geordnete Kernmaterial seit 32 Jahren neben Kupfer, Silber und Stahl der Isolationswerkstoff PTFE.

Deshalb ist es dem Geretsrieder HF-Spezialisten ein besonderes Anliegen, einmal den Stand der Forschung und Anwendung über PTFE rund um die Eigenschaften und die Grenzen des Materials hinsichtlich der Hochfrequenzeigenschaften aufzuzeigen und die verschiedenen Publikationen, die zu diesem Themenbereich existieren, zusammenzufassen.

Im zweiten Teil unserer kleinen Reihe über das meist genutzte Isolationsmaterial PTFE, vergleichen wir auf Grund eigener Messungen und Berechnungen das Verhalten der Permittivität und der damit einhergehenden Längenänderung.



Wir wissen, die elektrische Länge einer Leitung ergibt sich aus:

$$l_{\text{el}} = l \cdot \sqrt{\epsilon_r} \quad l = l_0 (1 + TK_{PTFE} \cdot \Delta T)$$

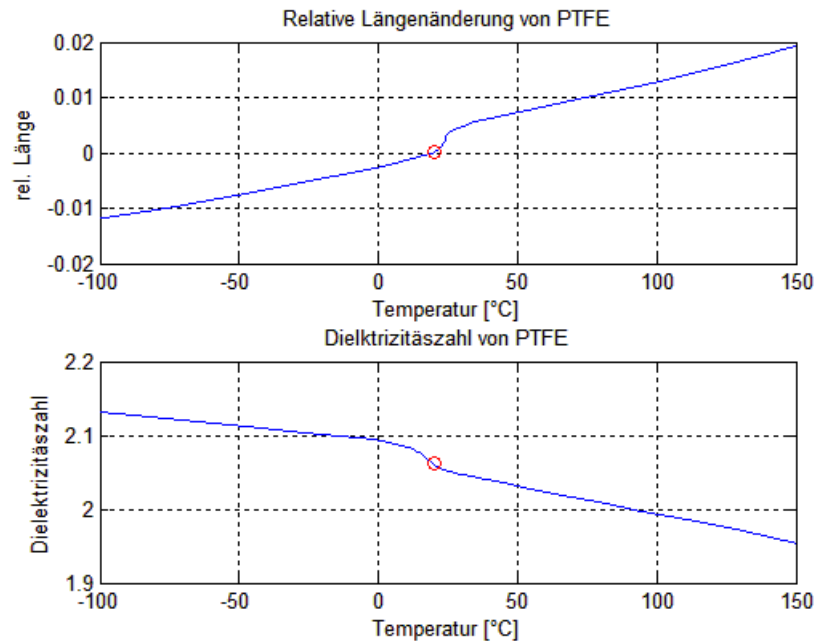


Abb 1: Ausdehnung und Dielektrizitätszahl aus den extrahierten Werten

Wie zu sehen ist, expandiert PTFE mit zunehmender Temperatur, jedoch nimmt die Permittivität ab. Dies hat zwar einen kompensierenden Effekt, er hebt sich aber nicht gegenseitig auf.

Berücksichtigen wir jetzt die Änderungen über der Temperatur rein mathematisch bei einer Koaxial-Leitung nach folgender Gleichung:

$$\Delta l = l \cdot \sqrt{\epsilon_r(T)} \cdot (1 + TK \cdot \Delta T) - l \cdot \sqrt{\epsilon_r(20^\circ C)}$$

- $\Delta l$  : Längenänderung
- $l$  : mechanische Länge der Leitung
- $\epsilon_r(T)$  : temperaturabhängige Permittivität
- $\Delta T$  : Temperaturänderung

Unterhalb von 0°C bleibt die elektrische Länge weitgehend konstant, wogegen sie bei Temperaturen darüber bis 100°C um ca. 10mm absinkt.

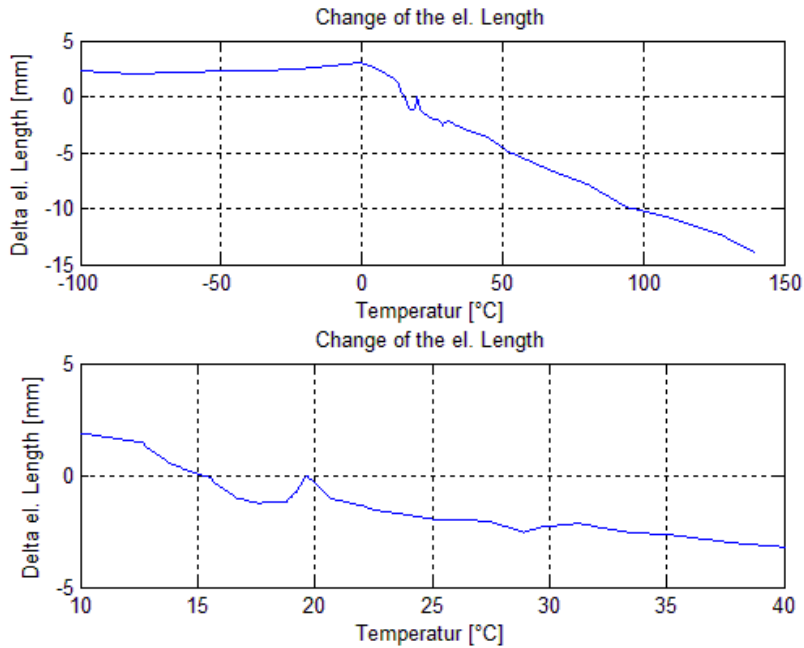


Abb 2: Elektrische Längenänderung abhängig von der Temperatur

Im Temperaturbereich von 10°C bis 40°C sind es ca. 5mm, was einer Phasenänderung von 6° bei 1GHz und 60° bei 10GHz entspricht. Dieses Ergebnis ist jedoch mit Vorsicht zu betrachten, da die Materialwerte aus verschiedenen Publikationen stammen und somit auch von zwei verschiedenen Proben.

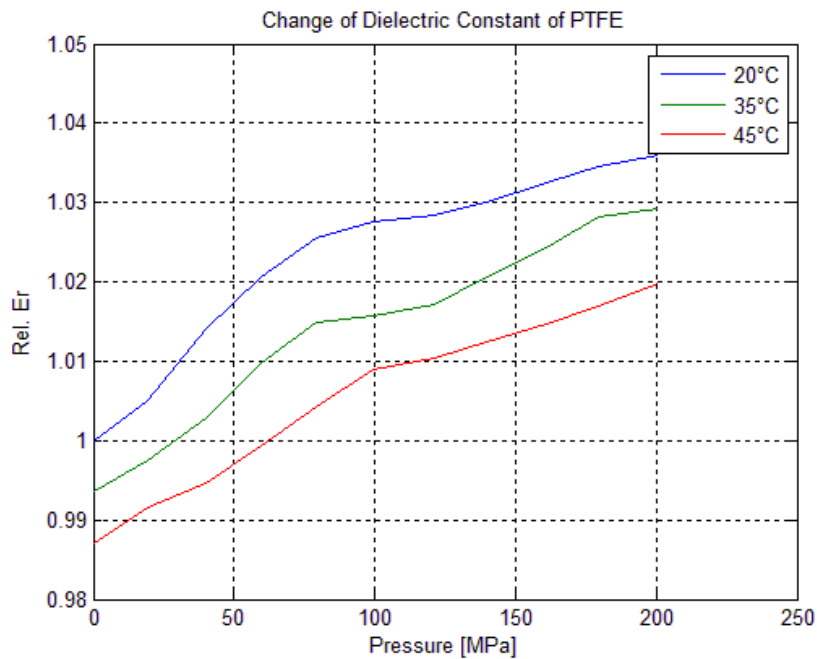


Abb 3: Rel. Permittivity von PTFE abhängig vom Druck und der Temperatur

Die kristalline Phasenänderung ist auch vom Druck abhängig. Aus [13] wurden die Werte im Abbildung 3 entnommen. Wie daraus zu sehen ist, erhöht sich die Permittivität mit zunehmenden Druck. Da sich das PTFE stärker ausdehnt als der Schirm aus Kupfer und bei manchen Kabeln der zweite Schirm aus Edelstahl besteht, baut sich ein Druck auf, der dem Absinken der Permittivität entgegenwirkt und somit der Längenänderung.

Um eine Abschätzung des sich ergebenden Drucks zu erhalten, kann für ein röhrenförmiges Objekt die Kesselformel verwendet werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass das Material nur in seinem elastischen Bereich belastet wird. D.h. die Belastung muss unterhalb der Steckgrenze bleiben. Für Kupfer liegt der Wert zwischen 120 – 320 N/mm<sup>2</sup>.

$$P = \frac{\sigma_t \cdot 2 \cdot s}{d_m}$$

P : Druck  
 $\sigma_t$  : Tangential Spannung  
s : Schirm Dicke  
 $d_m$  : Mittlerer Schirmdurchmesser

Bei einer Koaxialleitung mit einem Durchmesser von 1.19mm ergibt sich anhand der Gleichung ein maximaler Druck von ca 75 MPa. Aus Abbildung 3 ergibt sich eine bei 35°C ca 1.5% höhere Permittivität, als wenn kein Druck auf das PTFE ausgeübt wird. Wird dies mit im Design berücksichtigt, kann die sich ergebende Phasenänderung minimiert werden. Dafür ist jedoch eine FEM Simulation notwendig, bei der das multi-physikalische Problem berechnet und optimiert wird. Es wird trotz allem aber nicht möglich sein, die Änderung vollständig zu kompensieren. Ein mehr oder weniger stark ausgeprägter Sprung im Bereich von 10°C bis 40°C wird weiterhin vorhanden sein.

Um den Einfluss weiter zu verringern, bietet es sich an, den Anteil des Dielektrikums zu reduzieren. Dies kann z.B. dadurch erreicht werden, dass der Innenleiter entweder in regelmäßigen Abständen von dielektrischen Stützen, durch eine Wendel oder andere Konstruktionen in der Mitte vom Schirm gehalten wird. Eine weitere Möglichkeit ist, den Anteil der Luft im Dielektrikum zu erhöhen. Ein PTFE Schaum wäre eine gute Möglichkeit, jedoch scheint eine industrielle Herstellung bis jetzt nicht möglich zu sein.

Wird PTFE abrupt gereckt, entstehen sehr kleine Poren im Material. Dieses Verfahren wird z.B. von der Firma Gore angewendet. Bei beiden Möglichkeiten wird die effektive Permittivität verringert. Dies ergibt eine geringere Phasenänderung sowie eine Verringerung der dielektrischen Verluste.

## Literaturverzeichnis:

- [1] Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluorethylen>
- [2] *Characterization of PTFE using Advanced Thermal Analysis Techniques*; J. Blumm, A. Lindenmann, M. Meyer, C. Strasse; Netzsch-Gerätebau GmbH
- [3] *The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression*; P. J. Rae, D. M. Dattelbaum; *Polymer* 45 (2004) 7615 – 7625
- [4] *Molecular Mobility, Phase Transitions, Transformation Plasticity and Memory Effect in Poly( tetrafluoroethylene) (PTFE)*; *Journal de Physique III*, Volume 6, décembre 1996
- [5] *Transitions and Phase of Polytetrafluoroethylene (Teflon)*; C. E. Weir; *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 50, No. 2, February 1953
- [6] *Thermal Expansion of Polytetrafluoroethylene (Teflon) from -190° to +300°C*; R. K. Kirby, *ournal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 57, No. 2, August 1956
- [7] *Current Innovation in Phase Stable Coaxial Cable Design*; *Times Microwave Systems*; *Microwave Product Digest*
- [8] *Understandign Effect of Teflon Room Temperature Phase Transition on Coax Cable Delay in Order to Improve the Measurement of TE Signals of Deuterated Polarized Targets*; S. K. Dhawan; *IEEE Transactions on nuclear sc.enge*, Vol. 39, No. 5, October 1992
- [9] *Phase Drift Versus Temperature Measurmements of Coaxial Cables*; K. Czuba, D. Sikora, *Warsawa University of Technology, ISE, Warsawa, Poland*
- [10] *Low-Temperature Properties of Polymers*, I. Perepechko, *MIR Publishers, Moscow*
- [11] *Microwave Measurement of Dielectric Properties of Low-Loss Materials by the Dielectric Rod Resonator Method*; Y. Kobayashi, M. Katho; *IEEE Transaction on microwave theory and techniques*, Vol. MTT-33, No. 7, July 1985
- [12] *Physical Properties of Fluon® unfilled and filled PTFE*, *Technical Service Note F12/13*, *AGC Chemicals* 2002
- [13] *Effects of Temperature and Pressure on the Dielectric Constant in Non-Polar Polymers*; H. Sasabe, S. Saito, *Polzmer Journal*, Vol. 3, No. 6, 1972





## Impressum

©copyright 2016 by el-spec GmbH

Konzept, Text, Zeichnungen: Stefan Burger, GammaDelta RF-Expert, Melbourne Australien

Layout und Gestaltung: Udo Klünsch | kpr kommunikation, Geretsried

Fotos: Udo Klünsch | kpr kommunikation

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung ist ohne Zustimmung der Firma el-spec GmbH unzulässig und strafbar. Insbesondere gilt dies für Vervielfältigungen, Übersetzungen und Einspeicherung in elektronische Systeme.

### el-spec GmbH

Lauterbachstr. 23c

82538 Geretsried-Gelting

T.: +49 81 71 43 57-21/-22

F.: +49 81 71 43 57-99

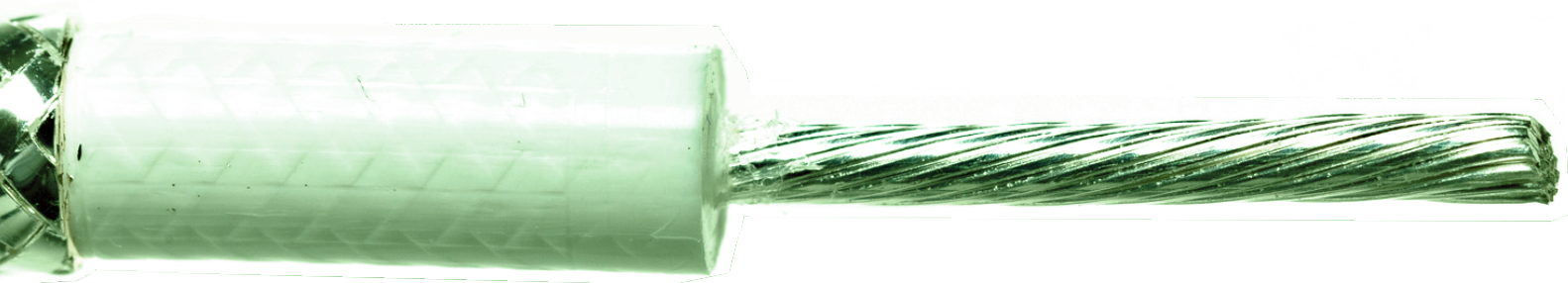
info@elspecgroup.de

Geschäftsführer: Thomas Weber

[www.elspecgroup.de](http://www.elspecgroup.de)



# 1.3



## Wissenswertes über PTFE in der Hochfrequenztechnik Teil 3

### **Zum Autor Stefan Burger**

erhielt 1986 sein Diplom als Ingenieur (FH) von der University of Applied Science, Offenburg. Bis 1990 blieb er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität und wechselte dann in die Forschungs- und Entwicklungsabteilung von Endress + Hauser in Maulburg.

Dort war er bis 2001 in die Entwicklung der Füllstandmessgeräte auf RADAR Basis eingebunden und unter anderem für die Betreuung der RADAR Module, die Entwicklung von Antennen und druckfesten HF-Durchführungen verantwortlich.

Danach arbeitete er von 2001 bis 2011 bei Panasonic Electronic Devices in Lüneburg an Filtern und Duplexern für Basis Stationen, SAW Filtern und war für die Life Time und Power Durability Simulation zuständig.

Im Jahr 2012 gründete er in Hampton, Australien, sein eigenes Unternehmen Delta Gamma Consultant ([www.delta-gamma.com](http://www.delta-gamma.com)). Seit 2014 ist er als exklusiver Berater im Bereich HF- und Mess-Technik für das Unternehmen el-spec GmbH, Geretsried tätig.



# 1.3

## Wissenswertes über PTFE in der Hochfrequenztechnik

Dipl. Ing. (FH) Stefan Burger | DeltaGamma RF-Expert

### Inhalt

Einführung.....	5
1 - Testaufbau .....	7
2 - Simulationsmodell.....	8
3 - Messaufbau und Messung .....	9
3.1 - Messung mit PTFE.....	11
3.2 - Hysterese .....	13
4 - Vergleich Berechnung und Messung .....	13
4.1 - Impedanz.....	13
4.2 - Phasenstabilität.....	14
Zusammenfassung.....	15
Impressum .....	16
Literaturverzeichnis .....	16



## **Einführung**

Wie in den beiden vorhergehenden Artikeln erwähnt, sind die Eigenschaften des PTFE unter anderem von seiner Vorgeschichte abhängig. Daher ist es wichtig die Permittivität und seine Ausdehnung über der Temperatur parallel zu messen. Wie später gezeigt wird ist der Einfluss nicht unerheblich. Werden Daten aus verschiedenen Messungen verwendet, kann es zu ungenauen, oder falschen Ergebnissen kommen wie im Teil II zu sehen ist. Es wurde bei der ausführlichen Recherche keine Literaturstelle mit gleichzeitiger Permittivität und Ausdehnung von PTFE gefunden. So wurde ein Testaufbau gefertigt und verschiedene Proben gemessen.

## **Polytetrafluorethylen**

Polytetrafluorethylen ist ein unverzweigtes, linear aufgebautes, teilkristallines Polymer aus Fluor und Kohlenstoff. Umgangssprachlich wird dieser Kunststoff oft mit dem Handelsnamen Teflon der Firma DuPont bezeichnet. Weitere häufig verwendete Handelsnamen anderer Hersteller von PTFE sind Dyneon PTFE und Gore-Tex für PTFE-Membranen.

Wikipedia (DE)



## 2 - Simulationsmodell

In Comsol Multiphysics wurde der Resonator mit der Probe als ganzes, halbes und viertel Model erstellt. In ausgiebigen Simulationen ist untersucht worden, ob es Unterschiede in den Simulationsergebnissen gibt. Ein weiterer Aspekt war die Einbaulage der Probe, ob es exakt in der Mitte und senkrecht, außerhalb oder gekippt, einen Einfluss hat. Da die Probe einen kleineren Durchmesser als die Bohrung haben muss, bestand die Möglichkeit einer nicht idealen Positionierung. Es zeigte sich, dass es keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Deshalb wurde mit der zentrischen Position der Probe und dem viertel Resonator gerechnet.

Die Probe ragte außerhalb des Resonators in den freien Raum. Ein Teil dieses Bereichs wurde in das Modell aufgenommen. Die Größe des offenen Bereiches ober- und unterhalb des Resonators wurde so dimensioniert, dass das Feld im Resonanzfall an den Rändern auf mindestens 60 dB abgeklungen war. Damit sollte gewährleistet sein, dass es zu keiner Frequenzverstimmung durch den begrenzten freien Raum kam.

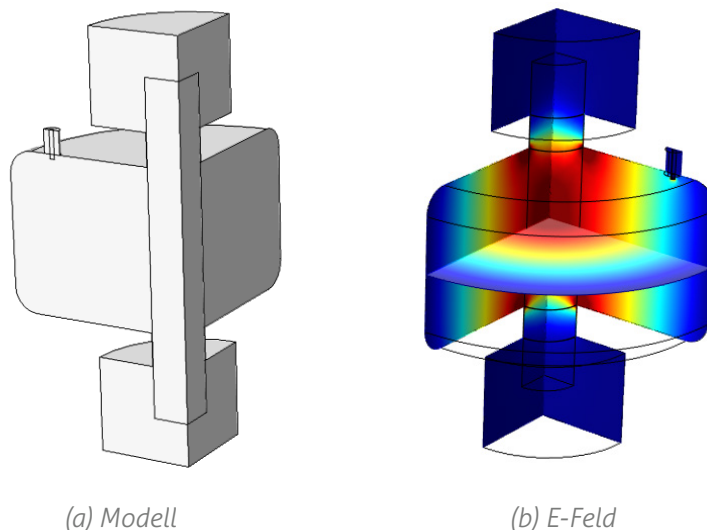


Abb 2: Quarter Modell und elektrische Feldverteilung

Mit dem nominalen Durchmesser ergab sich eine Diskrepanz zu den gemessenen Werten. Der Durchmesser wurden so optimiert, dass der Verlauf der Resonanzfrequenz über der Temperatur mit der Messung übereinstimmt. Die Abweichungen lagen schlussendlich innerhalb von  $\pm 3$  kHz.

### 3 - Messaufbau und Messung

Der Resonator wurde in einem Temperaturschrank im Bereich von 5°C bis 45°C betrieben. Er war mit dem Networkanalyser (VNA) verbunden, der programmgesteuert die S-Parameter regelmäßig aufnahm. Parallel wurde das Längenmessgerät ausgelesen und die Temperatur dokumentiert.

Bei den ersten Messungen waren die Ergebnisse stark verrauscht, was durch die Vibrationen des Kompressors vom Temperaturschrank hervorgerufen wurde. Um dies zu umgehen wurde die Temperatur auf 5°C gefahren und für eine halbe Stunden gehalten. Danach wurde der Schrank ausgeschaltet und der Innenraum erwärmte sich mit der Zeit. Später ist noch ein Heizwiderstand dazugeschaltet worden um auf 45°C zu gelangen.

Die ausgelesene Resonanzkurve vom VNA hatte nicht die Auflösung um feine Frequenzänderungen sicher zu bestimmen. Deshalb wurde an die Messwerte eine Lorenz-Funktion angepasst und von ihr die Resonanzfrequenz und die Bandbreite extrahiert.

Mit der Resonanzfrequenz und der Bandbreite wird die belastete Güte (1) und anhand der Einfügedämpfung bei der Resonanz die unbelastete Güte (2) berechnet.

$$Q_L = \frac{f_0}{B} \quad (1)$$



Abb 3: Temperaturschrank mit Resonator

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - 10^{\frac{IL[dB]}{20}}} \quad (2)$$

Für den geschlossenen Resonator, ohne Bohrungen im Boden und Deckel, kann die Güte für die verschiedenen Moden berechnet werden. In unserem Fall bei der TM010 Mode mit Gleichung (3).

$$Q_{010} = \frac{Z_0 \cdot j_{01}}{R_s \cdot 2 \cdot \left( \frac{R(T)}{H(T)} + 1 \right)} \quad (3)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega_0 \cdot \mu_0}{2 \cdot \sigma(T) \cdot \sigma_r}} \quad (4)$$

$$\sigma(T) = \sigma_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \quad (5)$$

$$Z_0 = \mu_0 \cdot c \quad (6)$$

Hierbei wurde mit einem Temperaturkoeffizient für die Längenänderung bei Radius R und Höhe H von  $16.5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$  dem idealen Leitwert von Kupfer mit  $58.5 \cdot 10^{-6} \frac{S}{m}$  und  $\alpha = 3.9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K}$  gerechnet.  $Z_0$  ist der Freiraumwellenwiderstand und  $j_{01}$  ist die Nullstelle der Besselfunktion für die TM<sub>01</sub> Mode mit 2.405. Der gemessene und gerechnete Güteverlauf stimmen recht gut überein (Abb. 4), wenn man berücksichtigt, dass die Gleichung nur für geschlossene Resonatoren exakt ist.

Der nicht ideale Leitwert durch die Oberflächenrauigkeit wird berücksichtigt durch den relativen Leitwert, der anhand Gleichung (7) aus der unbelasteten Güte zu berechnen ist.

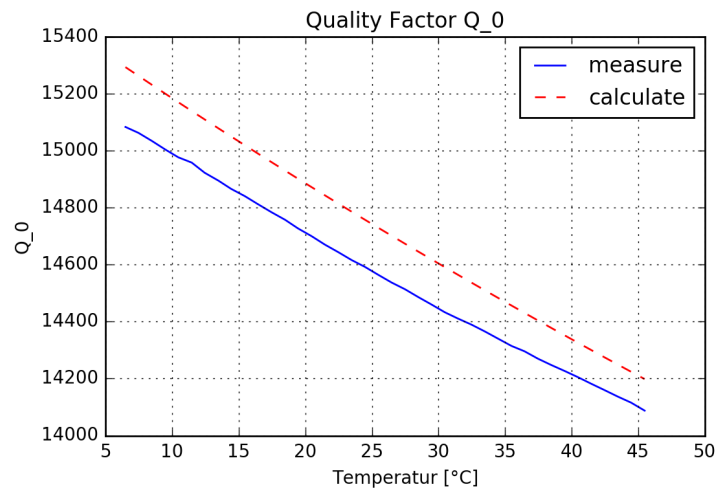


Abb 4: Gemessene und berechnete Güte des leeren Resonators

$$\sigma_r = \left( Q_u \cdot \frac{\delta_{s0}}{\lambda} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \left( 1 + \frac{D(T)}{2 \cdot H(T)} \right)}{j_{01}} \right)^2 \quad (7)$$

$$\delta_{s0} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \sigma(T)}} \quad (8)$$



Estin [3] hat untersucht wie die Bohrungen im Deckel und Boden die Resonanzfrequenz beeinflusst. Deren Einfluss wird anhand eines Korrekturfaktors berücksichtigt den er durch rigorose Analyse bestimmte. In unserem Fall wurden sie anhand der Feldsimulation bestimmt in dem für jede Temperatur die Permittivität und Verluste optimiert wurden bis sie mit den Messungen übereinstimmen.

$$\epsilon_r = C_1 \cdot 2 \cdot J_1(j_{01})^2 \cdot \frac{f_0 - f_1}{f_1} \cdot \left( \frac{D(T)}{d(T)} \right)^2 + 1 \quad (9)$$

$$\tan\delta = C_2 \cdot \frac{2 \cdot J_1(j_{01})^2}{\epsilon_r} \cdot \left( \frac{D(T)}{d(T)} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{Q_{DUT}} - \frac{1}{Q_0} \right) \quad (10)$$

$$C_1 = 1.05913 - 7.33 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ C} \cdot T[^\circ C] \quad (11)$$

$$C_2 = 1.20974 - 4.963 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ C} \cdot T[^\circ C] \quad (12)$$

$J_1$  : Bessel Funktion erster Art

$D(T)$  : Temperatur abhängiger Durchmesser des Resonators

$d(T)$  : Temperatur abhängiger Durchmesser der Probe

$Q_{DUT}$  : unbelastete Güte mit Probe

$Q_0$  : unbelastete Güte des Resonators

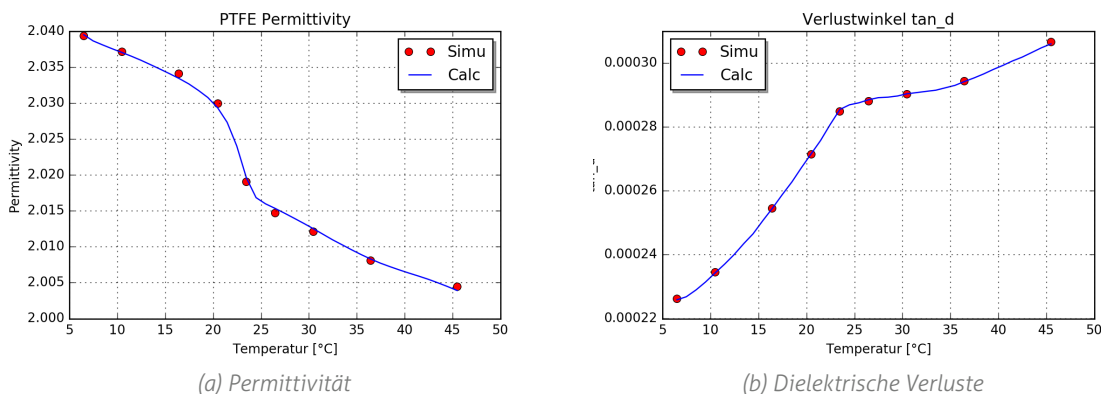
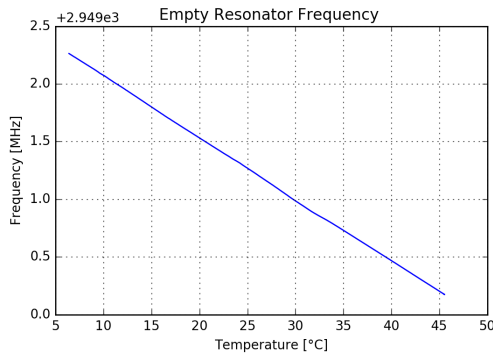


Abb 5: Vergleich Feldsimulation und Berechnung

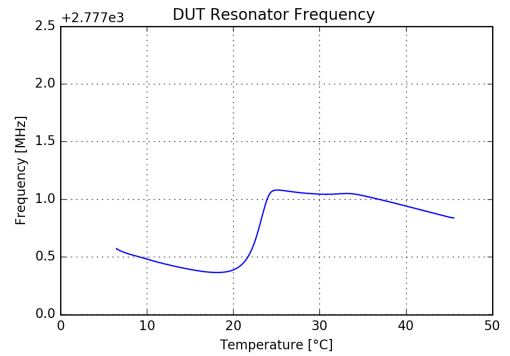
Inklusive dem Korrekturfaktor stimmt die Rechnung sehr gut mit dem Ergebnis aus der Feldsimulation überein.

### 3.1 - Messung mit PTFE

Mit der PTFE Probe ist der Drift der Resonanzfrequenz über der Temperatur kleiner als beim leeren Resonator (Abb. 6). Dies war zu erwarten, da bei steigender Temperatur die Permittivität abnimmt und damit dem Drift, durch die Ausdehnung des Resonators, entgegenwirkt.



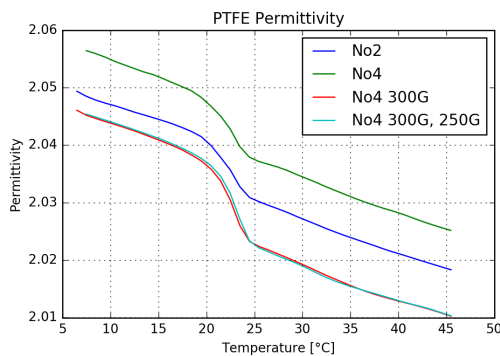
(a) Leer



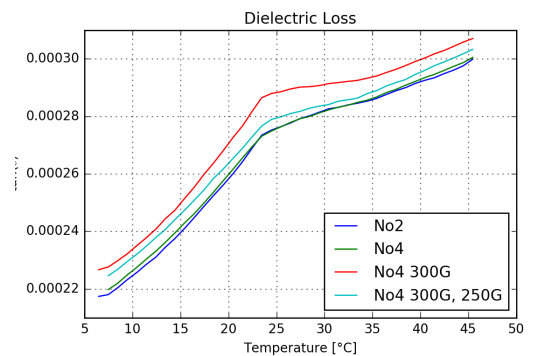
(b) Mit Probe

Abb 6: Resonanzfrequenz ohne und mit Probe

Nach dem Tempern war die Probe Nr.4 kürzer und der Durchmesser größer. Sie wurde nochmals bearbeitet. Um sicher zu gehen, dass sich die Eigenschaften nicht dadurch veränderten, wurde sie nochmals für längere Zeit auf 250°C erwärmt. Was aber keinen Unterschied bei der Permittivität ergab. Jedoch zeigt sich bei den dielektrischen Verlusten nach dem Tempern ein etwas kleinerer Wert. Dies kann aber durch Reste von Luftfeuchtigkeit herrühren.



(a) Permittivität



(b)  $\tan(\delta)$

Abb 7: Permittivität und  $\tan(\delta)$  verschiedener Proben

Dieser Memory-Effekt tritt durch mechanische Spannungen im PTFE auf, die bei der Herstellung oder Bearbeitung entstehen. Wird das PTFE auf eine Temperatur unter 340°C länger erwärmt und langsam abgekühlt, können die Molekülketten sich ungestört ausrichten.

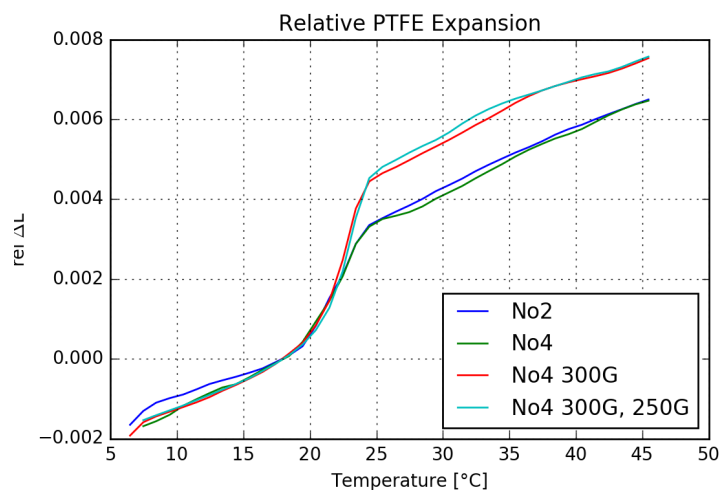


Abb 8: Relative Ausdehnung verschiedener Proben

### 3.2 - Hysterese

Wie schon früher erwähnt, beschreibt das PTFE eine Hysterese, wenn die Temperatur um die Stufe herum verändert wird. Deshalb wurde Probe Nr. 4 nochmal vermessen und zwar von 5°C bis 45°C und zurück auf 5°C. Bei einem Temperaturverlauf von hohen zu niedrigen Temperaturen verschiebt sich die Stufe um ca. 4°C zur tieferen Temperatur, was einen maximalen Unterschied in der Permittivität von 0.0125 oder 0.6% ausmacht. Bei den Verlusten ist kein Unterschied zu sehen. Die sichtbare Abweichung rührt von der Messunsicherheit her.

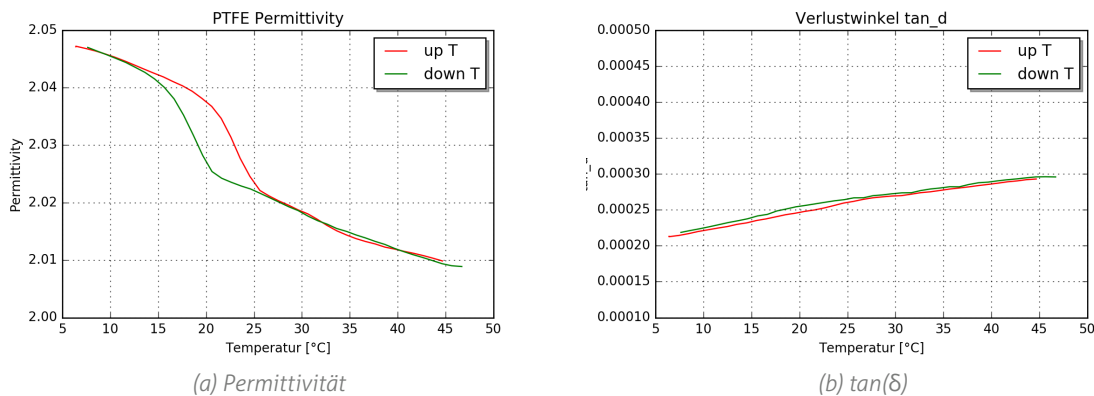


Abb 9: Permittivität und  $\tan(\delta)$  über Temperaturzyklus

## 4 - Vergleich Berechnung und Messung

Mit der gemessenen Permittivität und Ausdehnung von PTFE ist es möglich, die Eigenschaften einer Koaxialleitung über der Temperatur zu berechnen.

### 4.1 - Impedanz

Die Impedanz einer Koaxialleitung berechnet sich zu:

$$Z_L = \frac{\mu_0 \cdot c}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r(T)}} \cdot \ln \frac{D(T)}{d(T)} \quad (13)$$

$Z_L$  : Impedanz

$\mu_0$  : Magnetische Feldkonstante  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$

$c$  : Lichtgeschwindigkeit 299 792 458 m/s

$\epsilon_r(T)$  : Relative Permittivität des Dielektrikums

$D(T)$  : Durchmesser des Schirms

$d(T)$  : Durchmesser des Innenleiters

Wenn der Innenleiter und Schirm aus demselben Material sind, bleibt das Verhältnis gleich und damit auch die Impedanz. Bei einer solchen Leitung hat die Permittivität den wesentlichen Einfluss.

Wenn wir davon ausgehen, dass sich das PTFE in der Länge ausdehnen kann, so kann die Impedanz unter Vernachlässigung von Druck auf das PTFE berechnet werden.

Wird expandiertes PTFE verwendet, verringert sich der Einfluss, da die effektive Permittivität kleiner ist. Aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Leitung kann der Anteil der Luft bestimmt werden.

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (14)$$

$$a = \frac{\left(\frac{c}{v}\right)^2 - \epsilon_{r\_PTFE}}{\epsilon_{r\_Air} - \epsilon_{r\_PTFE}} \quad (15)$$

- a : Anteil der Luft
- $\frac{v}{c}$  : Relative Ausbreitungsgeschwindigkeit
- $\epsilon_{r\_PTFE}$  : Relative Permittivität von PTFE
- $\epsilon_{r\_Air}$  : Relative Permittivität von Luft

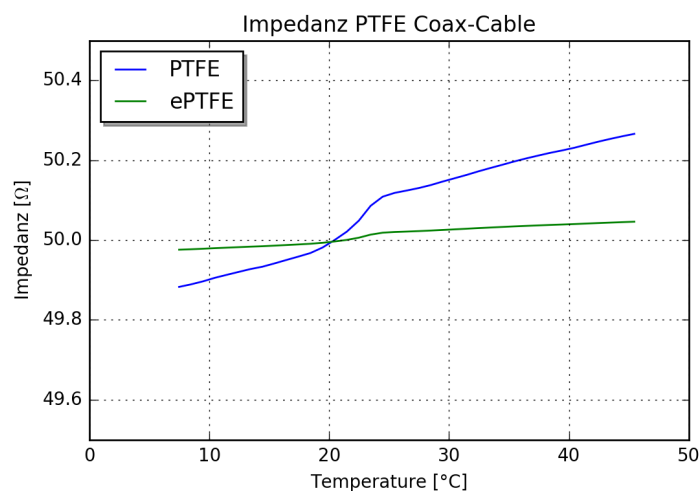


Abb 10: Impedanz über Temperatur

Unter Berücksichtigung der Fertigungstoleranz hat die Koaxialleitung bei guten Kabeln eine Impedanz von  $(50 \pm 2) \Omega$ . Der Einfluss vom PTFE ist wesentlich kleiner als die Fertigungstoleranz und ist bei einem Koaxialkabel mit PTFE ca.  $(50 \pm 0.3) \Omega$  und bei ePTFE  $(50 \pm 0.03) \Omega$ .

#### 4.2 - Phasenstabilität

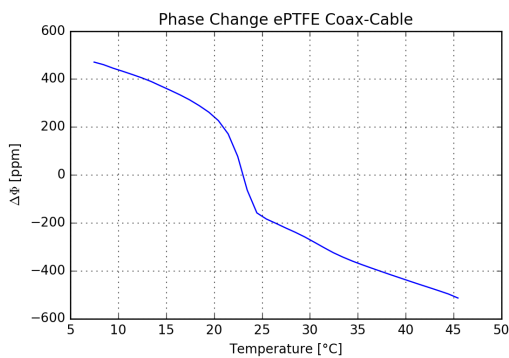
Problematisch ist das Verhalten von PTFE bei Druck [5]. Die Permittivität steigt wenn PTFE unter Druck gesetzt wird. Da genaue Daten fehlen, wird auch eine FEM Simulation nur ungenaue Werte liefern. Die Situation ist bei einem Koaxialkabel mit expandiertem PTFE etwas anders. Hierbei ist die Annahme, dass, wenn sich das PTFE ausdehnt, sich der Anteil der Luft dementsprechend reduzieren wird. Innenleiter und Schirm werden sich mit ihrem Temperaturkoeffizient ausdehnen und den zur Verfügung stehenden Raum definieren. Die Änderung in der Permittivität zeigt sich am deutlichsten in der Phasenstabilität, zu denen es bei einigen Kabeltypen Werte in den Datenblättern gibt.

$$\Phi = \frac{l}{\lambda} \cdot 360^\circ \quad (16)$$

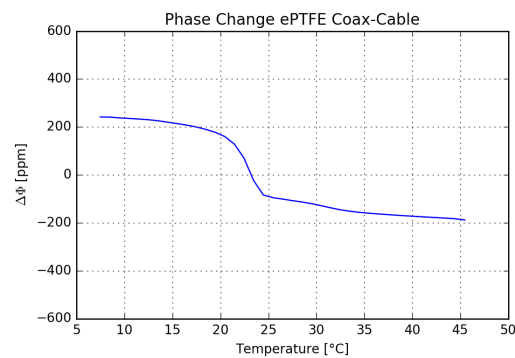
$$\Delta\Phi = \frac{\Delta\varphi}{\Phi} \cdot 10^6 [\text{ppm}] \quad (17)$$

Bei einem Vergleich eines Phasen optimierten Kabels, wie dem Phase Master von Teledyne Storm Microwave, welches einen Wert von max. 865 ppm und eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von 0.87 hat, und der Berechnung, was ein Kabel haben würde, so bekommen wir den Verlauf in Abb. 11a. Die Phasenänderung ist zwar in derselben Größenordnung, hat aber einen anderen Verlauf.

Die vereinfachte Annahme scheint wesentliche Einflüsse außer Acht zu lassen. Wenn der PTFE Anteil weiter verringert wird, so dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit 0.91 ist, zeigt die Berechnung einen Verlauf wie er im Datenblatt dargestellt ist. Die Phasenänderung erreicht einen maximalen und minimalen Wert wie in Abb. 11b.



(a) Ausbreitungsgeschwindigkeit 0.87



(b) Ausbreitungsgeschwindigkeit 0.91

Abb 11: Änderung der Phase über Temperatur

## Zusammenfassung

PTFE ist durch seinen großen Temperaturbereich, die relative stabile Permittivität und die geringsten Verluste aller Polymere, einer der wichtigsten Kunststoffe bei Anwendungen in der Hochfrequenztechnik. Nachteilig ist der Memory-Effekt, durch den die Eigenschaften von Probe zu Probe leicht variieren können, und seine Hysterese. Um diese Effekte zu berücksichtigen sind genaue Daten notwendig, die erst durch gleichzeitiges Messen der Permittivität und Ausdehnung erreicht werden.

## Literaturverzeichnis:

[1] M. Höft, S. Burger, *Q-factor improvement of combline resonators*, German Microwave Conference 2005, Ulm, Germany, pp. 53-56, 5.-7. Apr. 2005.

[2] S. Ramo, J. R. Whinnny, T. van Duzer: *Fields and Wave in Communication Electronics*, 3rd Edition, Wiley

[3] A. J. Estlin, H. E. Bussy, *Errors in dielectric measurements due to a sample insertion hole in cavity*, IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, pp. 650-653, November 1960

[4] H. Kawabata, H. Tanpo, Y. Kobayashi: *An Improvement of the Perturbation Method Using a TM<sub>010</sub> Mode Cylindrical Cavity*, IEICE Trans. Electron., Vol. E86-C, No. 12 Dec 2003

[5] H. Sasabe, S. Saito, *Effects of Temperature and Pressure on the Dielectric Constant in Non-Polare Polymers*, Polymer Journal, Vol. 3, No. 6, 1972

## Impressum

©copyright 2018

by el-spec GmbH

Konzept, Text, Zeichnungen: Stefan Burger, Gamma Delta RF-Expert, Melbourne Australien

Layout und Gestaltung: Udo Klünsch | kpr kommunikation, Geretsried

Fotos: Udo Klünsch | kpr kommunikation außer S.9 Stefan Burger

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung ist ohne Zustimmung der Firma el-spec GmbH unzulässig und strafbar. Insbesondere gilt dies für Vervielfältigungen, Übersetzungen und Einspeicherung in elektronische Systeme.

### el-spec GmbH

Lauterbachstr. 23c

82538 Geretsried-Gelting

T.: +49 8171 4357-21/-22

F.: +49 8171 4357-99

info@elspecgroup.de

Geschäftsführer: Thomas Weber

[www.elspecgroup.de](http://www.elspecgroup.de)



el-spec GmbH  
Lauterbachstr. 23c  
82538 Geretsried-Gelting, Germany  
Tel. +49 (0) 8171-4357-23  
Fax +49 (0) 8171-4357-99  
sales@elspecgroup.de  
www.elspecgroup.de