

Intelligente Steckverbinder mit integrierten temperaturstabilen hochdielektrischen Keramikfiltern als Interface in Kommunikationsnetzen

Abschlußbericht

Conec Elektronische Bauelemente GmbH, Lippstadt

PI Ceramic GmbH, Lederhose

Laufzeit des Vorhabens 1.02.2001 bis 31.01.2004

Verfasser :

Jörg Kühle, FA CONEC , Lippstadt

Jan Meppelink, Prof. Dr.-Ing, FH-SWF, Soest

Albrecht Otto, FA PI CERAMIC, Lederhose

Dr. Falko Schlenkrich, IKTS Dresden

Projektleiter : Jörg Kühle

Dieses Projekt wurde durch das BMBF im Förderprogramm Matech gefördert.

Förderkennzeichen 03N1072

1	AUFGABENSTELLUNG	5
1.1	Zielwerte	6
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde	7
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	8
2	STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK ZU BEGINN DES PROJEKTS	10
2.1	Bekannte Konstruktionen	16
2.2	Bekannte Verfahren	16
2.3	Verwendete Fachliteratur und genutzte Informationsdienste	18
3	ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	18
3.1	PI Ceramic und IKTS	18
3.2	Conec und Uni GH Paderborn / FH-SWF	18
4	ERZIELTE ERGEBNISSE	19
4.1	Aus der Zusammenarbeit PI Ceramic und IKTS	19
4.1.1	Auswahl von Komponenten	20
4.1.2	Herstellung von Keramiken unter Verwendung von Glattscherben	24
4.1.2.1	Mischungen von Bleiperowskitpulvern mit Bleiperowskit-Glattscherben	25
4.1.2.2	Mischungen von Bariumtitanatpulvern mit Bariumtitanat-Glattscherben	29
4.1.3	Modifikation bekannter X7R-Werkstoffe	30
4.1.4	Skalierung der Heterogenität	31
4.1.5	Herstellung von Sprüh- und Wirbelschichtgranulaten	33
4.1.6	Granulate von Werkstoffen auf Basis komplexer Bleiperowskite	35
4.1.7	Granulate von Werkstoffen auf Basis BaTiO ₃	39
4.1.8	Bleieisentalat-Keramiken	41
4.1.9	Reproduktion an Kilogramm-Versätzen	44
4.1.10	Lösungsansatz – Bleioxidhaltige Verbindungen	46
4.1.11	Lösungsansatz – Bleioxidhaltige Verbindungen	49
4.1.12	Ergebnisse der Wirbelschichtgranulat-Mischungen	50
4.1.13	Herstellung und Ergebnisse von Funktionsmustern	52
4.1.14	Ergebnisse einer 3-poligen Planarfilter-Ausführung	52
4.1.15	Ergebnisse am 9-poligen Planarfilter	53

4.1.16	Zusammenfassung und Wertung der Ergebnisse	54
4.1.17	Ergebnisse der Sprühgranulatmischungen	55
4.1.18	Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen	60
4.1.19	Ergebnisse beim Einsatz von Bleieisentalat	60
4.1.20	Aktivitäten und Ergebnisse bleifreier Systemen	66
4.2	Aus der Zusammenarbeit CONEC und Universität GH Paderborn bzw FH-SWF	68
4.2.1	Grundprinzip eines Filtersteckverbinders am Beispiel eines C-Filters	68
4.2.2	Vergleich verschiedener Technologien	71
4.2.3	Realer Kondensator mit einem Dielektrikum hoher Dielektrizitätszahl	72
4.2.4	Ansätze zur Verbesserung des Hochfrequenzverhaltens	75
4.3	Ergebnisse aus der Entwicklung bei der Fa CONEC	81
4.3.1	Übersicht der Prüfungen	81
4.3.1.1	Kapazität und Verlustfaktor	81
4.3.1.2	Isolationswiderstand	81
4.3.1.3	Einfügungsdämpfung	81
4.3.1.4	Übersprechen/Crosstalk	82
4.3.1.5	Spannungsfestigkeit	82
4.3.1.6	Steckzyklen	83
4.3.2	Übersicht Proben	83
4.3.3	Ergebnisse	83
4.3.3.1	K1+K2	83
4.3.3.1.1	Elektrodenmaterial : Standard –D-SUB	84
4.3.3.1.1.1	Spannungsfestigkeit	85
4.3.3.1.2	Elektrodenmaterial HD-SUB	86
4.3.3.1.2.1	Kapazität	86
4.3.3.1.2.2	Spannungsfestigkeit	87
4.3.3.2	K1+K3	87
4.3.3.2.1	Verlustfaktor	89
4.3.3.2.2	Isolationswiderstand	89
4.3.3.2.3	Einfügungsdämpfung / Crosstalk	90
4.3.3.2.3.1	Spannungsfestigkeit	91
4.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	91
	SEQUENCE A	92
	SEQUENCE F	92
	VISUAL/ MECHANICAL EXAMINATION	92
	CONTACT RESISTANCE	92

VISUAL / MECHANICAL EXAMINATION	92
DISSIPATION FACTOR	92
VISUAL / MECHANICAL EXAMINATION	92
MATING / UNMATING FORCE	92
DISSIPATION FACTOR	92
VISUAL / MECHANICAL EXAMINATION	92
VISUAL / MECHANICAL EXAMINATION	92
CABLE TERMINATION RESISTANCE	92
TERMINATION GAS TIGHTNESS	92
VISUAL / MECHANICAL EXAMINATION	92
SEQUENCE I	92
4.3.4.1 Wekkstoffsystem K1+K2	93
4.3.4.2 Werkstoffsystem K1+K3	94
5 VERÖFFENTLICHUNGEN	96



Bild 1.1: Typische Bauformen von Filtersteckverbindern der Fa. CONEC.

1 Aufgabenstellung

Entwicklung eines neuen, multifunktionalen dielektrischen HDK-Werkstoffs mit definierter Temperaturcharakteristik, der komplexe Bauformen von Kondensatoren für den Einbau in Filtersteckverbindern der Informationstechnik ermöglicht.¹

¹ Im Originalantrag vom 28.8.2000 ist folgender Wortlaut zu finden:

Entwicklung eines neuen, multifunktionalen dielektrischen HDK Werkstoffs mit definierter Temperaturcharakteristik. Der Werkstoff ermöglicht komplexe Bauformen von Kondensatoren für den Einbau in Filtersteckverbindern der Informationstechnik mit reduziertem Bleioxidgehalt.

1.1 Zielwerte

Die Zieldaten wurden im Antrag vom 28.8.2000 formuliert². Im weiteren Ablauf des Projektes wurden die Zielwerte jedoch aufgrund der zwischenzeitlich vorliegenden Ergebnisse korrigiert und vom Projektträger genehmigt.

Dielektrizitätszahl bei Raumtemperatur > 15.000; **geändert auf > 7.500**

Temperaturbereich –55 Grad Celsius bis 125 Grad Celsius

Kapazitätsänderung im Temperaturbereich +/- 20 %

Mechanische Festigkeit 50 N/mm²

² Zielwerte: Dielektrizitätszahl bei Raumtemperatur > 15000, Temperaturbereich –55 Grad Celsius bis 125 Grad Celsius, Kapazitätsänderung im Temperaturbereich +/- 20 %, Mechanische Festigkeit 50 N/mm², Einsparung von Edelmetallen.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

Das Projekt wurde als Verbundprojekt mit den Firmen

Conec GmbH Lippstadt Hersteller von Filtersteckverbindern der Informationstechnik und Anwender neuer Werkstoffe in Produkten als Projektkoordinator,

und

PI Ceramic GmbH Lederhose als Hersteller von Funktionskeramiken und somit als Hersteller der dielektrischen Filter auf Basis der Entwicklungsergebnisse

durchgeführt.

Im Unterauftrag waren beteiligt :

Von Conec:

Universität Gesamthochschule Paderborn, heute Fachhochschule Südwestfalen, Abt. Soest

Von PIC:

IKTS Dresden

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde mit drei Meilensteinen und insgesamt acht Arbeitsschritten geplant³:

Meilensteine

Meilenstein 1

Ermittlung optimaler Zusammensetzungsbereiche mit Erfüllung der Zieldaten

Meilenstein 2

Selektion der Werkstoffe mit „Performance >0.8“ der Zielwerte, Abbruch falls diese Daten nicht erreichbar sind

Meilenstein 3

Prototypen sind komplett gemessen und charakterisiert.

Liste der Arbeitsschritte

Arbeitsschritt 1

Detaillierte Literatur- und Patentrecherche

Arbeitsschritt 2

Identifizierung aussichtsreicher Werkstoffzusammensetzungen durch Modellrechnung

Arbeitsschritt 3

Evaluierung der Werkstoffkonzepte hinsichtlich der elektrischen Materialkenndaten im Labormaßstab

Arbeitsschritt 4

Mechanische Charakterisierung von Prüfmustern aus A3

Arbeitsschritt 5

Übertragung der Ergebnisse aus der Labortechnologie zu PI Ceramic, Maßstabsvergrößerung 1 : 10

Arbeitsschritt 6

³ Siehe auch Antrag vom 28.8.2000 III.2 Arbeitsplan

Elektrische und mechanische Werkstoffcharakterisierung am HDK-
Steckverbinder

Arbeitsschritt 7

Optimierung ausgewählter Werkstoffe

Arbeitsschritt 8

Designphase bei Conec incl. Messung der Parameter des Prototyps.

Der Projektablauf war vom 01.02.2001 bis 31.01.2004 bei der Antragstellung
geplant und wurde bis 30.06.2004 verlängert.

2 Stand der Wissenschaft und Technik zu Beginn des Projekts

Im Rahmen des Projektes lag der materialwissenschaftliche Schwerpunkt der Arbeiten auf dem Gebiet der Entwicklung von Werkstoffen, die eine hohe Dielektrizitätskonstante paaren mit einer geringen Änderung derselben im Temperaturbereich von -55°C bis 125°C . Gefordert wurde eine Änderung von $\pm 20\%$ bezogen auf den Wert bei 20°C . Diese Forderung stellt an sich einen physikalischen Widerspruch dar, da Dielektrizitätszahlen > 5.000 an das Phänomen der Ferroelektrizität geknüpft sind. Dabei erfolgt im Bereich der Curietemperatur T_C die Umwandlung einer polaren ferroelektrischen Phase in eine unpolare kubische, wodurch in einem sehr engen Temperaturbereich auf der Grundlage von Gitterdeformationen sehr hohe DK_{max} -Werte auftreten. Im übrigen Temperaturbereich liegen die DK-Werte z.T. deutlich unter diesen bei T_C beobachteten. Die TKc-Kurven - Änderung der Kapazität über der Temperatur - in den Abb. 1 und 2 verdeutlichen diesen Sachverhalt am Beispiel von BaTiO_3 -basierten Werkstoffen, die reine Ferroelektrika darstellen, und komplexen Bleiperowskiten, die zu den Relaxorwerkstoffen zählen. Im Bereich der Curietemperatur wirken in beiden Strukturen auf der Ebene der Elementarzellen unterschiedliche Mechanismen, die zu den beobachteten Unterschieden in den Kurvenformen führen. So sind die BaTiO_3 -basierten Kurven durch hohe bis z.T. extrem hohe DK_{max} -Werte bei T_C verbunden mit sehr steilen Flanken der Kurven charakterisiert. Im übrigen Temperaturbereich weisen diese Werkstoffe verhältnismäßig geringe DK-Werte im Bereich um 1.000 auf, was weit unter den im Rahmen des Projektes geforderten Werten liegt.

Die TKc-Kurven von Bleiperowskiten sind dagegen in der Regel nicht durch derartig hohe DK_{max} -Werte bei T_C charakterisiert, weisen dafür aber wesentlich flachere Flanken auf, was dazu führt, dass sich die hohen bis sehr hohen DK-Werte über einen wesentlich breiteren Temperaturbereich erstrecken, was für die geforderte Zielstellung von Vorteil sein sollte.

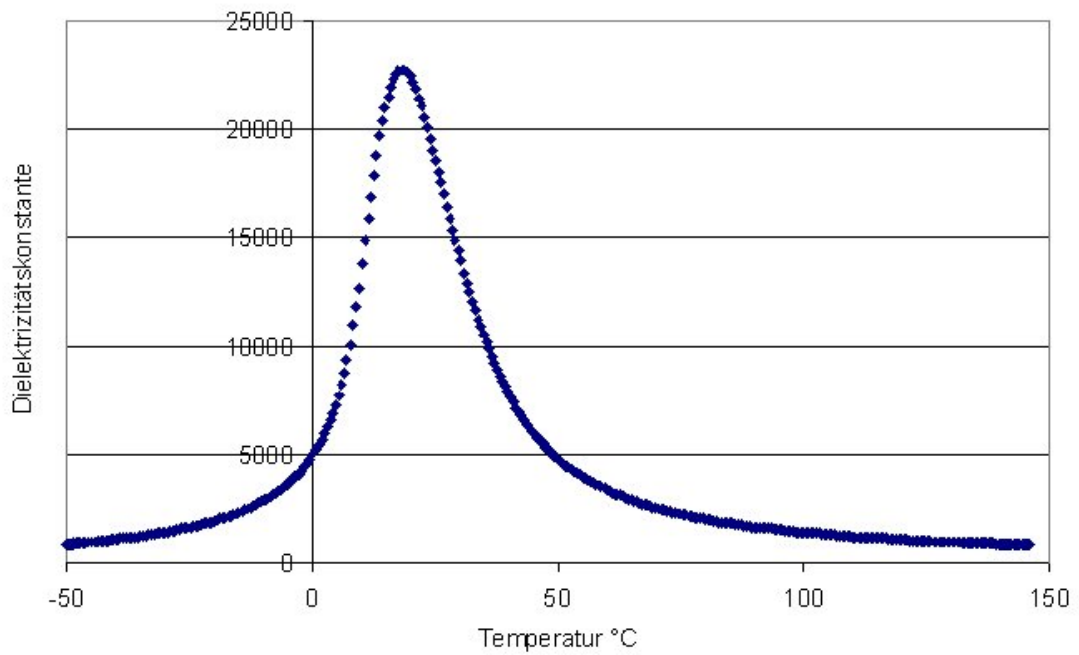


Bild 2.1: Änderung der Kapazität mit der Temperatur (TKc-Kurve) einer Keramik auf Basis BaTiO₃

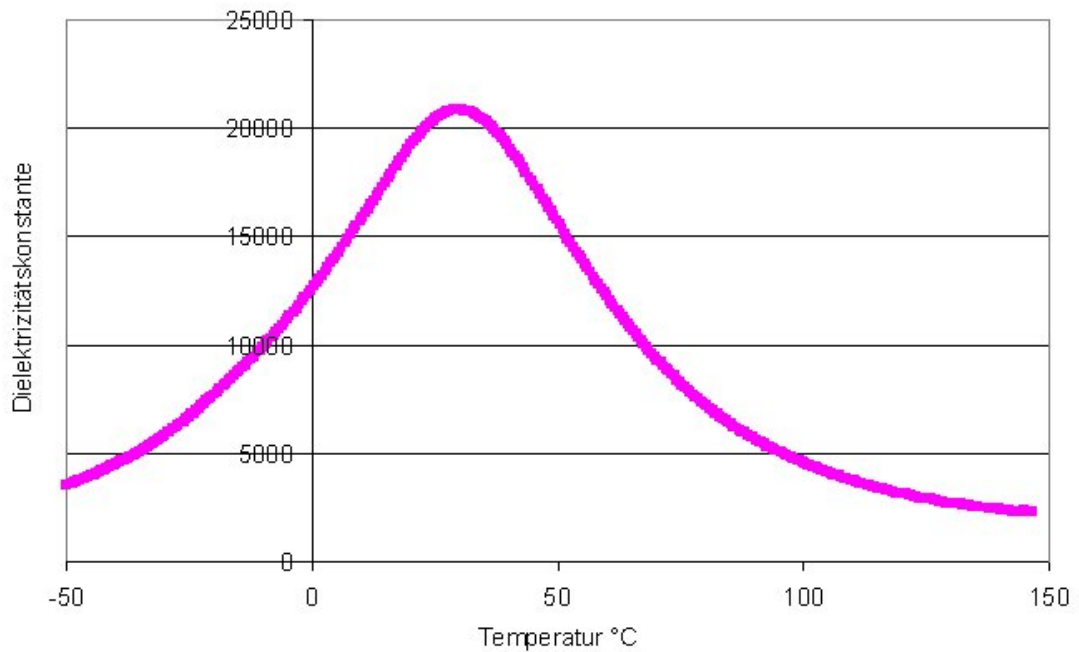


Bild 2.2: Änderung der Kapazität mit der Temperatur (TKc-Kurve) einer Keramik auf Basis komplexer Bleiperowskite

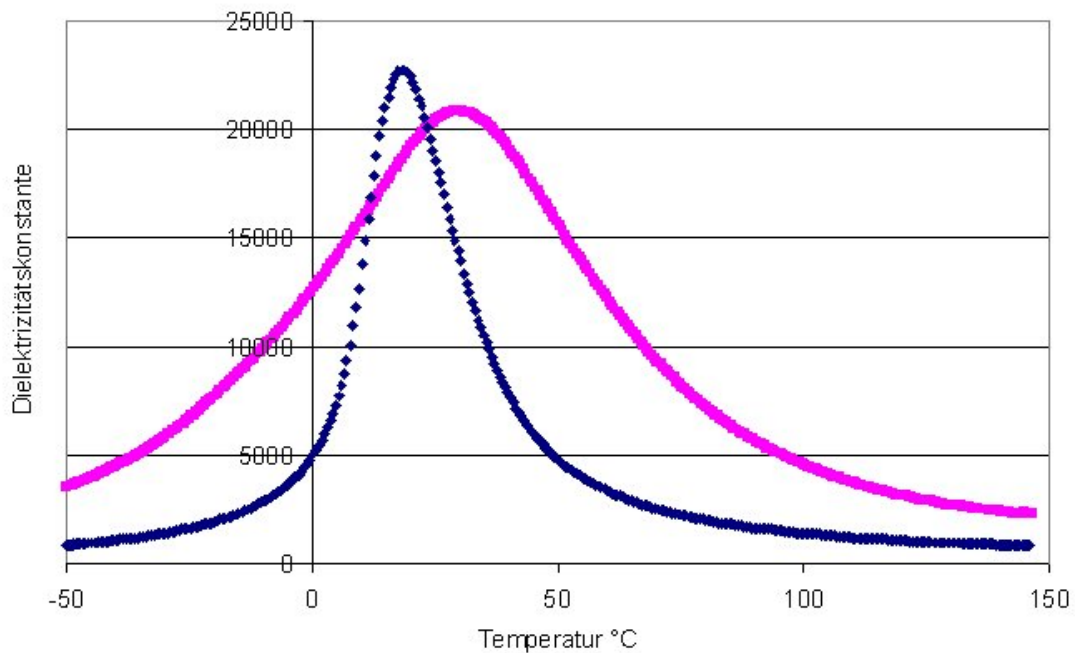


Bild 2.3: Vergleich der TKc-Kurven von Werkstoffen auf Basis BaTiO₃ (blaue Kurve) und Bleiperowskiten (rote Kurve)

Die kristallografische Grundstruktur ist für beide Verbindungsklassen die Perowskitstruktur der allgemeinen Zusammensetzung ABO_3 , die damit auch die Grundlage für die Materialentwicklungen im vorliegenden Projekt darstellte.

Da eine einzelne Verbindung nicht die geforderten Materialeigenschaften – hohe DK-Werte über einen weiten Temperaturbereich - in sich vereint, besteht das Ziel der Entwicklung in einer Steuerung der Mischkristallbildung und damit der Einstellung einer definierten Heterogenität in der Keramik, um auf diesem Weg durch die Überlagerung der individuellen Eigenschaften neue integrale Eigenschaftsprofile einzustellen.

Die dafür in Frage kommenden Systeme sind dabei zum einen die sich vom $BaTiO_3$ ableitenden Verbindungen mit Sintertemperaturen im Bereich von $>1.350^\circ\text{C}$ und zum anderen die sogenannten komplexen Bleiperowskite mit der allgemeinen Formel $PbB'B''O_3$, die typischerweise Sintertemperaturen zwischen 1.000°C und 1.200°C aufweisen. Aus diesem Grund ist eine getrennte Betrachtung der Systeme erforderlich, auch wenn aus der Literatur Beispiele

bekannt sind, die durch die Kombination von Bleiperowskiten mit BaTiO_3 Werkstoffe mit X7R-Charakteristik ($\Delta C/C_{20^\circ\text{C}} = \pm 15\%$; Temperaturbereich: $-55^\circ\text{C} \dots 125^\circ\text{C}$) beschreiben, wobei die bei 20°C erreichten DK-Werten im Bereich um 4.000 liegen. Die Abflachung der DK wird in diesem Fall durch eine Kern-Rand-Struktur ermöglicht. Diese Struktur scheint nach derzeitigem Wissensstand nicht das Potenzial aufzuweisen, um die im Projekt geforderten Daten zu ermöglichen.

Ein weiteres Werkstoffsystem, das DK-Werte in der geforderten Größenordnung aufweist, sind die sogenannten Sperrschichtwerkstoffe, die vor allem in den 80er Jahren sehr intensiv bearbeitet wurden. Dabei handelt es sich um Verbindungen auf Basis BaTiO_3 und vor allem SrTiO_3 , die unter reduzierenden Bedingungen gesintert werden, wodurch es zu einer Reduktion eines Teils des 4-wertigen Titans in der Perowskitstruktur zu 3-wertigem kommt. Dieser Sinterung schließt sich ein zweiter Tempersschritt an Luft unter Verwendung von Gläsern an, der durch Reoxidation und Korngrenzendiffusion eine Isolation der halbleitenden Körner bewirkt. Der eigentliche Dipol ist in diesen Keramiken nicht in der Elementarzelle lokalisiert wie bei den klassischen Ferroelektrika, sondern das gesamte Korn wirkt als solcher. Für derartige Keramiken werden DK-Werte bei Raumtemperatur >100.000 beschrieben, wobei ein entscheidender Nachteil solcher Keramiken die geringe Durchschlagsfestigkeit aufgrund der halbleitenden Körner verbunden mit der geringen Stärke der die Körner umgebenden Isolationsschichten ist, wodurch ein Einsatz in Filtersteckern nicht möglich ist. Ein weiterer schwerwiegender Nachteil ist die aufwendige und vor allem kostenintensive Technologie zur Herstellung von Sperrschichtwerkstoffen.

Bild 2.4 und Bild 2.5 zeigen im Ergebnis einer Literaturlauswertung den Zusammenhang zwischen Curietemperatur und DK_{max} für verschiedene BaTiO_3 -Systeme und $\text{PbB}'\text{B}''\text{O}_3$ -Verbindungen. Dabei wird deutlich, dass über den gesamten geforderten Temperaturbereich Verbindungen mit sehr hohen DK_{max} -Werten beschrieben werden, die damit als Ausgangsmaterialien zur Einstellung einer gezielten Heterogenität dienen können. Somit galt es in der

ersten Projektphase den Stand der Literatur mit der am IKTS vorhandenen Technologie zu reproduzieren.

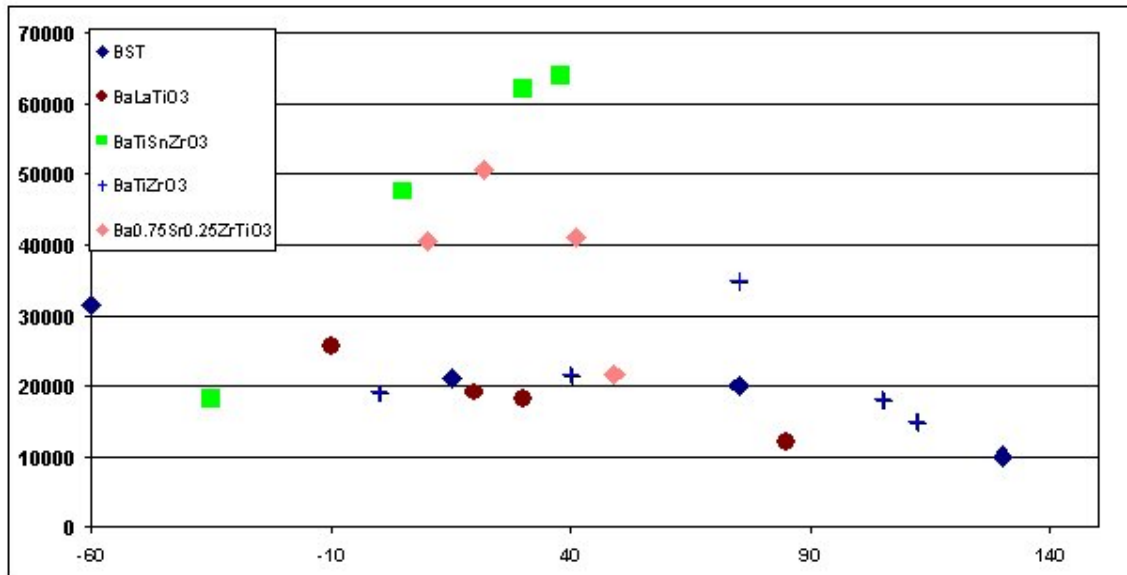


Bild 2.4: Zusammenhang zwischen Curietemperatur und DK_{max} ausgewählter BaTiO₃-Werkstoffe (Literaturlauswertung)

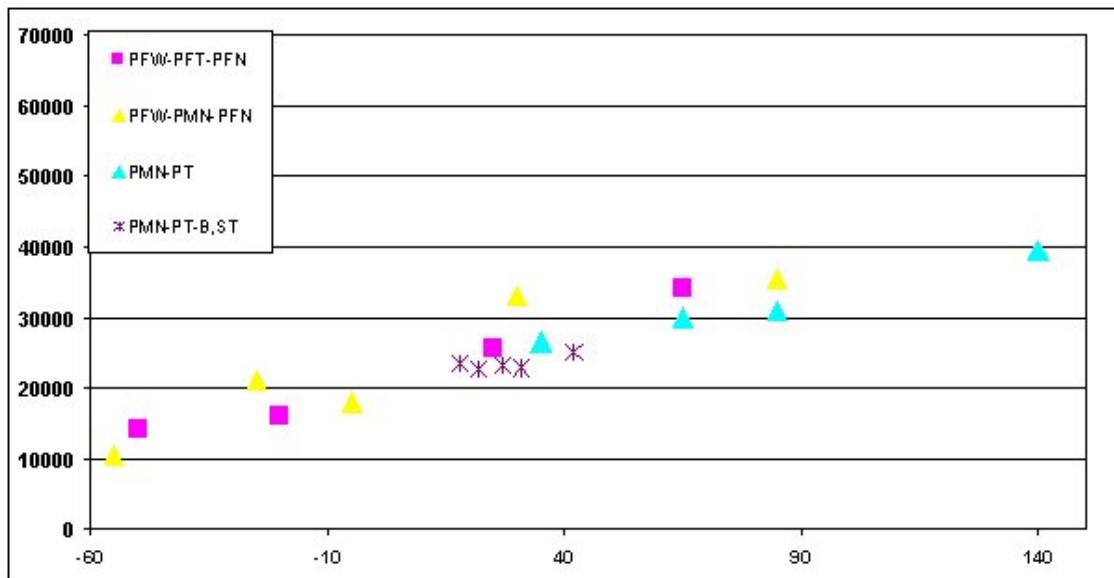


Bild 2.5: Zusammenhang zwischen Curietemperatur und DK_{max} ausgewählter PbB'B''O₃-Werkstoffe (Literaturlauswertung)

Aus der Sicht des Anwenders von keramischen Werkstoffen für Kondensatoren ist neben den Temperatureigenschaften besonders das Frequenzverhalten zu berücksichtigen. Die Eigenschaften keramischer Dielektrika sind im Bezug auf ihre Frequenzabhängigkeit in der Literatur beschrieben. Tabelle 2.1 zeigt das typische Verhalten von HDK Materialien, mit einer Dielektrizitätszahl von 5 bis etwa 10000 im Vergleich. Bild 2.6 zeigt die Abhängigkeit von der Frequenz in einer Grafik. Man erkennt, dass es im Bereich hoher Frequenzen um 1-10 GHz zu einer deutlich sichtbaren Veränderung der Eigenschaften kommt. Zu diesen reinen Materialeigenschaften muss noch das Verhalten eines Kondensators als ausgedehntes Bauelement beachtet werden. Wegen der hohen Dielektrizitätszahl ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem Kondensator viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit und es kommt daher auch bei Abmessungen von einigen mm und Frequenzen im GHz-Bereich zu stehenden Wellen im Kondensator.

Frequenz	Steatit Bodies		Titania and Titanate bodies			
	AlSiMag A-35		TAM TICON BS		Tam Ticon B	
	ϵ'/ϵ_0	$\tan\delta \cdot 1e4$	ϵ'/ϵ_0	$\tan\delta \cdot 1e4$	ϵ'/ϵ_0	$\tan\delta \cdot 1e4$
100	6,1	150	8700	230	1240	360; $\tan\delta=0,036$
1.000	5,96	100	8500	200	1200	130
10.000	5,89	70	8200	230	1170	150
100.000	5,86	50	8100	90	1153	120
1 MHz	5,84	38	8000	48	1143	105
10 MHz	5,8	35	8000	98	1140	75
100 MHz	5,75	37	8000	400	Keine Messdaten	Keine Messdaten
300 MHz			7000	900	1100	500
3 GHz	5,6	41	2000	5000	600	3000
10 GHz			200	4000	150	5000
25 GHz	5,36	58			100	6000; $\tan\delta=0,6$
	Magnesium silikate		79%Barium 21% Strontium titanate (Titanium Alloy fired at Lab. Ins. Res.)		Barium Titanate (Titanium Alloy; fired at Lab Ins. Res.)	

Tabelle 2.1: Typisches Verhalten von HDK Materialien⁴

⁴ Quelle Arthur von Hippel. Dielectric Materials and Applications; 1954.Reprint 1995, ISBN 0-89006-805-4.

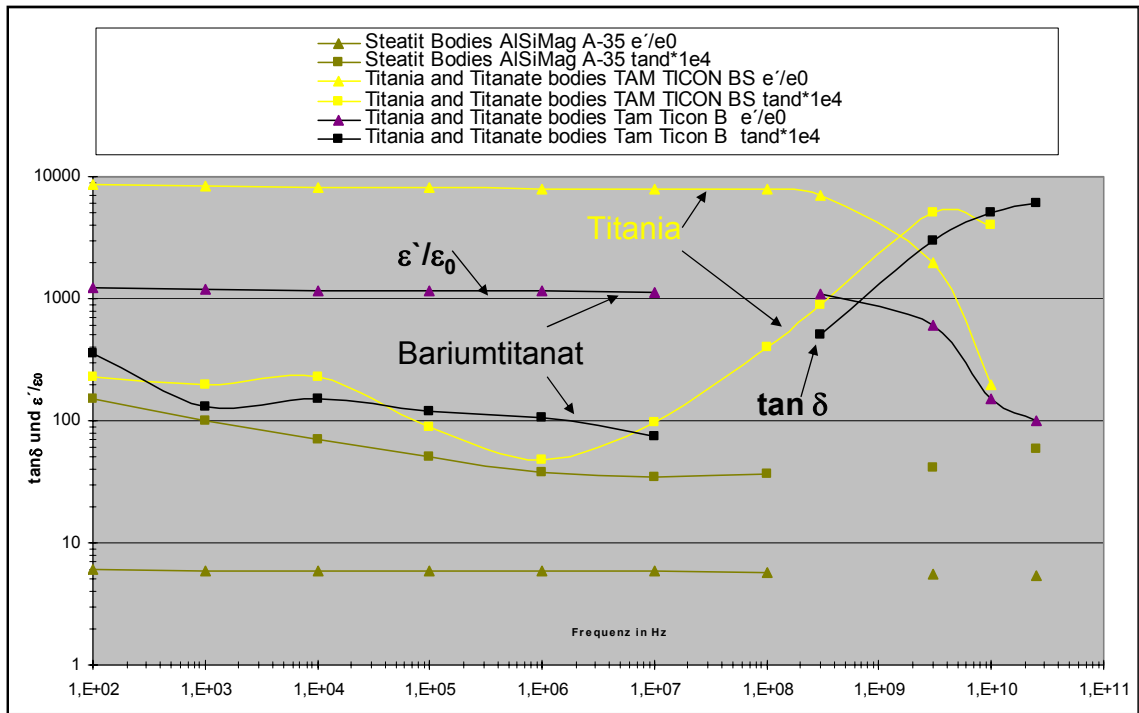


Bild 2.6: Daten aus Tabelle 2.1 als Grafik dargestellt

2.1 Bekannte Konstruktionen

Auf dem Markt hat sich eine Vielzahl von Anbietern etabliert, die spezifische Produkte für verschiedenste Anwendungen liefern. Der Frequenzgang der Einfügungsdämpfung liegt jedoch bauartbedingt meist weit hinter der Performance der CONEC-Filter, was durch eine besondere Planartechnik der CONEC Filter bedingt ist. Daher würde ein neuer Werkstoff, verbunden mit dem speziellen Design als Planarfilter einen großen Wettbewerbsvorteil mit sich bringen.

2.2 Bekannte Verfahren

Das Dickschichtverfahren für Planarfilter ist seit Jahren bekannt und wird für dieses Produkt angewendet.

Für die Steckerherstellung werden die seit vielen Jahren bewährten Materialien und Spritzgießteile verwendet. Kontakte werden gedreht und vergoldet. Spritzgießteile werden in Kunststoffspritzgießmaschinen hergestellt.

2.3 Verwendete Fachliteratur und genutzte Informationsdienste

Fachliteratur:

Quelle Arthur von Hippel. Dielectric Materials and Applications; 1954.Reprint 1995, ISBN 0-89006-805-4.

Software

Microcap 7 Spectrum-Soft.com

Microsoft Office

Literatursuche :

Internet

Datenbanken der FH-SWF

3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die beiden beteiligten Firmen haben sich ihrerseits kompetente Partner aus dem Bereich F+E gesucht, da sie aus eigener Kraft diese Entwicklung nicht leisten können.

3.1 PI Ceramic und IKTS

Die Fa. PI CERAMIC hat mit dem IKTS in Dresden ihre langjährigen Kontakte zur Forschung genutzt.

3.2 Conec und Uni GH Paderborn / FH-SWF

CONEC hat seine langjährigen Verbindungen zur FH-SWF in Soest genutzt.

4 Erzielte Ergebnisse

4.1 Aus der Zusammenarbeit PI Ceramic und IKTS

Inhalt der Zusammenarbeit von PI Ceramic und IKTS waren die Lösung der werkstoffwissenschaftlichen Aufgaben und der damit verbundenen technologischen Probleme zur Werkstoffherstellung.

Die Durchführung anspruchsvoller Werkstoffentwicklungen erfordert von allen Beteiligten streng koordiniertes und konzertiertes Arbeiten, um über Suchforschung, Kleinstversatz des Forschungslabors im Gramm-Bereich und Reproduktion im Industrielabor mit Materialmengen von einigen 100 Gramm bis zu wenigen Kilogramm zielgerichtet, effektiv und letztendlich erfolgreich zu agieren. Die große Anzahl unterschiedlicher Versätze ist dabei zusätzlich oft mit Variationen der technologischen Randbedingungen kombiniert, beginnend bei der Pulvervor- und -aufbereitung, über Formgebung, thermische Prozesse bis zur Metallisierung. Die Gefahr, dabei in falsche Richtungen zu gelangen, geplante Zeitachsen weit zu überziehen bis hin zum ungenügenden Erkennen von Trends und Erfolg versprechenden Richtungen, ist nicht unerheblich.

Die im Folgenden beschriebenen Arbeiten und Ergebnisse wurden auf der Basis permanent durchgeführter Konsultationen und Abstimmungen zwischen den Entwicklern des IKTS und von PI Ceramic zu Zielrichtungen, Versatzgrößen, Reproduktionen und dem detaillierten Abgleich aller Ergebnissen erzielt. Im IKTS wurden wenige Tabletten (Standardmaß zur Bemusterung \varnothing 10 mm x 1,0 mm) aus den gemeinsam festgelegten Werkstoffversätzen gefertigt, teilweise reproduziert und dann bei PI Ceramic in Kleinversätzen wiederholt und z.T. beim IKTS bewertet, bis sich Ergebnisse manifestierten.

Zur Erleichterung der Komponentenauswahl wurde ein eigens entwickeltes Rechenprogramm eingesetzt, das auf der Basis von real gemessenen TKc-Kurven bzw. generierten Gauß'schen Glockenkurven die resultierenden TKc-Kurven von Mischungen mehrerer Komponenten errechnen kann unter

gleichzeitiger Einbeziehung einer Variation der Anteile der Einzelkomponenten. Die Auswertung koppelt die Höhe der bei Raumtemperatur erreichten DK_{20} -Werte mit der Abweichung der Kapazität über einen bestimmbaren Temperaturbereich.

4.1.1 Auswahl von Komponenten

Erste Arbeiten zur Synthese von Ausgangsverbindungen konzentrierten sich im Rahmen dieses Projektes auf das System Bleimagnesiumniobat – Bleititanat – Bariumtitanat (PMN-PT-BT), in dem entsprechend einer Arbeit von Syamaprasa et al. Werkstoffe mit DK_{20} -Werten >10.000 und sehr flachen Temperaturabhängigkeiten beschrieben werden (siehe Bild 4.1).

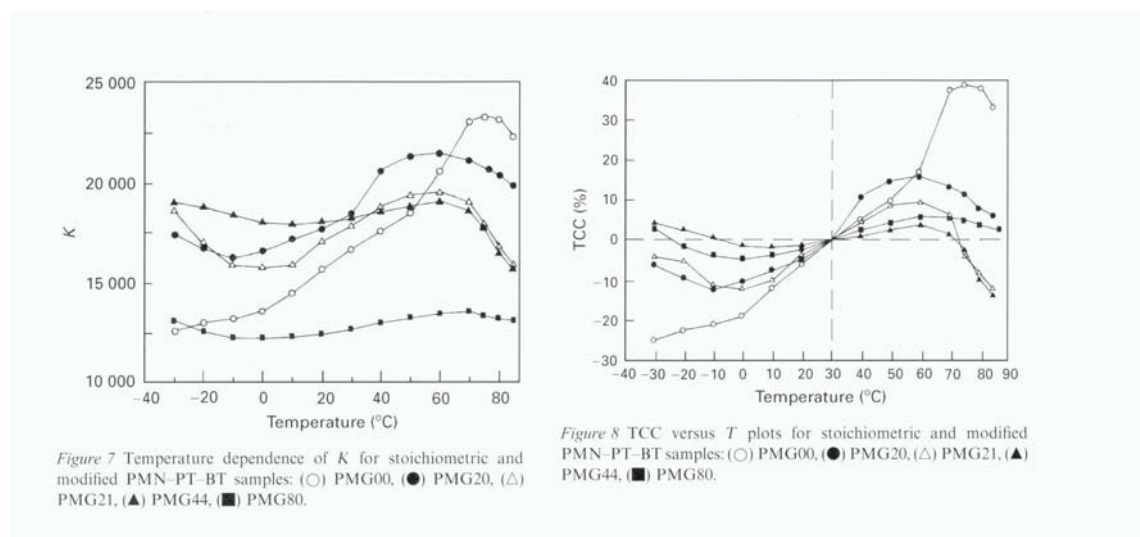


Bild 4.1: TKc -Kurven (links) und $\Delta C/C_{20^{\circ}C}$ -Kurven (rechts) im System PMN-PT-BT nach U. Syamaprasad et al.

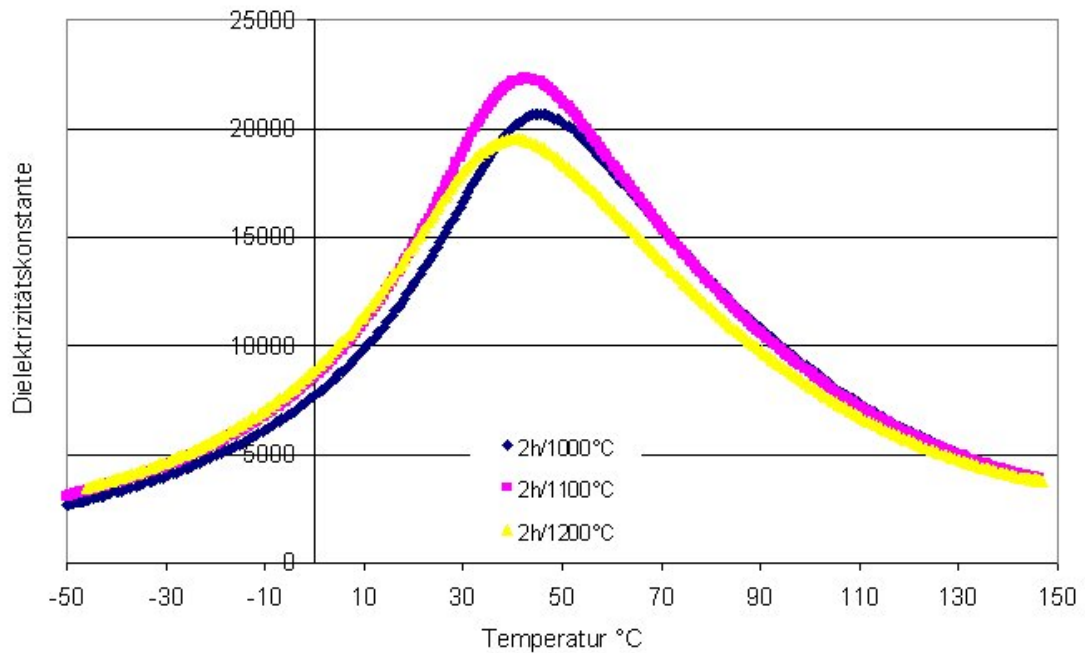


Bild 4.2: TKc-Kurven im System PMN-PT-BT, hergestellt nach IKTS – Technologie

Weitere Verbindungen mit für die Anwendung in Filtersteckverbindern viel versprechenden Eigenschaften werden im System Bleisenniobat – Bleisewolfram – Erdalkalikulferwolfram (PFN-PFW-McuW, M: Ca, Ba) im US-Patent 4544644 unter dem Titel "High dielectric constant type ceramic" beschrieben. Das Interessante an diesen Verbindungen besteht in der Kombination einer sehr hohen Dielektrizitätskonstanten bei Raumtemperatur von > 30.000 mit Sintertemperaturen < 1.000°C, woraus sich das Potenzial zur gezielten Einstellung von Heterogenitäten ergeben könnte.

Tabelle 4.2: Überblick über in der Patentschrift beschriebene Versätze mit besonders hohen DK-Werten

	PFN / mol-%	PFW / mol-%	MCW / mol-%	MnO / wt-%	Ts / °C	DKmax
V7	85	12	3 (Ca)		900	29.500
V24	85	12	3 (Ca)	0,25	900	32.500
V44	80	18	2 (Ba)		900	33.000
V61	80	18	2 (Ba)	0,25	900	34.000

Die eigenen Keramiken auf dieser Werkstoffbasis konnten die genannten Werte nicht in vollem Umfang bestätigen (vgl. Bild 4.3), dennoch ist der Einsatz dieser Verbindungen als niedrig sinternde Komponenten in Mischsystemen geplant.

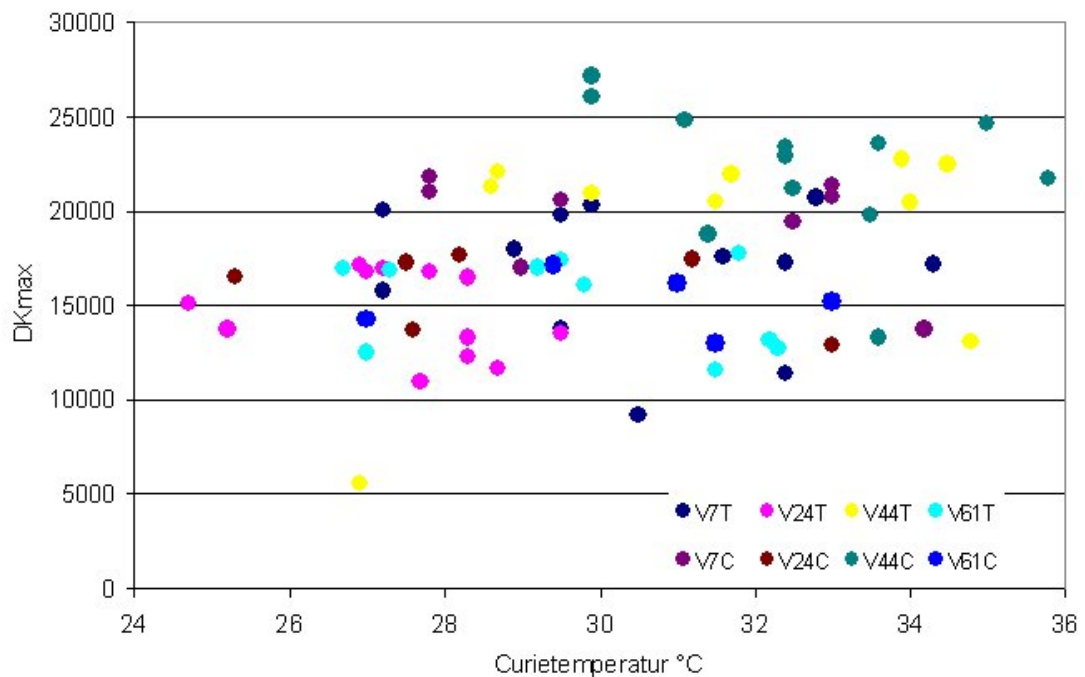


Bild 4.3: Übersicht über DKmax-Werte für PFN-PFW-MCuW – Keramiken, hergestellt nach IKTS-Technologie

Verbindungen der allgemeinen Zusammensetzung BaTiSnZrO_3 (BTSZ) ermöglichen über eine Variation des Ti / Sn / Zr – Verhältnisses eine Verschiebung der Curietemperatur von 125°C beginnend für reines BaTiO_3 zu niedrigeren Temperaturen. Interessanterweise ist diese Erniedrigung von T_c verbunden mit einem deutlichen Anstieg der DK_{max} – Werte. Diese Werte sind wiederum stark von der Synthese der Verbindungen abhängig, wie die Kurven in Bild 4.4 und 4.5 verdeutlichen. Einen deutlichen Vorteil bringt die Totalsynthese. An derartig zusammengesetzten Keramiken konnten DK_{max} bis 50.000 gemessen werden.

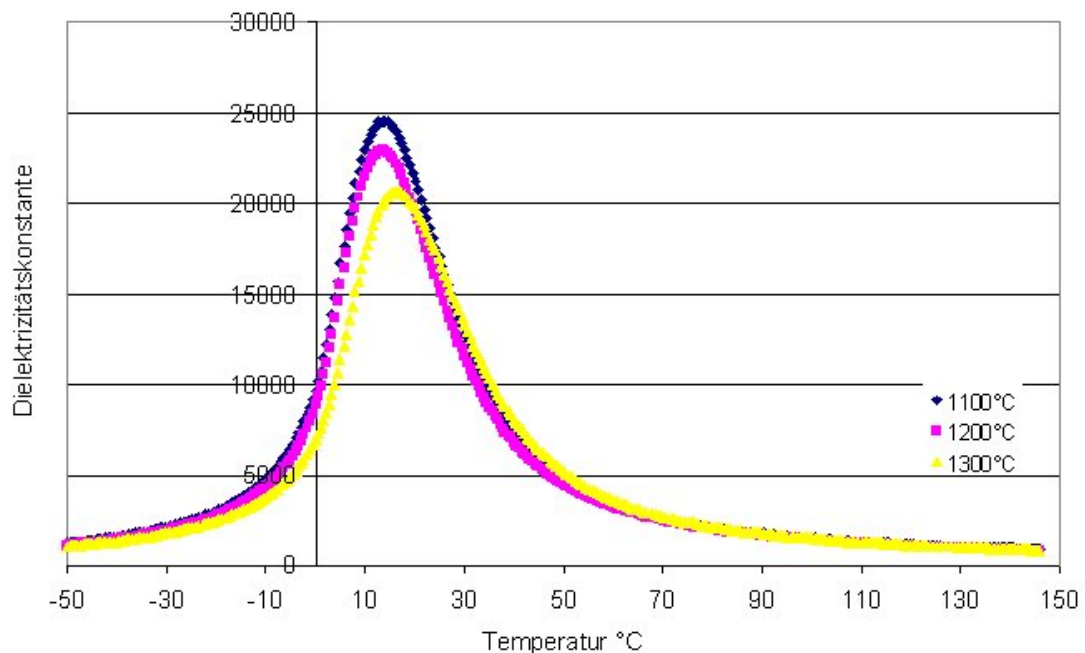


Bild 4.4: TKc-Kurven von BaTiSnZrO_3 synthetisiert unter Verwendung von vorgebildetem BaTiO_3

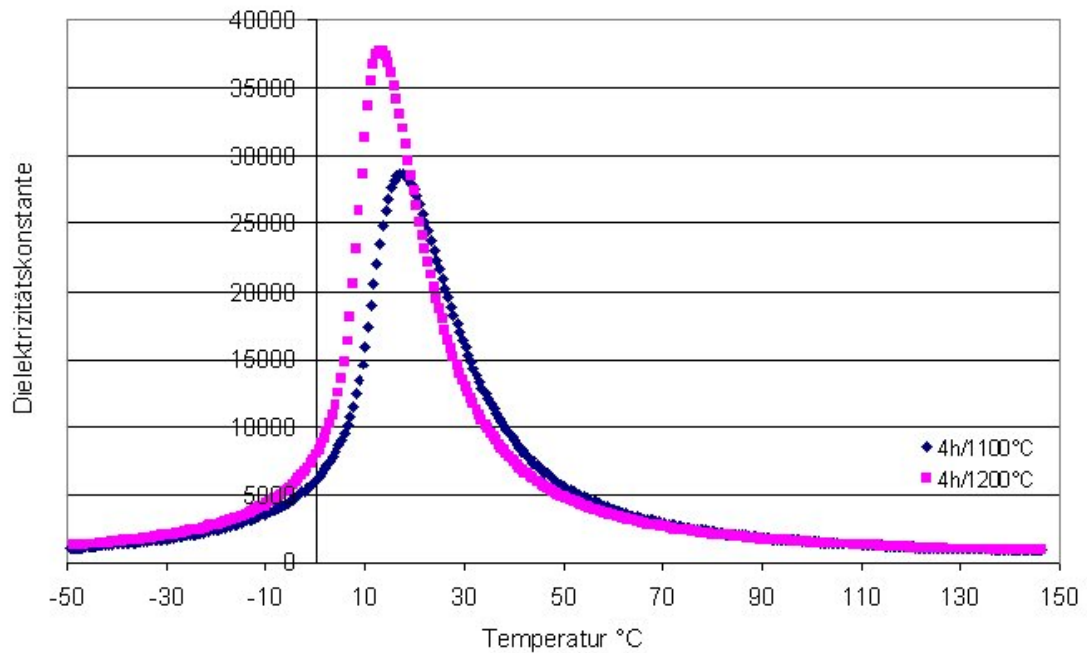


Bild 4.5: TKc-Kurven von BaTiSnZrO₃ synthetisiert als Totalsynthese

Neben der Auswahl von vorgebildeten Komponenten kommt auch der Rohstoffqualität eine immense Bedeutung bei der Einstellung gewünschter Eigenschaftsprofile zu. Nach Bestätigung der Literaturwerte bestand deshalb eine Aufgabe darin, den Einfluss unterschiedlicher, industriell verfügbarer BaCO₃- Pulver auf die dielektrischen Eigenschaften zu untersuchen.

4.1.2 Herstellung von Keramiken unter Verwendung von Glattscherben

Ein wesentlicher Schwerpunkt der weiteren Arbeit bestand in der Herstellung und Charakterisierung der Eigenschaften von Glattscherben und von Mischungen, hergestellt unter Verwendung derartiger Glattscherben.

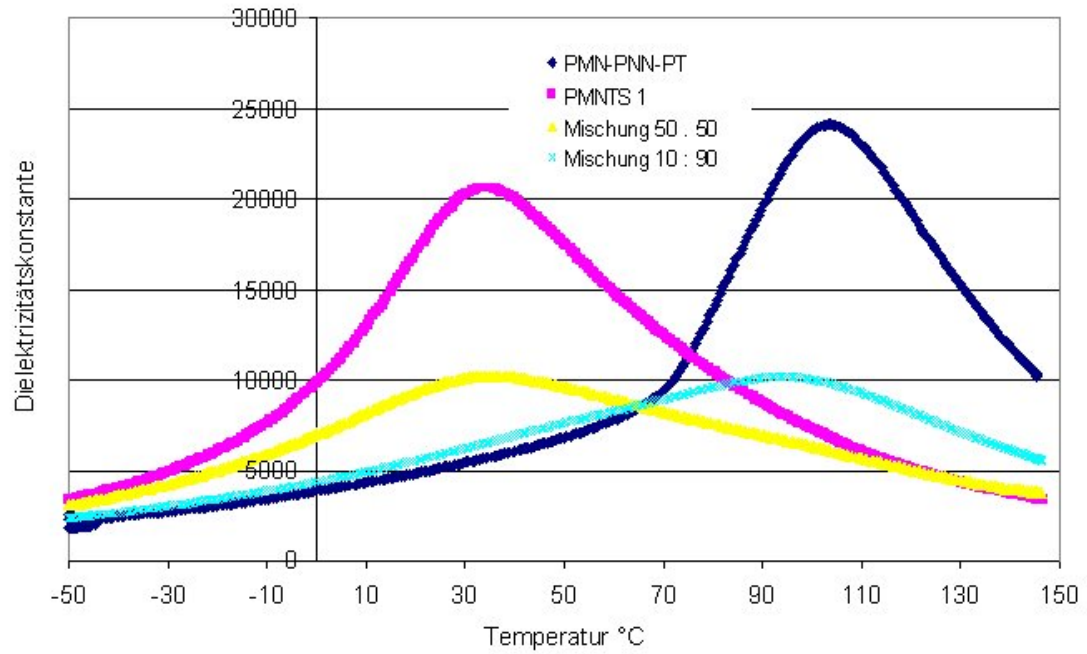
4.1.2.1 Mischungen von Bleiperowskitpulvern mit Bleiperowskit-Glattscherben

Bild 4.6: TKc-Kurven von Bleiperowskit-Keramiken, hergestellt aus Mischungen von Glattscherben und Pulvern (gelbe und türkisfarbene Kurve) im Vergleich zu den TKc-Kurven der reinen Verbindungen (blau, pink).

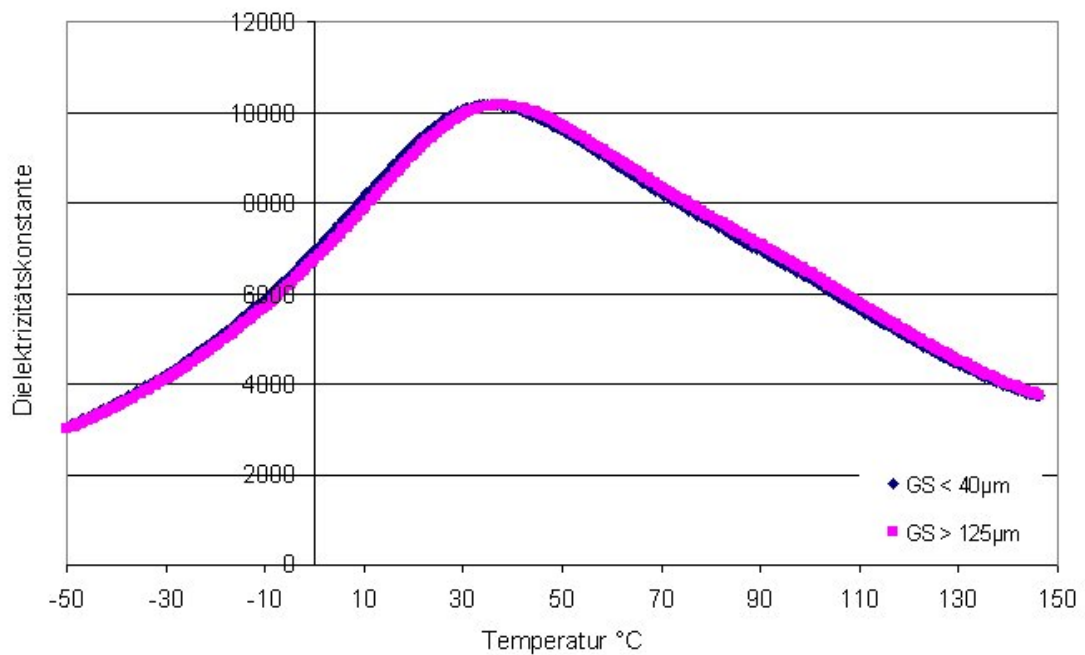


Bild 4.7: TKc-Kurven von Bleiperowskit-Keramiken, hergestellt aus Mischungen von Glattscherben und Pulvern in Abhängigkeit von der Größe der Glattscherben

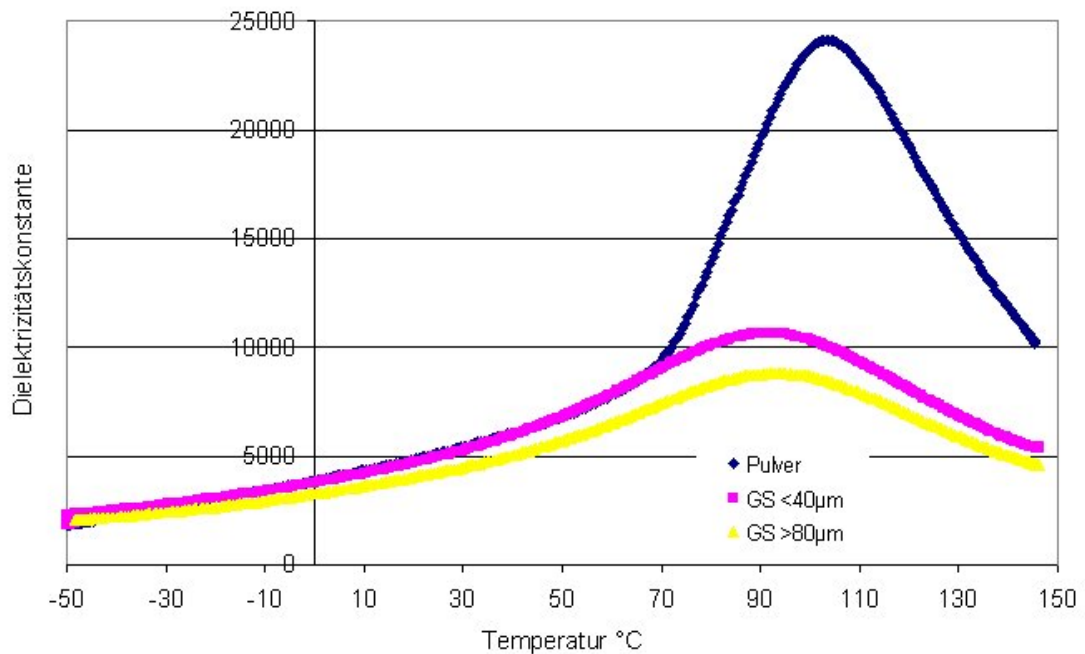


Bild 4.8: TKc-Kurven von Bleiperowskit-Keramiken, hergestellt aus Mischungen von Glattscherben und Pulvern im Vergleich zu einer aus einem Pulver hergestellten Keramik

Aus TKc-Kurven lassen sich folgende prinzipielle Aussagen zum Reaktionsverlauf in Pulvermischungen ableiten: Jede individuelle Curietemperatur steht für die Umwandlung einer ferroelektrischen in eine paraelektrische Phase, d.h. immer wenn in einem Kurvenzug mehrere Maxima auftreten, sind diese an Phasenumwandlungen gebunden. Liegen nun in einer Keramik mehrere Phasen mit sich unterscheidenden Elementarzellen nebeneinander vor, müssen in den TKc-Kurven dieser Keramik mehrere Maxima auftreten. Hat sich dagegen nach der Sinterung in der Keramik eine neue Verbindung gebildet, weist diese einen neuen Phasenübergang und damit eine neue Curietemperatur auf.

Bei der Suche nach den Ursachen für das Nichtauftreten der Glattscherben in den Mischungen wurden sowohl Untersuchungen zum Einfluss der Größe der eingesetzten Glattscherben als auch zur Art und Dauer der Mischung der Glattscherben mit den Pulvern unternommen.

Eine Erklärung für das Nichtauftreten der Glattscherben in den Mischungen könnte im Gefüge derartiger Keramiken liegen. Aus diesem Grund wurden sowohl Bruchflächen als auch Schliiffbilder angefertigt und charakterisiert. Die REM-Bilder Bild 4.9 bis Bild 4.10 zeigen einen deutlichen Korngrößenunterschied aufgrund der unterschiedlichen Primärkorngrößen der Ausgangsmaterialien, sie zeigen aber auch gleichzeitig, dass die Porosität in allen Fällen vergleichbar ist und damit nicht als Ursache für den Abfall der dielektrischen Eigenschaften herangezogen werden kann.

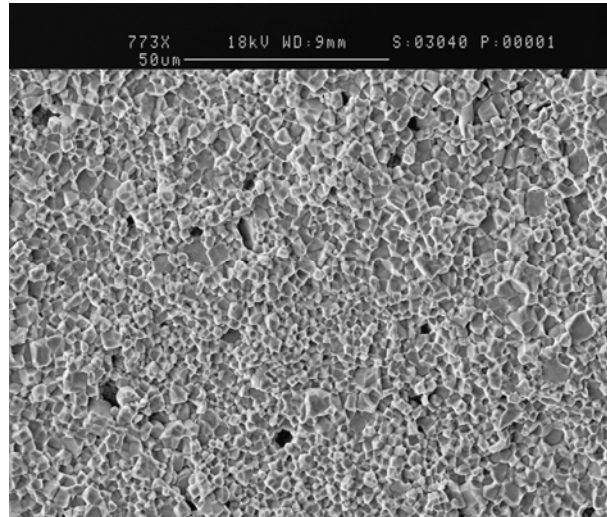


Bild 4.9: Bruchfläche einer PMN-PNN-PT-Keramik, hergestellt aus Pulver

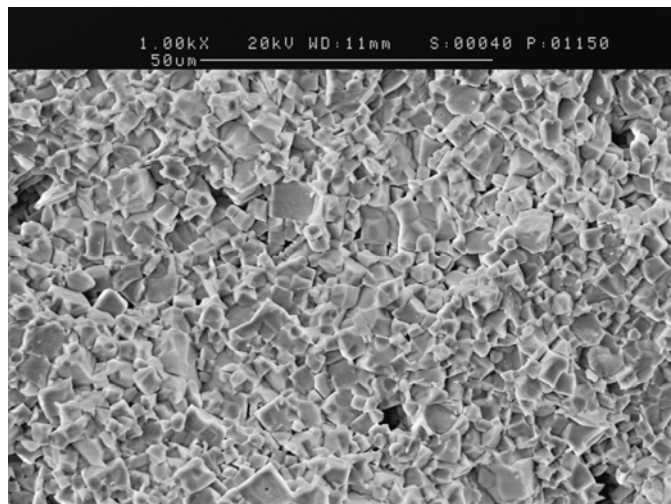


Bild 4.10: Bruchfläche einer PMN-PNN-PT-Keramik, hergestellt aus Glattscherben

4.1.2.2 Mischungen von Bariumtitanatpulvern mit Bariumtitanat-Glattscherben

Analoge Versuche an BaTiO_3 -basierten Werkstoffen ergaben ein anderes Bild. Danach zeigten die aus den entsprechenden Glattscherben hergestellten Keramiken annähernd das Potenzial der analogen Keramiken aus Pulvern.

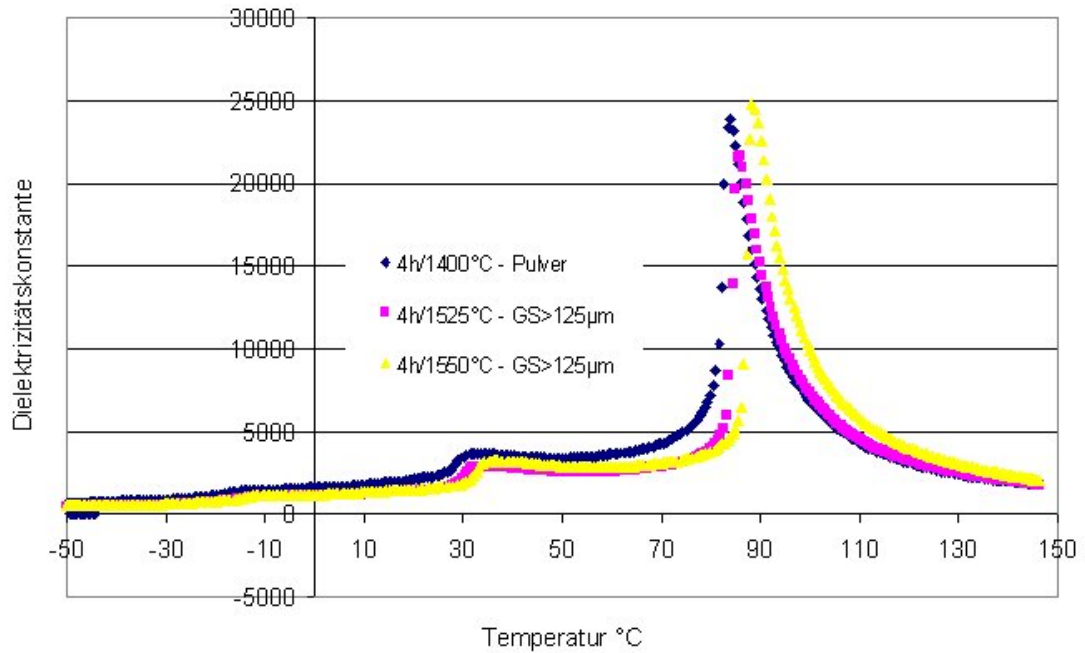


Bild 4.11: TKc-Kurven von BaTiO_3 -Keramiken, hergestellt aus Pulvern und Glattscherben

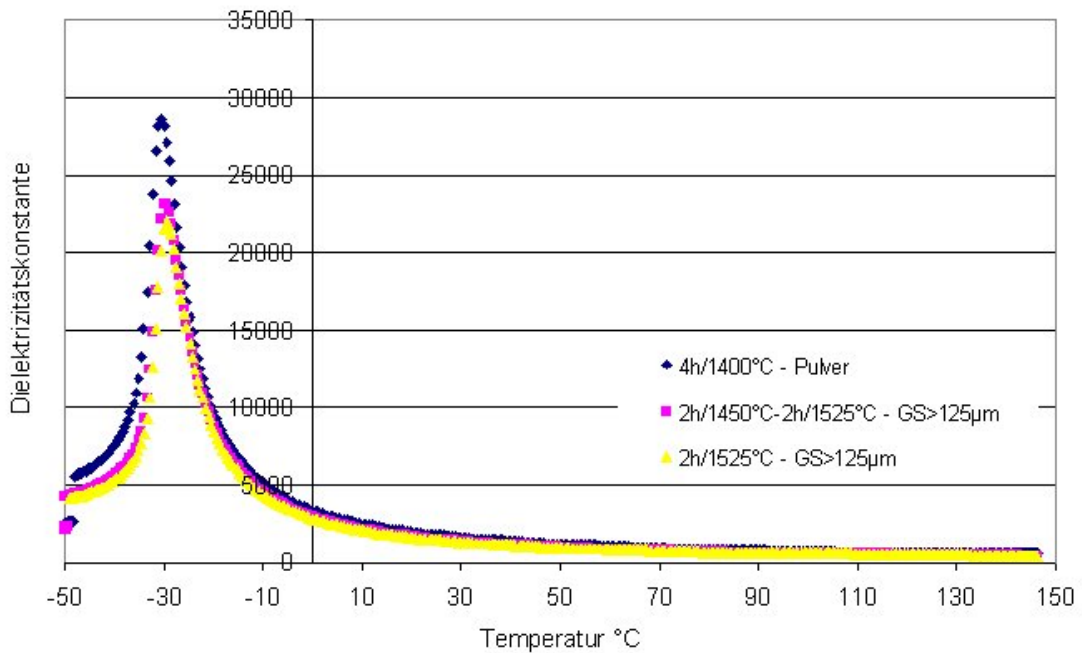


Bild 4.12: TKc-Kurven von BaTiO₃-Keramiken, hergestellt aus Pulvern und Glattscherben

4.1.3 Modifikation bekannter X7R-Werkstoffe

Ein weiteres Teilgebiet der Arbeiten befasste sich mit der Modifikation bekannter X7R-Werkstoffe durch den Einsatz von unterschiedlichen PZT-Zusammensetzungen und verschiedenen BaTiO₃-Komponenten. Bei diesen Untersuchungen konnten zwar Werkstoffe mit abgeflachten TKc-Kurven erhalten werden, die Höhe der erreichten DK₂₀-Werte lag dabei allerdings weit unter den geforderten Projektzielen, so dass auch diese Arbeiten nicht zum gewünschten Erfolg führten und nicht weiter verfolgt wurden.

4.1.4 Skalierung der Heterogenität

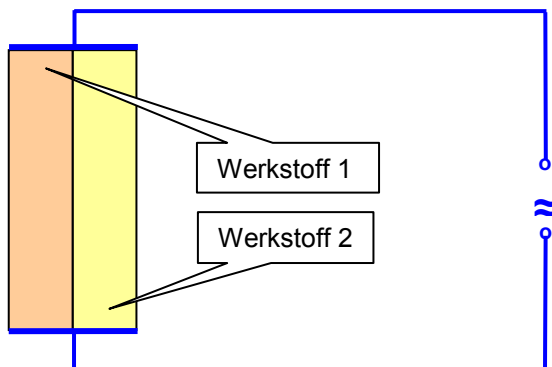


Bild 4.13: Prinzipskizze zur Skalierung der Heterogenität durch Zusammenbringen zweier unterschiedlich zusammengesetzter Werkstoffe

Nach diesen zuvor erzielten Zwischenergebnissen wurde versucht, durch eine Skalierung der Heterogenität eine Verbreiterung der TKc-Kurven zu erzielen. Aus der Literatur ist bekannt, dass durch das Zusammenfügen von in Folienform vorliegenden Werkstoffen unterschiedlicher Zusammensetzungen derartige Resultate erzielbar sind. Im vorliegenden Fall wurden in ersten Experimenten Presslinge gefertigt, in denen die unterschiedlichen Phasen räumlich getrennt vorlagen, wie schematisch in Bild 4.13 dargestellt ist. Die anschließende Sinterung erfolgte unter Erhalt des Verbundes. Kontaktiert wurden die Ober- und Unterseite des Verbundes derart, dass beide Werkstoffe gleichzeitig von der gleichen Elektrode kontaktiert werden und somit bei der Bestimmung der Kapazität eine integrale Summenkapazität über beide Komponenten bestimmt wird.

Auf diese Weise konnten unter Verwendung von zwei Bleiperowskitwerkstoffen die in Bild 4.14 und Bild 4.15 gezeigten TKc-Kurven bzw. die $\Delta C/C_{20^\circ\text{C}}$ -Kurven erhalten werden.

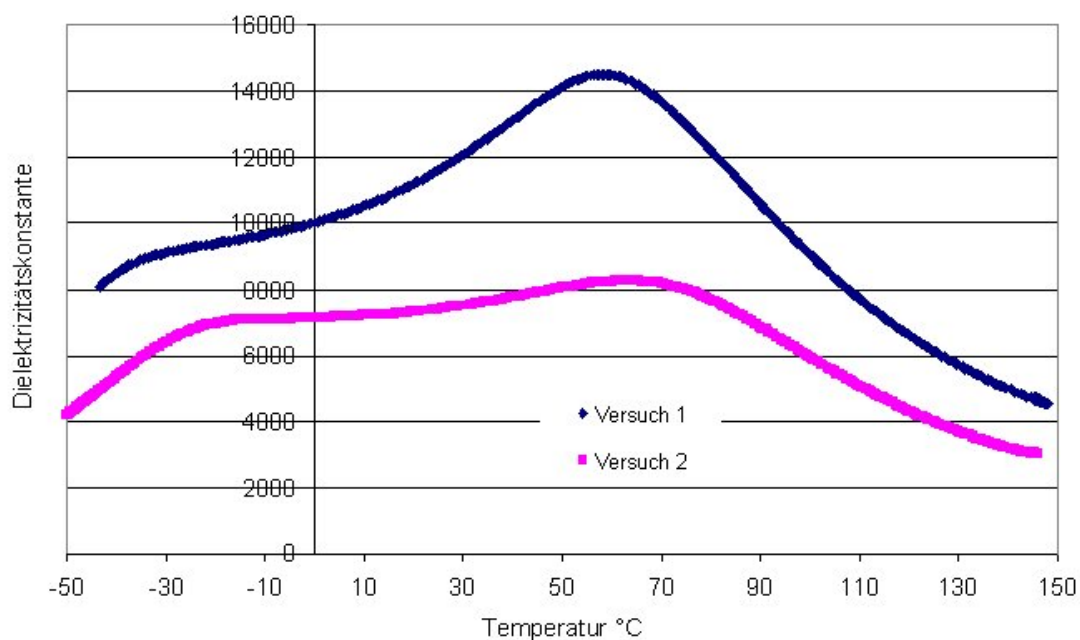


Bild 4.14: TKc-Kurven einer Mischung aus Komponente 1 und Komponente 2, gemessen in Parallelschaltung

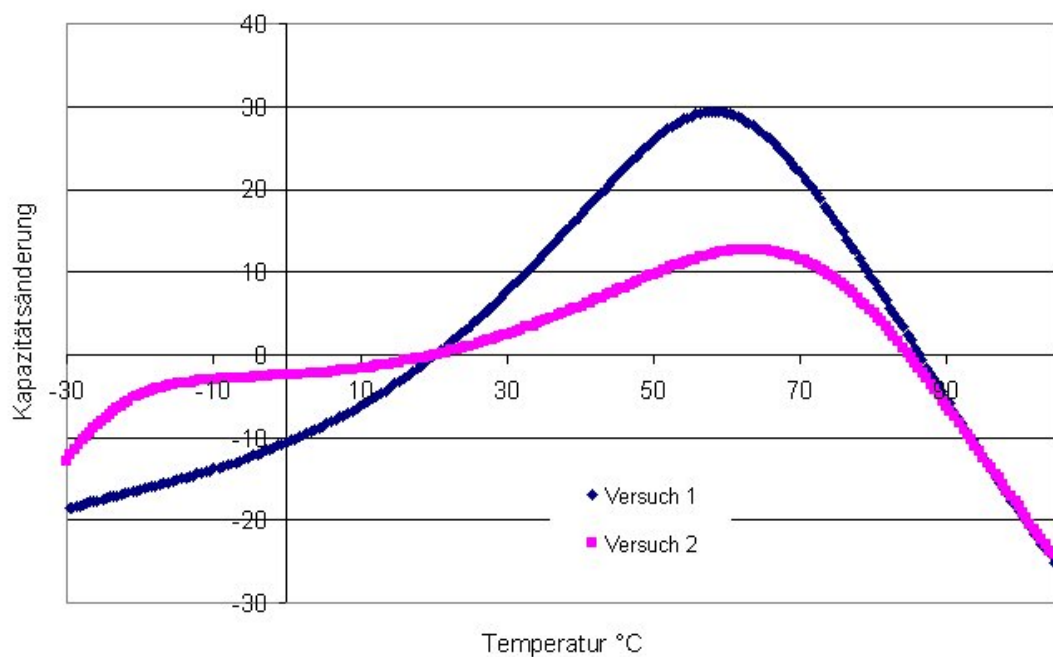


Bild 4.15: $\Delta C/C_{20^\circ\text{C}}$ -Kurven einer Mischung aus Komponente 1 und Komponente 2, gemessen in Parallelschaltung (Temperaturbereich: $-30^\circ\text{C} \dots 105^\circ\text{C}$)

Mit dieser Werkstoffkombination in dieser speziellen Anordnung lag eine Keramik vor, die bei Raumtemperatur über eine Dielektrizitätskonstante von 7.400 verfügte gepaart mit einer Änderung der Kapazität $\Delta C/C_{20^\circ\text{C}}$ von -25 % bis 12 % über einen Temperaturbereich von -30°C bis 105°C. Damit lag das Erreichen des reduzierten Projektzieles in realistischer Größe. Gleichzeitig zeigten diese Versuche den weiteren Weg auf, der sich in der Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in einer für den vorliegenden Anwendungsfall realisierbaren Ausführungsform umsetzen musste.

4.1.5 Herstellung von Sprüh- und Wirbelschichtgranulaten

Durch alle bisherigen Ergebnisse zeichnete sich ab, dass die Projektzielstellung nur durch Realisierung eines hohen Anteils von Parallelschaltungen unterschiedlicher Komponenten im Bauteil möglich ist. Da dies aufgrund der Bauteilauslegung nicht durch die Kombination von Folien erfolgen kann, musste nach einem anderen Weg gesucht werden, dieses Funktionsprinzip in einen Filterstecker umzusetzen. Dazu boten sich Granulate an, die von ihrer Primärgröße deutlich über dem Bereich der Reaktionszonen, bedingt durch die Diffusion während der Sinterung, liegen mussten, die aber wiederum auch klein sein mussten im Vergleich zur Dicke des fertigen Planarfilters. Gleichzeitig mussten diese Granulate mechanisch so stabil sein, dass sie nach dem Preßvorgang als Individuen im Grünkörper erhalten bleiben.

Dazu wurde unter Verwendung von PZT-Pulvern als Modellsubstanz eine Entwicklung im IKTS gestartet, die zur Herstellung von mechanisch sehr festen Wirbelschichtgranulaten führte. Diese Granulate wurden in mehreren Fraktionen hergestellt, wie in Bild 4.16 gezeigt, und in dieser Form in Versätze durch Kombination mit Wirbelschichtgranulaten (WS-Granulate) anderer Komponenten eingebracht. Die Größe der Granulate im linken Teil des Bildes liegt im Bereich $< 200 \mu\text{m}$, im mittleren Teil bei $250 - 315 \mu\text{m}$ und im rechten Teil bei $400 - 500 \mu\text{m}$. Unter Verwendung der PZT-Granulate konnte gezeigt werden, dass selbst die kleinsten Granulate nach dem Pressen im Grünkörper erhalten bleiben und auch nach der Sinterung in der Keramik wieder zu finden sind.

Aufbauend auf diesen Resultaten wurden 3 Komponenten auf der Basis komplexer Bleiperowskite mit Curietemperaturen im Bereich von 0°C (K1), 75°C (K2) und 125°C (K3) für die Herstellung von Wirbelschichtgranulaten ausgewählt. Grundvoraussetzung dafür war die Herstellung einer größeren Pulvermenge von mindestens 2 kg.

Die Wirbelschichtgranulate der 3 Verbindungen lagen in 3 Größenfraktionen von beginnend bei 63 µm bis > 315 µm vor. Damit konnten Versuche zur gezielten Einstellung der Heterogenität durch Variation der Massenanteile der Einzelverbindungen und der Größe der eingesetzten Granulate vorgenommen werden.

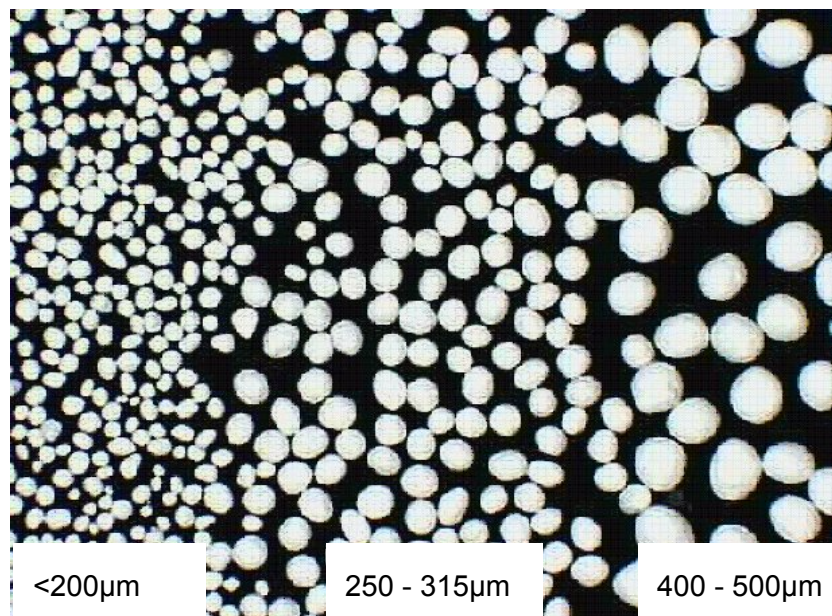


Bild 4.16: PZT-WS-Granulate unterschiedlicher Größen



Bild 4.17: Oberfläche einer gesinterten Keramik, hergestellt aus WS-Granulaten unterschiedlicher Komponenten

4.1.6 Granulate von Werkstoffen auf Basis komplexer Bleiperowskite

Erste Versuche zeigten sehr schnell, dass nach der Sinterung die Einzelkomponenten im Gefüge gut sichtbar sind. Die dielektrischen Messungen bestätigten das Vorliegen der individuellen Bestandteile in den gesinterten Keramiken, was sich durch das Auftreten mehrerer Maxima in den TKc-Kurven der Keramiken zeigt. Diese Maxima liegen im Bereich der Curietemperaturen der Ausgangskomponenten. Die Kurven in Bild 4.18 und Bild 4.19 verdeutlichen, dass die Verteilung der Komponenten in den Keramiken über die Dicke homogen ist.

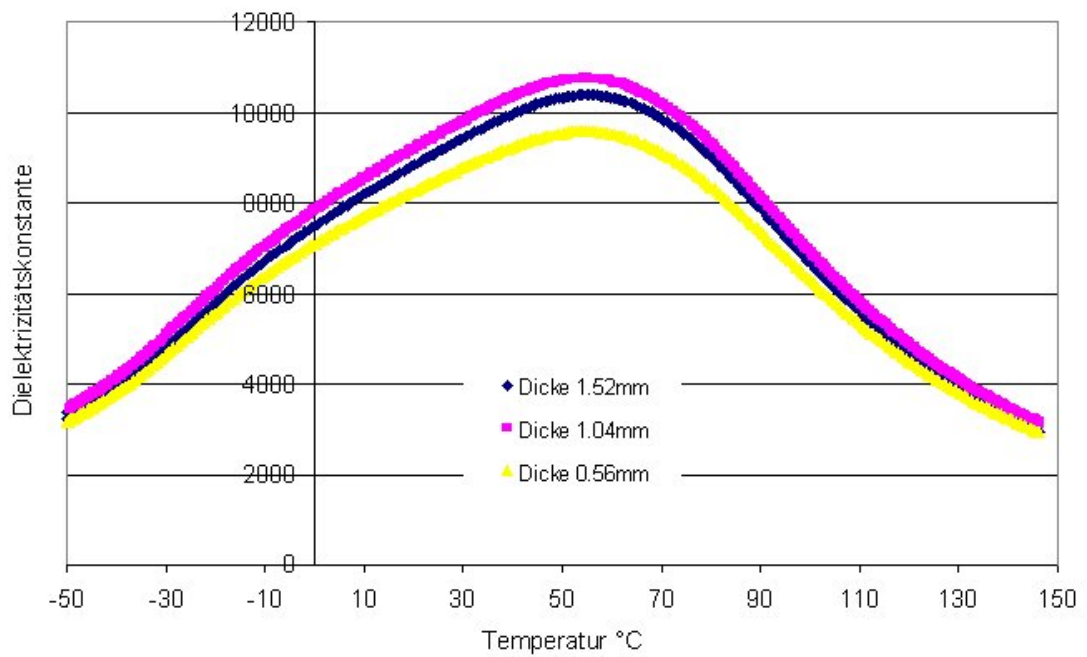


Bild 4.18: TKc-Kurven von Keramiken, hergestellt aus WS-Granulaten zweier Komponenten in Abhängigkeit von der Dicke der Keramiken

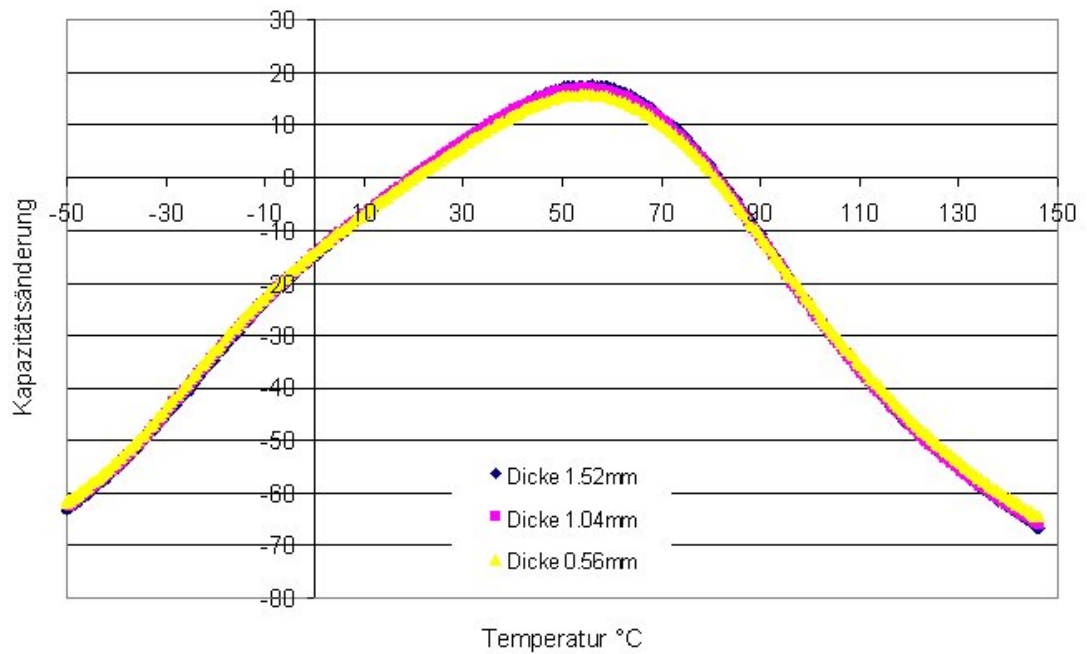


Bild 4.19: $\Delta C/C_{20^\circ C}$ -Kurven von Keramiken, hergestellt aus WS-Granulaten zweier Komponenten in Abhängigkeit von der Dicke der Keramiken

Die TKc-Kurven in den beiden folgenden Bildern verdeutlichen sowohl den Einfluss der Sinterbedingungen als auch der Granulatgröße auf die Mischkristallbildung im untersuchten System K1/K3.

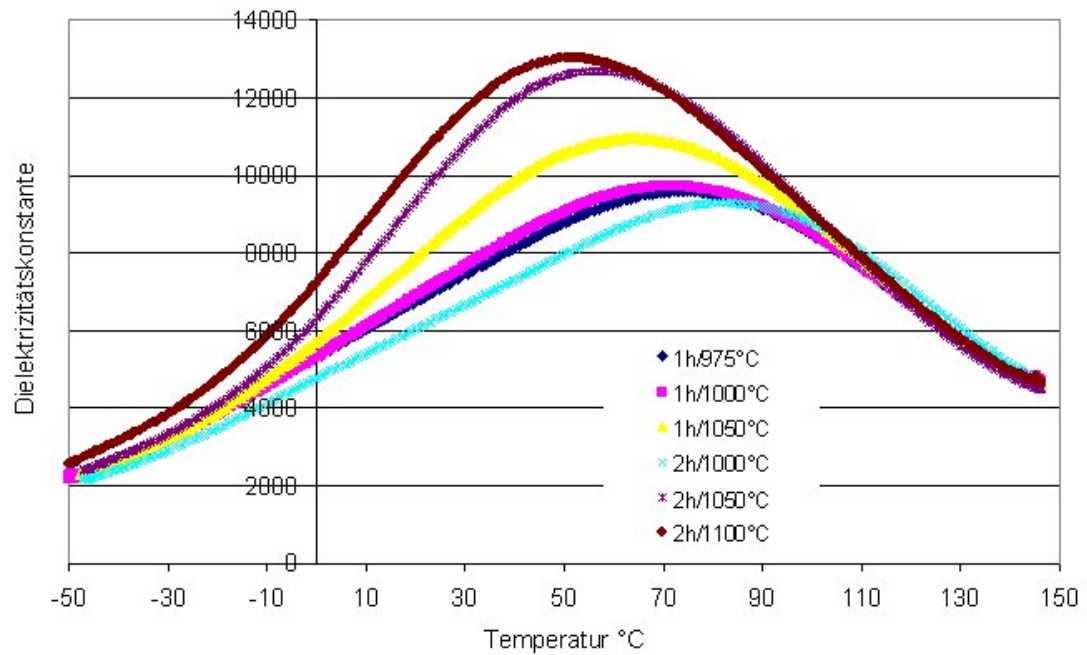


Bild 4.20: TKc-Kurven von Keramiken, hergestellt aus Granulaten mit einer Granulatgröße von 160 – 315µm

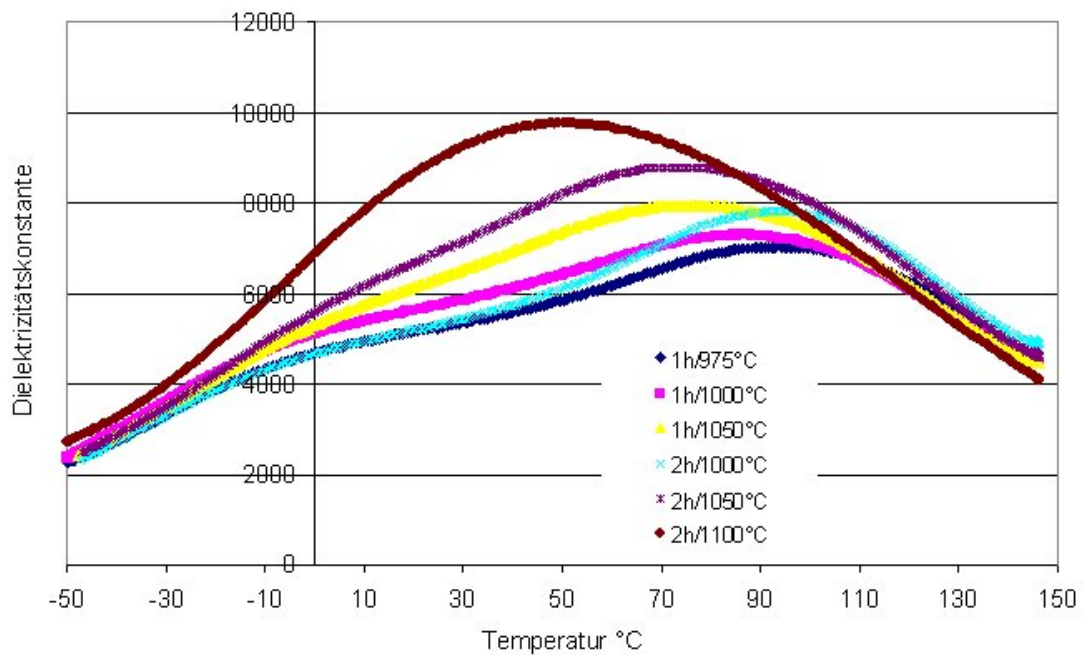


Bild 4.21: TKc-Kurven von Keramiken, hergestellt aus Granulaten mit einer Granulatgröße von 315 – 500µm

Durch eine deutliche Erhöhung des K1 – Anteils in den Keramiken gelingt es, die Kapazitätsänderung über einen wesentlich größeren Temperaturbereich zu minimieren, wobei gleichzeitig die bei Raumtemperatur gemessene Kapazität geringer wird. Durch weitere technologische Variationen können Keramiken hergestellt werden, die bei Raumtemperatur über eine Dielektrizitätskonstante von 6.500 verfügen und ein $\Delta C/C_{20^\circ\text{C}}$ von $\pm 20\%$ über einen Temperaturbereich von -30°C bis 105°C aufweisen.

Gleichzeitig verdeutlichen diese Ergebnisse aber auch, dass die Zielstellung des Projektes mit den ausgewählten Komponenten nicht erfüllbar ist, da die Komponente K1 im negativen Bereich nicht die geforderten Eigenschaften aufweist. Modellrechnungen zeigten, dass dafür eine Verbindung erforderlich ist, die eine Curietemperatur im Bereich von -30°C besitzt gepaart mit einem DK_{max} von >15.000 . Diese Verbindung war bis zum erreichten Projektstand nicht bekannt und musste durch umfangreiche Literaturlauswertung gefunden und experimentell bestätigt werden.

4.1.7 Granulate von Werkstoffen auf Basis BaTiO₃

Neben diesen Granulaten wurden unter dem Gesichtspunkt der Kostenersparnis und der höheren Umweltakzeptanz auch solche auf Basis von BaTiO₃-Werkstoffen hergestellt und analog verarbeitet.

Als erstes stand die Auswahl der Einzelverbindungen. Aufgrund der steileren Kurvenform wurden 4 Verbindungen ausgewählt, die durch die TKc-Kurven in Bild 4.25 charakterisiert sind. Die individuellen Curietemperaturen liegen bei ca. -30°C; 30°C; 90°C und 125°C und überdecken damit den geforderten Temperaturbereich vollständig.

Die auf diesem Weg realisierte DK beträgt bei Raumtemperatur 5.800 mit einem $\Delta C/C_{20^\circ\text{C}}$ von $\pm 20\%$ im Bereich von 0°C bis 90°C.

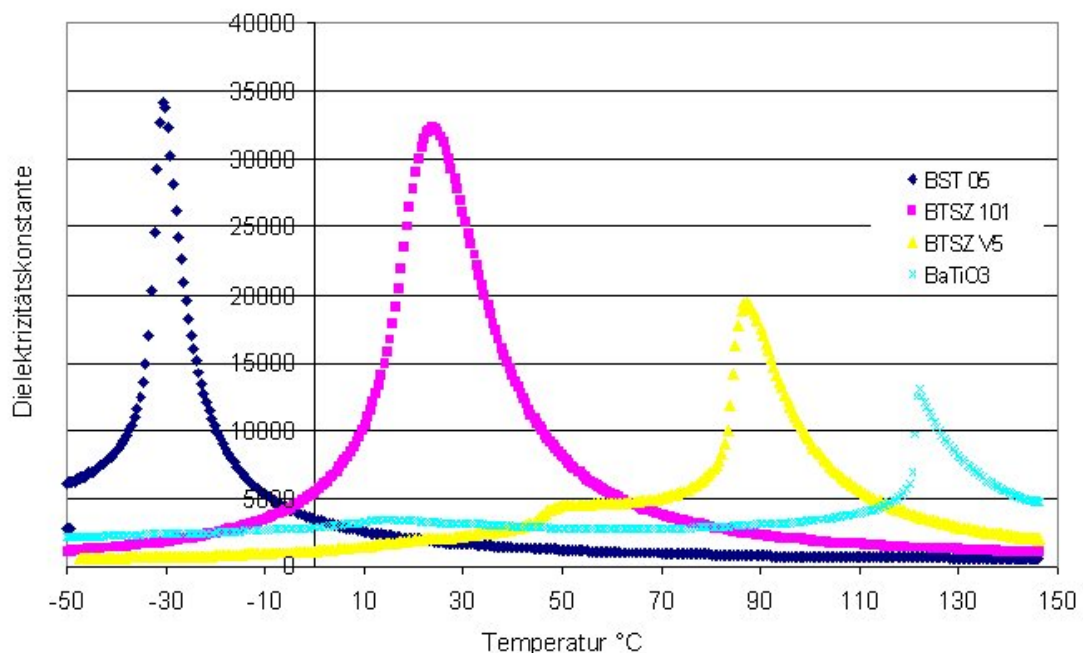


Bild 4.22: TKc-Kurven von BST 05, BTSZ 101, BTSZ V5 und BaTiO₃-Keramiken

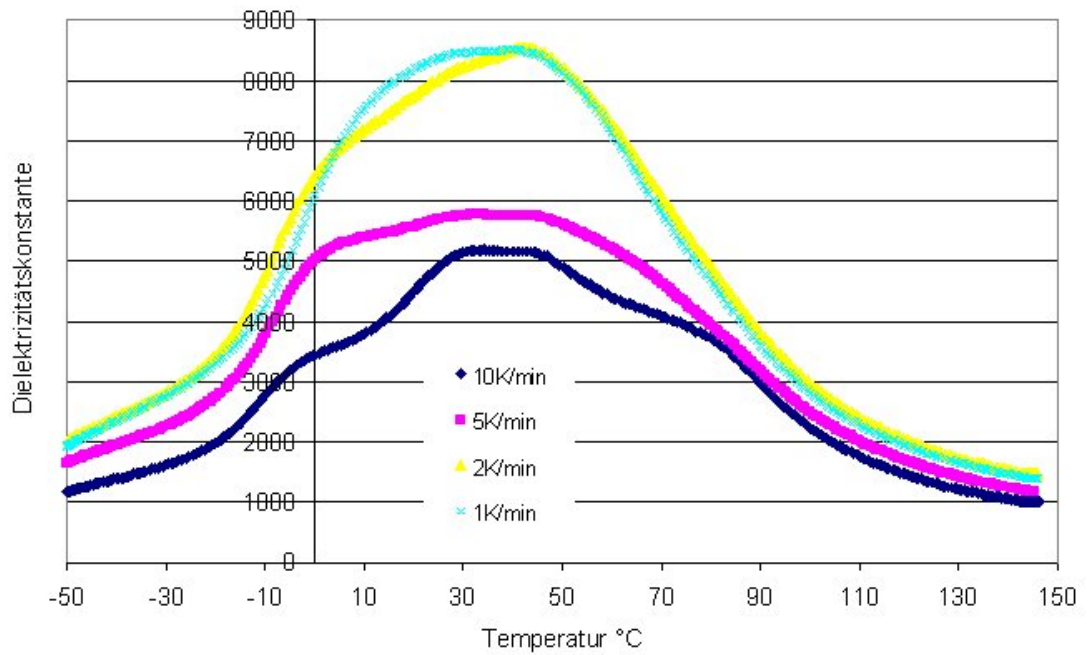


Bild 4.23: TKc-Kurven von Keramiken, hergestellt aus BST 05, BTSZ 101 und BTSZ V5 – WS-Granulaten in Abhängigkeit von der Heizrate

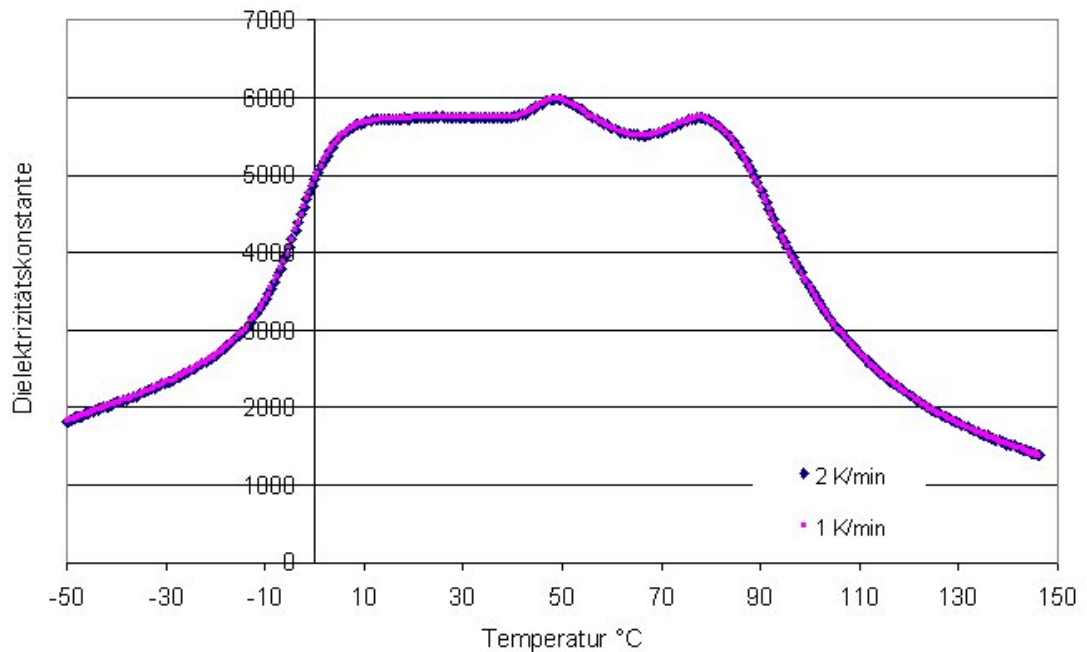


Bild 4.24: TKc-Kurven von Keramiken, hergestellt aus BST 05, BTSZ 101 und BTSZ V5 – WS-Granulaten mit anderem Mischungsverhältnis in Abhängigkeit von den Sinterbedingungen

4.1.8 Bleieisentantalat-Keramiken

Die Auswertung der Literatur zu Keramiken auf Basis von Bleieisentantalat mit Curietemperaturen um -30°C verbunden mit DK_{20} -Werten >15.000 führte zu Verbindungen auf Basis von Bleieisentantalat (PFT). Die Synthese dieser Verbindungen kann sowohl über eine Totalsynthese als auch über einen zweistufigen Weg unter Bildung von FeTaO_4 erfolgen. Beide Wege wurden untersucht und die Keramiken bezüglich ihrer dielektrischen Eigenschaften charakterisiert.

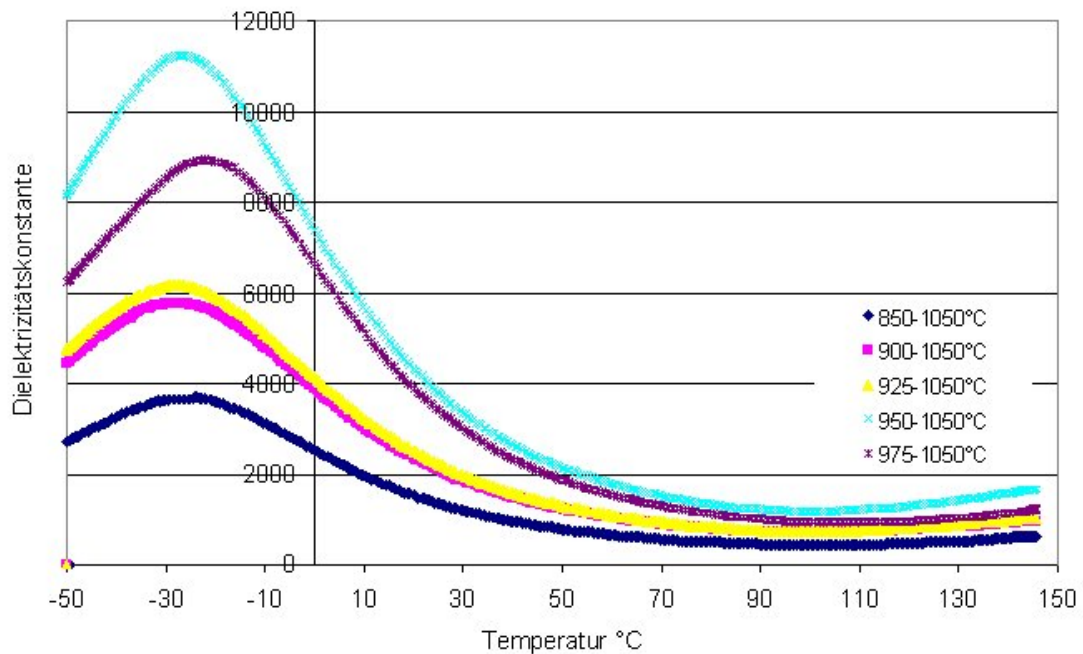


Bild 4.25: TKc-Kurven von PFT-basierten Keramiken hergestellt über die Totalsynthese, Einfluss der Calcinationstemperatur (linke Zahl) – Sinterung: 2h/1050°C

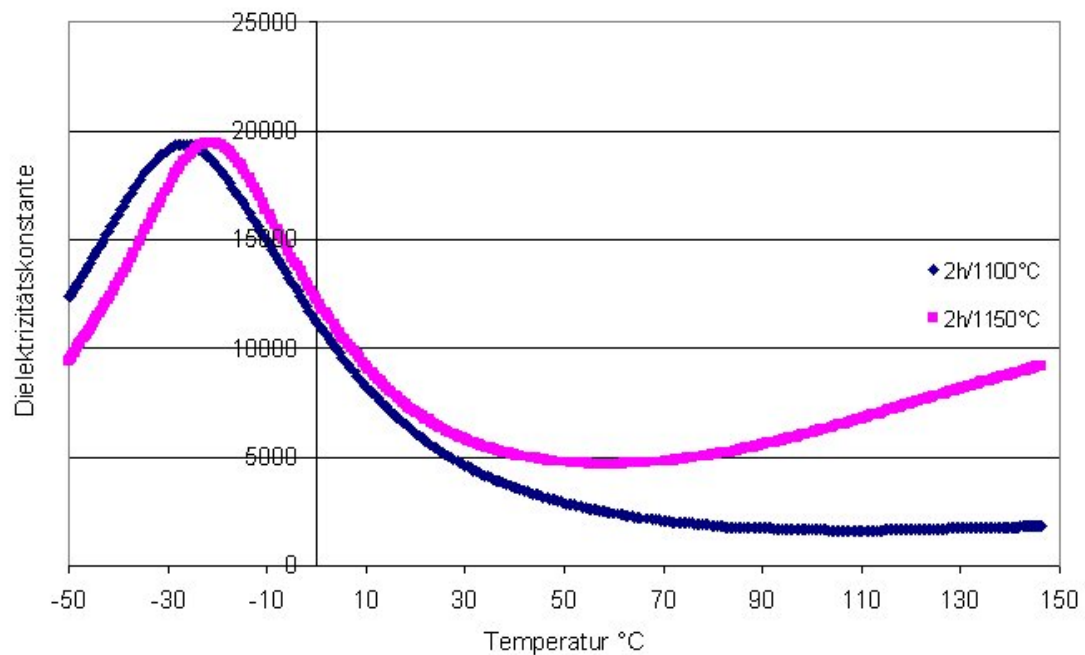


Bild 4.26: TKc-Kurven von PFT-basierten Keramiken hergestellt über die 2-stufige Synthese, Einfluss der Sintertemperatur

Die TKc-Kurven in Bild 4.26 zeigen deutlich den Einfluss der Calcinationstemperatur - linke Zahl im Wertepaar der Legende - auf die dielektrischen Eigenschaften. Der direkte Vergleich zwischen Totalsynthese und zweistufiger Variante bestätigt die an einer Vielzahl von Bleiperowskiten gewonnene Erfahrung, dass die dielektrischen Eigenschaften von Keramiken, hergestellt nach der Totalsynthese z.T. deutlich unter denen der über den zweistufigen Prozess hergestellten liegen. Eine Betrachtung der dielektrischen Verluste zeigt allerdings, dass diese mit steigender Sintertemperatur stark zunehmen und in eine Größenordnung kommen, die für die genannte Entwicklung nicht akzeptabel ist.

Mit den PFT-basierten Keramiken stehen Verbindungen zur Verfügung, die es ermöglichen sollten, heterogene Keramiken mit hohen DK-Werten bei Raumtemperatur gepaart mit einer geringen Änderung der Kapazität über einen weiten Temperaturbereich herzustellen. Im Ergebnis dieser Untersuchungen liegen eine Vielzahl von Kombinationen vor, die bei unterschiedlichen Bedingungen gesintert DK-Werte bei RT von 6.500 bis 7.500 ergeben verbunden mit einer Kapazitätsänderung von $\Delta C/C_{20^\circ\text{C}}$ von $\pm 20\%$ über einen Temperaturbereich von -40°C bis 110°C . Höhere DK-Werte bei Raumtemperatur führen dabei in der Regel zu steileren Kurven und damit zu einem eingeschränkten Temperaturbereich, in dem die Kapazitätsänderung $\pm 20\%$ beträgt.

Mit der Einführung einer weiteren Komponente – als K4 bezeichnet – können Keramiken hergestellt werden, an denen die in den folgenden Abb. gezeigten Kurven gemessen werden.

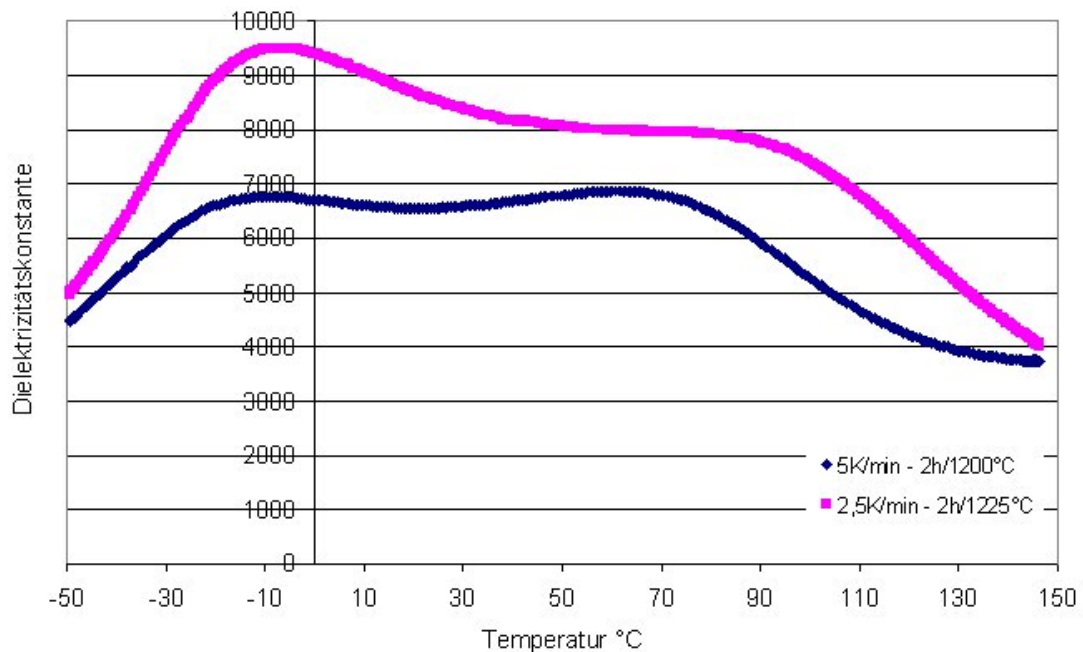


Bild 4.27: TKc-Kurven von Mischungen aus PFT-basierten Granulaten in Verbindung mit Granulaten zweier anderer Verbindungen in Abhängigkeit von den Sinterbedingungen

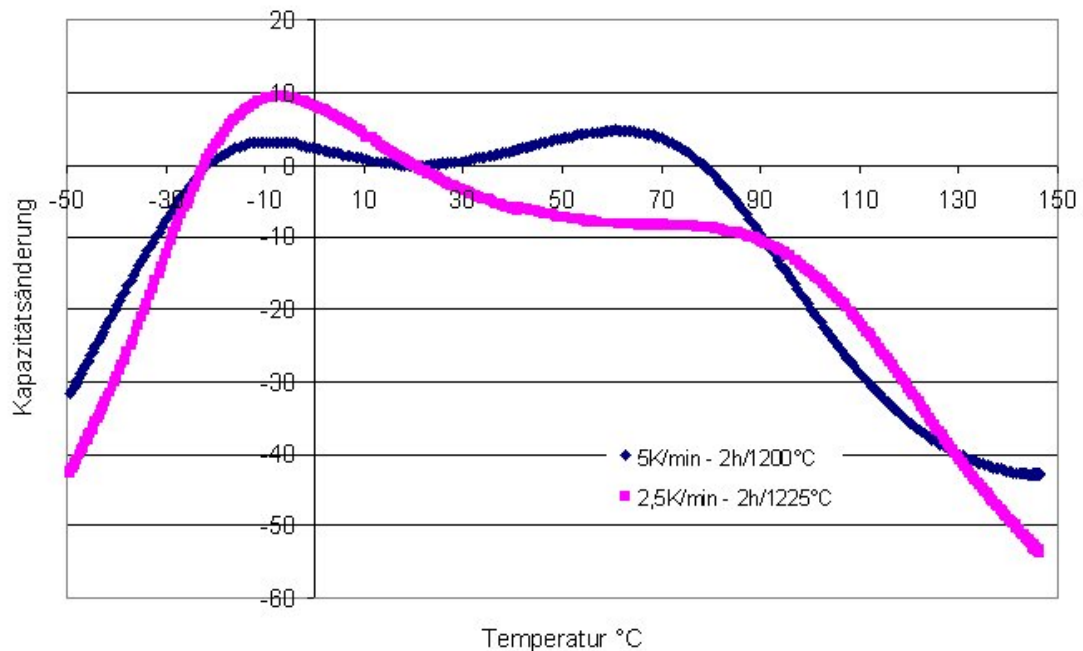


Bild 4.28: $\Delta C/C_{20^\circ\text{C}}$ -Kurven von Mischungen aus PFT-basierten Granulaten in Verbindung mit Granulaten zweier anderer Verbindungen in Abhängigkeit von den Sinterbedingungen

Damit liegen Werkstoffe vor, die für den Einsatz in Filtersteckverbindern geeignet sind und weit über den bekannten Stand der Technik hinausgehen. Die Überführung der zuletzt gezeigten Ergebnisse in konkrete Filtersteckverbinder steht aus Zeitgründen noch aus.

4.1.9 Reproduktion an Kilogramm-Versätzen

Im Folgenden werden Arbeiten und Ergebnisse dargestellt, die auf als „aussichtsreich“ eingeschätzten Versätzen entsprechend der bislang durch IKTS und PI Ceramic erzielten Ergebnisse beruhen und in Mengen von mehreren Kilogramm hergestellt wurden.

Der Übersichtlichkeit halber seien vorab nochmals die Zielparameter des Projektes zusammengefasst:

Werkstoff	DK ₂₀	delta C/C ₂₀ (%)	Temperaturber. (°C)
Anfangsziel	15.000	± 15	- 55.....+ 125
Korrektur	7.500	± 20	- 55.....+ 125

Als unmittelbarer Vergleich zum Stand der Technik dienen der Werkstoff X5 mit X7R-Charakteristik der englischen Firma Ferro sowie verschiedene Werkstoffe der Fa. PI Ceramic.

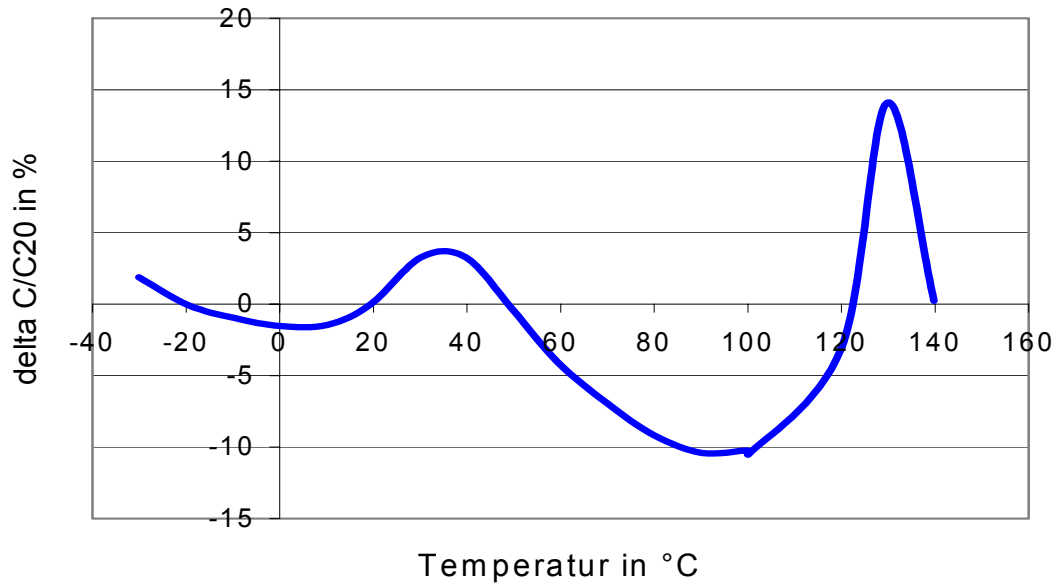


Bild 4.29: Temperaturgang X7R

Werkstoffübersicht PI Ceramic

<u>Werkstoff</u>	<u>DK₂₀</u>	<u>delta C / C_{20°C} [%]</u>	<u>Temperaturbereich</u>
2C5	1.800 -2.000	± 20	- 55....+ 70°C
2E4	4.000 -4.500	+ 20 / - 55	- 25....+ 85°C
2E5	8.000 -9.000	+ 20 / - 55	- 10.....+ 70°C
2F5	12.000 -15.000	+ 30 / - 80	- 10.....+ 70°C

Je größer der DK_{20} -Wert ist, umso steiler sind die Flanken der Temperaturgangkurven.

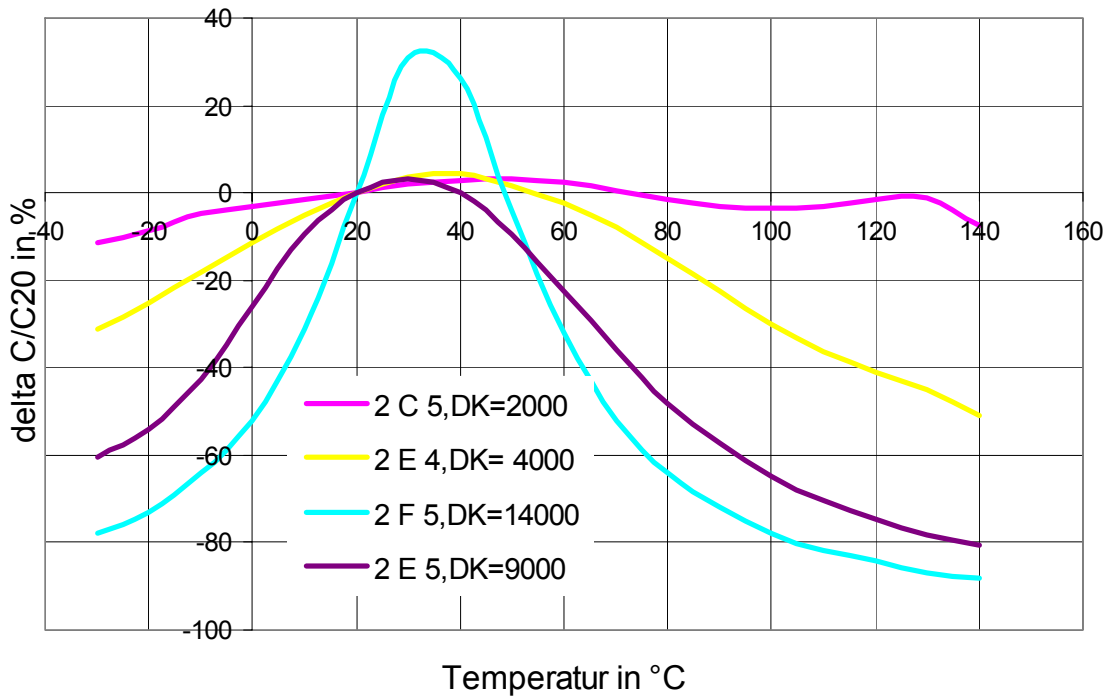


Bild 4.30: Temperaturgänge der bekannten PI Ceramic-Dielektrika

Die Daten verdeutlichen nochmals die Höhe des Anspruchs des gesteckten Zieles.

4.1.10 Lösungsansatz – Bleioxidhaltige Verbindungen

Es wurden folgende Komponenten mit unterschiedlichen Curietemperaturen gemischt mit dem Ziel, im gesinterten Scherben eine Parallelschaltung der Komponenten zu erzeugen. Dazu wird sehr grobes und festes Korn im Grünling benötigt, dessen Korndurchmesser deutlich über den Diffusionswegen der Mischkristallbildung liegen. Derartiges Korn wurde durch die Wirbelschichtgranulierung erhalten.

Komponenten	DK ₂₀	Curiepkt. (°C)
K 1	8.000	- 25
K 2	25.000	+ 80
K 3	18.000	+ 120

Von den o. g. Komponenten wurden je 2 kg Massepulver hergestellt.

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Temperaturgänge der Einzelkomponenten, gemessen an Scheiben.

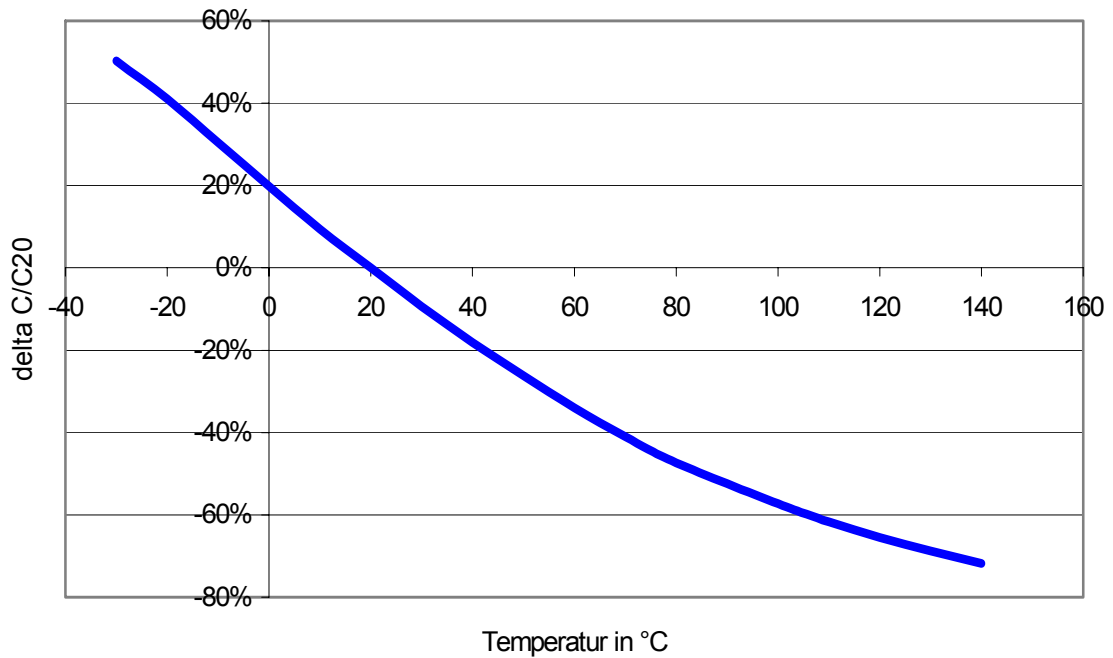


Bild 4.31: Temperaturgang K1, Masseanmusterung 1.100°C / 2h; Scheibe 10 x 0,5 mm; DK₂₀=6.200

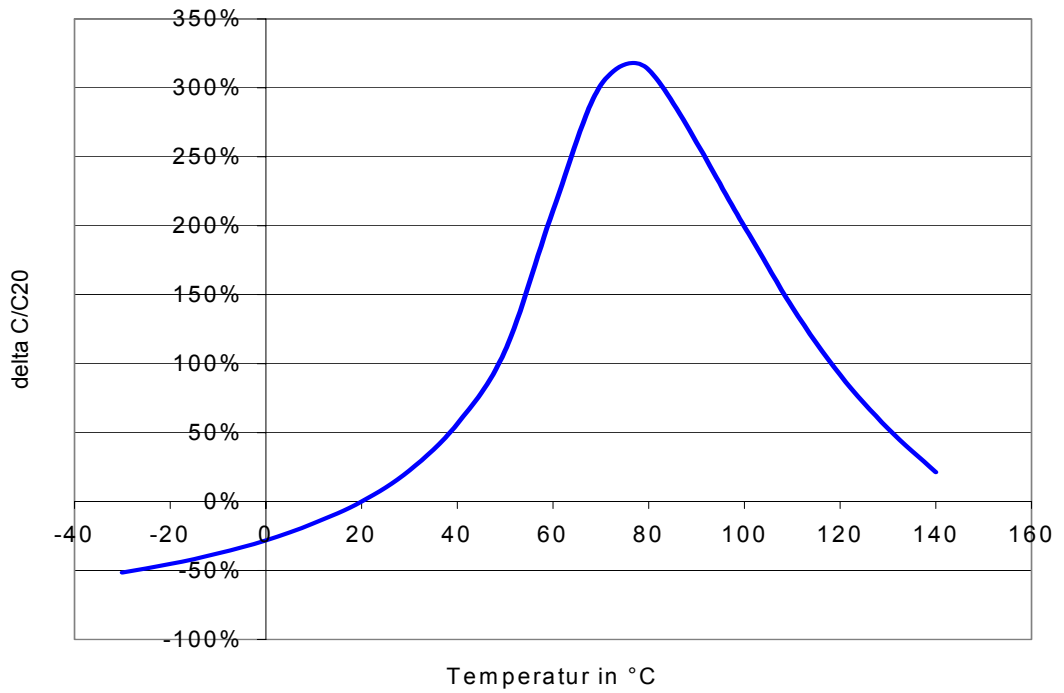


Bild 4.32: Temperaturgang K2, Masseanmusterung 1100°C / 2h; Scheibe 10 x 0,5 mm; $DK_{20}=7.200$

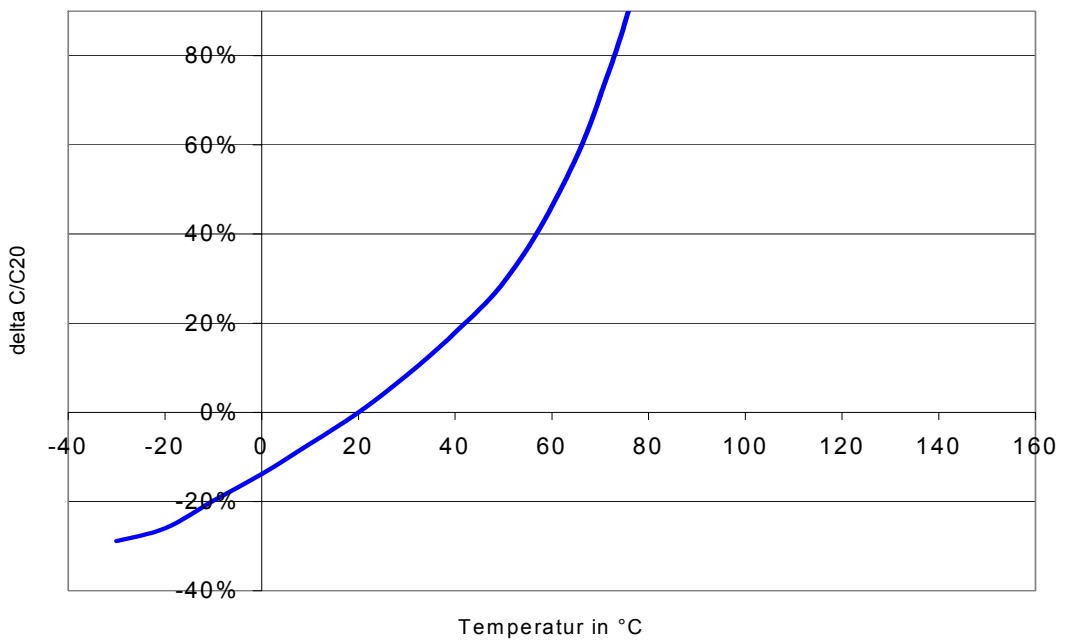


Bild 4.33: Temperaturgang K3, Masseanmusterung 1100°C / 2h; Scheibe 10 x 0,5 mm; $DK_{20}=2.200$

4.1.11 Lösungsansatz – Bleioxidhaltige Verbindungen

Aus der handgranulierten Masse wurden erste Scheibenmuster hergestellt und die Komponenten als Pulver untereinander vermischt. Bereits diese ersten Ergebnisse sind interessant, da das handgranulierte Pulver schon eine Wirkung der Parallelschaltung zeigte.

Werkstoff	DK ₂₀	delta C / C ₂₀ (%)	Temperaturbereich
K 1 + K 2	14.800	+ 5 / - 75 ± 20	-30.....+ 140 0.....+ 60

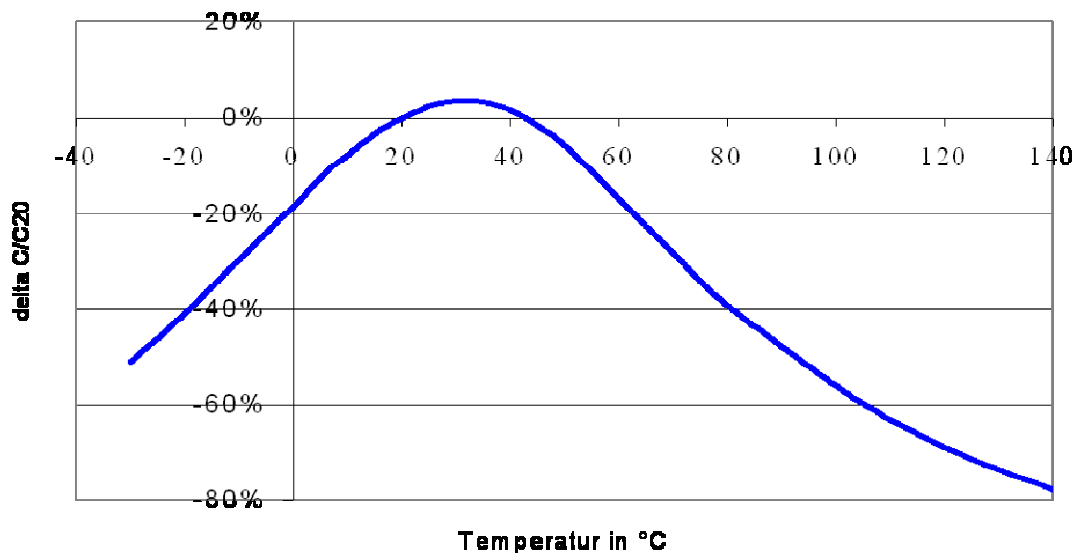


Bild 4.34: Temperaturgang K1+ K2, Masseanmusterung 1.100°C / 2h; Scheibe 10 x 0,5 mm; DK₂₀=14.800

Werkstoff	DK ₂₀	delta C / C ₂₀ (%)	Temperaturbereich
K 1 + K 3	9.000	+ 20 / - 40 ± 20	-20.....+ 140 0.....+ 120

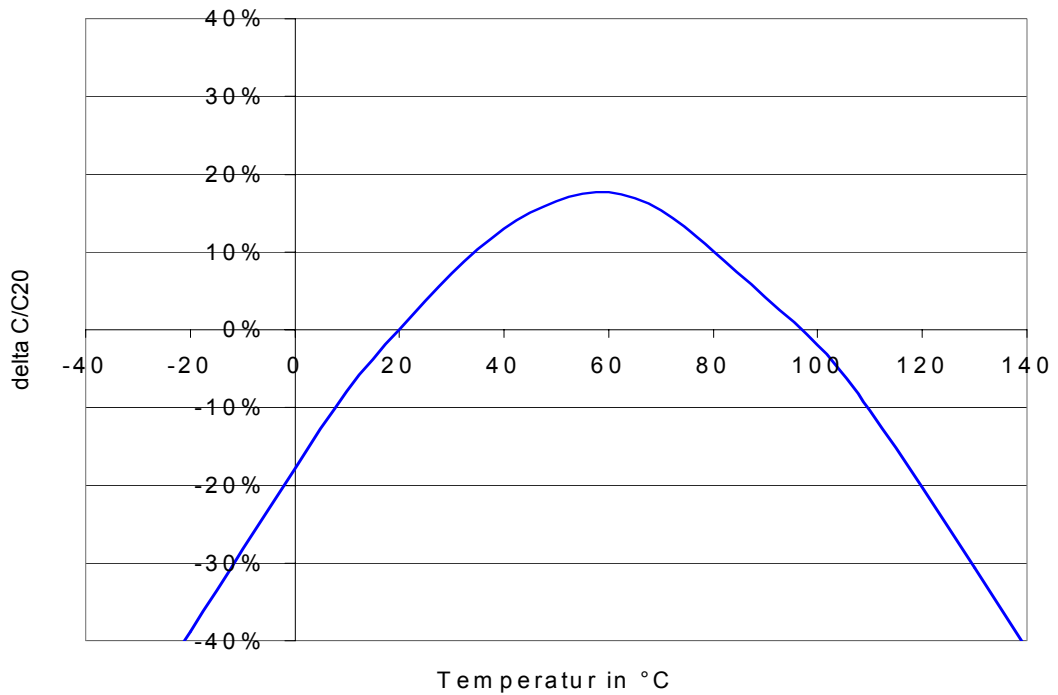


Bild 4.35: Temperaturgang K1+ K3, Masseanmusterung 1.100°C / 2h; Scheibe 10 x 0,5 mm; $DK_{20} = 9.000$

4.1.12 Ergebnisse der Wirbelschichtgranulat-Mischungen

Die Komponenten aus Wirbelschichtgranulat mit der Kornfraktion 160 µm – 315 µm wurden gemischt, als Scheiben verpresst, gesintert und gemessen.

<u>Werkstoff</u>	<u>DK_{20}</u>	<u>delta C / C_{20} (%)</u>	<u>Temperaturbereich</u>
K 1 + K 2	12.000	+ 20 / - 50	-30.....+ 130
		±20	- 5.....+ 90

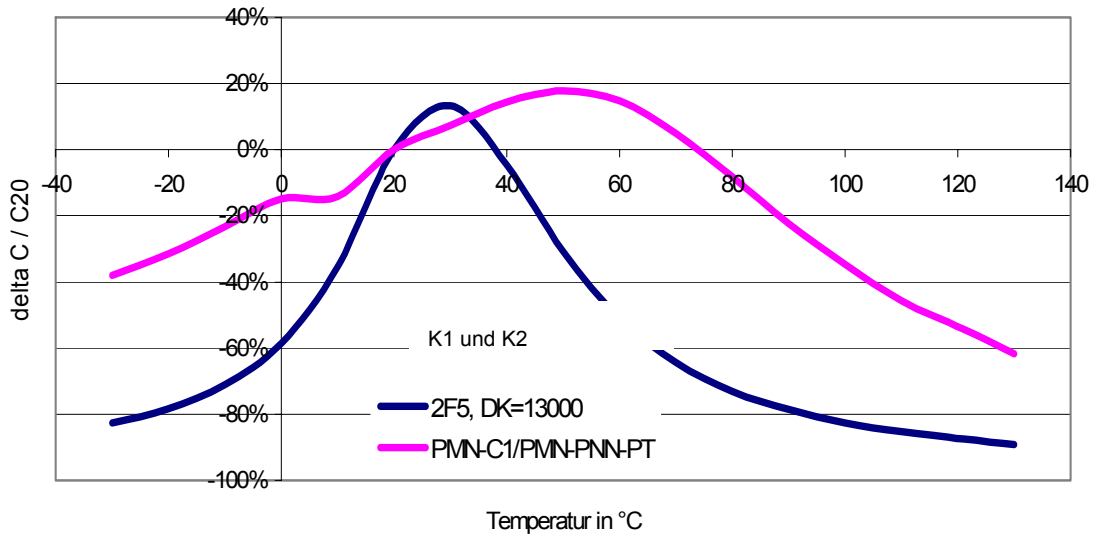


Bild 4.36: Temperaturgang K1+ K2, $DK_{20} = 12.000$

Werkstoff	DK_{20}	delta C / C_{20} (%)	Temperaturbereich
K 1 + K 3	6.700	+ 15 / - 45	-30.....+ 130

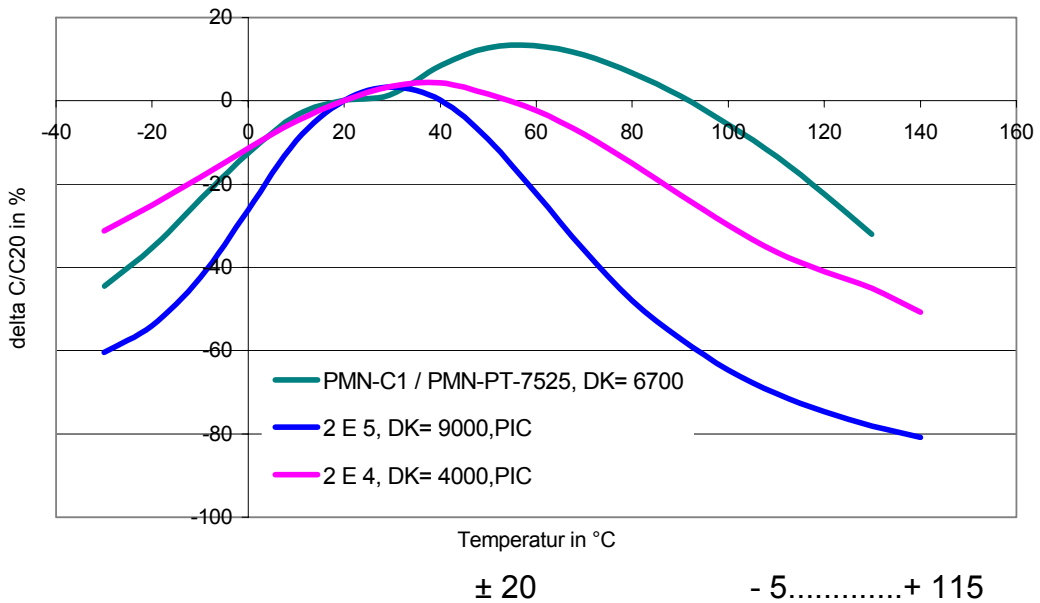


Bild 4.37 Temperaturgang K1+ K3, $DK_{20} = 6.700$

4.1.13 Herstellung und Ergebnisse von Funktionsmustern

Werkstoffsystem (K1 + K2), 1200°C, 120'

Ergebnisse der Scheibenanmusterung:

DK₂₀ : 12.000

tanδ (1 kHz) : 22,0 x 10⁻³

R_{is} : 5 x 10⁹ Ω

Delta C / C₂₀ : ± 20 %

Temperaturbereich : von - 5 bis + 90 °C

4.1.14 Ergebnisse einer 3-poligen Planarfilter-Ausführung

Aus dem o.g. Werkstoffgemisch wurden Zylinder gepresst und gesintert. Die Pinlöcher wurden per Ultraschall in den Zylinder gebohrt. Anschließend wurden von dem Zylinder 0,50 mm Scheiben getrennt und auf den Scheiben per Siebdruckverfahren die maximal mögliche Elektrodenfläche aufgetragen.

Die Messung der einzelnen Pins ergab folgende Kapazitätswerte:

Pin – Nr.	1	2	3
Muster 1 C in pF	1096	1077	1135
Muster 2	1127	1152	1200
Muster 3	1056	1053	1156

Up (1 kV / 1') VDC : o.k.

aü (3,25 MHz) : 40 dB

tanδ (1 kHz) : 22,0 x 10⁻³

Einfügungsdämpfung

5 MHz.....	1,9 (1 dB)
10 MHz.....	4,8 (5 dB)
20 MHz.....	9,3 (9 dB)
50 MHz.....	16,4(16 dB)
100 MHz.....	24,4(22 dB) Klammerwerte = Sollwerte für 1300 pF

Mit einer $DK_{20} = 12.000$ wird eine Kapazität von ca. 1100 pF erreicht. Die Dämpfungseigenschaften des Systems entsprechen der Qualität der Planarfilter. Das $\Delta C/C_{20}$ von $\pm 20\%$ bewegt sich im Temperaturbereich von -5 bis $+90$ °C.

Werkstoffsystem (K1 + K3) , 1200°C, 120'

Ergebnisse der Scheibenanmusterung:

DK_{20}	: 6.700
$\tan\delta$ (1 kHz)	: $4,0 \times 10^{-3}$
Ris	: $1 \times 10^{10} \Omega$
Delta C / C20	: $\pm 20 \%$

Temperaturbereich : von -5 bis +115°C

4.1.15 Ergebnisse am 9-poligen Planarfilter

Aus dem Werkstoffgemisch (K1+K3) wurden Blöcke gepresst und gesintert. Anschließend erfolgte der Konturenschnitt (Länge x Breite) und per Ultraschall wurden die Pinlöcher gebohrt. Der gebohrte Block wurde auf 0,50 mm Plattenstärke getrennt und per Siebdruckverfahren die max. Elektrodenfläche auf die Platten aufgetragen.

Die Messung der einzelnen Pins ergab folgende Kapazitätswerte:

Pin – Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Muster 1 / C in pF	898	967	1068	1066	965	1033	1032	995	972
Muster 2	843	1005	955	935	904	934	1005	994	964
Muster 3	831	914	902	916	875	882	1005	906	920

Up (1 kV / 1') VDC : o.k.

aü (2,70 MHz) : 38 dB

tanδ (1 kHz) : 11,0 x 10⁻³

Einfügungsdämpfung

5 MHz.....1,6 (1 dB)

10 MHz..... 4,0 (2 dB)

20 MHz.....8,3 (9 dB)

50 MHz.....19,4(16 dB)

100 MHz.....20,0(20 dB) Klammerwerte = Sollwerte für 830 pF

Mit der $DK_{20} = 6.700$ wird eine Kapazität von 830 pF realisiert. Die Dämpfungseigenschaften entsprechen ebenfalls der Planarfilterqualität der laufenden Fertigung.

Das delta C/C20 von ±20% bewegt sich im Temperaturbereich von - 5°C bis +115 °C.

4.1.16 Zusammenfassung und Wertung der Ergebnisse

- (1) Die Ergebnisse mit Gemischen aus Wirbelschichtgranulat (Pkt.1.6.5.3.) zeigen deutlich verbesserte Temperaturgänge gegenüber den bisherigen Bariumtitanat-Keramiken.

- (2) Bereits Gemische aus handgranuliertem Pulver zeigen ebenfalls verbesserte Temperaturgangverläufe.
- (3) Standzeiten der Presswerkzeuge für den Einsatz mit Wirbelschichtgranulat sind nicht bekannt.
- (4) Standzeiten der Presswerkzeuge für den Einsatz mit Sprühgranulat sind bekannt.
- (5) Bereits gute Ergebnisse mit handgranuliertem Massepulver lassen vermuten, dass die Werkstoffsysteme als Sprühgranulat ebenfalls positive Ergebnisse zeigen.

4.1.17 Ergebnisse der Sprühgranulatmischungen

Von den Einzelkomponenten K1, K2 und K3 werden je 30 kg Pulver hergestellt und sprühgranuliert. Die Korngrößenfraktion lag zwischen 60 und 80 µm.

Folgende Ergebnisse des Werkstoffsystems K1+K2 an Scheibenmustern wurden ermittelt:

DK₂₀ : 15.300

tanδ (1 kHz) : 8,0 x 10⁻³

Ris : 1 x 10¹¹ Ω

<u>Werkstoff</u>	<u>DK₂₀</u>	<u>delta C / C₂₀ (%)</u>	<u>Temperaturber.</u>	<u>Schwindung (%)</u>
K 1 + K 2	15.300	+ 5 / - 80 ± 20	- 30 + 140 -10 + 45	18

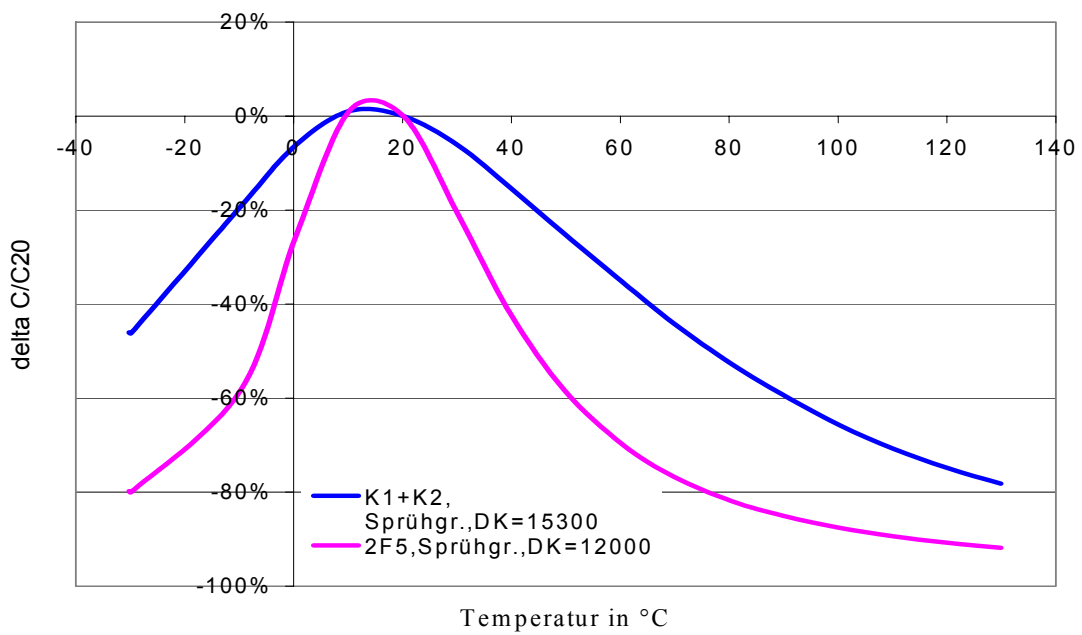


Bild 4.38: Temperaturgang Sprühgranulat K1 + K2; $DK_{20} = 15.300$

Folgende Ergebnisse des Werkstoffsystems K1+K3 an Scheibenmustern wurden ermittelt:

DK_{20} : 7.300

$\tan\delta$ (1 kHz) : $12,0 \times 10^{-3}$

Ris : $3 \times 10^{10} \Omega$

Werkstoff	DK_{20}	delta C / C_{20} (%)	Temperaturber.	Schwindung (%)
K 1 + K 3	7.300	+ 25 / - 50	- 30.....+ 140	15
		+ 25 / - 20	0 + 115	

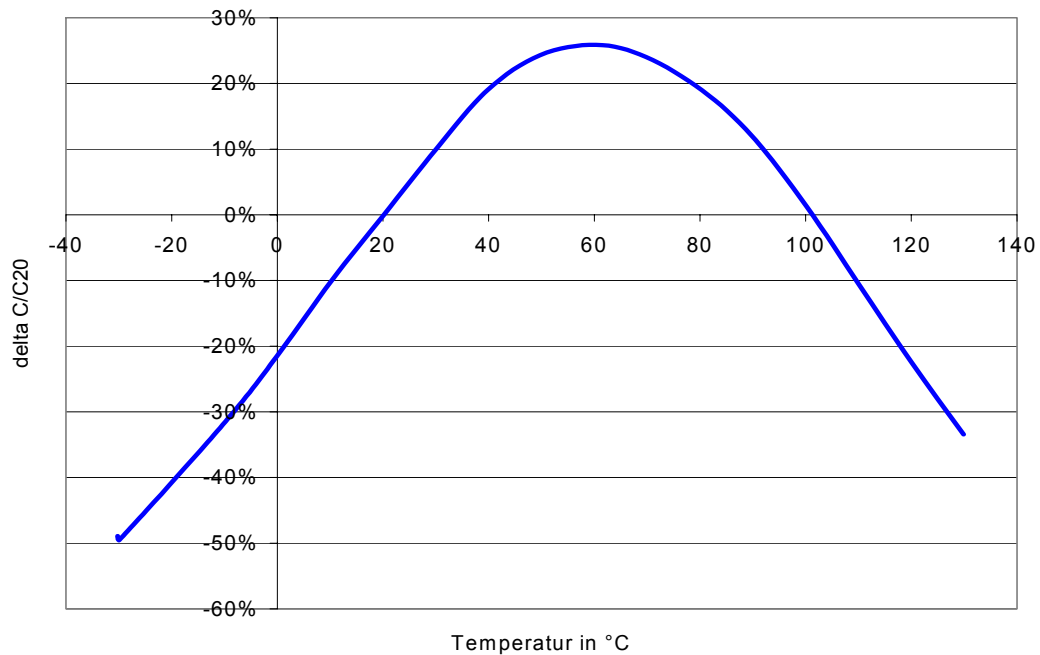


Bild 4.39: *Temperaturgang K1+K3, Sprühgranulat, 1200°C, 120', DK20 = 7.300*

Aus den vorhandenen Sprühgranulatmischungen wurden 25-polige Planarfilter gepresst.

Ergebnisse 25-poliger Planarfilter

Menge : 10 Stck.

Charge : K1 + K2 (DK₂₀ = 15.300)

Paste : Fertigungspaste für Standardtypen

Wandstärke : 0,50 mm

Lange Pinlochreihe: von 1 bis 13

Kurze Pinlochreihe : von 14 bis 25

aü : 38 dB

up (1,0 kV, 1')VDC : o.k.

Einfügungsdämpfung

5 MHz.....	3 dB
10 MHz.....	7 dB
20 MHz.....	11 dB
50 MHz.....	19 dB
100 MHz.....	26 dB

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Kapazitätsverteilung innerhalb eines Planarfilters:

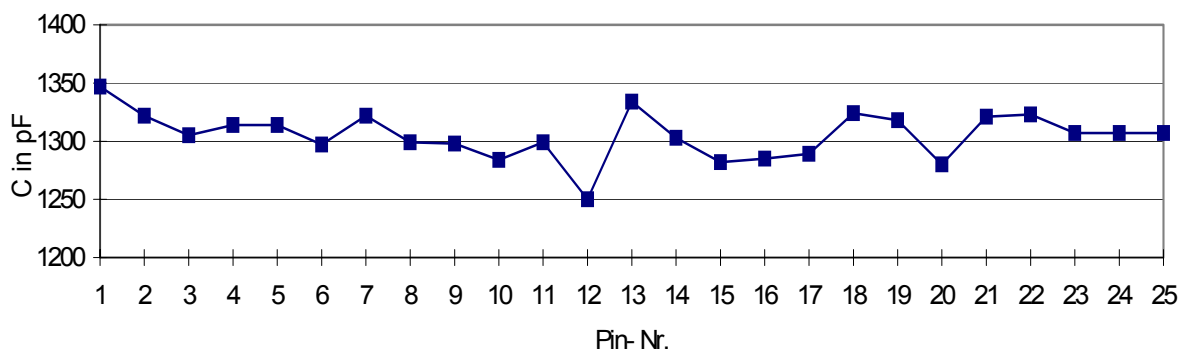


Bild 4.40: Kapazitätsverteilung 25-poliger Planarfilter (K1+ K2), Standard-Elektrodenpaste

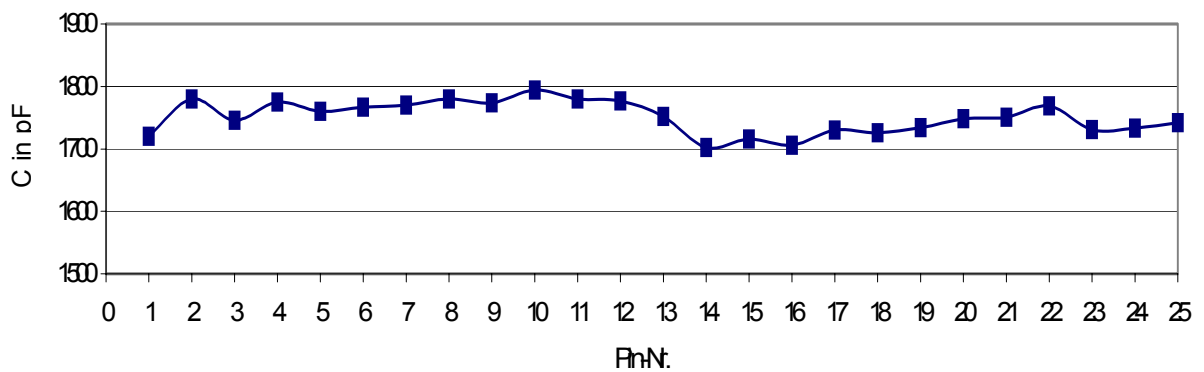


Bild 4.41: Kapazitätsverteilung 25-poliger Planarfilter (K1+ K2), Elektrodenpaste für HD-Filter

Das zweite Werkstoffsystem K1 + K3 konnte nur im unteren Rohdichtebereich verpresst werden, um auf Grund der geringeren Schwindung von ca. 15 % möglichst maßhaltige Planarfilter zu erhalten. Die Teile waren dadurch sowohl beim Sintern als auch beim Bearbeitungsgang Schleifen sehr bruchanfällig.

Menge : 10 Stck.
 Charge : K1 + K3 (DK₂₀ = 7.300)
 Paste : Fertigungspaste für Standardtypen
 Wandstärke : 0,40 mm
 Lange Pinlochreihe: von 1 bis 13
 Kurze Pinlochreihe : von 14 bis 25
 a_ü : 43 dB
 up (1,0 kV, 1')VDC : o.k.
 Einfügungsdämpfung

5 MHz.....2 dB
 10 MHz.....4 dB
 20 MHz.....8 dB
 50 MHz.....15 dB
 100 MHz.....21 dB

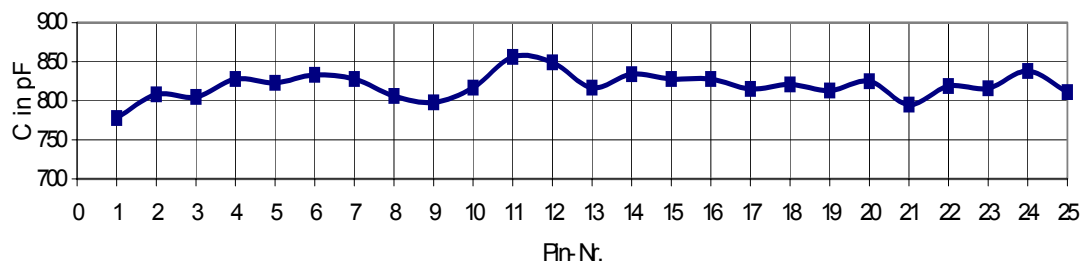


Bild 4.42: Kapazitätsverteilung 25-poliger Planarfilter (K1+ K3), Standardelektrodenpaste

Mit diesem Werkstoffsystem wird eine Kapazität von 830 pF realisierbar.

4.1.18 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen

- (1) Das Werkstoffsystem K1+ K2 (Sprühgranulat) bringt einen verbesserten Temperaturgang (von ca. + 20°C) im Bereich $\Delta C / C_{20}$ von $\pm 20\%$ gegenüber der derzeitig bekannten 2F5-Keramik (Pkt.1.6.5.5.1).
- (2) Das Werkstoffsystem K1+ K3 (Sprühgranulat) bringt einen verbesserten Temperaturgang (von ca. + 50°C) im Bereich $\Delta C / C_{20}$ von $\pm 20\%$ gegenüber der derzeitig bekannten 2E5-Keramik (Pkt.1.6.5.5.1).
- (3) Die Ergebnisse zeigen auch, dass die o.g. Verbesserungen im Temperaturgangverlauf nur den positiven Temperaturbereich betreffen. Für den negativen Temperaturbereich musste eine weitere Komponente gesucht und erprobt werden.

4.1.19 Ergebnisse beim Einsatz von Bleieisentalat

(Komponente für den negativen Temperaturbereich)

Für die Erprobung von PFT basierten Komponenten wurden folgende Granulate verwendet:

K2 : Sprühgranulat ($d_{50} = 80 \mu\text{m}$)

K3 : Sprühgranulat ($d_{50} = 60 \mu\text{m}$)

PFT Basis : Masse(Handgranulat) > 160 μm

Aus den o.g. Komponenten wurden 10g Mischungen hergestellt. Anschließend zur Anmusterung als Scheiben verpresst und gesintert.

PFT-Basis-Ergebnisse der Scheibenmuster (PFT + K2):

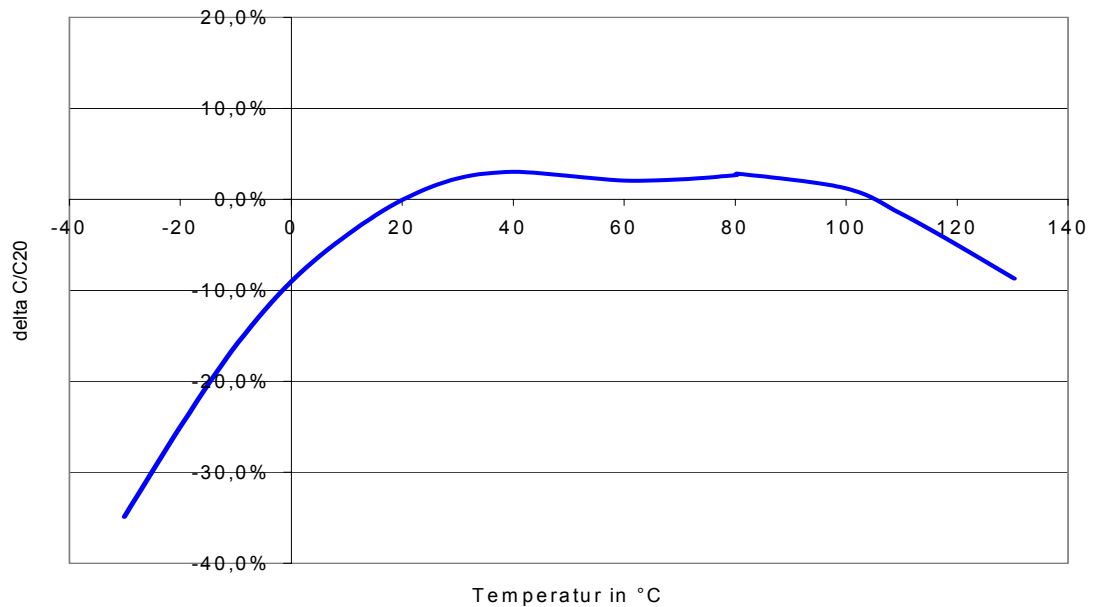
DK₂₀ : 14.900

tanδ (1 kHz) : 250,0 x 10⁻³

Ris : 2 x 10⁷ Ω

Up (VDC) : bis 1,6 kV (bei 0,80 mm Scheibenwandstärke)

<u>Werkstoff</u>	<u>DK₂₀</u>	<u>delta C / C₂₀ (%)</u>	<u>Temperaturber.</u>	<u>Verhältnis</u>
PFT-Basis + K2	14.900	+/- 20	- 15 + 130	65 : 35

Bild 4.43: TG_PFT-Basis + K2, DK₂₀=14.900

Ergebnisse der Scheibenbemuster (PFT-Basis + K2):

DK₂₀ : 16.000

tanδ (1 kHz) : 220,0 x 10⁻³

Ris : 2 x 10⁷ Ω

Up (VDC) : bis 1,9 kV (bei 1,00 mm Scheibenwandstärke)

<u>Werkstoff</u>	<u>DK₂₀</u>	<u>delta C / C₂₀ (%)</u>	<u>Temperaturber.</u>	<u>Verhältnis</u>
PFT-Basis + K2	16.000	± 20	- 20 +130	65 : 35

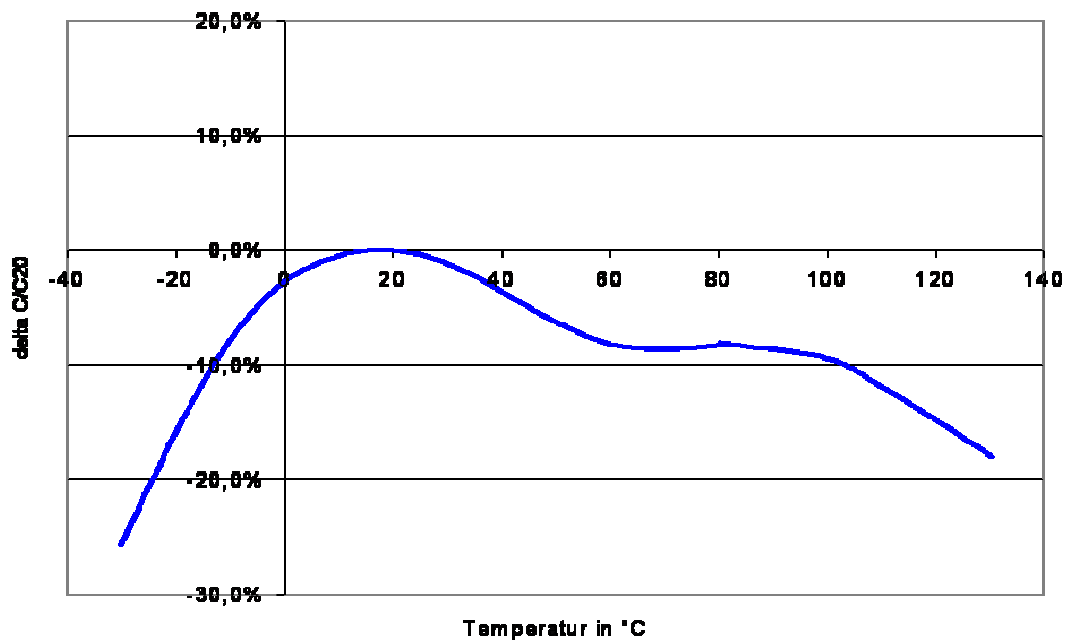


Bild 4.44: TG_PFT-Basis (Masse, getempert) + K2, Scheibe, DK20=16.000

Ergebnisse der Scheibenmuster (PFT-Basis+K3):

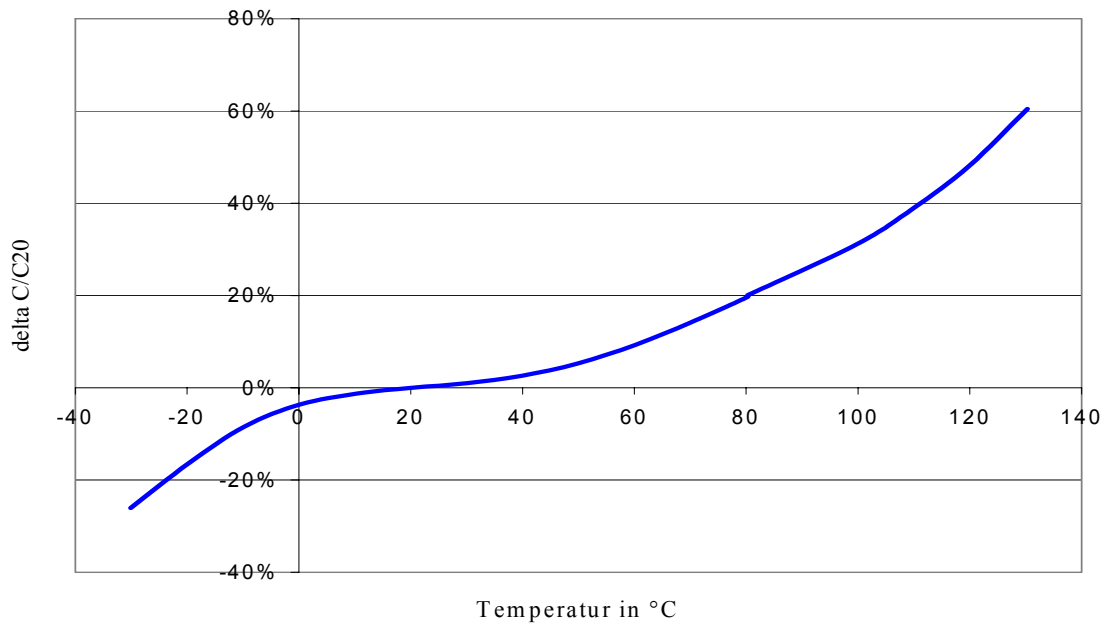
DK₂₀ : 8.800

tanδ (1 kHz): 250,0 x 10⁻³

Ris : 2 x 10⁶ Ω

Up (VDC) : bis 300V (bei 0,80 mm Scheibenwandstärke)

Werkstoff	DK ₂₀	delta C / C ₂₀ (%)	Temperaturber.	Verhältnis
PFT-Basis + K3	8.800	± 20	- 20 + 80	65 : 35

Bild 4.45: TG_PFT-Basis, DK₂₀=8.800

Ergebnisse der Scheibenmuster (PFT-Basis + K3):

DK₂₀ : 9.300

tanδ (1 kHz) : 210,0 x 10⁻³

Ris : 2 x 10⁶ Ω

Up (VDC) : bis 700V (bei 1,00 mm Scheibenwandstärke)

Werkstoff	DK ₂₀	delta C / C ₂₀ (%)	Temperaturber.	Verhältnis
PFT-Basis + K3	9.300	± 20	- 20 + 80	65 : 35

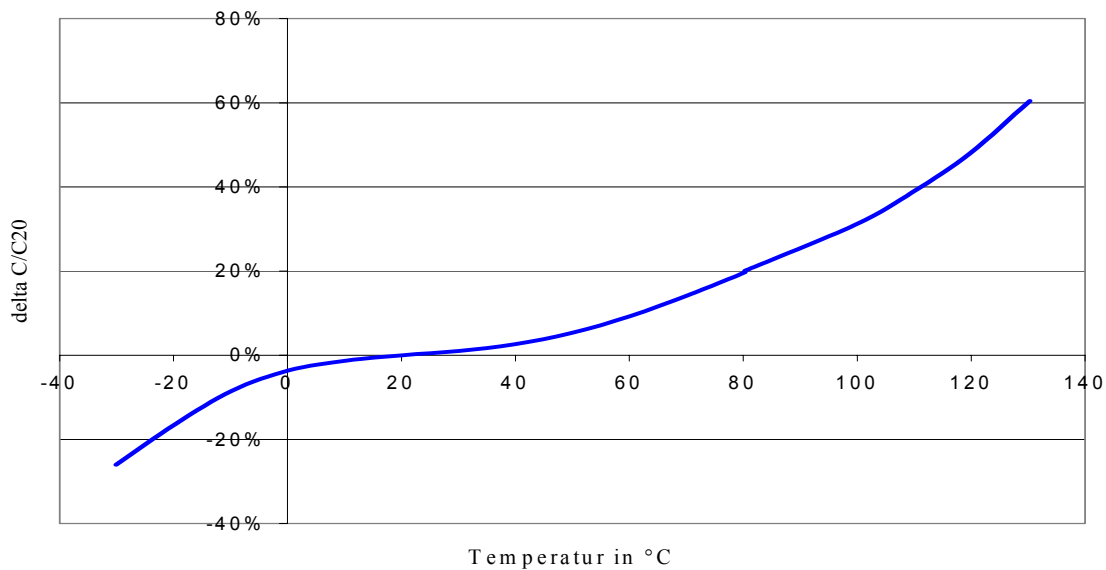


Bild 4.46: TG_PFT –Basis + K3, Scheibe DK20 = 9.300

Zusammenfassung der Anmusterungsergebnisse (PFT Komponente):

Das Gemisch PFT-Basis + K2 bringt eine DK = 16000 und eine Kapazitätsänderung $\pm 20\%$ im Temperaturbereich -25°C bis $+130^{\circ}\text{C}$.

Das Gemisch PFT-Basis + K3 bringt eine DK=9300 und eine Kapazitätsänderung $\pm 20\%$ im Temperaturbereich -25 bis $+80^{\circ}\text{C}$.

Beide Systeme weisen hohe Verlustfaktorwerte, als auch geringe Isolationswerte auf.

Durch den Zusatz von MnCO_3 verbessern sich deutlich der Isolationswiderstand und der Verlustfaktor. Der DK_{20} -Wert verringert sich jedoch von 14.900 auf 5.900.

4.1.20 Aktivitäten und Ergebnisse bleifreier Systemen

Der grundsätzliche Lösungsansatz ist der gleiche wie bei den bleihaltigen Verbindungen.

<u>Komponenten</u>	<u>Bezeichnung</u>	<u>DK₂₀</u>	<u>Curiepkt. (°C)</u>
BST – 05		33.000	- 30
BTSZ		48.000	+ 25
BTSZ – V5		22.000	+ 80
BT		12.000	+120

Je Komponente wurden 2 kg Massepulver hergestellt.

Ergebnisse der Masseanmischung

Gemisch der o. g. Komponenten.

DK₂₀ : 4.100

Delta C/C₂₀ : -50 % / +50 %

Temperaturbereich - 30°C bis + 130°

Ergebnisse der Wirbelschichtgranulierung

Es wurde Wirbelschichtgranulat beim IKTS mit dem Korngrößenbereich von 160 µm bis 250 µm hergestellt.

PIC (3-Komponentengemisch)

IKTS (Versuch M6 = optim. Versatz)

DK₂₀ : 5.300

5500

tanδ (1 kHz) : 20,0 x 10⁻³

Ris : 2 x 10⁹ Ω

Delta C/C₂₀ : ± 20 %

± 20 %

Temperaturbereich : von +5°C bis + 70°C

von +5°C bis + 75 °C

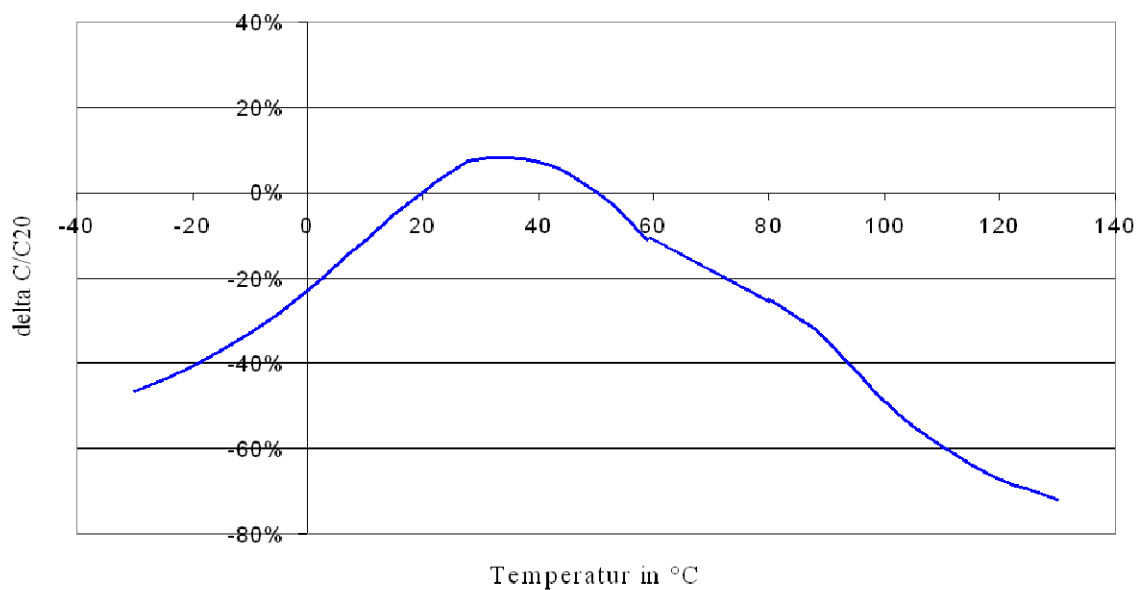


Bild 4.47: Kapazitätsänderung 3 Komponentengemisch (ohne BT) – Wirbelschichtgranulat

Die Funktionsmusterherstellung (3-polige Ausführung) aus Wirbelschichtgranulat erfolgte nach optimaler Mischkombination M6. Realisierung von 500 pF mit max. Elektrodenfläche und einer Wandstärke von 0,40 mm.

System: CaCu₃Ti₄O₁₂ (CCT)

Keramiken der Zusammensetzung CaCu₃Ti₄O₁₂ (CCT) weisen neben einer hohen DK₂₀ auch einen günstigen Temperaturgang der Kapazität auf, der in Richtung X7R – Charakteristik geht.

4.2 Aus der Zusammenarbeit CONEC und Universität GH Paderborn bzw FH-SWF

Die Zusammenarbeit betraf im Wesentlichen die Modellierung von Filtersteckverbindern, sowie Messtechnische Fragen.

4.2.1 Grundprinzip eines Filtersteckverbinders am Beispiel eines C-Filters

Bild 4.48 zeigt das Prinzip eines Filters. Ein Störsignal wird einem Nutzsignal überlagert. Die Aufgabe des Filters besteht darin, das Störsignal zu vernichten und trotzdem das Nutzsignal in einem akzeptablen Rahmen zu übertragen, d.h. dass es noch von einem elektronischen System z.B. als digitales Signal erkannt werden kann.

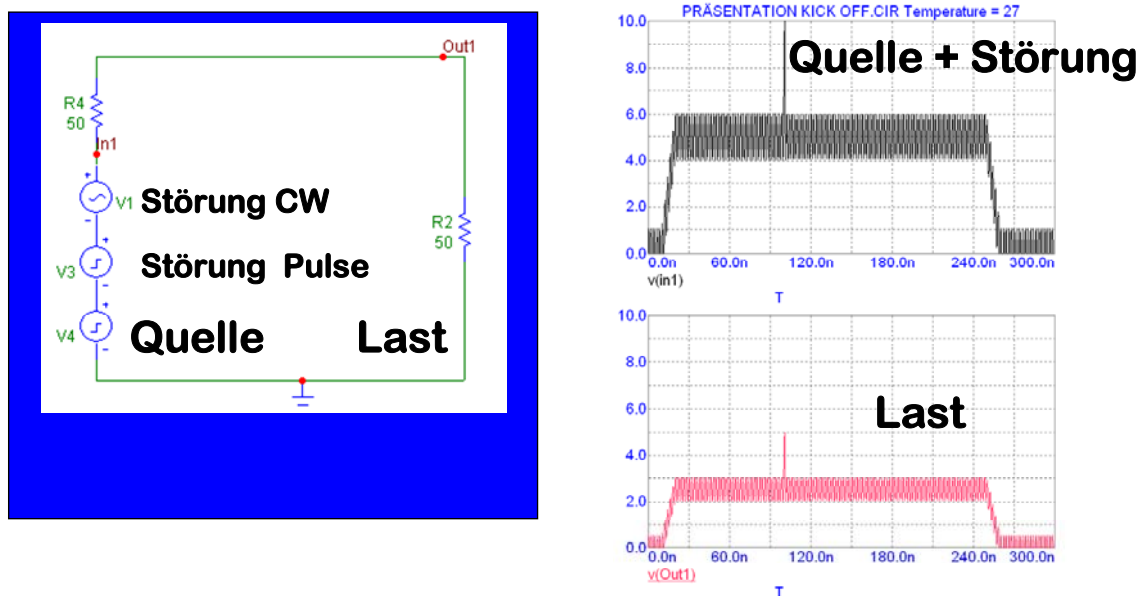
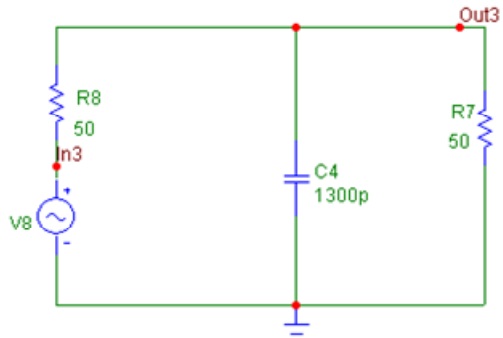


Bild 4.48: Grundfunktion eines Filtersteckverbinders.

Der theoretische Frequenzgang ergibt sich aus Bild 4.49. Demgegenüber zeigt Bild 4.50 den gemessenen Frequenzgang eines realen C-Filters. Es kommt dabei zu starken Resonanzeffekten.

Bild 4.51 zeigt die Übersprechdämpfung. Bild 4.52 zeigt die Abhängigkeit der Kapazität von der Frequenz im unteren Frequenzbereich.



$$\alpha_E(f) = 20 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot V_{out}}{V_{in}}\right)$$



Bild 4.49: Theoretischer Frequenzgang der Einfügungsdämpfung eines C-Filters mit einem idealen Kondensator

Filtertechnologien

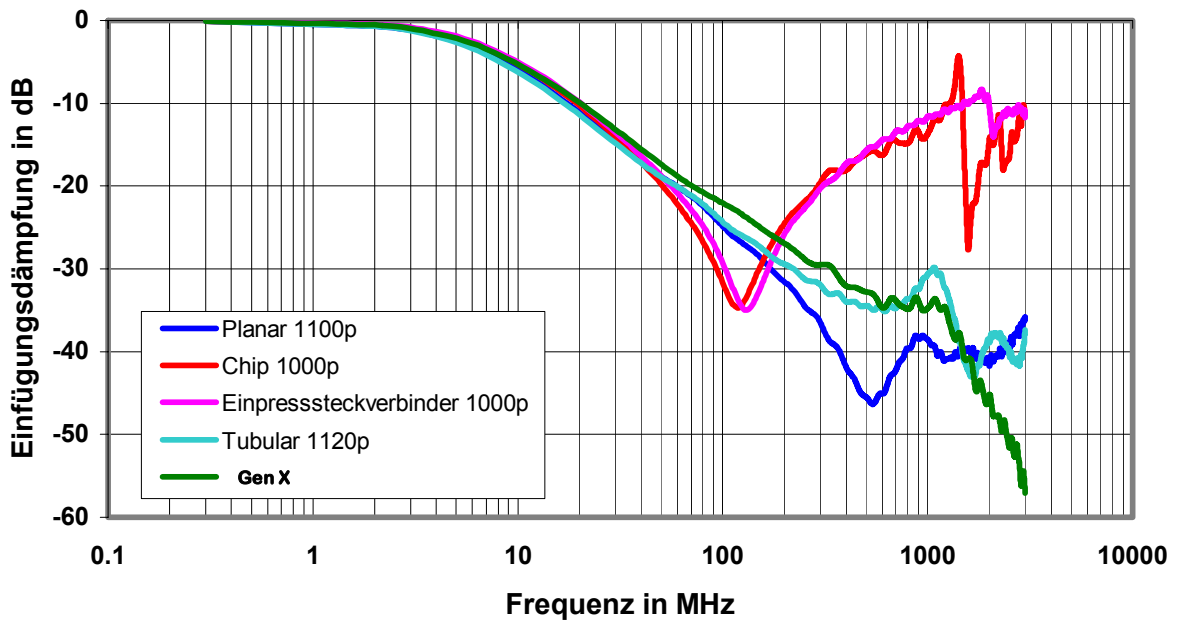


Bild 4.50: Realer Frequenzgang der Einfügungsdämpfung eines C-Filters

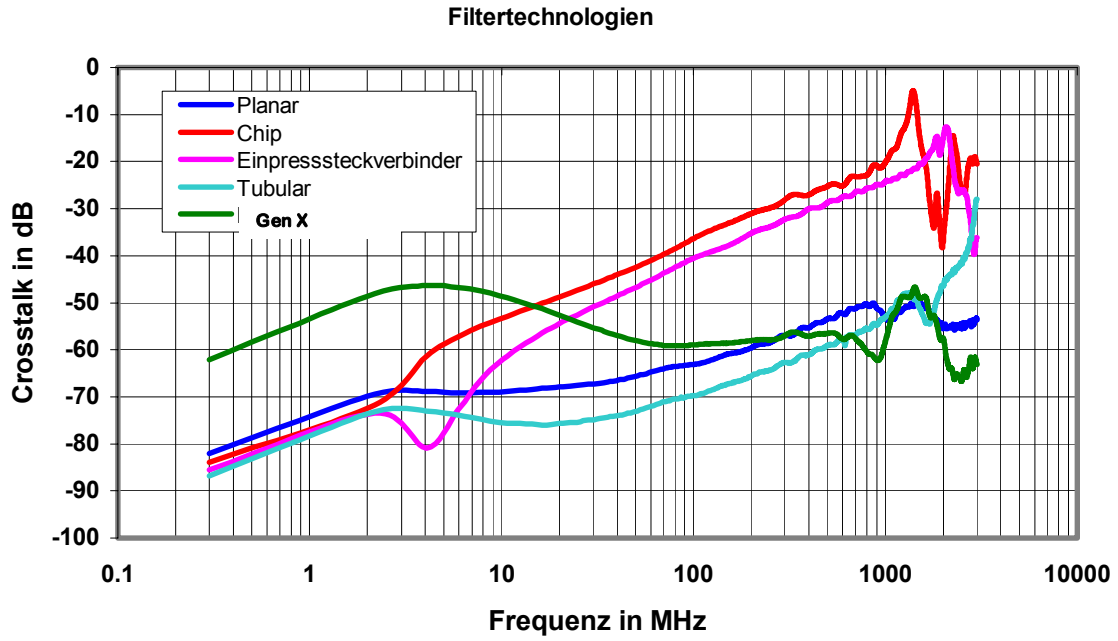


Bild 4.51: Übersprechdämpfung eines C-Filters

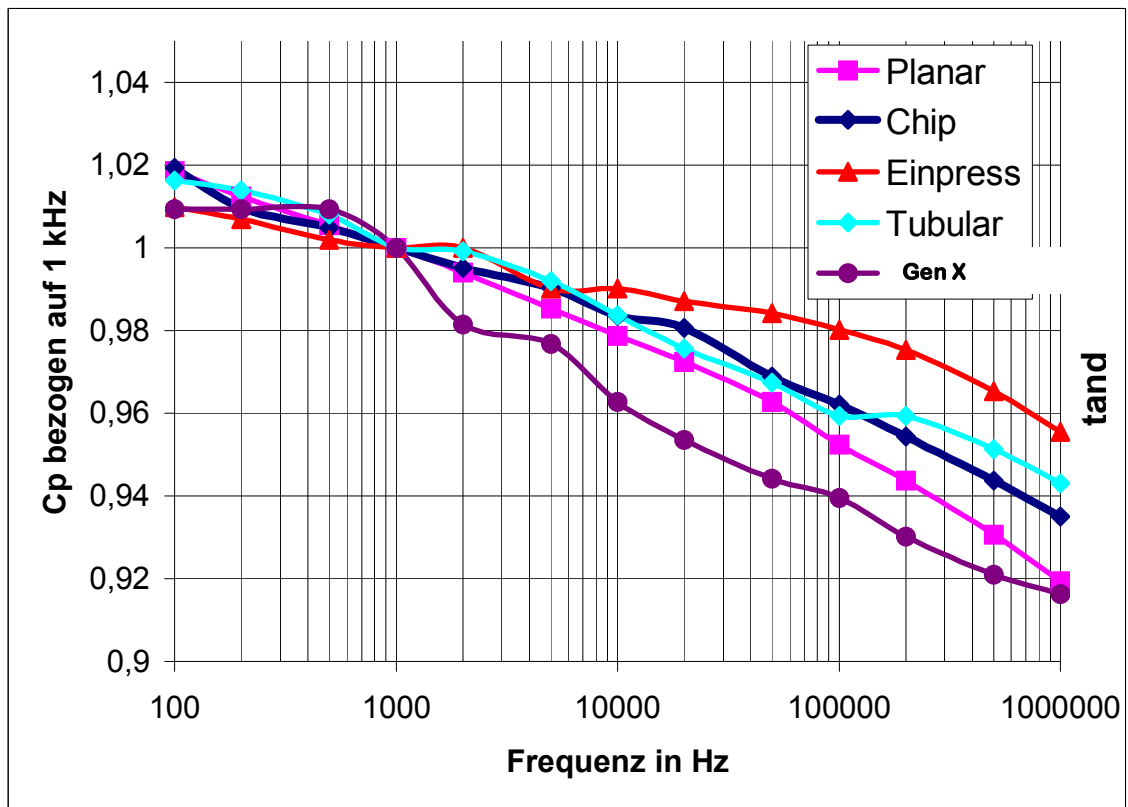


Bild 4.52: Kapazität eines C-Filters in Abhängigkeit von der Frequenz.

4.2.2 Vergleich verschiedener Technologien

Ein Vergleich der am Markt etablierten Technologien ist in Bild 4.53 bis Bild 4.55 dargestellt.

	Kapazität in pF	Ud DC in Volt	αE in dB bei 1 GHz	$\alpha \dot{U}$ dB (bester Wert 0-1GHz)	dC/C in % (-50...+100Grad Celsius)	dC/C=f(f) bis 1 MHz in %	Preislevel
Planare Multilayer USA	5000	700	45	40	20	8	50
Gen1 Taiwan	1300	300	40	50	20	8,5	30
Gen2 PI Ceramic	1300	1500	30	6	50	9	10
Gen3 PI Ceramic	1300	1000	37,5	40	40	10	20
Gen X	2500	1000	35	55	15	8,4	15
Chip	2000	100	12,5	20	20	6,5	15
Röhrchen	2000	300	30	50	20	5,7	30
Marktanforderungen für	1300	1000	40	40	10	10	10

Bild 4.53: Vergleich verschiedener Technologien

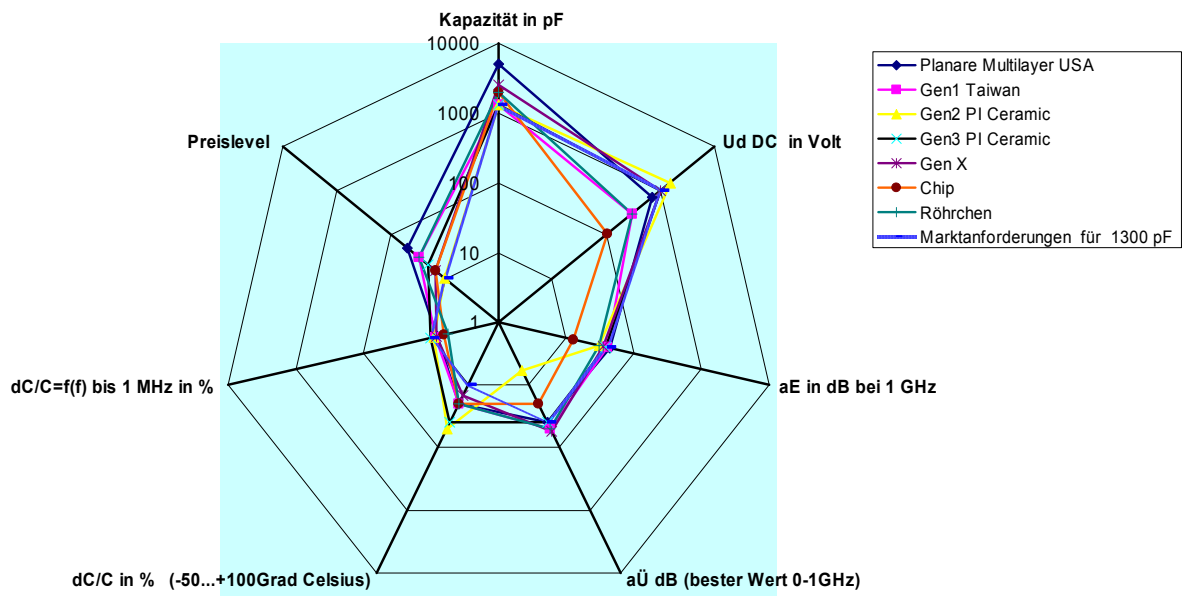


Bild 4.54: Verschiedene Technologien im Vergleich

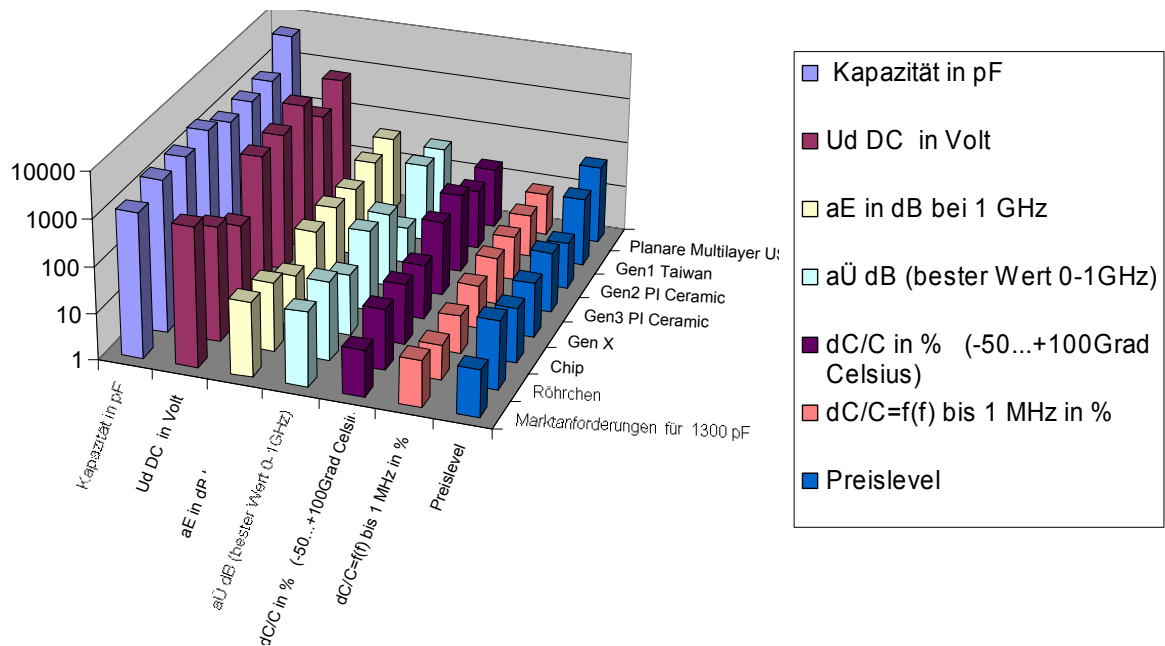


Bild 4.55: Verschiedene Technologien im Vergleich

4.2.3 Realer Kondensator mit einem Dielektrikum hoher Dielektrizitätszahl

Die folgenden Ausführungen betreffen das Verhalten eines realen Kondensators.

Ein Kondensator wird in Bild 4.56 als koaxiale Leitung modelliert mit dem Ziel, den Einfluss eines Dielektrikums mit sehr hoher Dielektrizitätszahl darzustellen. Bild 4.57 zeigt das prinzipielle Verhalten eines Kondensators, der als koaxiale Leitung modelliert wird. Ab der oberen Grenzfrequenz f_0 beginnt der Kondensator zu resonieren, da es aufgrund des geringen Wellenwiderstandes der koaxialen Leitung am Eingang und Ausgang der Leitung des Kondensators zu Fehlanpassungen kommt. Als Konsequenz daraus muss der Kondensator in seiner axialen Ausdehnung möglichst klein gehalten werden, was andererseits wiederum mit einer kleinen Kapazität verbunden ist, was man nicht möchte. Verringert man dann aber die Abstände, um die Kapazität wieder auszugleichen, verliert man die Spannungsfestigkeit.

Zur weiteren Untersuchung wurden daher einige Varianten durchgerechnet, die in Bild 4.58 dargestellt sind. Die Ergebnisse der simulierten Varianten zeigt Bild 4.59. Eine Vergrößerung der Dielektrizitätszahl verringert die obere Grenzfrequenz, d.h. der Kondensator kann höhere Frequenzen als f_0 nicht mehr optimal dämpfen.

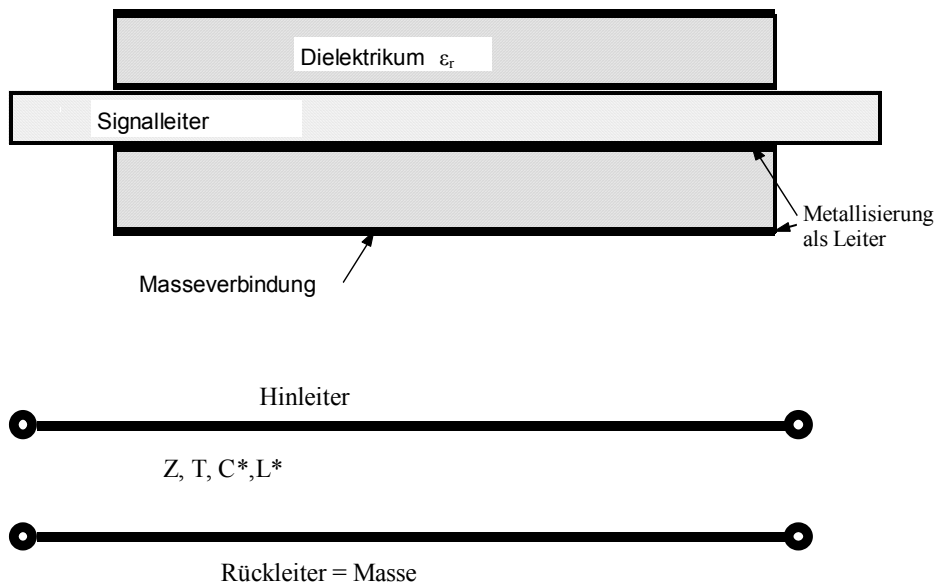


Bild 4.56: Modellierung eines elektrisch langen Kondensators als Koaxialleitung

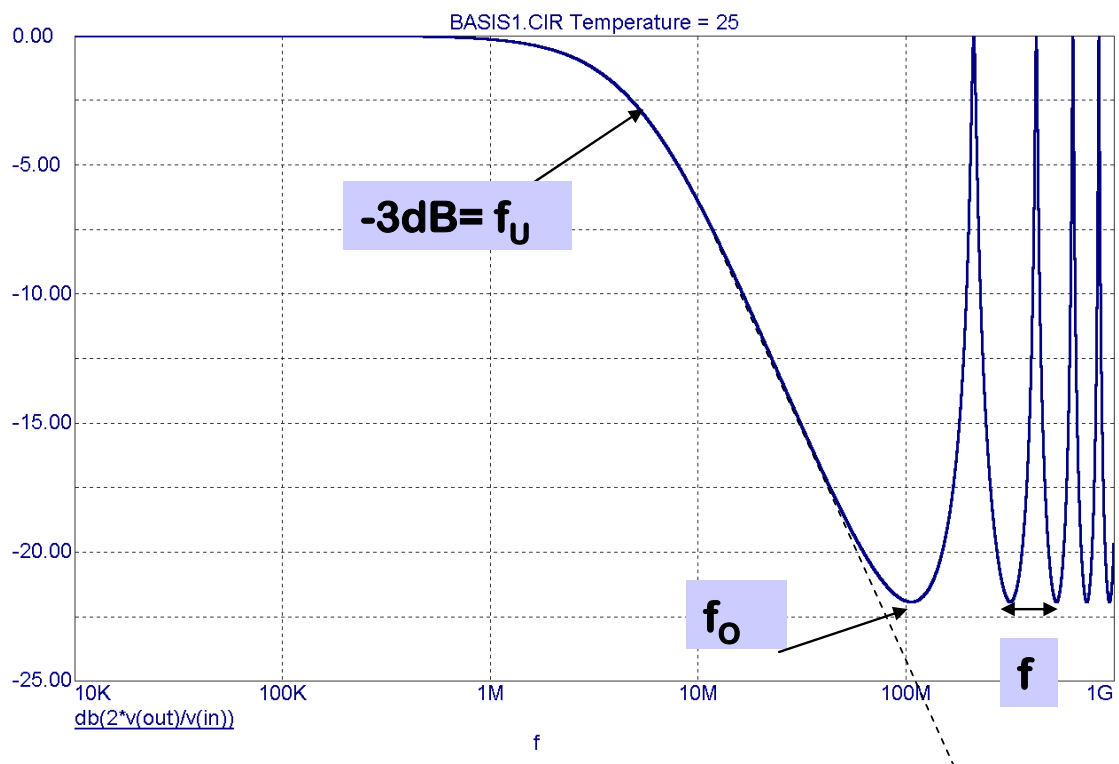


Bild 4.57: Frequenzgang der Einfügungsdämpfung eines realen Kondensators

ϵ_r	Z	v	T	C=C* l	f_U	f_O	f
	Ohm	mm/ns	ns	nF	MHz	MHz	MHz
1000	1,73	9,49	1,05	0,61	10,42	237,17	118,59
2000	1,22	6,71	1,49	1,22	5,21	167,71	83,85
3000	1,00	5,48	1,83	1,83	3,47	136,93	68,47
4000	0,86	4,74	2,11	2,44	2,61	118,59	59,29
5000	0,77	4,24	2,36	3,06	2,08	106,07	53,03
6000	0,70	3,87	2,58	3,67	1,74	96,82	48,41
7000	0,65	3,59	2,79	4,28	1,49	89,64	44,82
8000	0,61	3,35	2,98	4,89	1,30	83,85	41,93
9000	0,58	3,16	3,16	5,50	1,16	79,06	39,53
10000	0,55	3,00	3,33	6,11	1,04	75,00	37,50
11000	0,52	2,86	3,50	6,72	0,95	71,51	35,75
12000	0,50	2,74	3,65	7,33	0,87	68,47	34,23
13000	0,48	2,63	3,80	7,94	0,80	65,78	32,89
14000	0,46	2,54	3,94	8,55	0,74	63,39	31,69
15000	0,45	2,45	4,08	9,17	0,69	61,24	30,62
16000	0,43	2,37	4,22	9,78	0,65	59,29	29,65
17000	0,42	2,30	4,35	10,39	0,61	57,52	28,76
18000	0,41	2,24	4,47	11,00	0,58	55,90	27,95
19000	0,40	2,18	4,59	11,61	0,55	54,41	27,21
20000	0,39	2,12	4,71	12,22	0,52	53,03	26,52

ϵ_r : Dielektrizitätszahl des Dielektrikums

Z: Wellenwiderstand der Leitung

v: Ausbreitungsgeschwindigkeit

T: Laufzeit

C=C* l : Kapazität des Kondensators

f_U : Untere Grenzfrequenz (3dB)

f_O : Obere Grenzfrequenz

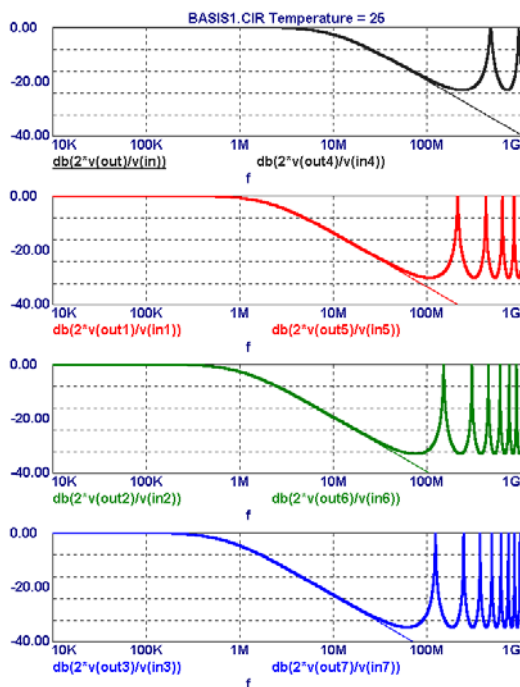
f: Abstand der Nullstellen

$$f_U = \frac{1}{\pi C Z_M}$$

$$f_O = \frac{1}{4T}$$

$$f = \frac{1}{2T}$$

Bild 4.58: Einfluss der Dielektrizitätszahl auf die Einfügungsdämpfung



Von oben nach unten :

$\epsilon_r = 1000, 5000, 10000, 15000$;

C = 0,61 nF, 3,06nF, 6,11nF, 9,17 nF.

Die fetten Linien geben den Frequenzgang der Einfügungsdämpfung für einen el. langen Kondensator an.

Die dünne Linie gibt den Frequenzgang der Einfügungsdämpfung für einen idealen Kondensator an.

Bild 4.59: Simulation der Einfügungsdämpfung eines Filtersteckverbinders

4.2.4 Ansätze zur Verbesserung des Hochfrequenzverhaltens

Bei Kondensatoren, die mit Dielektrika mit hohen Dielektrizitätszahlen hergestellt werden, fällt die Einfügungsdämpfung bei hohen Frequenzen im Bereich einiger 100 MHz bis GHz wieder ab. Zur Lösung dieses Problems wurden Ansätze durchgeführt, die im Folgenden beschrieben sind.

Die folgende Untersuchung zeigt prinzipiell einen Weg auf, wie die stehenden Wellen in ihrer Wirkung abgeschwächt werden können. Dazu wird gemäß Bild 4.60 der zylindrische Kondensator in 4 Leitungsabschnitte aufgeteilt.

Eine elektrische Ersatzschaltung zeigt Bild 4.61. Die mit einer solchen Schaltung zu erzielende Einfügungsdämpfung zeigt *Bild 4.62*. Gegenüber einem nicht unterteilten Kondensator erhält man eine Verbesserung der Einfügungsdämpfung. Dabei wird die Dämpfung größer und die Resonanzen verschieben sich hin zu höheren Frequenzen.

Eine Begrenzung der Resonanzen kann durch die Beschaltung der Leitungsabschnitte mit dem Wellenwiderstand der Leitungsabschnitte erreicht werden. Eine Beschaltung zwischen Signalleiter und Masse kommt nicht in Frage, da die Impedanz des Filters dadurch unzulässig klein würde. Daher kommt nur die in Bild 4.63 dargestellte Beschaltung in Frage, deren Wirksamkeit in Bild 4. dargestellt ist. Man erkennt die weniger ausgeprägten Resonanzen im oberen Frequenzbereich, die hier im Gegensatz zu Bild 4. statt -200 dB nur noch etwa 50 dB betragen.

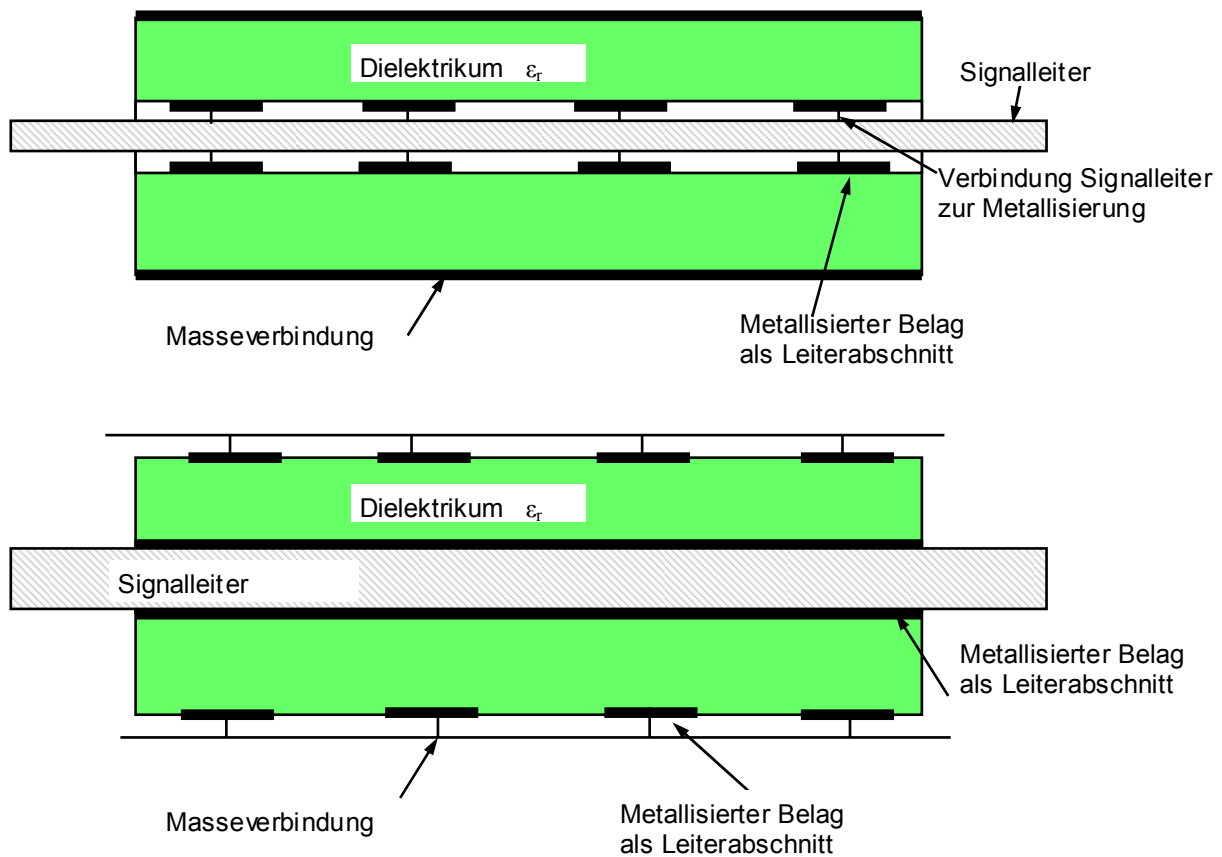


Bild 4.60: Schnitt durch einen einzelnen zylindrischen Kondensator eines Filtersteckverbinders mit mehrfacher Unterteilung in z.B. hier dargestellte 4 einzelne Leitungsabschnitte.

Oben: Die Innenelektrode des Kondensators ist in 4 Leitungsabschnitte unterteilt und in der Mitte der Leitungsabschnitte kontaktiert.

Unten: Die Außenelektrode des Kondensators ist in 4 gleiche Leitungsabschnitte unterteilt und in der Mitte kontaktiert.

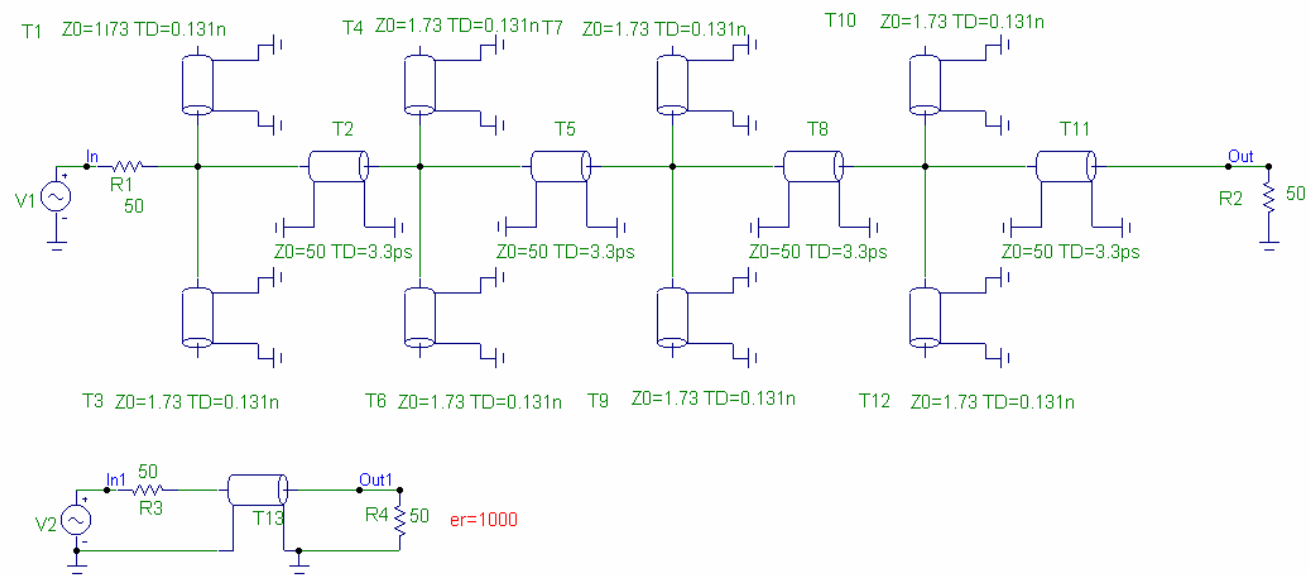


Bild 4.61: Oben: Modellierung für einen Kondensator gemäß Bild 1.1.2.1.1 mit den Daten $\epsilon_r = 1000$ $C = 0,61$ nF,

Länge eines Leitungsabschnitts = 2,5 mm , Laufzeit eines Abschnitts = 262 ps. Da dieser Abschnitt in der Mitte kontaktiert ist, vergl.

Bild 1.1.2.1.1, wird die Leitung halbiert und parallel geschaltet. Wellenwiderstand der Leitungsabschnitte = 1,73 Ohm

Laufzeit der Verbindung (1 mm angenommen) zwischen zwei Leitungsabschnitten = 3,3 ps.

Unten: Schaltung ohne Unterteilung in Leitungsabschnitte.

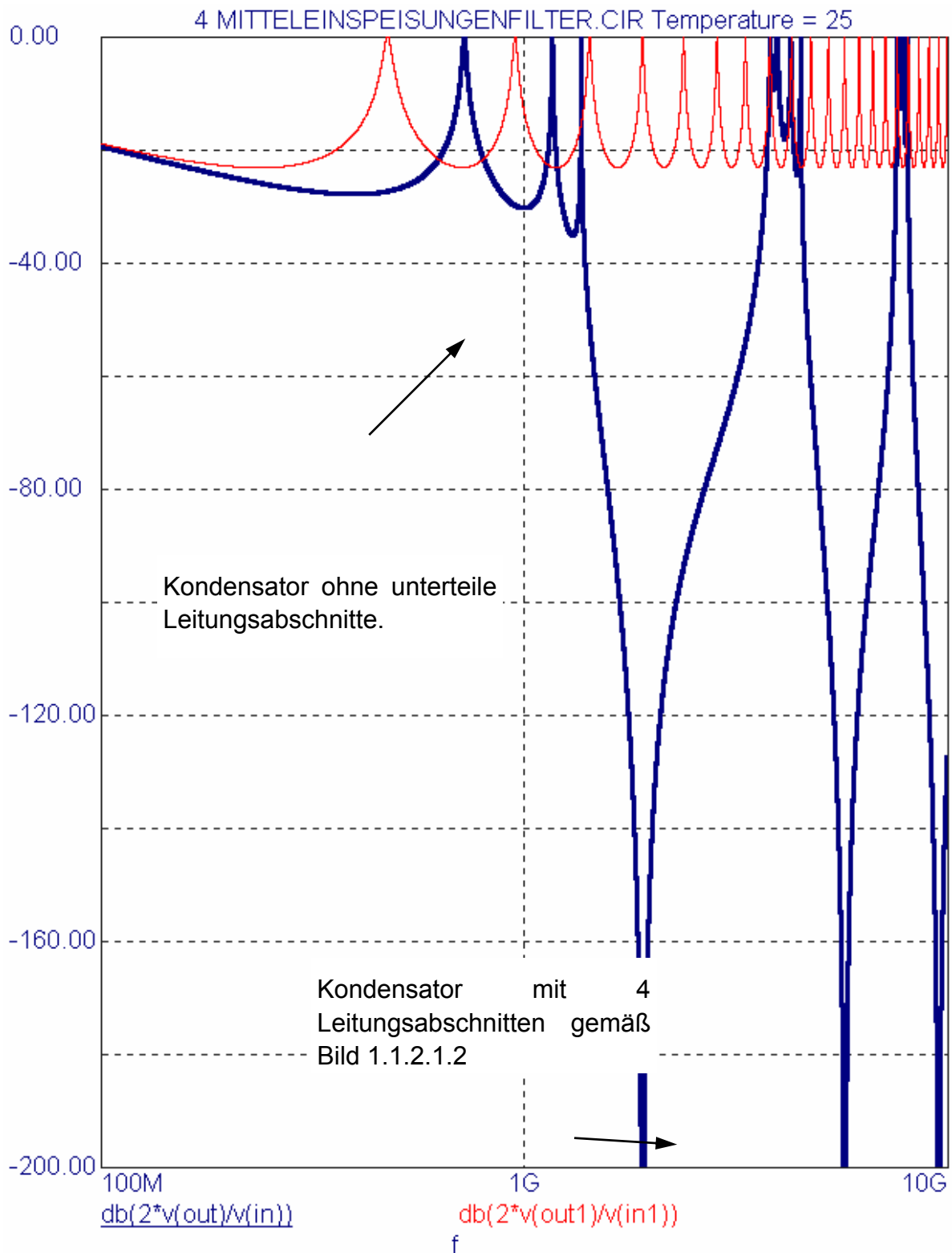


Bild 4.62: Resultat der Berechnung für den Frequenzgang der Einfügungsdämpfung für einen Kondensator mit 4-fach unterteilten Leitungsabschnitten gemäß Bild 4.61 im Vergleich zu einem Kondensator ohne Unterteilung der Leitungsabschnitte im Bereich 100 MHz bis 10 GHz.

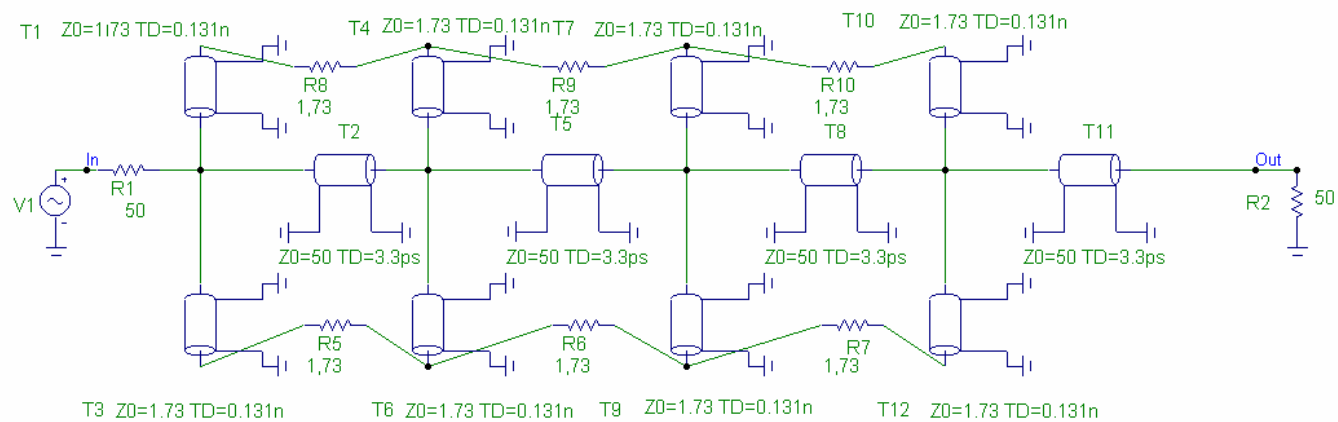


Bild 4.63: Modellierung für einen Kondensator mit den Daten

$\epsilon_r = 1000$ $C=0,61$ nF , Länge eines Leitungsabschnitts = 2,5 mm , Laufzeit eines Abschnitts =262 ps. Da dieser Abschnitt in der Mitte kontaktiert ist, wird die Leitung halbiert und parallel geschaltet. Wellenwiderstand der Leitungsabschnitte = 1,73 Ohm

Laufzeit der Verbindung (1 mm angenommen) zwischen zwei Leitungsabschnitten = 3,3 ps. R7-R10 Beschaltungswiderstände

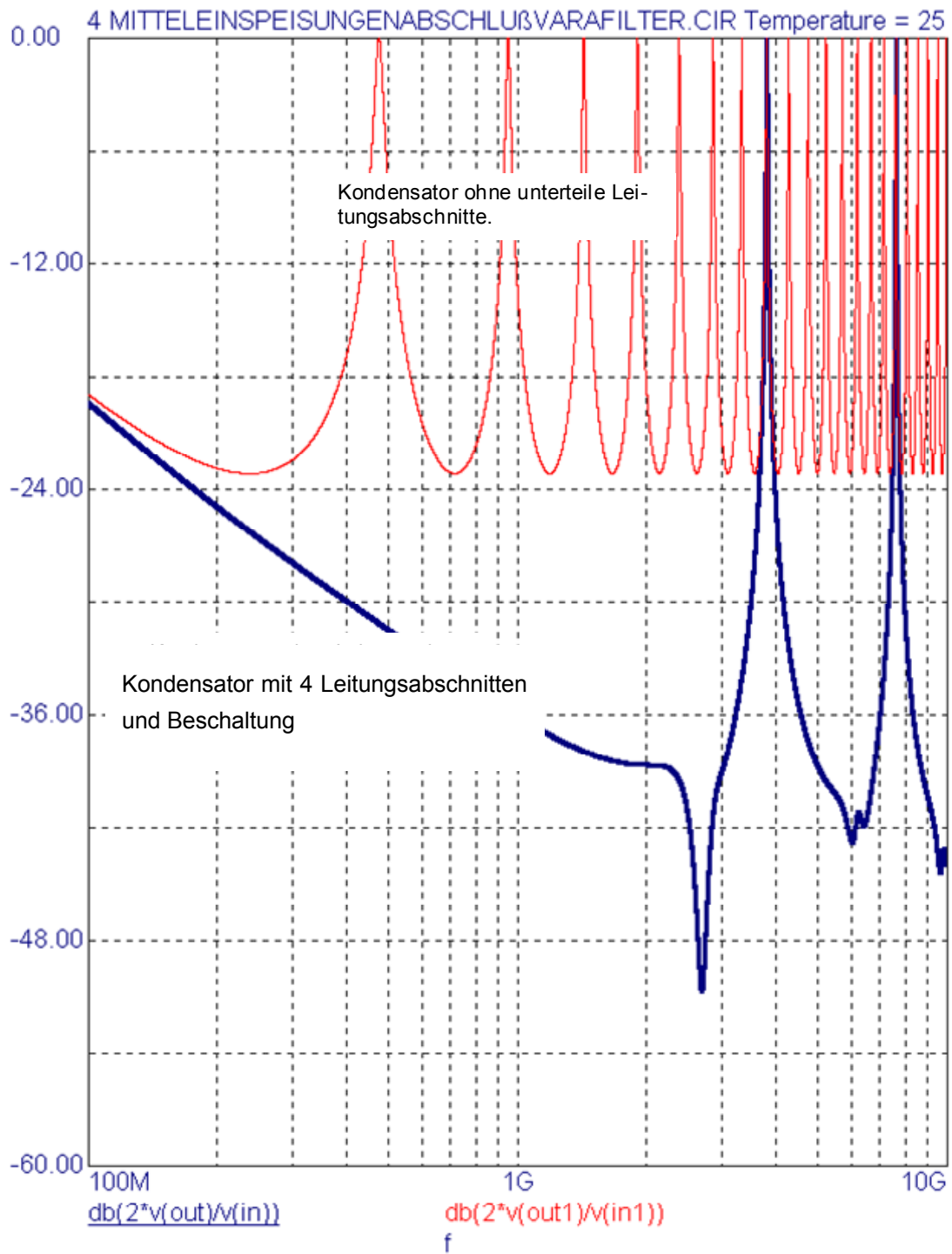


Bild 4.64: Resultat der Berechnung für den Frequenzgang der Einfügungsdämpfung für einen Kondensator mit 4-fach unterteilten und mit dem Wellenwiderstand beschalteten Leitungsabschnitten gemäß Bild 4.63 im Vergleich zu einem Kondensator ohne Unterteilung der Leitungsabschnitte im Frequenzbereich bis 1 GHz.

4.3 Ergebnisse aus der Entwicklung bei der Fa CONEC

4.3.1 Übersicht der Prüfungen

Um eine erste Aussage über das Verhalten des neuen Materials im Steckverbinder bewerten zu können wurden die folgenden Prüfungen durchgeführt.

4.3.1.1 Kapazität und Verlustfaktor

Die Kapazität und der Verlustfaktor wurden innerhalb des Temperaturbereichs – 60°C bis 155°C bewertet.

4.3.1.2 Isolationswiderstand

Der Isolationswiderstand wurde bei Raumtemperatur mit 100V DC bewertet.

4.3.1.3 Einfügungsdämpfung

Die Einfügungsdämpfung wird nach dem MIL Standard 220 gemessen und stellt das logarithmische Verhältnis der Pegel mit und ohne Filter dar. Gemessen wird in einem 50OHM Messsystem. Bild 4.65 zeigt den Messaufbau.

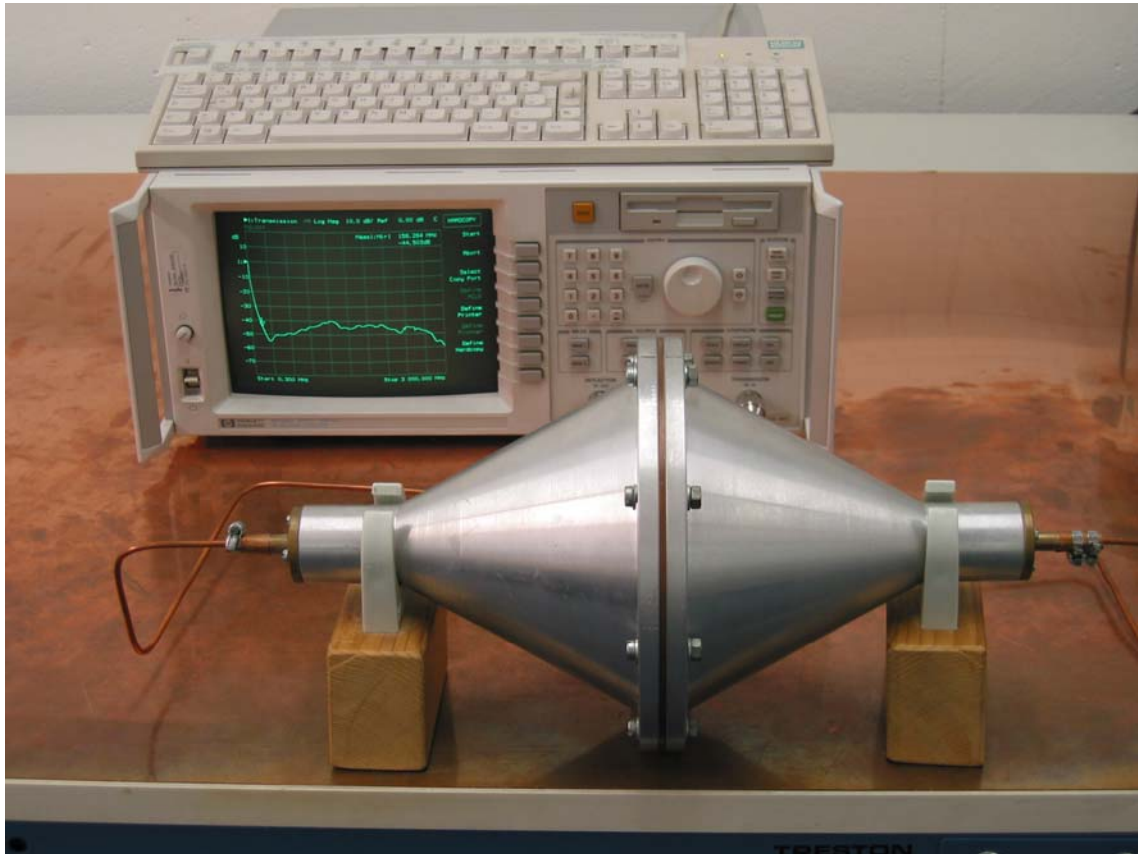


Bild 4.65: Aufbau eines Messplatzes für die Messung der Einfügungsdämpfung und der Übersprechdämpfung

4.3.1.4 Übersprechen/Crosstalk

Die Einfügungsdämpfung wird nach dem MIL Standard 220 gemessen und stellt das logarithmische Verhältnis der Pegel mit und ohne Filter dar. Gemessen wird in einem 50 OHM Messsystem.

4.3.1.5 Spannungsfestigkeit

Die Spannungsfestigkeit wird mit den folgenden Parametern ermittelt:

Anstiegsgeschwindigkeit : 200V/s

Haltezeit : 60s

4.3.1.6 Steckzyklen

Die Steckzyklen werden ermittelt, um die mechanische Stabilität im Einsatz des Steckverbinders zu simulieren. Danach wird eine Überprüfung der Kapazität, des Verlustfaktors und der Spannungsfestigkeit vorgenommen.

4.3.2 Übersicht Proben

Getestete Materialien

Probenbezeichnung	Werkstoffsystem	Bemerkung
K1 + K2	PMN – C1 / PMN – PNN – PT (K1 + K2) , 1200°C, 120'	Standard Elektroden Material
K1 + K2	PMN – C1 / PMN – PNN – PT (K1 + K2) , 1200°C, 120'	HD Elektroden Material
K1 + K3	C1 / PMN – PT- 7525 (K1 + K3) , 1200°C, 120'	

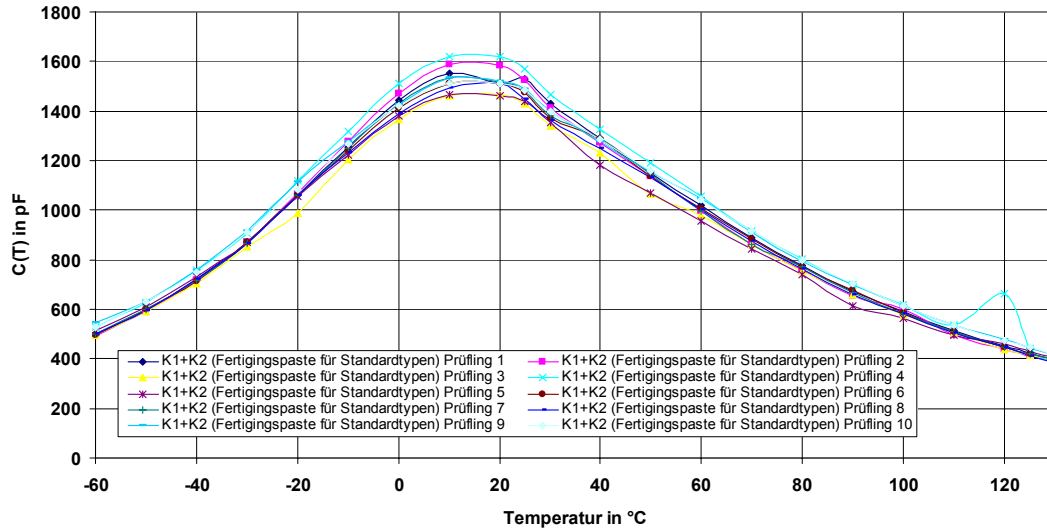
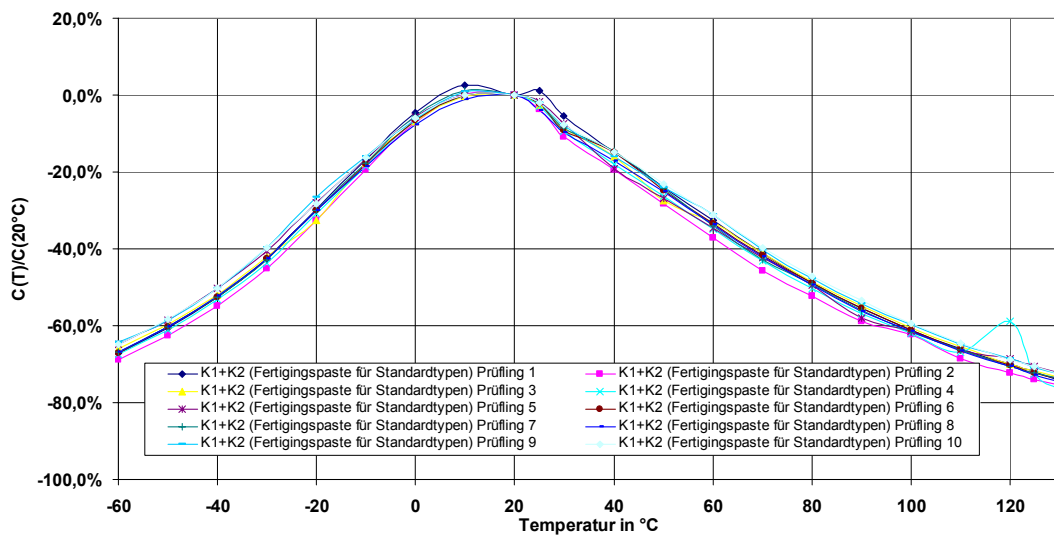
4.3.3 Ergebnisse

4.3.3.1 K1+K2

DK20 : 15.300

Die Bemusterung dieses Werkstoffsystem wurde mit zwei verschiedenen Elektrodenmaterialien durchgeführt, die im Folgenden mit Standard D-SUB und HD-SUB bezeichnet werden.

4.3.3.1.1 Elektrodenmaterial : Standard –D-SUB

Bild 4.66: $C(T)$ Bild 4.67: $C(T) / C(T_{20^\circ\text{C}})$

Der Temperaturverlauf stellt sich wie bei den Ergebnissen von PI Ceramic dar. Der Temperaturbereich für eine Abweichung von $\pm 20\%$ liegt zwischen -10°C bis $+40^\circ\text{C}$. Damit hat sich nahezu der gleiche Temperaturbereich wie bei den Messungen an den Proben der Planarfilterplatten ergeben.

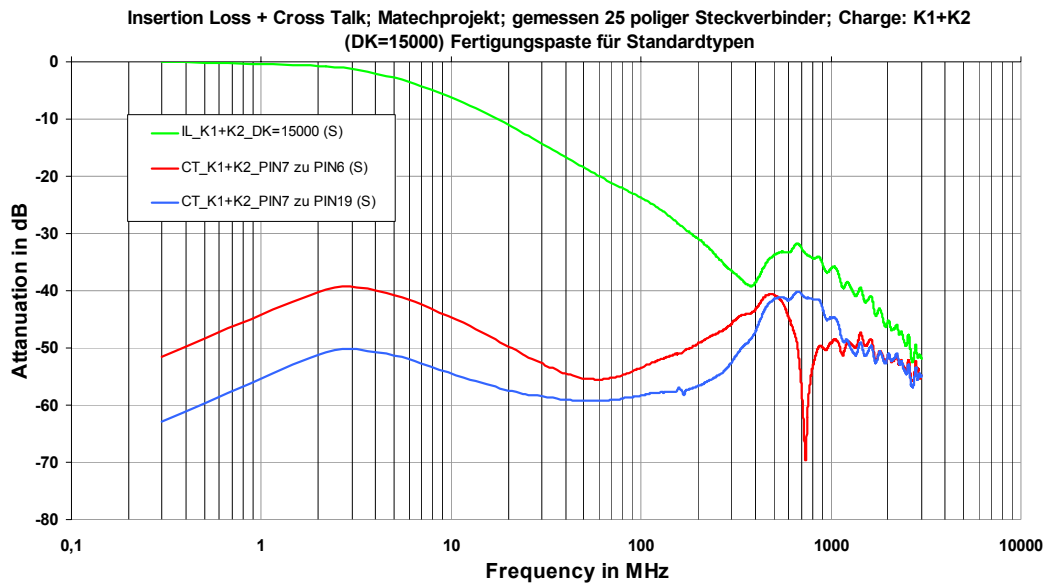


Bild 4.68: Einfügungsdämpfung und Crosstalk

Der Verlauf der Einfügungsdämpfung entspricht den Anforderungen der Industrie für diesen Kapazitätswert. Beim ermittelten Crosstalk kann von keiner Beeinflussung der benachbarten Signalkontakte ausgegangen werden.

4.3.3.1.1 Spannungsfestigkeit

Prüfling	710V DC	1500V DC
K1+K2 (Fertigungspaste für Standardtypen) Prüfling1	bestanden	Ausfall bei 1240V
K1+K2 (Fertigungspaste für Standardtypen) Prüfling2	bestanden	Bestanden
K1+K2 (Fertigungspaste für Standardtypen) Prüfling3	bestanden	Ausfall bei 1190V
K1+K2 (Fertigungspaste für Standardtypen) Prüfling4	bestanden	Bestanden
K1+K2 (Fertigungspaste für Standardtypen) Prüfling5	bestanden	Ausfall bei 1130V
K1+K2 (Fertigungspaste für Standardtypen) Prüfling6	bestanden	Ausfall bei 1450V
K1+K2 (Fertigungspaste für Standardtypen) Prüfling7	bestanden	Ausfall bei 1450V
K1+K2 (Fertigungspaste für Standardtypen) Prüfling8	bestanden	Bestanden
K1+K2 (Fertigungspaste für Standardtypen) Prüfling9	bestanden	Ausfall bei 800V
K1+K2 (Fertigungspaste für Standardtypen) Prüfling10	bestanden	Bestanden

4.3.3.1.2 Elektrodenmaterial HD-SUB

Bei den Mustern mit dem Elektrodenmaterial HD-SUB konnten ein Kapazitätswachst von ca. 300pF gegenüber dem Standard D_SUB Elektrodenmaterial ermittelt werden. Dies hängt mit damit zusammen, dass die Basis der Druckpaste besser mit der Keramik harmonisiert.

Ansonsten haben sich die Ergebnisse gegenüber dem Elektrodenmaterial Standard D-SUB nicht verändert.

4.3.3.1.2.1 Kapazität

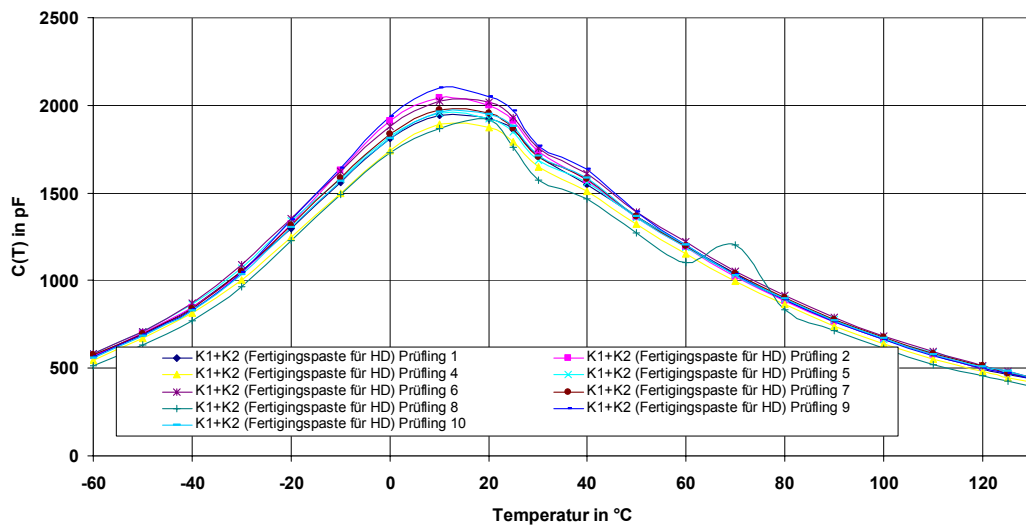


Bild 4.69: $C(T)$

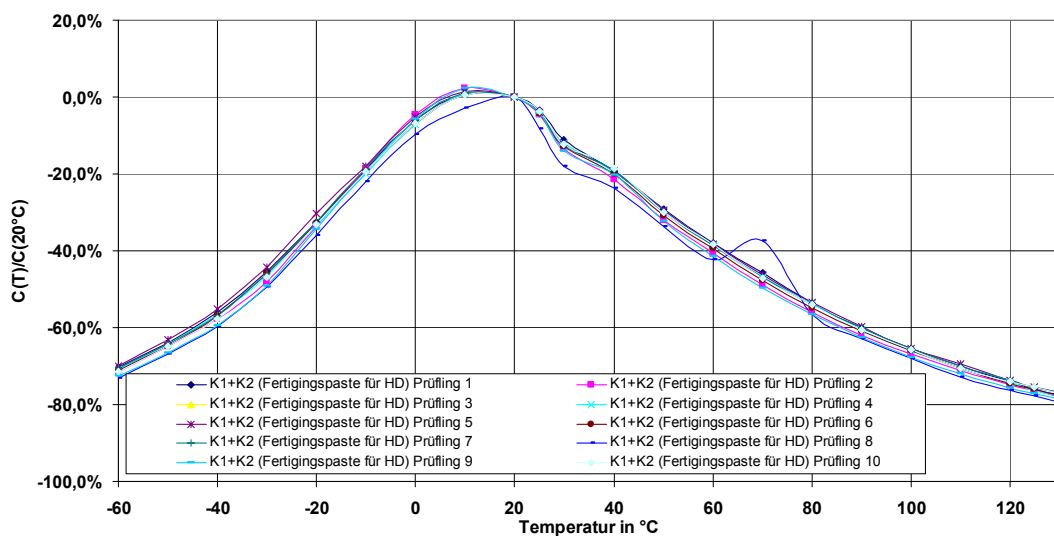


Bild 4.70: $C(T)/C(T_{20^\circ C})$

4.3.3.1.2.2 Spannungsfestigkeit

Prüfling	710V DC	1500V DC
K1+K2 (Fertigungspaste für HD) Prüfling1	bestanden	Ausfall bei 580V
K1+K2 (Fertigungspaste für HD) Prüfling2	bestanden	Ausfall bei 1240V
K1+K2 (Fertigungspaste für HD) Prüfling3	bestanden	Ausfall bei 1230V
K1+K2 (Fertigungspaste für HD) Prüfling4	bestanden	Ausfall bei 705V
K1+K2 (Fertigungspaste für HD) Prüfling5	bestanden	Ausfall bei 810V
K1+K2 (Fertigungspaste für HD) Prüfling6	bestanden	Ausfall bei 1480V
K1+K2 (Fertigungspaste für HD) Prüfling7	bestanden	bestanden
K1+K2 (Fertigungspaste für HD) Prüfling8	bestanden	Ausfall bei 810V
K1+K2 (Fertigungspaste für HD) Prüfling9	bestanden	Ausfall bei 1030V
K1+K2 (Fertigungspaste für HD) Prüfling10	bestanden	Ausfall bei 1010V

4.3.3.2 K1+K3

DK₂₀ : 7300

Der Temperaturverlauf der Kapazität hat bei diesem Werkstoffsystem keinen extremen Abfall unter 0°C und oberhalb 50°C gezeigt. Bei Temperaturen oberhalb 50°C steigt die Kapazität um bis zu 40% gegenüber dem Wert bei 20°C. Dieser große Anstieg wurde nicht bei den Ergebnissen von PI Ceramic festgestellt.

Kapazität

Bild 4.71 und Bild 4.72 zeigen die Abhängigkeit der Kapazität von der Temperatur.

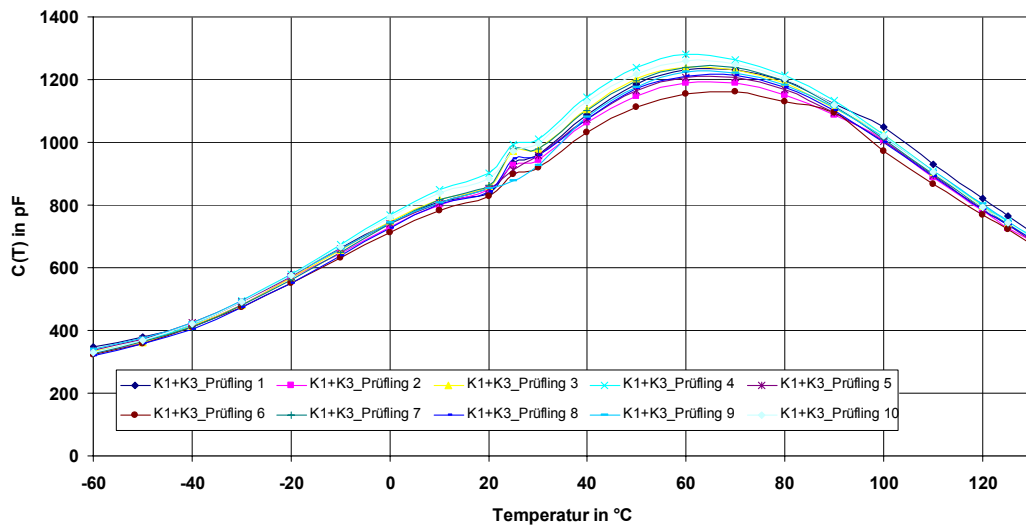


Bild 4.71: $C(T)$

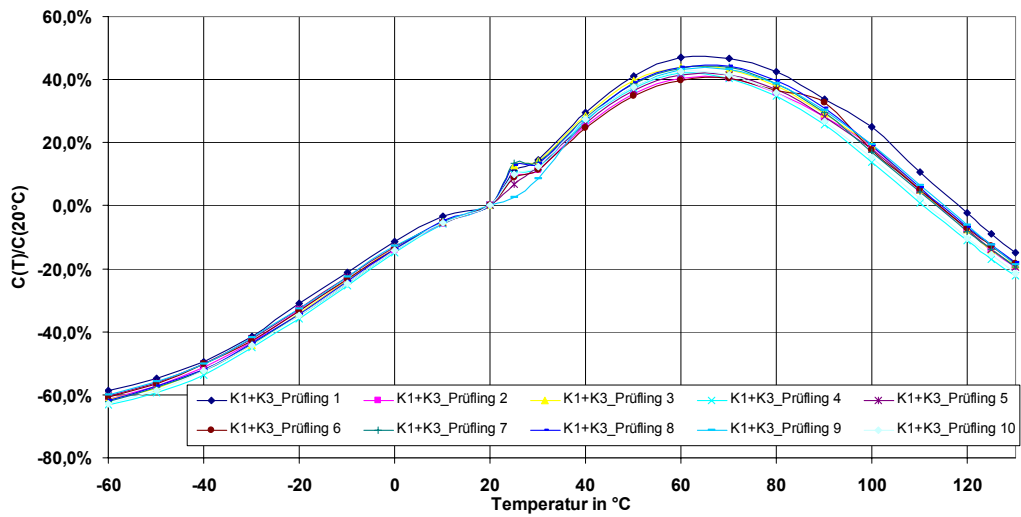
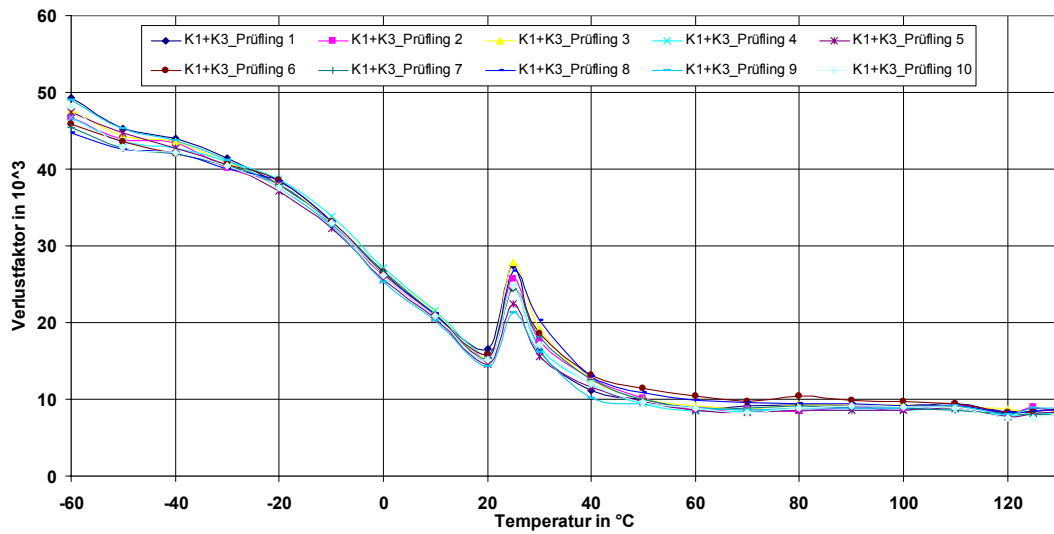
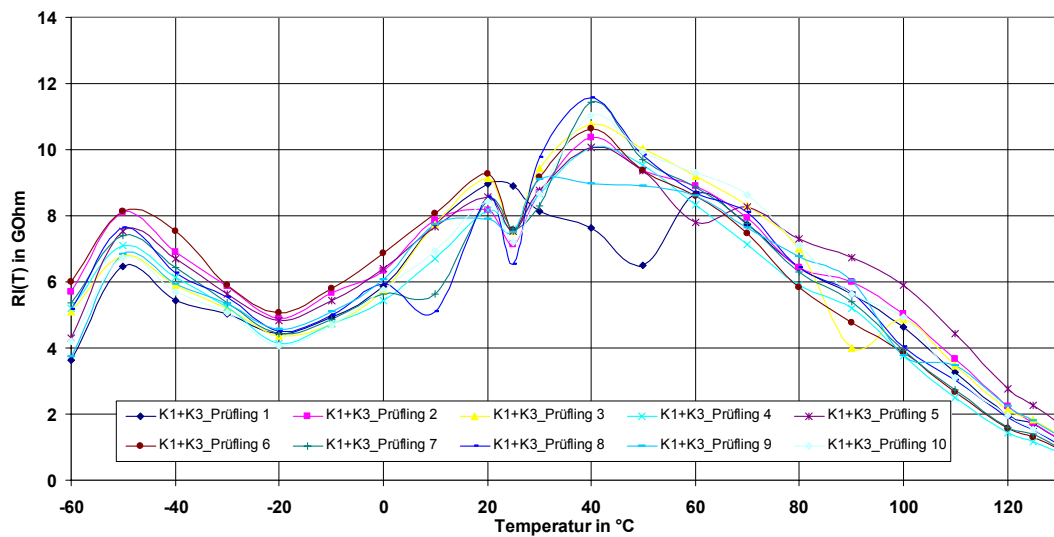


Bild 4.72: $C(T)/C(T_{20^{\circ}\text{C}})$

4.3.3.2.1 Verlustfaktor

Bild 4.73: Verlustfaktor $\tan \delta$

4.3.3.2.2 Isolationswiderstand

Bild 4.74: Isolationswiderstand $R_i(T)$

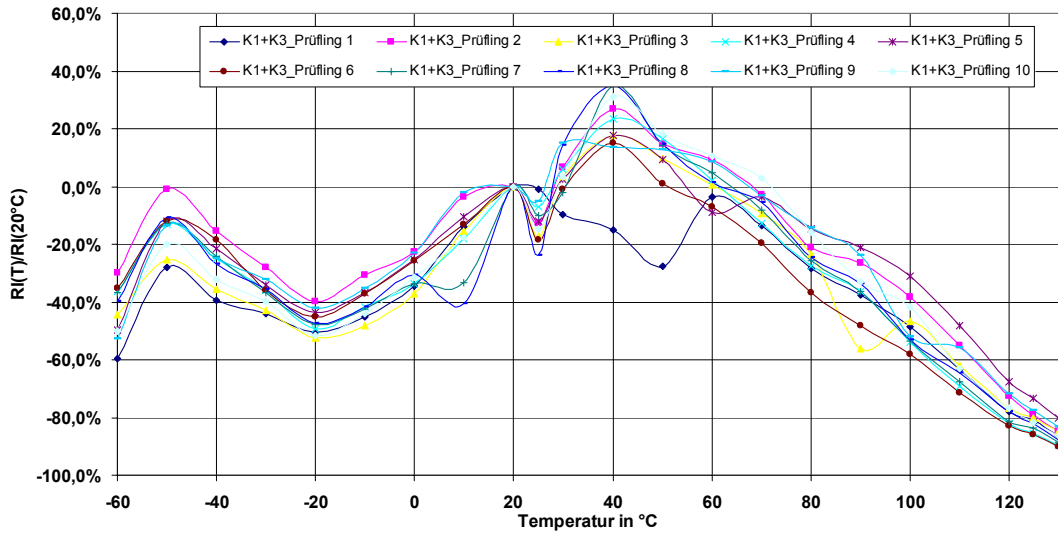


Bild 4.75: $R_i(T)/R_i(T_{20^\circ\text{C}})$

4.3.3.2.3 Einfügungsdämpfung / Crosstalk

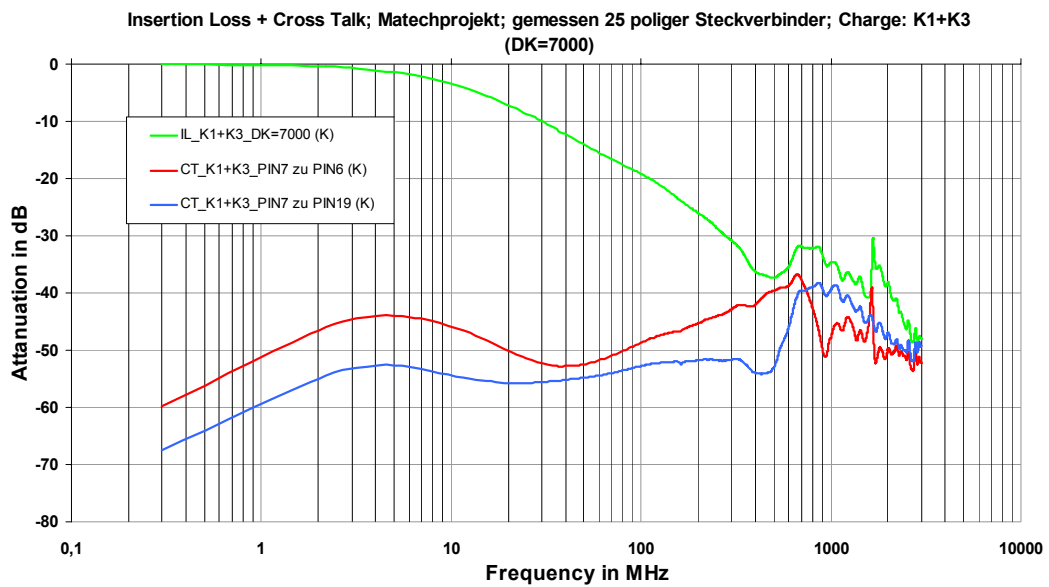


Bild 4.76: Einfügungsdämpfung und Crosstalk

4.3.3.2.3.1 Spannungsfestigkeit

Prüfling	710V DC	1500V DC
K1+K3 Prüfling 1	bestanden	Ausfall bei 1040V
K1+K3 Prüfling 2	bestanden	Ausfall bei 1010V
K1+K3 Prüfling 3	bestanden	Ausfall bei 820V
K1+K3 Prüfling 4	bestanden	Ausfall bei 820V
K1+K3 Prüfling 5	bestanden	Ausfall bei 1020V
K1+K3 Prüfling 6	bestanden	Ausfall bei 1040V
K1+K3 Prüfling 7	bestanden	Ausfall bei 820V
K1+K3 Prüfling 8	bestanden	Ausfall bei 1040V
K1+K3 Prüfling 9	bestanden	Ausfall bei 1240V
K1+K3 Prüfling 10	bestanden	Ausfall bei 1040V

Die Spannungsfestigkeit wurde an unlackierten Prüflingen durchgeführt. Eine Bewertung mit einem Schutzlacküberzug brachte eine sichere Spannungsfestigkeit bei 1500VDC.

4.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Planarfilterplatten, hergestellt mit den Werkstoffsystem K1 + K2 und K1 + K3, wurden nach der im vorigen Abschnitt dargestellten Vorprüfung einem umfangreichen Produktqualifikationstest nach unten aufgestelltem Plan durchgeführt. Beide Werkstoffe erfüllen die mechanischen und elektrischen Anforderungen für die aktuellen Conec-Produkte.

<u>Sequence a</u>	<u>Sequence b</u>	<u>Sequence c</u>	<u>Sequence d</u>	<u>Sequence e</u>	<u>Sequence f</u>	
Visual/ Mechanical Examination Contact Resistance Mating / Unmating Force Durability Contact Resistance Gas Tightness (Sn, Ag only) Wear Track (Au, Pd only)	Visual / Mechanical Examination Contact Resistance Insulation Resistance Dielectric Withstanding Voltage Capacitance Dissipation Factor Vibration Contact Resistance Insulation Resistance Dielectric Withstanding Voltage Capacitance Dissipation Factor Mechanical Shock Contact Resistance Insulation Resistance Dielectric Withstanding Voltage Capacitance Dissipation Factor	Visual / Mechanical Examination Mating / Unmating Force Contact Resistance Insulation Resistance Dielectric Withstanding Voltage Capacitance Dissipation Factor Thermal Shock Contact Resistance Insulation Resistance Dielectric Withstanding Voltage Capacitance Dissipation Factor Moisture Resistance Mating / Unmating Force Contact Resistance Insulation Resistance Dielectric Withstanding Voltage Capacitance Dissipation Factor	Visual / Mechanical Examination Contact Resistance Insulation Resistance Dielectric Withstanding Voltage Capacitance Dissipation Factor Insertion Loss Thermal Aging Filtered Ground Integrity Contact Resistance Insulation Resistance Dielectric Withstanding Voltage Capacitance Dissipation Factor Insertion Loss Electrical Surge	Visual / Mechanical Examination Cable Termination Resistance Thermal Aging Termination Gas Tightness Cable Termination Resistance	Visual / Mechanical Examination Cable Flexing Strain Relief Integrity Termination Gas Tightness Sequence i Visual / Mechanical Examination Contact Resistance Insulation Resistance Dielectric Withstanding Voltage Capacitance Dissipation Factor Insertion Loss Durability Mixed Flowing Gas Contact Resistance Mixed Flowing Gas Contact Resistance Mixed Flowing Gas Contact Resistance Mixed Flowing Gas	Contact Resistance Durability Contact Resistance Insulation Resistance Dielectric Withstanding Voltage Capacitance Dissipation Factor Insertion Loss

Tabelle 4.3: Qualifikationsprogramm

4.3.4.1 Wekstoffsystem K1+K2

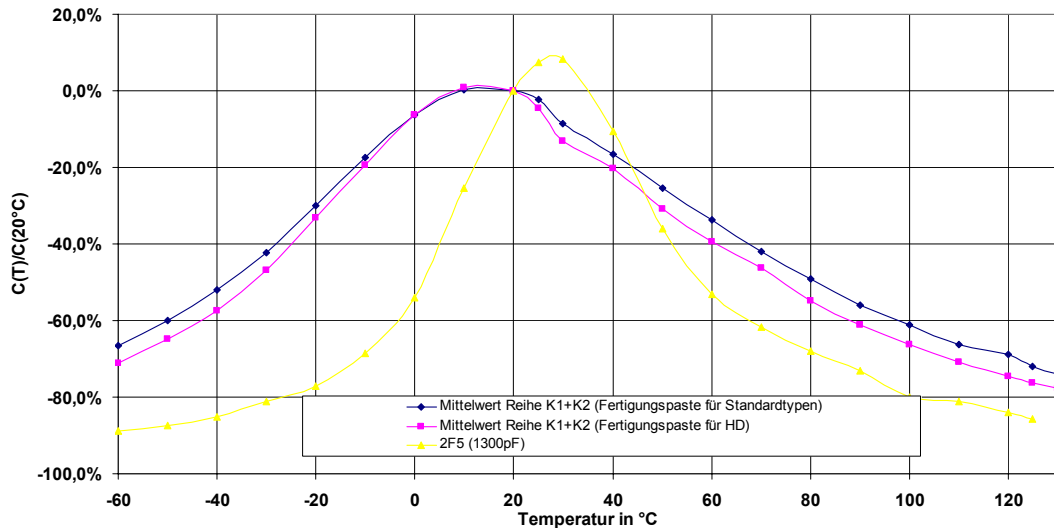


Bild 4.77: Vergleich zwischen K1+K2 und 2F5

In Bild 4.77 ist die auf 20°C normierte Temperaturabhängigkeit der Kapazität für das in diesem Vorhaben entwickelte Werkstoffsystem K1 + K2 und das bereits existierende Werkstoffsystem 2F5 dargestellt. Bei fast gleichen Dielektrizitätskonstanten konnte eine erheblich verbesserte Temperaturstabilität hergestellt werden. Der Curiepunkt des Werkstoffsystems liegt bei 20°C und die Steigungsraten ober- und unterhalb des Curiepunktes sind gegenüber des Werkstoffsystems 2F5 stark reduziert worden wie in Bild 2 dargestellt ist. Der -20%- Punkt konnte von 10°C auf -10°C verschoben werden.

Der Verlustfaktor liegt mit $8 \cdot 10^{-3}$ unter dem geforderten Minimumwert.

Die HF Eigenschaften dieses Werkstoffsystems zeigen in dem untersuchten Frequenzbereich keinerlei Abweichungen zum bekannten System 2F5.

Die Spannungsfestigkeit wurde an unlackierten Mustern durchgeführt und zeigte eine mindesten eine Spannungsfestigkeit von 1kV bei 0,4mm Materialstärke. Die Minstdurchschlagsfeldstärke, welche momentan mit 2,5kV pro mm spezifiziert wurde muss noch weiter optimiert werden, liegt aber jetzt schon im Bereich der Masse 2F5, die Ihrerseits im Bereich von 3kV pro mm liegt.

Mit den heutigen Ergebnissen kann gesagt werden, dass das Werkstoffsystem K1 + K2 eine Verbesserung gegenüber des Werkstoffsystems 2F5 ist und somit in nächster Zukunft in den Planarfilterplatten der Firma PI Cermic verwendet und in die Endprodukte der Firma Conec integriert werden.

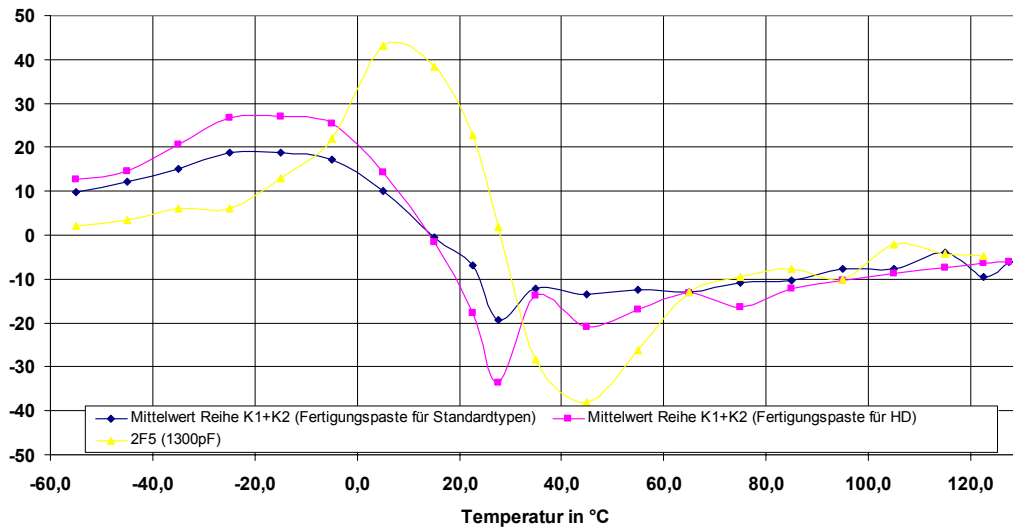


Bild 4.78: Steigung für $C(T)$

4.3.4.2 Werkstoffsystem K1+K3

Beim Werkstoffsystem K1 + K3 wurde eine Dielektrizitätskonstante von 7300 für das Sprühgranulat ermittelt. Bei den Probanden, hergestellt mittels Wirbelschichtgranulat, wurde eine Dk von 6700 ermittelt. Da die Schwindung bei diesen Werkstoffsystem nicht mit den Vorgaben der existierenden Werkzeugen übereinstimmte, musste die Sinterdichte verändert werden, um mit den Serienwerkzeugen maßhaltige Planarfilterplatten herzustellen. Daraus ergibt sich die starke DK-Anhebung im Temperaturbereich oberhalb 40°C. Um die von dem Wirbelschichtgranulat bekannten und besseren Temperaturverläufe zu erreichen, müsste die Sinterdichte wieder erhöht werden, dies hätte eine Korrektur der Presswerkzeuge zur Folge. Aufgrund der ermittelten und in Bild 4.79 dargestellten Ergebnisse, wurde mit dem Werkstoffsystem K1 + K3 der größte Schritt zum Erreichen des Projektzieles gemacht. Mit dem Werkstoffsystem wurde der komplette positive Temperaturbereich in den Bereich $\pm 20\%$ gelegt. Wie schon in den Ausführungen von PI Ceramic vermerkt, müsste für den negativen Temperaturbereich noch eine Komponente hinzugefügt werden, die eine Anhebung der DK um ca. 30% realisiert. Es kann aber trotzdem gesagt werden, dass ein solches Werkstoffsystem nicht am Markt verfügbar ist. Dieses Material kann mit Sicherheit in einem großen Bereich in der Industrie eingesetzt werden.

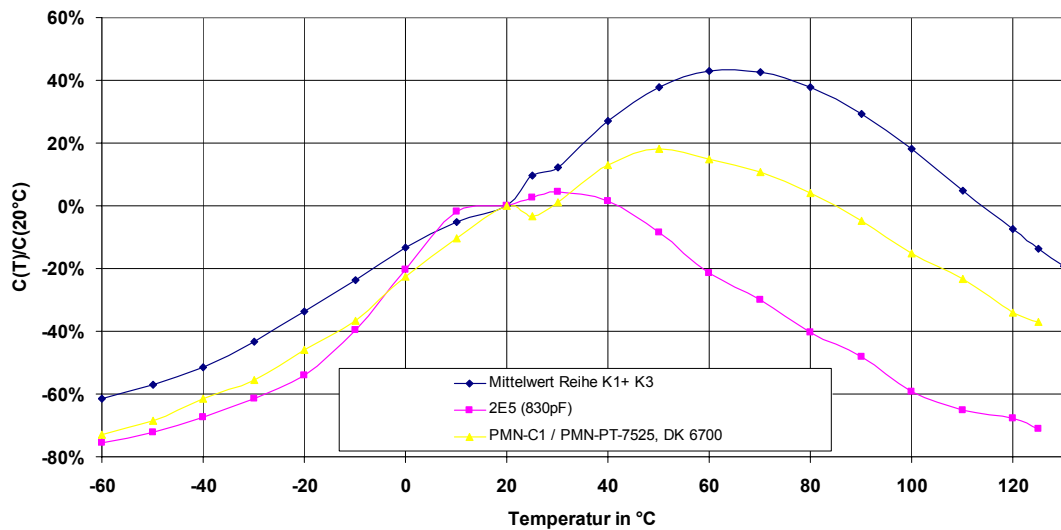


Bild 4.79: Vergleich zwischen K1 + K3 und 2E5

Der Verlustfaktor liegt mit $12 \cdot 10^{-3}$ unter dem geforderten Minimumwert. Bei diesen Mustern wurde ebenfalls eine Messung des Verlustfaktors über den Temperaturbereich durchgeführt, der Verlustfaktor liegt über den gesamten Temperaturbereich unterhalb des geforderten Wertes.

Die HF-Eigenschaften dieses Werkstoffsystems zeigen in dem Untersuchten Frequenzbereich keinerlei Abweichungen zum bekannten System 2E5.

Die Spannungsfestigkeit wurde an unlackierten Mustern durchgeführt und zeigte eine mindesten eine Spannungsfestigkeit von 1kV bei 0,4mm Materialstärke. Die Minstdurchschlagsfeldstärke, welche momentan mit 2,5kV pro mm spezifiziert wurde muss noch weiter optimiert werden, liegt aber jetzt schon im Bereich der Masse 2F5, die ihrerseits im Bereich von 3kV pro mm liegt.

5 Veröffentlichungen

J. Meppelink, J.Kühle: EINSATZVERHALTEN VON
FILTERSTECKVERBINDERN 8. Energietechnisches Forum der
Fachhochschule Kiel 2001

Erste Wing Konferenz 29.-31.Oktober 2003 in Weimar.:

Gemeinsames Poster Intelligente Steckverbinder mit integrierten,
temperaturstabilen hochdielektrischen Keramikfiltern als Interface in
Kommunikationsnetzen. Förderkennzeichen 03N1072

Dr. Falko Schlenkrich; Dr. Andreas Schönecker
Entwicklung temperaturstabiler hochdielektrischer
Werkstoffe für Filtersteckverbinder. Jahresbericht IKTS 2003