



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7458

Entwicklung von Polymer-Keramik-Komposit Kondensatoren

A. T. Bär, T. Hanemann, B. Schumacher
Institut für Materialforschung

März 2009

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7458

**Entwicklung von
Polymer-Keramik-Komposit
Kondensatoren**

Alexander Theodor Bär*

Thomas Hanemann

Benedikt Schumacher

Institut für Materialforschung

*Bachelorarbeit an der Universität Freiburg

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2009

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-074582

Kurzfassung

In den letzten Jahren haben Polymer-Keramik-Komposite immer größeres Interesse in der Aufbau- und Verbindungstechnik erweckt. Die Komposite kombinieren die guten Verarbeitungsmöglichkeiten der Polymere mit den guten dielektrischen Eigenschaften der Keramiken und können somit eine kostengünstige Integration von Kondensatoren in Bauelementen oder Leiterplatten ermöglichen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Integration eines Polymer-Keramik-Komposit Kondensators in eine Leiterplatte. Dazu wurde das Komposit, bestehend aus einem Polyesterklarharz und Bariumtitanat, bzgl. seiner dielektrischen und rheologischen Eigenschaften charakterisiert. Des Weiteren wurde mit dem Schablonendruck ein mögliches Verfahren zur Strukturierung des Komposits untersucht. Hierbei wurden Prozessparameter wie die Schablonendicke, die Rakelgeschwindigkeit und der Füllgrad des Komposits variiert.

Die Herstellung eines integrierten Kondensators mittels Schablonendruck hat die prinzipielle Realisierung mit diesem Verfahren aufgezeigt, allerdings lassen eine Schichtdicke des Dielektrikums von $50\ \mu\text{m}$ und eine Kapazitätsdichte von $0,13\ \text{nF}/\text{cm}^2$ erhebliche Verbesserungen sowohl in der Prozessführung als auch im Materialsystem zu.

Abstract

Development of polymer-ceramic-composite capacitors

Over the past years polymer-ceramic-composites have become increasingly more promising in the assembly and packaging technology. The composites combine the advantage of the ease of processability of polymers and the great dielectric properties of ceramics. Thus a cost-efficient integration of capacitors in electronic devices or printed circuit boards is possible.

The aim of this thesis is to integrate a polymer-ceramic-composite capacitor in a printed circuit board. In order to do so the composite, consisting of a polyester resin and bariumtitanate, was characterized regarding the dielectric and rheological properties. In addition stencil printing as a potential process to structure the composite was investigated. Thereby process parameters such as thickness of the stencil, the squeegee speed and the volumetric content of the composite were diversified.

The fabrication of an integrated capacitor using stencil printing has proofed the possibility of realising an integrated capacitor. The layer thickness of 50 μm and capacitance density of 0,13 nF/cm^2 however needs to be improved by a improved process control and material system.

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung und Motivation	1
2	Grundlagen	2
2.1	Kondensator	2
2.1.1	Kapazität.....	2
2.1.2	Lade- und Entladestrom	3
2.1.3	Parallel- und Reihenschaltung von Kondensatoren.....	4
2.1.4	Ersatzschaltbild eines realen Kondensators	5
2.1.5	Frequenzabhängige Widerstände.....	5
2.2	Dielektrikum	7
2.2.1	Polarisationsmechanismen.....	7
2.2.2	Relative Permittivität	9
2.2.3	Frequenzabhängigkeit	9
2.2.4	Dielektrikum im Kondensator.....	11
2.3	Bariumtitanat	11
2.4	Polyesterklarharz.....	13
2.5	Rheologie	13
2.6	Ausdehnungskoeffizient	16
2.7	Schichtgebungsverfahren.....	16
2.7.1	Schablonendruck.....	16
2.7.2	Folienguss	18
3	Experimentelle Vorgehensweise	20
3.1	Aufbereitung und Charakterisierung von Bariumtitanat.....	20
3.1.1	Sieben und Trocknen	20
3.1.2	Pulvercharakterisierung	20
3.2	Probenherstellung und Charakterisierung	21

3.2.1	Herstellungsverfahren Komposit.....	21
3.2.2	Charakterisierung des Komposit.....	22
3.2.3	Herstellung und Charakterisierung von Dielektrizitäts- und Dilatometerproben.....	23
3.2.4	Schablonendruck.....	24
3.2.5	Schichtdickenmessung.....	27
3.2.6	Externer Kondensator.....	28
3.2.7	Integrierte Leiterplattenkondensatoren.....	28
3.2.8	Kapazitätsmessung.....	31
3.2.9	Herstellung von Schliffen für die Mikroskopie.....	32
4	Ergebnisse und Diskussion	34
4.1	Pulvercharakterisierung.....	34
4.2	Probenherstellung.....	34
4.2.1	Verarbeitungszeit.....	34
4.2.2	Ausdehnungskoeffizient.....	36
4.2.3	Dielektrizitätsmessung.....	37
4.2.4	Rheologie.....	41
4.2.5	Schichtdickenmessung.....	44
4.2.6	Kapazitätsmessung.....	49
5	Zusammenfassung und Ausblick	59
6	Anhang	62
6.1	Rakelgeschwindigkeit.....	62
6.2	Leiterplattendesign.....	63
6.3	Schichtdicke.....	65
6.4	Kapazitätsmessung.....	69
7	Literaturverzeichnis	70

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

Variable	Bedeutung
A	Querschnittsfläche
a, b, c	geometrische Abmessungen
c_v	Volumenkonzentration
C	Kapazität
D	dielektrische Verschiebung
D_{verlust}	Verlustfaktor
E	elektrisches Feld
F	Kraft
f, f_0	Frequenz; Resonanzfrequenz
H	getrocknete Foliendicke
h	Höhe
i	elektrischer Strom
j	Imaginäre Zahl
L	Induktivität
l, Δl , l_0	Länge, Längenänderung, Anfangslänge
P	Polarisation
ΔP	hydrostatischer Druck
Q	Ladung
R, R_{iso} , R_S , $R(\omega)$	Widerstand, Isolationswiderstand, in Reihe, frequenzabhängig

$T, \Delta T$	Temperatur, Temperaturänderung
t	Zeit
U	Spannung
v	Geschwindigkeit
X, X_C, X_L	Blindwiderstand, kapazitiv, induktiv
Z	Impedanz

Griechische Buchstaben

Variable	Bedeutung
α	Winkel
α_{therm}	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
β	Faktor der Trocknungsschwindung berücksichtigt
ϵ_0	dielektrische Feldkonstante; $8,854 \times 10^{-12} \text{ As/Vm}$
ϵ_r	relative Permittivität
γ	Scherverformung
$\dot{\gamma}$	Scherrate
η, η_r, η_M	Viskosität, relative, Matrix
λ	Kapazitätsdichte
τ	Schubspannung
δ	Verlustwinkel
χ	elektrische Suszeptibilität

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
UPM	Ungesättigtes Polymer
INT54	Trennmittel
MEKP	Methylethylketonperoxid
PMMA	Polymethylmethacrylat
A1, A4	Strukturbezeichnung, s Kap. 3.2.4
B2, B4	Strukturbezeichnung, s Kap. 3.2.4
C3, C4	Strukturbezeichnung, s Kap. 3.2.4
D4	Strukturbezeichnung, s Kap. 3.2.4

1 Zielsetzung und Motivation

Die größer werdende Nachfrage nach kleiner werdenden Bauelementen aus dem Konsum-, dem Automobil-, dem Telekommunikations- und dem Computerbereich veranlasst die Elektronik Industrie nach neuen Technologien und Verfahren zu suchen, um diese Nachfrage zu befriedigen. Ein möglicher Lösungsansatz besteht in der Integration von passiven Bauelementen, wie z.B. Kondensatoren, in Leiterplatten oder Multi-Chip-Modulen. Die Vorteile in der Miniaturisierung der Bauteile liegen in einer verbesserten elektrischen Leistungscharakteristik, verbesserten Zuverlässigkeit, einer reduzierten Anzahl an Bauteilen und geringeren Belastungen. Prognosen sagen vorher, dass bis zu 60% der diskreten, passiven Komponenten durch integrierte ersetzt werden könnten. Allerdings ist einer der Hauptbarrieren für die Einführung der integrierten, passiven Bauelemente der Kostenfaktor. Eine Rentabilität tritt erst ein, wenn eine große Anzahl an Komponenten innerhalb eines Systems in einem einzigen Durchgang prozessiert werden können [1-3].

Als aussichtsreichstes Material für die Realisierung von integrierten Kondensatoren gelten Polymer-Keramik-Komposite. Sie kombinieren die gute Verarbeitbarkeit von Polymeren und die hohen relativen Permittivitäten von Keramiken. Es wurde bereits Komposite mit einer relativen Permittivität von 130 hergestellt und eine Kapazitätsdichte von 50 nF/cm^2 (Spin Coating) erreicht. [2-3].

Ziel dieser Arbeit ist es einen Polymer-Keramik-Komposit-Kondensator mit einem möglichst einfachen und fabrikationsnahen Verfahren in eine Leiterplatte zu integrieren. Des Weiteren soll der Prozess weitestgehend optimiert und der Kondensator charakterisiert werden.

2 Grundlagen

2.1 Kondensator

In der Elektrotechnik ist ein Kondensator ein passives Bauelement mit dem Ladungen und Informationen gespeichert werden können und der als frequenzabhängiger Widerstand betrieben werden kann. Kondensatoren gibt es in den unterschiedlichsten geometrischen Bauformen wie z.B. als Kugel-, Zylinder- oder Plattenkondensator. In den nachfolgenden Kapiteln wird der Plattenkondensator unter Gleich- und Wechselspannung betrachtet.

2.1.1 Kapazität

Die Kapazität C ist eine physikalische Größe mit der Kondensatoren beschrieben werden können. Dabei ist die Kapazität nur abhängig von der Geometrie und der Anordnung der Elektroden und dem Stoff zwischen den Kondensatorplatten.

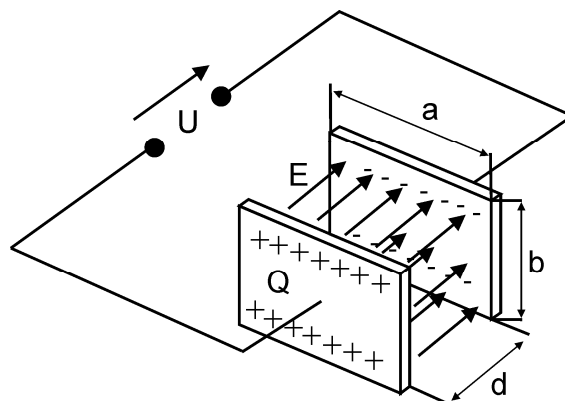


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Plattenkondensators, der an eine Spannungsquelle angeschlossen ist; Spannung U , Ladung Q , elektrisches Feld E , Seitenlänge a , Breite b und Elektrodenabstand d

Dabei werden Streufelder im Randbereich vernachlässigt. Dies ist zulässig wenn der Abstand d der Kondensatorplatten wesentlich kleiner als die Querabmessungen der Elektroden sind [4].

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot a \cdot b}{d} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} \quad (2.1)$$

$$Q = C \cdot U \quad (2.2)$$

Das elektrische Feld E im Kondensator kann wie folgt berechnet werden

$$E = \frac{U}{d} \quad (2.3)$$

2.1.2 Lade- und Entladestrom

Ein idealer Kondensator stellt bei Gleichstrom einen unendlich großen Widerstand dar. Wird jedoch ein entladener Kondensator an eine Spannungsquelle angeschlossen so fließt kurzzeitig ein Strom bis die Kondensatorplatten aufgeladen sind und am Kondensator die volle Eingangsspannung abfällt. Wird ein ohmscher Widerstand in Reihe zum Kondensator geschaltet (s. Abbildung 2.2) verlangsamt sich der Ladeprozess und der Spannungsabfall am Kondensator kann gemessen werden.

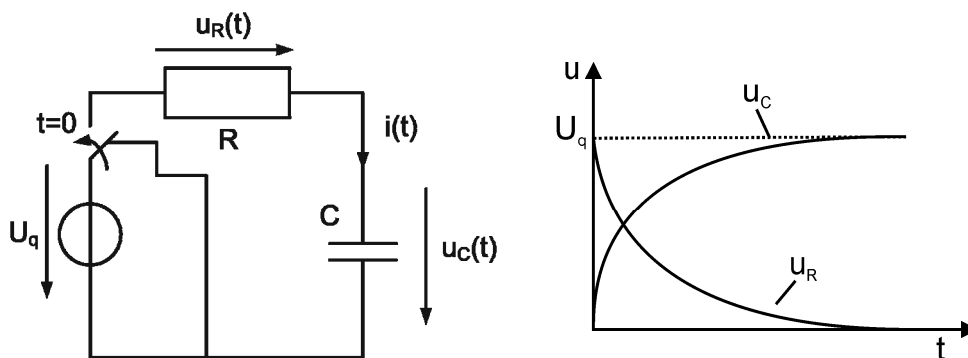


Abbildung 2.2: links Reihenschaltung eines Widerstandes und einer Spule an einer Spannungsquelle; rechts: Ladekurve der Reihenschaltung

Die Formel (2.2) und der 2. Kirchhoffsche Satz ergeben:

$$U_q = R \cdot C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) \quad (2.4)$$

Die Differentialgleichung 1. Ordnung lässt sich mit der Randbedingung $u_C(0) = 0$ lösen zu [5]:

$$u_C(t) = U_q \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (2.5)$$

Mit Gleichung (2.5) kann dann aus der Ladekurve eines Kondensators dessen Kapazität im Gleichspannungsfall berechnet werden.

2.1.3 Parallel- und Reihenschaltung von Kondensatoren

Mehrere Kondensatoren können in elektrischen Netzwerken parallel oder seriell zusammengeschaltet werden (s. Abbildung 2.3). Die einzelnen Kapazitäten der Schaltungen können in Gesamtkapazitätswerten C_{ges} zusammengefasst werden.

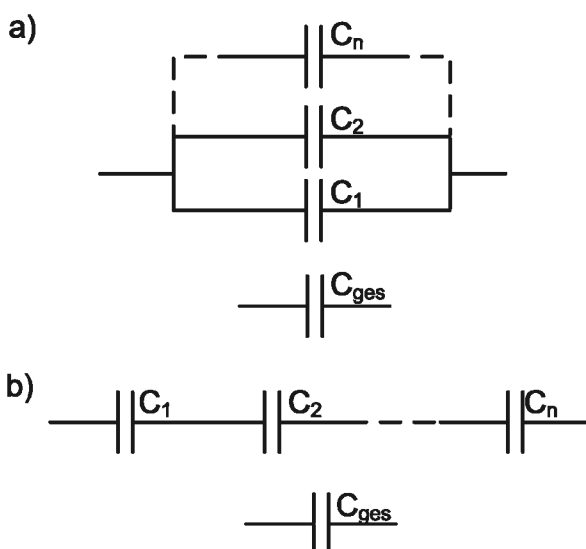


Abbildung 2.3: a) Parallelschaltung von n Kapazitäten; b) Reihenschaltung von n Kapazitäten

Bei der Parallelschaltung von Kapazitäten kann die Gesamtkapazität der Schaltung über die Formel (2.6) berechnet werden.

$$C_{\text{ges}} = \sum_{j=1}^n C_j \quad (2.6)$$

Die Gesamtkapazität einer Parallelschaltung von Kondensatoren ist deshalb immer größer als die größte Einzelkapazität in der Schaltung.

Bei der Reihenschaltung von Kapazitäten verringert sich die Gesamtkapazität auf einen Wert, der kleiner als die kleinste Einzelkapazität ist. Die Gesamtkapazität lässt sich durch folgende Formel bestimmen.

$$C_{ges} = \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

2.1.4 Ersatzschaltbild eines realen Kondensators

Ein realer Kondensator weist im Gleichspannungsbetrieb ohmsche Verluste auf, die im Allgemeinen von der Bauform des Kondensators abhängig sind.

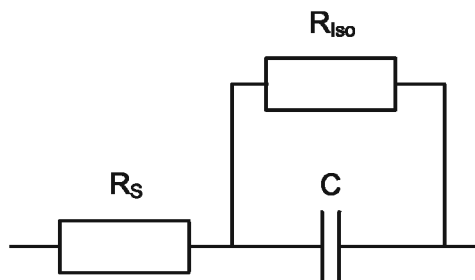


Abbildung 2.4: Ersatzschaltbild eines realen Kondensators im Gleichspannungsbetrieb; Zuleitungswiderstand R_S , Widerstand des Dielektrikums R_{ISO} , verlustfreie Kapazität C

Die ohmschen Verluste entstehen auf Grund des endlichen Isolationswiderstands R_{ISO} des Materials zwischen den Kondensatorplatten und machen sich durch einen Leckstrom bemerkbar. Der Isolationswiderstand wird in dem Ersatzschaltbild (s. Abbildung 2.4) mit einem zum Kondensator parallelen Widerstand berücksichtigt. Zusätzlich müssen die Leitungswiderstände R_S der Zuleitungen zum Kondensator beachtet werden. Dies geschieht mit einem zum Kondensator in Reihe liegenden Widerstand [6].

2.1.5 Frequenzabhängige Widerstände

Kondensatoren und Spulen können bei Wechsignalen als frequenzabhängige Widerstände betrachtet werden. Der kapazitive Blindwiderstand X_C bzw. der Indukti-

ve Blindwiderstand X_L ist, wie in Gleichung (2.8) und (2.9) zu sehen, definiert, wobei f für die Frequenz des Signals steht.

$$X_C = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (2.8)$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (2.9)$$

Die Impedanz Z einer Schaltung setzt sich aus den ohmschen Widerständen R und den Blindwiderständen X zusammen. Dabei werden die Widerstände und die Blindwiderstände, je nach Schaltungstyp (seriell oder parallel), jeweils direkt addiert oder der Kehrwert der Summe aus den einzelnen Kehrwerten berechnet (s. Formel 2.10)

$$Z = R + j \cdot X \quad (2.10)$$

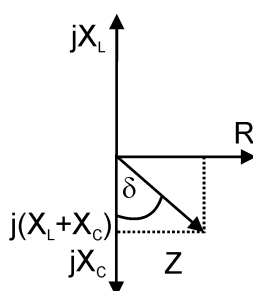


Abbildung 2.5: komplexes Zeigerdiagramm einer Reihenschaltung aus Kapazität X_C , Induktivität X_L und ohmscher Widerstand R mit Verlustwinkel δ

Die Impedanz lässt sich auch in einem komplexen Zeigerdiagramm darstellen (s. Abbildung 2.5). Aus der Impedanz kann der Verlustwinkel δ und der Verlustfaktor D einer Schaltung berechnet werden [5]

$$D_{Verlust} = \tan \delta = \frac{R}{X} \quad (2.11)$$

Weil ein einfacher Leiter bei Wechselströmen induktive Effekte aufweist, muss das Ersatzschaltbild für einen realen Kondensator erweitert werden (vgl. Abbildung 2.4 und Abbildung 2.6). Die parasitären Effekte der Zuleitungen werden in einer zum Kondensator in Reihe liegenden Induktivität L beachtet [6].

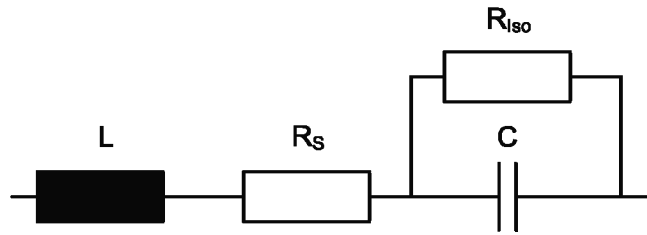


Abbildung 2.6: Ersatzschaltbild eines realen Kondensators bei Wechselstrom; Induktivität L der Zuleitungen, ohmscher Widerstand R der Zuleitungen, Widerstand des Dielektrikums R_{iso} , verlustfreie Kapazität C

2.2 Dielektrikum

Der Begriff Dielektrikum stammt aus dem griechischen und bedeutet isolierende Substanz. Die isolierende Eigenschaft zeichnet alle Dielektrika aus. Ansonsten können Dielektrika sehr unterschiedlich sein, wobei sich die Eigenschaften und Anforderungen an die Materialien nach den entsprechenden Einsatzgebieten richten [7]. In den folgenden Kapiteln werden lineare Dielektrika und deren Eigenschaften betrachtet, die in Kondensatoren zur Anwendung kommen.

2.2.1 Polarisationsmechanismen

Auf Grund eines statischen elektrischen Feldes E werden in einem Material Ladungen gegeneinander verschoben. Die relative Verschiebung einer positiven und negativen Ladung bewirkt, dass sich ein Dipol ausbildet. Die Gesamtheit der im Material ausgebildeten Dipole pro Volumen wird Polarisation P genannt. Werden die unterschiedlichen Mechanismen der Ladungverschiebung auf mikroskopischer Ebene betrachtet, so lässt sich die Polarisation in eine elektrische, eine ionische, eine Orientierungs- und in eine Raumladungspolarisation unterteilen (s. Abbildung 2.7).

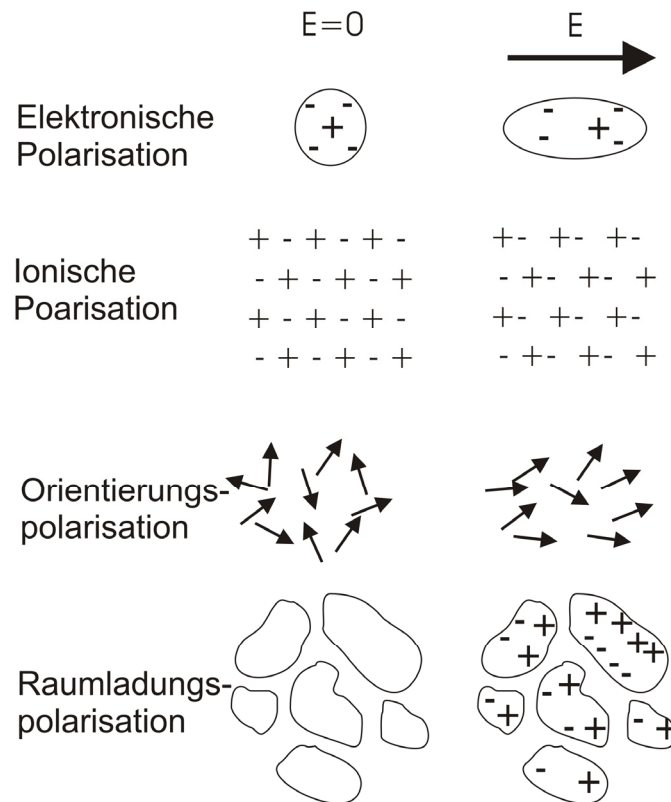


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Polarisationsmechanismen [7]

Die Elektronenpolarisation tritt in allen Materialien auf. Bei dieser Art der Polarisation werden auf Grund eines elektrischen Feldes die Elektronenhülle und der Atomkern eines Atoms gegeneinander verschoben. Damit fallen die Ladungsschwerpunkte der negativen und positiven Ladungen nicht mehr zusammen und ein Dipol wird induziert.

Ionenpolarisation wird nur in Ionengittern bzw. in Materialien mit Ionenbindung verursacht. Bei dieser Art von Polarisation werden die negativen und positiven Ladungen wie bei der Elektronenpolarisation gegeneinander verschoben und es entsteht ebenfalls ein Dipol. Elektronen- und Ionenpolarisation kann man unter dem übergeordneten Begriff der Verschiebungspolarisation zusammenfassen.

Materialien, wie z.B. Wasser oder Ferroelektrika, die aus permanenten Dipolen bestehen, können in ihrer Gesamtheit durch ein elektrisches Feld polarisiert werden. Das Feld übt auf die Dipole ein Dipolmoment aus, das die Dipole in Richtung des Feldes ausrichtet. Diese Art von Polarisation wird Orientierungspolarisation genannt.

Der Unterschied zwischen den zuvor genannten Polarisationsmechanismen und der Raumladungspolarisation liegt in der Distanz in der Ladungen bewegt bzw. ver-

schoben werden. In den bereits erwähnten Mechanismen werden Ladungen in atomaren oder molekularen Größenordnungen bewegt. Bei der Raumpolarisation können Ladungen innerhalb begrenzter Räume über einige Gitterabstände hinweg bewegt werden. Dazu müssen im Material freie Ladungsträger vorhanden sein, die dann durch ein elektrisches Feld bewegt werden. Die räumliche Begrenzung der Ladungsbewegung wird durch Leitfähigkeitsinhomogenitäten im Inneren der Körner und der Korngrenzregion bewirkt [7-8].

2.2.2 Relative Permittivität

Im Vakuum ist die dielektrische Verschiebung \vec{D} definiert als

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (2.12)$$

Wird ein Dielektrikum in einen Kondensator eingeführt, erhöht sich die dielektrische Verschiebung um die Polarisation \vec{P} .

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (2.13)$$

Dabei besteht folgender Zusammenhang zwischen der Materialpolarisation und der dielektrischen Verschiebung des Vakuums $\varepsilon_0 \vec{E}$

$$\vec{P} = \chi \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \quad \text{mit} \quad \chi = \varepsilon_r - 1 \quad (2.14)$$

Hierbei ist χ die elektrische Suszeptibilität und ε_r die relative Permittivität. Aus Gleichung (2.13) und Gleichung (2.14) ergibt sich dann für die dielektrische Verschiebung mit Dielektrikum

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + (\varepsilon_r - 1) \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} \quad (2.15)$$

Die relative Permittivität ist eine dimensionslose Werkstoffkenngröße und gibt an wie viel Ladung mehr auf einem Kondensator gespeichert werden kann als im Vakuum[7-8].

2.2.3 Frequenzabhängigkeit

Dielektrika können bei einem anliegenden elektrischen Feld polarisiert werden. Die induzierten Dipole richten sich dabei nach dem äußeren Feld aus. Bei einer Änderung des äußeren Feldes lagern sich die polarisierten Bereiche bzw. die Dipole auf

atomarer Ebene mit einer gewissen Zeitverzögerung um und verursachen durch Wärmedissipation dielektrische Verluste. Die einzelnen Polarisationsarten und deren Verluste sind stark frequenzabhängig und können ab einer bestimmten Frequenz wegen ihrer Trägheit dem äußeren Feld nicht mehr folgen. An dieser Stelle sind die Verluste am Größten (s. Abbildung 2.8) [7-8].

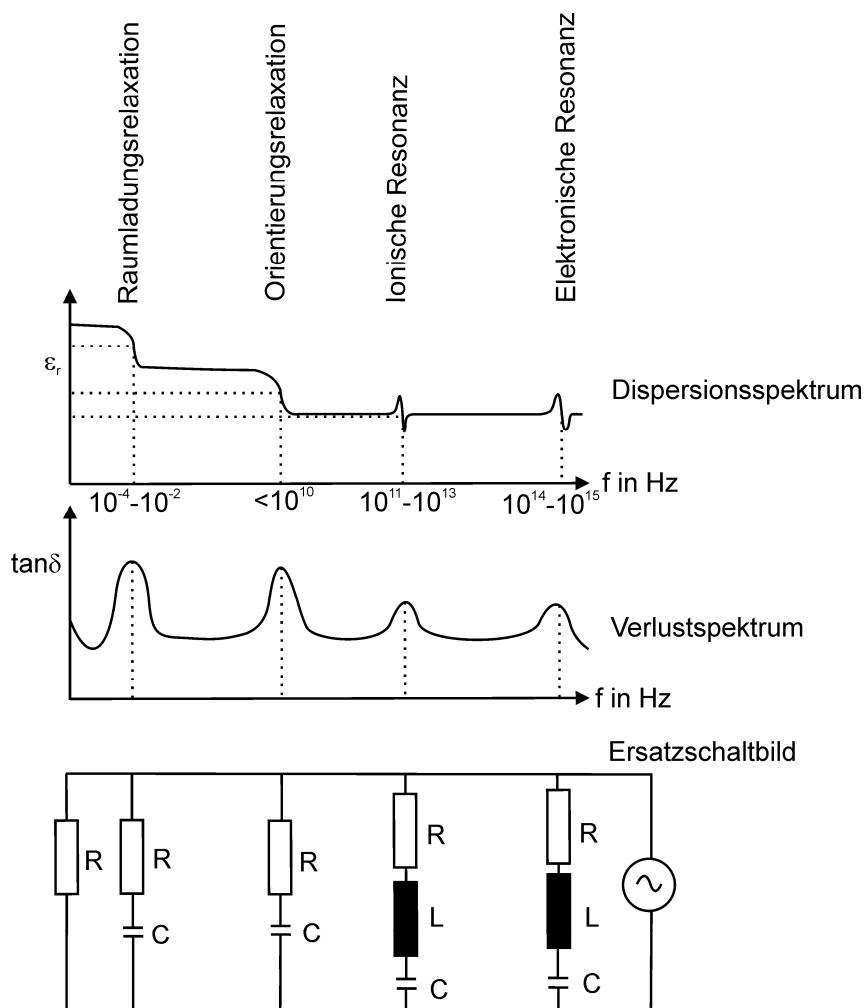


Abbildung 2.8: Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität ϵ_r und der Verluste $\tan \delta$ für dielektrische Keramiken; Darstellung stark vereinfacht [7]

2.2.4 Dielektrikum im Kondensator

Durch das Einbringen eines Dielektrikums in einen Plattenkondensator verändert sich die Kapazität. Mit den Gleichungen (2.2), (2.3), (2.15) und

$$D = \frac{Q}{A} \quad (2.16)$$

kann die Kapazität eines Kondensators mit Dielektrikum berechnet werden.

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d} \quad \text{mit} \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (2.17)$$

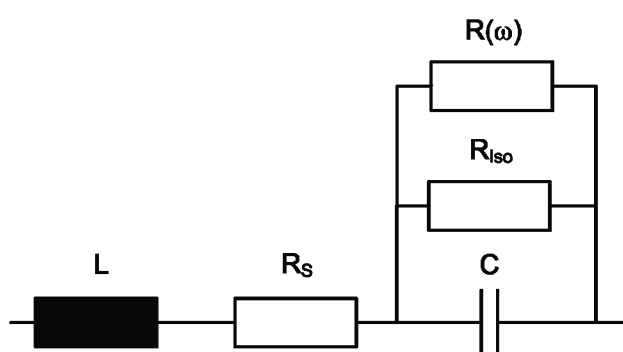


Abbildung 2.9: Universelles Ersatzschaltbild eines Kondensators mit Zuleitungsinduktivität L , Zuleitungswiderstand R_s , Isolationswiderstand R_{iso} , frequenzabhängiger Verlustwiderstand $R(\omega)$ des Dielektrikums und ideale Kapazität C [6]

Des Weiteren müssen in der Ersatzschaltung eines Kondensators die frequenzabhängigen Verluste im Dielektrikum berücksichtigt werden. Dies wird durch einen frequenzabhängigen Widerstand parallel zur Kapazität realisiert.

2.3 Bariumtitanat

Bariumtitanat ($BaTiO_3$) gehört zu der Klasse der Ferroelektrika. Alle Ferroelektrika weisen eine spontane Polarisierung auf, die auf einer unsymmetrischen Kristallstruktur beruht. Die Kristallstruktur des Bariumtitanats ist eine so genannte Perowskitstruktur (s. Abbildung 2.10).

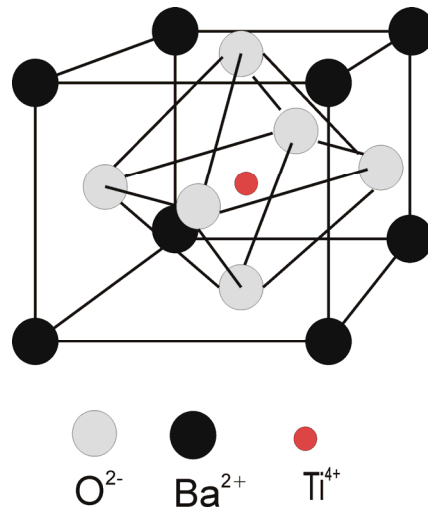


Abbildung 2.10: Perowskitstruktur des Bariumtitanats [7]

Durch thermische Anregung kann das Ti^{4+} -Ion im Kristall aus seiner Gleichgewichtslage bewegt werden. Somit liegt oberhalb der Curietemperatur eine kubische Elementarzelle mit Symmetriezentrum vor (s. Abbildung 2.11).

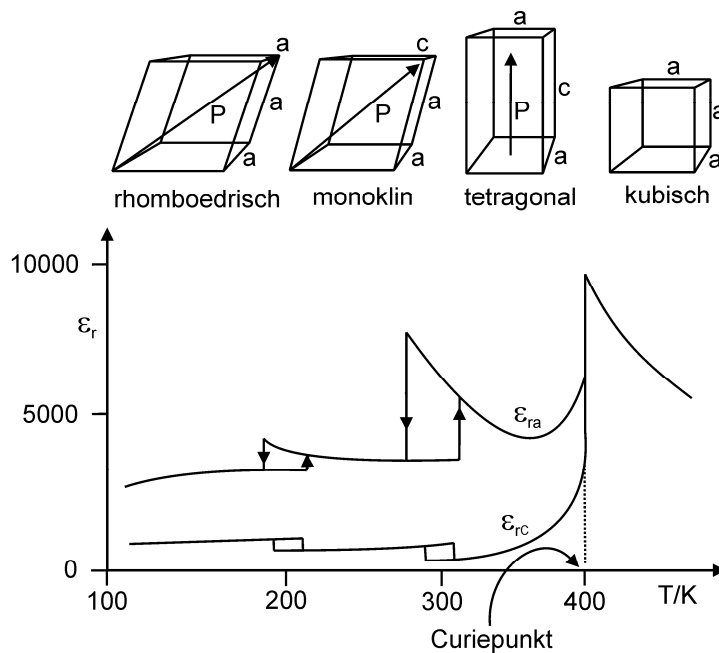


Abbildung 2.11: Relative Permittivität des Bariumtitanats und Skizzen der Kristallstrukturen in Abhängigkeit von der Temperatur [7]

Unterhalb der Curietemperatur hat der Kristall zwei stabile Lagen und in eine dieser fällt das Ti^{4+} -Ion. Das Kristallgitter wird dadurch verzerrt und eine spontane Polari-

sation hervorgerufen. Die Polarisation eines Ferroelektrika lässt sich durch ein äußeres elektrisches Feld umpolarisieren. Benachbarte Elementarzellen beeinflussen sich durch ihre spontane Polarisation gegenseitig. Dadurch wird bewirkt, dass sich in größeren Bereichen, den Domänen, die einzelnen Dipole gleich ausrichten und ein Nettodipolmoment entsteht [7-8].

2.4 Polyesterklarharz

Polyesterklarharz ist ein Gemisch aus dem Monomer Styrol und ungesättigtem Polyester (s. Abbildung 2.12). Reaktionsharze, wie z.B. das Polyesterklarharz, lassen sich durch eine radikalische Polymerisation aushärten.

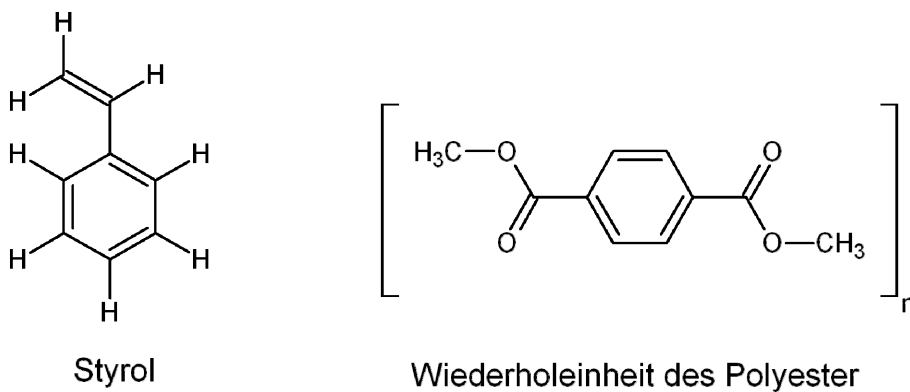


Abbildung 2.12: Strukturformeln von Styrol und der Wiederholeinheit des Polyester

Zum Aushärten werden dafür organische Peroxide benutzt, die die Polymerisation initiieren. In der Regel können die Aushärtezeiten durch die Einstellung der Temperatur, die Wahl und die Menge an Initiatormolekülen eingestellt werden. Das ausgehärtete Polymer verhält sich wie ein Thermoplast und muss für die Entformung nach dem Formgebungsprozess mit einem Trennmittel versetzt werden [9].

2.5 Rheologie

Die Rheologie beschäftigt sich mit dem Fließ- und Verformungsverhalten von Stoffen. Wichtige physikalische Größen zur Beschreibung dieses Verhalten sind die Viskosität η , die Schubspannung τ und die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$. In diesem Kapitel

werden die physikalischen Zusammenhänge zwischen diesen Größen aufgezeigt und typische Fließverhalten benannt.

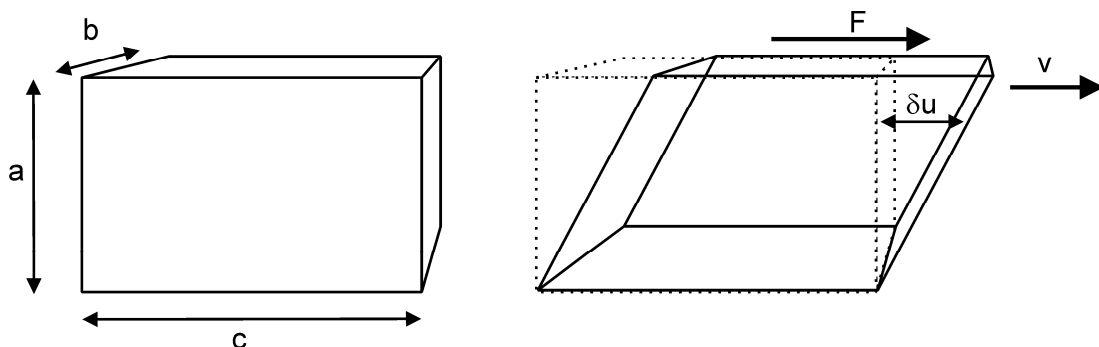


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung der Verformung eines Flüssigkeitsvolumens; links: Flüssigkeitsvolumen; rechts: Deformation des Flüssigkeitsvolumens auf Grund von einer Krafteinwirkung

Eine Kraft, die in Richtung der Oberfläche eines Flüssigkeitsvolumens wirkt, verursacht eine Deformation und somit eine Schubspannung τ (s. Abbildung 2.13).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{mit} \quad A = b \cdot c \quad (2.18)$$

Durch die Deformation entsteht in jeder Schicht eine Scherverformung γ , die über die gesamte Höhe des Volumens konstant ist.

$$\gamma = \frac{\partial u}{\partial a} \quad (2.19)$$

Des Weiteren kann die Scherrate $\dot{\gamma}$ wie folgt berechnet werden:

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial a} \quad (2.20)$$

Die durch die Schubspannung τ aufgebrachte Schergeschwindigkeit kann mit der Viskosität, also der inneren Reibung des Fluids, verknüpft werden.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.21)$$

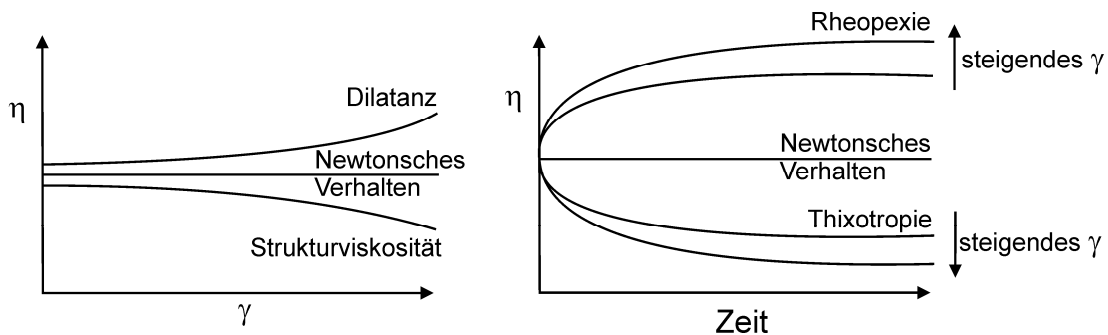


Abbildung 2.14: Darstellung von unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften; links: Abhängigkeit der Viskosität von der Scherrate; rechts: Abhängigkeit der Viskosität von der Zeit [10]

Stoffe können unterschiedliche rheologische Eigenschaften aufweisen, die von verschiedenen Faktoren abhängen können. Je nachdem, welche Eigenschaft untersucht werden soll, wird die Viskosität über der Scherrate oder der Zeit aufgetragen. Die gängigsten Viskositätsmerkmale sind in Abbildung 2.14 zu sehen.

Bei Suspensionen wird die Viskosität meist als relative Viskosität η_r angegeben. Dabei wird die Viskosität η der Suspension auf die Viskosität der Matrix η_M bezogen.

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_M} \quad (2.22)$$

Die relative Viskosität ist von der Konzentration der festen Phase, der Partikelform, der mittleren Partikelgröße, der Schergeschwindigkeit und den Wechselwirkungen zwischen den Partikeln selbst und den Partikeln und der Flüssigkeit abhängig. Für die Abhängigkeit der relativen Viskosität von der Volumenkonzentration c_v bestehen für kugelförmige Partikel folgende Modelle:

Einstein:

$$\eta_r = 1 + k \cdot c_v \quad (2.23)$$

Mooney:

$$\eta_r = \exp\left(\frac{k \cdot c_v}{1 - s \cdot c_v}\right) \quad (2.24)$$

Die Parameter s und k müssen dabei für jede Messreihe bzw. Suspension explizit ausgerechnet werden [10]

2.6 Ausdehnungskoeffizient

Der thermische Ausdehnungskoeffizient eines Materials berechnet sich aus der anfänglichen Länge l_0 dem Temperaturunterschied ΔT und der Längenänderung des Materials Δl .

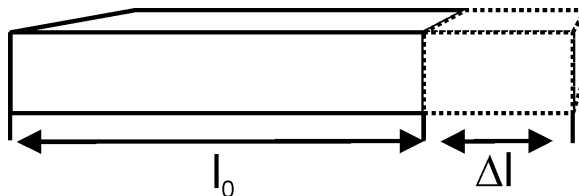


Abbildung 2.15: Längenänderung Δl eines Materials mit der anfänglichen Länge l_0

$$\alpha_{therm.} = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} \quad (2.26)$$

2.7 Schichtgebungsverfahren

2.7.1 Schablonendruck

Der Schablonendruck ist ein etabliertes Verfahren um Schichten auf Substraten abzuscheiden. Industriell wird der Schablonendruck hauptsächlich in der Surface Mounted Technology angewandt um Lotpasten auf Leiterplatten aufzubringen. Die Vorteile des Schablonendrucks liegen überwiegend in den niedrigen Prozessierkosten und dem hohen Durchsatz. Die Herausforderungen beim Schablonendruck liegen jedoch in der optimalen Einstellung der Prozessparameter, die durch verschiedene Einflüsse beeinflusst werden. Die Prozessparameter des Schablonendrucks lassen sich in vier Kategorien untergliedern: Drucker-Parameter, Schablonen-Parameter, Pasten-Parameter und Umwelteinflüsse [11].

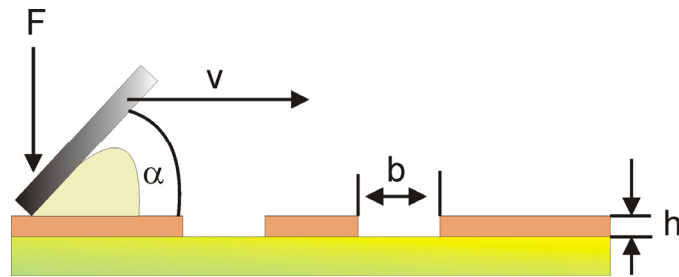


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung des Schablonendrucks mit Anpressdruck F , Anstellwinkel α , Rakelgeschwindigkeit v , Breite der Kavität b und Schablonendicke h

Die beim Schablonendruck zum Einsatz kommenden Schablonen bestehen zu meist aus Metall. Die Kavitäten werden in das Metall entweder chemisch geätzt, mit einem Laser ausgeschnitten oder per Galvanoformung hergestellt.

Als Rakel werden Polymerrakel oder Metallrakel verwendet. Die Rakel gibt es in unterschiedlicher Ausführung um unidirektional oder bidirektional drucken zu können.

An die zu verdruckenden Pasten werden besondere rheologische Eigenschaften gestellt. Wie bei fast allen Druckverfahren müssen die Pasten unter einer Scherung gute Fließeigenschaften aufweisen und im gegengesetzten Fall sollten sie möglichst starr sein. Das heißt die Druckpasten sollten strukturviskos sein und eine ausgeprägte Thixotropie aufweisen.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Rakelgeschwindigkeit. Hierbei ist herauszufinden wo das Optimum liegt, denn ein zu schnelles Rakeln kann durch eine Hobelwirkung Mulden in der Schicht verursachen, ein zu langsames Rakeln kann abgerisene Kanten oder Verschmierungen im Druck zur Folge haben [12].

In Abbildung 2.17 sind nochmals in einer Übersicht die verschiedenen Einflussfaktoren auf den Schablonendruck aufgelistet.

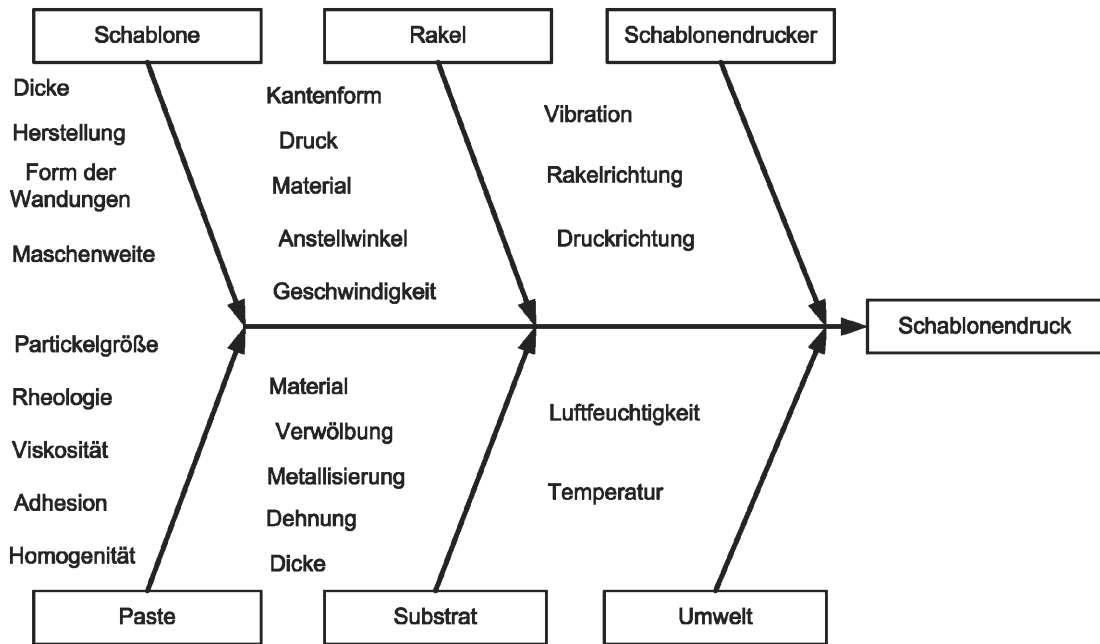


Abbildung 2.17: Einflussfaktoren auf den Schablonendruck [13]

2.7.2 Folienguss

Zur kostengünstigen Herstellung dünner keramischer Bauteile hat sich der Folienguss als Verfahren etabliert. Bei diesem Verfahren wird ein Schlicker, bestehend aus keramischen Pulvern und einem Dispergiermittel, durch eine Relativbewegung eines Substrats und eines Gießschuhs auf das Substrat aufgebracht (s. Abbildung 2.18). Im Anschluss an das Gießen wird durch Trocknen, Bearbeitung der Folie, Binderausbrand und Sintern die keramische Schicht bzw. Struktur hergestellt.

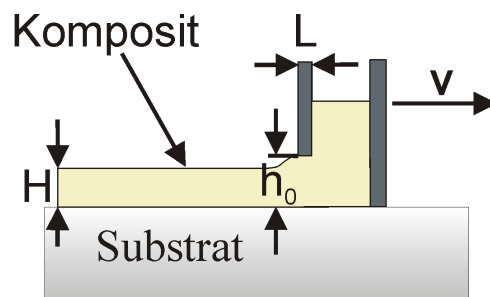


Abbildung 2.18: Schematische Darstellung eines Spaltrakels

Bei diesem Prozess ist die Aufbereitung des Schlickers ausschlaggebend für die spätere Qualität der Folie bzw. der keramischen Schicht. Der Schlicker sollte hierbei homogen sein und das keramische Pulver sollte im Schlicker nicht agglomerieren.

Des Weiteren sollte der Schlicker eine relativ hohe Viskosität aufweisen, um das Sedimentieren des Pulvers zu verhindern. Für den Schichtgebungsprozess sollte der Schlicker ein scherverdünnendes Fließverhalten haben. In der Regel lassen sich diese Eigenschaften durch Zusatzstoffe wie Dispergiermittel und Bindemittel einstellen. Vor dem Gießen der Folie muss der Schlicker zusätzlich entgast und gefiltert werden, um Luftblasen und Agglomerate zu entfernen.

Vor dem Sintern zum keramischen Endprodukt kann die Grünfolie, also die getrocknete Schlickerschicht, je nach Verwendungszweck durch Zuschneiden, Stanzen, Bedrucken oder Laminieren bearbeitet werden.

Mit der Gleichung (2.27) lässt sich die Dicke H einer mit einem Spaltrakel hergestellten, getrockneten Schicht berechnen.

$$H = \beta \cdot \frac{h_0}{2} \cdot \left(1 + \frac{h_0^2 \cdot \Delta P}{6 \cdot \eta_s \cdot v \cdot L} \right) \quad (2.27)$$

Die Schichtdicke wird durch die Spalthöhe h_0 des Rakels, die Rakelgeschwindigkeit v , den hydrostatischen Druck ΔP des Schlickers im Reservoir, der Viskosität des Schlickers η_s und der Spaltbreite L bestimmt. Der Faktor β berücksichtigt hierbei die Trocknungsschwindigkeit des Schlickers [14-15].

3 Experimentelle Vorgehensweise

3.1 Aufbereitung und Charakterisierung von Bariumtitanat

3.1.1 Sieben und Trocknen

Für die weitere Verwendung des BaTiO₃-Pulvers wurde das Pulver zunächst mit einem Rüttelsieb der Firma Retsch gesiebt. Dabei wurden zwei Analysensiebe mit einer Maschenweite von 250 µm und 125 µm übereinander gesetzt und das Pulver 99 min lang bei 80 % der maximalen Amplitude gesiebt. Die Fraktion mit einer Partikelgröße kleiner als 125 µm wurde anschließend in einem Trockenschrank bei ca. 150°C getrocknet und für die weiteren Arbeiten verwendet.

3.1.2 Pulvercharakterisierung

Die Bestimmung der Dichte des gesiebten Bariumtitanatpulvers erfolgte mit Helium-Pyknometrie. Hierbei kam das Gerät Accupyc II 1340 Pycnometer von Micromeritics zum Einsatz. Zusätzlich wurde die spezifische Oberfläche nach dem BET-Verfahren mit dem Gerät Flow Sorb2300/ von der Firma Micromeritics gemessen.

3.2 Probenherstellung und Charakterisierung

3.2.1 Herstellungsverfahren Komposit

Das in diesen Experimenten verwendete Komposit besteht aus einem ungesättigten Polymer als Matrix und Bariumtitanat als Füllstoff. Als Polymer wurde UPM2 verwendet. UPM2 besteht aus einer Mischung aus Polyesterklarharz der Firma Roth, Styrol als Verdünnungsmittel und dem Trennmittel INT 54 der Fa. E.&P. Würtz, Bingen. Die Zusammensetzung ist der Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Polyesterklarharz	79 Gew.-%
Styrol	20 Gew.-%
INT 54	1 Gew.-%

Tabelle 3.1: Zusammensetzung von UPM2; Angaben in Massenprozent

Die Bestandteile des Polymers wurden 30 min mit einem DissolVERRÜHRER bei einer Umdrehung von 800 U/min gelöst.

Für die Herstellung des Polymer-Keramik-Komposits wurde UPM2 in einem Becherglas vorgelegt und das aufbereitete Bariumtitanat (s. Kapitel 3.1) mit dem entsprechenden Massenanteil dazugegeben. In diesen Versuchen wurde der Füllgrad des Bariumtitanat zwischen 4, 11, 22, und 30 Volumenprozent variiert. Zur Dispergierung der Suspension wurde diese mit einem DissolVERRÜHRER 30 min bei einer Drehzahl von 800 U/min gerührt. Mit einer Pipette wurden dann 2,4 ml der Suspension für die Messung der rheologischen Eigenschaften entnommen. Danach wurde der Polymerisationsinitiator Methlethyketonperoxid (MEKP) mit einem Massenanteil von 2 %, bezogen auf die Einwaage an UPM2, zur Suspension dazugegeben und weitere 3 min bei einer Drehzahl von 800 U/min mit dem DissolVERRÜHRER dispergiert. Der Einfluss des MEKP auf das Komposit wurde näher untersucht (s Kapitel 3.2.2.)

Arbeitsschritt	Dauer	Tätigkeit
1	30 min	Dispergieren bei 800 U/min mit DissolVERRührer
2		Entnahme von 2,4 ml für Rheologiemessung
3	3 min	Zugabe von MEKP und Dispergierung bei 800 U/min
4	3 min	Evakuierung im Exsikkator

Tabelle 3.2: Übersichtstabelle zur Herstellung des Komposits

Auf Grund von den Ergebnissen wurde der MEKP-Gehalt auf zwei Massenprozent festgelegt. Um Luftblasen aus der Suspension zu entfernen wurde diese im Exsikkator 3 min evakuiert. Wegen der einsetzenden Polymerisation wurde die weitere Verarbeitung des Komposits innerhalb 25 min ab Zugabe des MEKP vollzogen. Die Verarbeitungszeit reichte aus und deshalb konnte auf Kühlen des Komposit verzichtet werden.

3.2.2 Charakterisierung des Komposit

Die rheologischen Eigenschaften und die maximale Verarbeitungszeit des Komposits wurden mit einem Rheometer (CVOSO) der Firma Bohlin Instruments analysiert. Als Messsystem wurde ein Kegel-Platte-System verwendet (s. Abbildung 3.1).

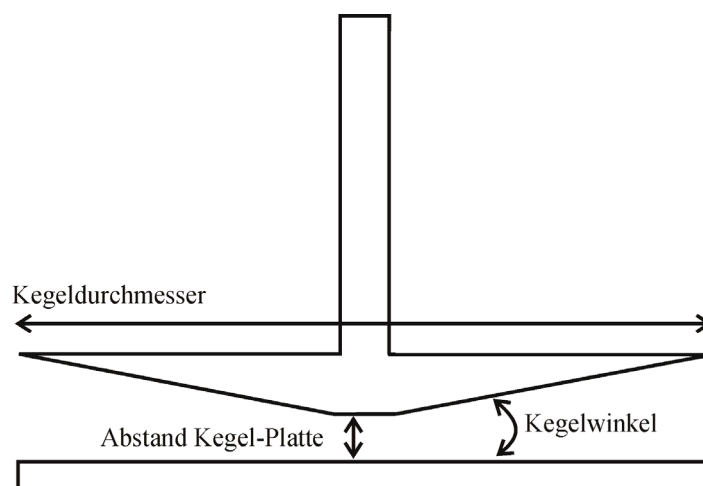


Abbildung 3.1: Schematische Abbildung des Kegel-Platte-Messsystems [16]

Der Kegel hat dabei einen Durchmesser von 40 mm und der Kegelwinkel beträgt 4° . Der Kegel wird für die Messung bis auf einen Abstand von 150 μm an die Platte herangefahren.

Um den Einfluss des MEKP auf die Verarbeitungszeit des UPM2 zu erforschen, wurde die Viskosität des UPM2 in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Die Messung erfolgte mit oben erwähntem Messsystem bei einer konstanten Scherrate von 100 s^{-1} und einer konstanten Temperatur von 20°C . Der Massenanteil an MEKP im Polymer wurde bei den einzelnen Messungen zwischen 1 Gew.-%, 2 Gew.-% und 3 Gew.-% variiert. Des Weiteren wurde die Beeinflussung bei konstantem MEKP-Gehalt und variierendem Füllgrad an Bariumtitanat untersucht. Der MEKP-Gehalt belief sich dabei auf zwei Massenprozent, der Füllgrad an Bariumtitanat wurde zwischen 4, 11 und 22 Volumenprozent verändert.

Die Rheologie von Suspensionen und Pasten ist der entscheidende Parameter für die Schichtgebung mittels Schablonendruck oder Folienguss. Deshalb wurde der Zusammenhang zwischen dem Füllgrad an Bariumtitanat im Komposit und der jeweiligen Viskosität untersucht. Die Viskosität wurde dabei in Abhängigkeit von der Scherrate gemessen. Bei der Messung wurde die Scherrate in logarithmischen Abständen von 1 s^{-1} auf 200 s^{-1} erhöht und die Messung bei 20°C , 40°C und 60°C durchgeführt.

3.2.3 Herstellung und Charakterisierung von Dielektrizitäts- und Dilatometerproben

In vorangegangenen Arbeiten wurden Probenformen für die Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten von verschiedenen Kompositen angefertigt. Die zweiteiligen Probenformen wurden aus dem Silikon Elastosil M 4370 AB der Firma Wacker gegossen. Zusätzlich wurde eine zweiteilige Probenform für die Dilatometermessung angefertigt (s. Abbildung 3.2).

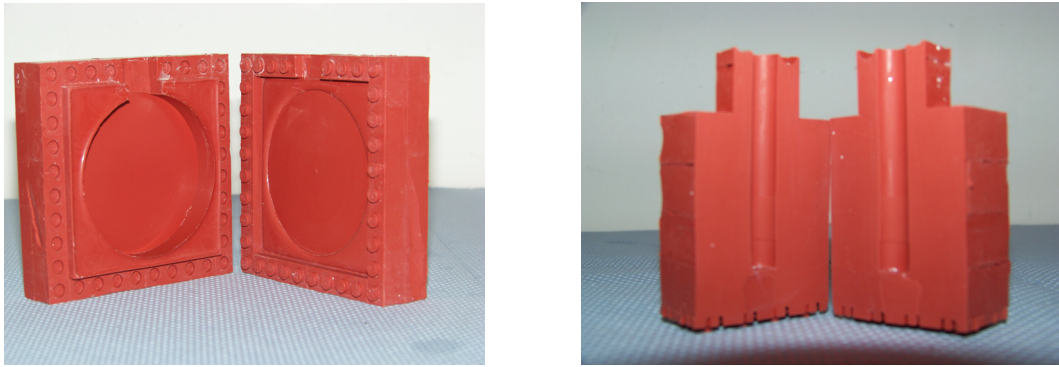


Abbildung 3.2: Silikonformen für die Herstellung von Proben für die Dielektrizitätsmessung (links) und Dilatometermessung (rechts)

Für die Herstellung der Dielektrizitäts- und Dilatometerproben wurden die zweiteiligen Probenformen zusammengefügt und mit dem Komposit befüllt. Zum Aushärten wurden die befüllten Probenformen für mindestens zwei Stunden in den Trockenschrank gestellt. Die Temperatur betrug dabei 50°C. Nach dem Entformen der Dielektrizitätsproben wurden die Angussysteme abgetrennt und die Ober- und Unterseite nachgeschliffen um möglichst planparallele Seiten für die Dielektrizitätsmessung zu erhalten. Die Permittivität der Proben wurde anschließend mit dem Impedanzanalysator HP4149A und der Probenhalterung HP16451B der Firma Agilent im „Contacting Electrode Method“ in einem Frequenzbereich von 100 Hz bis 15 MHz gemessen. Die Dilatometerproben wurden nach dem Aushärten auf eine Länge von ca. 1,8 mm gesägt und die Enden nahezu planparallel abgeschliffen. Die genaue Vermessung der Proben erfolgte mit dem Haidenhain Messtaster MT 25. Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten wurden dann mit dem Dilatometer DIL 402 E der Firma Netzsch mit Quarzglasprobenhalter und einer Heizrate von 1°C / min bestimmt, indem das Prüfstück 5-mal von 30°C auf 100°C aufgeheizt wurde.

3.2.4 Schablonendruck

Als Schichtgebungsverfahren für die spätere Abscheidung des dielektrischen Materials wurde der Schablonendruck ausgewählt. Dazu wurde eine Tape Casting Maschine umfunktioniert und für den Druck verwendet (Abbildung 3.3: Verwendete Tape Casting Maschine für den Schablonendruck)



Abbildung 3.3: Verwendete Tape Casting Maschine für den Schablonendruck

Die Modifikation der Tape Casting Maschine für den Schablonendruck besteht lediglich in der Verdrehung des Füllbehälters um 180° , so dass der Rakel bzw. der Öffnungsspalt des Füllbehälters in Rakelrichtung zeigt (vgl. Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5).

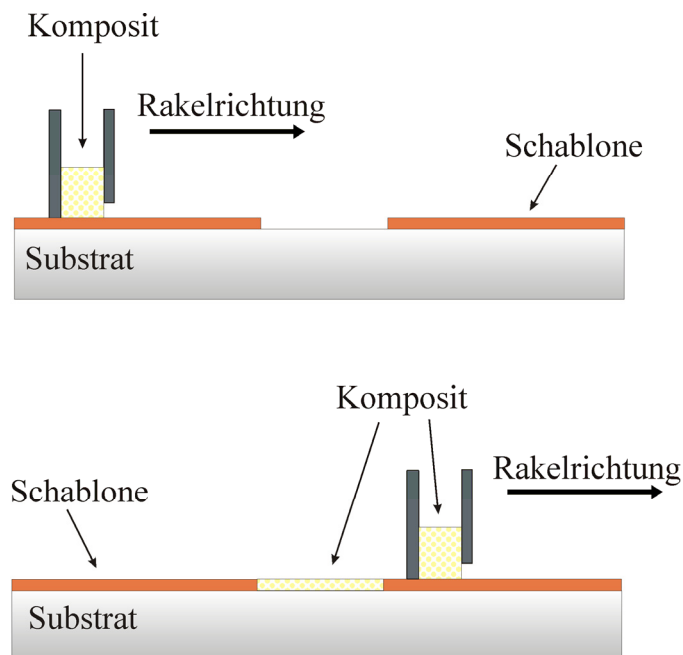


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Schablonendrucks mit der Tape Casting Maschine

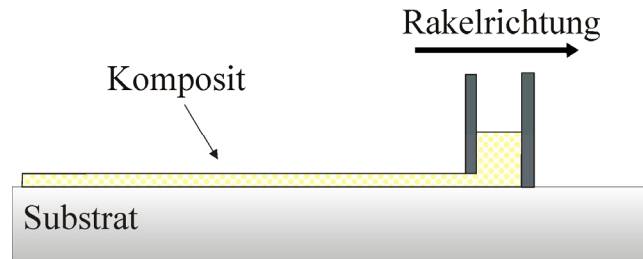


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Folienguss mit der Tape Casting Maschine

Um das Schichtgebungsverfahren und die Qualität der mit dem Schablonendruck hergestellten Schichten zu quantifizieren, wurden auf Polymethylmethacrylat (PMMA) Substraten verschiedene Teststrukturen gedruckt und unterschiedliche Prozessparameter variiert. In den Versuchen wurden die Rakelgeschwindigkeit, die Schablonendicke und der Füllgrad des Komposit verändert. Als Schablonen wurden Kaptonfolien der Firma Du Pont verwendet, die mit einem Skalpell strukturiert wurden. Die verwendeten Kaptonfolien haben eine Dicke von 25 μm , 50 μm und 75 μm .

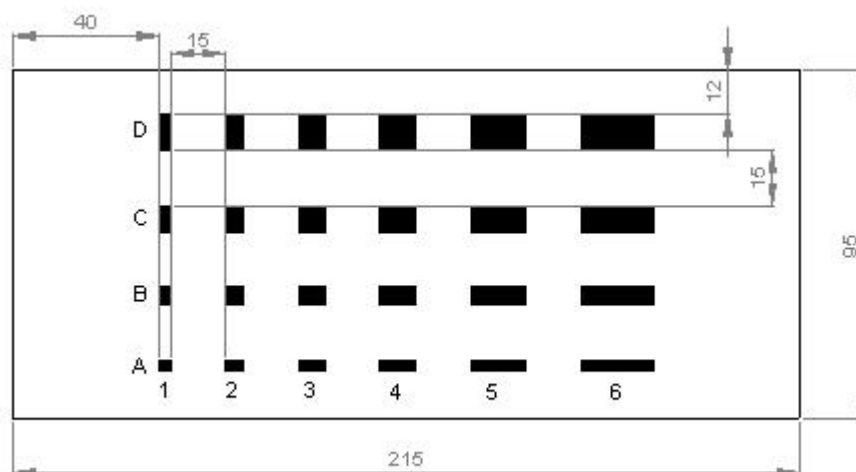


Abbildung 3.6: Abmessungen der Schablonen; schwarze Flächen stellen die Kavitäten dar; Angaben in mm

Die Anordnung der Kavitäten auf der Schablone sind in der Abbildung 3.6 zu sehen. Die Kavitäten wurden in Spalten (1-6) und Zeilen (A-D) unterteilt. Die Abstände der Zeilen und die Abstände der Spalten betragen jeweils 15 mm. Um die Übersichtlichkeit in der Abbildung 3.6 zu gewährleisten sind die Abmessungen der Kavitäten in der Tabelle 3.3 zusammengefasst.

mm x mm		Spalte					
		1	2	3	4	5	6
Zeile	A	3x3	3x5	3x7	3x10	3x15	3x20
	B	5x3	5x5	5x7	5x10	5x15	5x20
	C	7x3	7x5	7x7	7x10	7x15	7x20
	D	10x3	10x5	10x7	10x10	10x15	10x20

Tabelle 3.3: Abmessungen der Kavitäten auf den Schablonen

Die Rakelgeschwindigkeit kann über die Spannungsversorgung der Tape Casting Maschine reguliert werden. Um den Einfluss der Rakelgeschwindigkeit zu evaluieren, wurden Teststrukturen mit unterschiedlichen Rakelgeschwindigkeiten gedruckt. Dabei wurde eine Spannung von 6 V, 9 V und 12 V angelegt, was einer Rakelgeschwindigkeit von 3,9 mm/s, 6,7 mm/s und 9,4 mm/s entspricht (siehe Anhang 6.1). Des Weiteren wurden Schichten mit Füllgraden von 4, 11, 22 und 30 Volumenprozent hergestellt.

Der eigentliche Schablonendruck wurde durchgeführt, indem die strukturierte Kaptonfolie einseitig mit Kaptonklebeband auf PMMA Substraten fixiert wurde und der befüllte Rakel über die Schablone gezogen wurde. Der Rakel wurde jeweils mit einer Füllhöhe von 1 cm mit dem Komposit befüllt. Nach der Aufbringung des Komposit wurde die Schablone möglichst gleichmäßig vom Substrat abgehoben und das Substrat zum Aushärten für mindestens zwei Stunden bei 50°C in den Trockenschrank gestellt.

3.2.5 Schichtdickenmessung

Die Schichtdicke der unter dem Kapitel 3.2.4 hergestellten Schichten wurden mit einem topographischen Messsystem der Firma FRT GmbH vermessen. Die Schichtdicke wurde mit einem chromatischen Weißlichtsensor gemessen, indem der Sensor, ausgehend vom Substrat, die Schicht abgescannt hat. Der Scann erfolgte sowohl in Rakelrichtung als auch quer zur Rakelrichtung. Auf jeder Probe wurden die quadratischen Strukturen A1, B2, C3, D4 und die Strukturen A4, B4, C4 der Spalte 4 vermessen (s. Abbildung 3.6).

3.2.6 Externer Kondensator

In ersten Experimenten wurde versucht, einen großflächigen Kondensator auf einer PMMA Platte herzustellen. Dazu wurde auf einer Fläche von 16,5 cm mal 5,5 cm Silberleitlack auf das PMMA aufgetragen. Über diesen Silberleitlack wurde dann mittels Folienguss das Komposit aufgebracht. Für den Folienguss wurde die in Kapitel 3.2.4 erwähnte Tape Casting Maschine verwendet. Die Öffnung des Füllbehälters betrug 200 μm und die Folie wurde mit einer Rakelgeschwindigkeit von 6,7 mm/s gezogen. Nachdem das Dielektrikum bei 50°C im Trockenschrank für 3 Stunden ausgehärtet wurde, wurde die Gegenelektrode mit Silberleitlack aufgetragen. Die zweite Elektrode wurde dabei so aufgebracht, dass die übereinander liegenden Elektroden eine Fläche von 90,75 cm² umfasste. Im Anschluss an die Herstellung wurde der Kondensator mit dem digitalen Multimeter 195A von Keithley auf einen Kurzschluss überprüft.

3.2.7 Integrierte Leiterplattenkondensatoren

Zielsetzung dieser Arbeit ist es Kondensatoren in Leiterplatten zu integrieren. Um die Strukturierungsmöglichkeit einer mit Fotolack beschichteten Leiterplatte und den zur Verfügung stehenden Belichtungs- und Ätzanlagen zu evaluieren, wurden in ersten Vorversuchen Teststrukturen auf einer Leiterplatte hergestellt (s. Abbildung 3.7). Hierbei galt es vor allem die minimale Leiterbahndicke von geraden und runden Leiterbahnen (Teststruktur A und C) als auch den minimalen Abstand von zwei Leiterbahnen (Teststruktur B und D) herauszufinden. Deshalb wurden verschieden dicke Teststrukturen A und C auf einer Leiterplatte untergebracht.

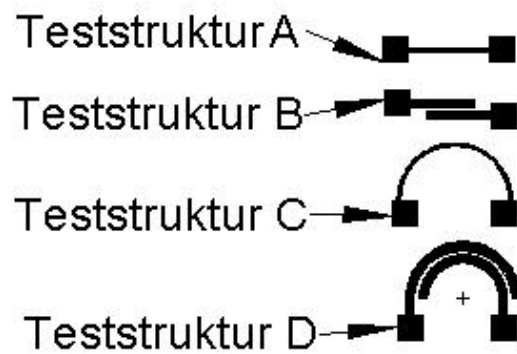
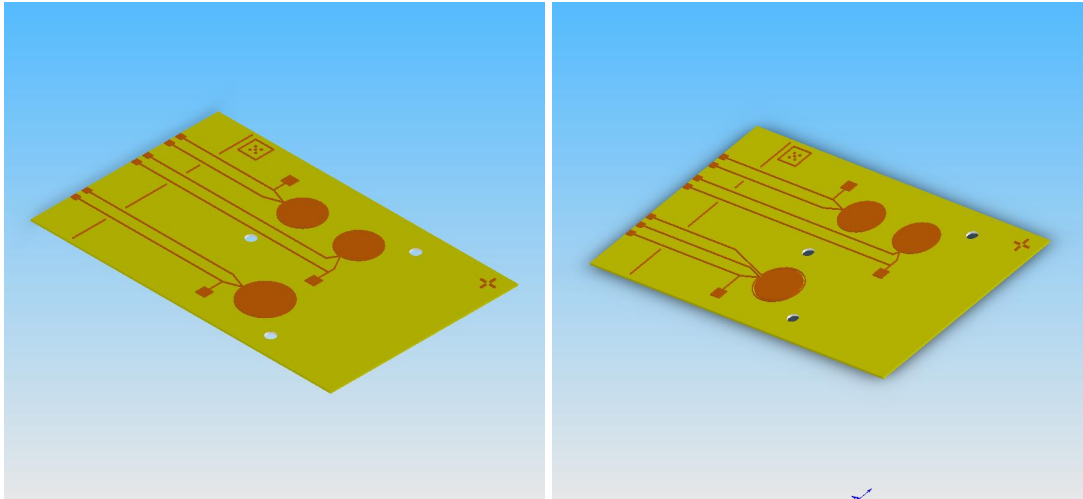


Abbildung 3.7: Teststrukturen zur Evaluierung Strukturierungsmöglichkeiten auf einer Leiterplatte

Die Dicke der Leiterbahnen wurde beginnend mit einer Stärke von 0,1 mm in 0,1 mm Schritten bis auf eine Stärke von 1 mm und dann in 0,2 mm Schritten auf eine Stärke von 2 mm erhöht. In gleichem Maße wurde der Abstand der Strukturen B und D variiert. Die für den Strukturübertrag benötigte Maske wurde auf eine spezielle Laserfolie mit einem HP 9100 PCL Drucker von Hewlett Packard gedruckt. Als Leiterplatte kam das fotobeschichtete Basismaterial der Firma Bungard zum Einsatz. Bei dem Basismaterial handelte es sich um Epoxidplatten FR4 mit den Abmessungen 100 mm*160 mm, einer Tafelstärke von 1 mm und einer Kupferauflage von 35 μm . Die Belichtung der Leiterplatte erfolgte 90 s lang in dem Belichtungsgerät Hellas der Firma Bungard bei einer Geräteeinstellung von 2,5 A. Nach der Belichtung wurde die Leiterplatte 45 s in einer 1 %igen Natriumhydroxidlösung entwickelt und anschließend ca. 15 min in einem Ammoniumperoxidsulfatbad bei einer Temperatur von 45°C geätzt. Die Überprüfung der einzelnen Teststrukturen erfolgte dann mit Hilfe eines Keithley Digital Multimeters 195A. Ausgehend von diesen Vorversuchen wurde dann das Design von zwei Leiterplatten mit Elektrodenstrukturen für die Herstellung einer integrierten Kapazität konzipiert (s. Abbildung 3.8). Auf den Leiterplatten wurden jeweils drei Kondensatorelektroden realisiert. Eine der drei Elektroden wurde als abgeschirmte Elektrode entworfen um wie in Kapitel 3.2.3 den Einfluss von Streufeldern im Randbereich zu minimieren. Um die Kondensatoren später zu charakterisieren, wurden an jede Elektrode zwei lange Zuleitungen bis zum Rand der Leiterplatten gelegt. Die zweite Leitung soll eine Vierpunktmessung der Kapazität ermöglichen.



*Abbildung 3.8: Elektroden auf Leiterplatten für die Herstellung eines integrier-
ten Kondensators; links: obere Elektroden; rechts: untere Elektroden*

Außerdem wurde eine kürzere Leitung zu den Kondensatoren gelegt, die durch eine in der gegenüberliegenden Leiterplatte angebrachte Bohrung kontaktiert werden kann. Durch diese verkürzten Zuleitungen sollen eventuelle parasitäre Effekte bei einer Kapazitätsmessung minimiert werden. Zusätzlich wurden auf den Leiterplatten Alignmentstrukturen angebracht, um die Leiterplatten aufeinander ausrichten zu können und eventuelle Verschiebungen nach dem Verkleben beobachten zu können. Das detaillierte Design der Leiterplatten ist im Anhang 6.2 einzusehen. Die Leiterplatten wurden auf dieselbe Weise hergestellt wie die Teststrukturen. Ebenfalls wurden die einzelnen Kontaktierungselektroden mit dem Multimeter auf ihre Leitfähigkeit überprüft, bevor sie weiterprozessiert worden sind.

Das Dielektrikum der Kondensatoren wurde durch Schablonendruck auf die untere Elektrode aufgebracht. Dazu wurde eine 50 μm Kaptonfolie strukturiert. Die quadratischen Kavitäten der Schablone haben eine Seitenlänge, die den Durchmessern der Elektroden plus einer Toleranz von 1 mm entspricht. Als Dielektrikum wurde das Komposit mit einem Füllgrad von 30 Vol.-% Bariumtitanat benutzt. Der Schablonendruck wurde mit einer Rakelgeschwindigkeit von 6,7 mm/s durchgeführt. Danach wurde die Schablone abgenommen und die Leiterplatte bei einer Temperatur von 50°C in den Trockenschrank gestellt. Um die beiden Leiterplatten miteinander zu verbinden, wurde nach dem Aushärten des Komposit auf die obere Leiterplatte eine Klebeschicht abgeschieden, indem mit der Tape Casting Maschine und dem Füllbehälter mit einer Öffnung von 0,2 mm UPM2 mit 2 Gew.-% MEKP aufgebracht worden ist. Die Rakelgeschwindigkeit betrug hierbei wiederum 6,7 mm/s. Die mit dem

UPM2 versehene obere Elektrode wurde dann auf der unteren Elektrode so positioniert, dass der Rand der oberen Elektrode mit den Ausrichtungslinien der unteren Elektrode übereinstimmte. Zum Aushärten werden die beiden verklebten Leiterplatten in den Trockenschrank bei 50°C gelegt und die Leiterplatten mit zwei Gewichten von jeweils 1900 g beschwert und somit zusammengepresst.

3.2.8 Kapazitätsmessung

Die Kapazität eines Kondensators kann auf unterschiedlich Weise bestimmt werden. Zum einen gibt es die Möglichkeit, die Kapazität über eine Impedanzanalyse zu bestimmen, zum anderen gibt es auch die Möglichkeit, die Kapazität über eine Lade- und Entladekurve zu berechnen. Im Zuge dieser Arbeiten wurden beide Methoden angewandt um die Kapazitäten der unter dem Kapitel 3.2.7 hergestellten Kondensatoren zu vermessen. Zuerst wurden die Kondensatoren mit dem LCR-Meter Escort ELC-3131D vermessen. Das Gerät bietet die Möglichkeit mittels einer Vierleitermessung Kapazitäten bei zwei Messfrequenzen (120 Hz und 1 kHz) zu bestimmen. Darüber hinaus hat das Gerät einen direkten Masseanschluss mit dem die abgeschirmte Elektrode kontaktiert werden kann. Sowohl die Möglichkeit der Messfrequenzeinstellung als auch die der Benutzung der abgeschirmten Elektrode wurden in dieser Charakterisierung ausgenutzt. In einem weiteren Versuch wurden die Frequenzabhängigkeit der Kapazitäten, die Impedanzen und die Phasenverschiebungen der Kondensatoren in einem Frequenzbereich zwischen 40 Hz und 10 MHz untersucht (Agilent 4294A). Hierbei wurden die Kondensatoren sowohl über die langen als auch über die kurzen Zuleitungen kontaktiert und deren Messergebnisse gegenübergestellt. Um die Kapazitäten der Kondensatoren zu bestimmen wurde am Messgerät ein so genannter Cs-Rs Modus ausgewählt, bei dem das Messgerät einen zum Kondensator in Reihe liegenden Widerstand aus der Berechnung des Kapazitätswertes eliminiert. Zusätzlich bietet das Impedanzanalysenmessgerät die Option mit verschiedenen definierten Anordnungen von Kapazitäten, Induktivitäten und ohmschen Widerständen eine parametrisierte Kurve an die Messkurve anzunähern. Diese Option wurde ebenfalls ausgenutzt. In einem letzten Versuch wurden die Ladekurven der Kondensatoren aufgenommen und anhand der gemessenen Werte die Kapazitäten berechnet. Zum Einsatz kamen ein Frequenzgenerator 33120 A von Agilent und das Oszilloskop 54622 A von Agilent. Die Messanordnung ist in Abbildung 3.9 zu sehen. Der Frequenzgenerator lädt den Kondensator über

einen Widerstand mit einer Rechteckspannung von 2 V auf und die Aufladespannung wird am Oszilloskop detektiert. Der Widerstand wurde vor der Messung mit dem Multimeter 195A von Keithley vermessen.

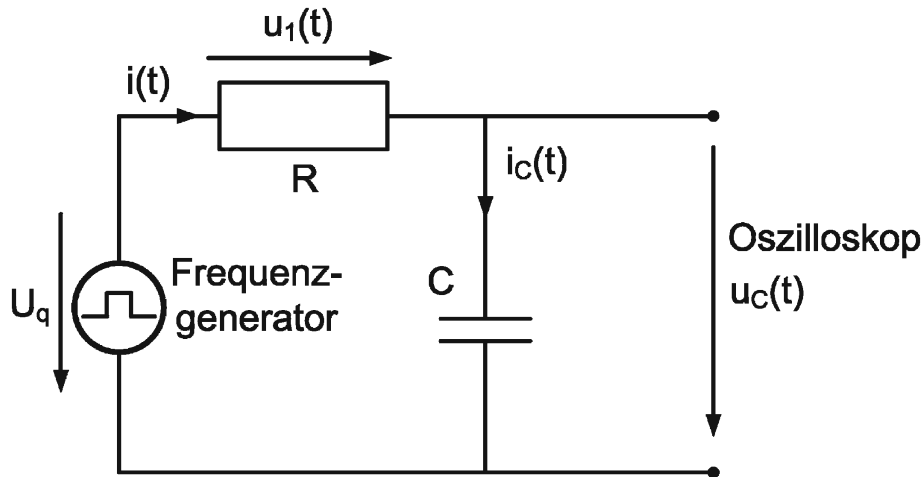


Abbildung 3.9: Messanordnung zur Aufnahme der Aufladespannung eines Kondensators

3.2.9 Herstellung von Schliffen für die Mikroskopie

Des Weiteren wurden von den fertigen integrierten und externen Kondensatoren Schliffe für die Mikroskopie angefertigt um die Dicke der dielektrischen Schicht und der Klebeschicht messen zu können. Dazu wurden aus den Kondensatoren Teile herausgesägt und mit dem Kalteinbettungsmittel VariDur 200 von Buehler eingebettet. Die einzelnen Schleif- und Polierschritte wurden dann mit der Schleifmaschine Phoenix 4000 von Buehler durchgeführt. Tabelle 3.4 zeigt einen Überblick über die einzelnen Schleif- und Polierschritte. Die einzelnen Schritte wurden jeweils bei einer Drehzahl des Probenhalters von 150 U/min und einem Anpressdruck von 25 N auf die einzelnen Proben durchgeführt.

Im Anschluss an die Schleif- und Polierschritte wurden die Proben unter dem Mikroskop begutachtet und die Dicke der Schichten mit der Software Analysis ausgewertet.

3 Experimentelle Vorgehensweise

	Scheibe/Tuch	Dauer	Medium
1. Schleifen	96 μm	20 s	Wasser
2. Schleifen	46 μm	20 s	Wasser
3. Schleifen	35 μm	30 s	Wasser
4. Schleifen	16 μm	30 s	Wasser
5. Schleifen	10 μm	2 min	Wasser
1. Polieren	9 μm	10 min	Lubricant + Diamantsuspension 9 μm
2. Polieren	6 μm	10 min	Lubricant + Diamantsuspension 6 μm
3. Polieren	3 μm	10 min	Lubricant + Diamantsuspension 3 μm
4. Polieren	1 μm	10 min	Lubricant + Diamantsuspension 1 μm

Tabelle 3.4: Übersichtstabelle zu den einzelnen Schleif- und Polierschritten

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Pulvercharakterisierung

Die Messergebnisse der Dichte und der spezifischen Oberfläche sind in der Tabelle 4.1 zu finden.

Dichte [g/cm ³]	Spezifische Oberfläche [m ² /g]
5,94	1,75

Tabelle 4.1: Dichte und spezifische Oberfläche des verwendeten Bariumtitanats

4.2 Probenherstellung

Um die Verarbeitbarkeit und die Materialeigenschaften des in diesen Arbeiten verwendeten Komposit zu untersuchen, wurden verschiedene Messungen und Experimente durchgeführt.

4.2.1 Verarbeitungszeit

Um den Einfluss des Polymerisationsinitiators MEKP auf die Verarbeitungszeit des Komposit messen zu können, wurde die Viskosität in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Dabei wurde sowohl der MEKP-Gehalt als auch der Füllgrad an Bariumtitanat im Komposit variiert. In der Abbildung 4.1 ist zu erkennen, dass das reine UPM 2 über eine Messzeit von 40 min eine sehr konstante Viskosität von ca. 0,15 Pa*s hat. Im Gegensatz dazu steigt die Viskosität des UPM 2 bei steigendem MEKP-Gehalt ab einem bestimmten Zeitpunkt stark an, wobei sich der Zeitpunkt mit erhöhtem MEKP-Gehalt zu kürzeren Zeiten hin verschiebt. Bei einem MEKP-Gehalt von 3 Gew.-% ist der Zeitpunkt bei ca. 10 min und bei einem MEKP-Gehalt von 2 Gew.-% bei ca. 20 min erreicht. Zu erwähnen ist, dass in der Abbildung 4.1 die

reine Messzeit des Rheometers aufgezeichnet wurde und nicht die Zeit ab Zugabe des MEKP zu dem UPM 2. Die Zeitdifferenz zwischen der Zugabe des MEKP und dem Start der Viskositätsmessung betrug bei jeder Messung 6 min.

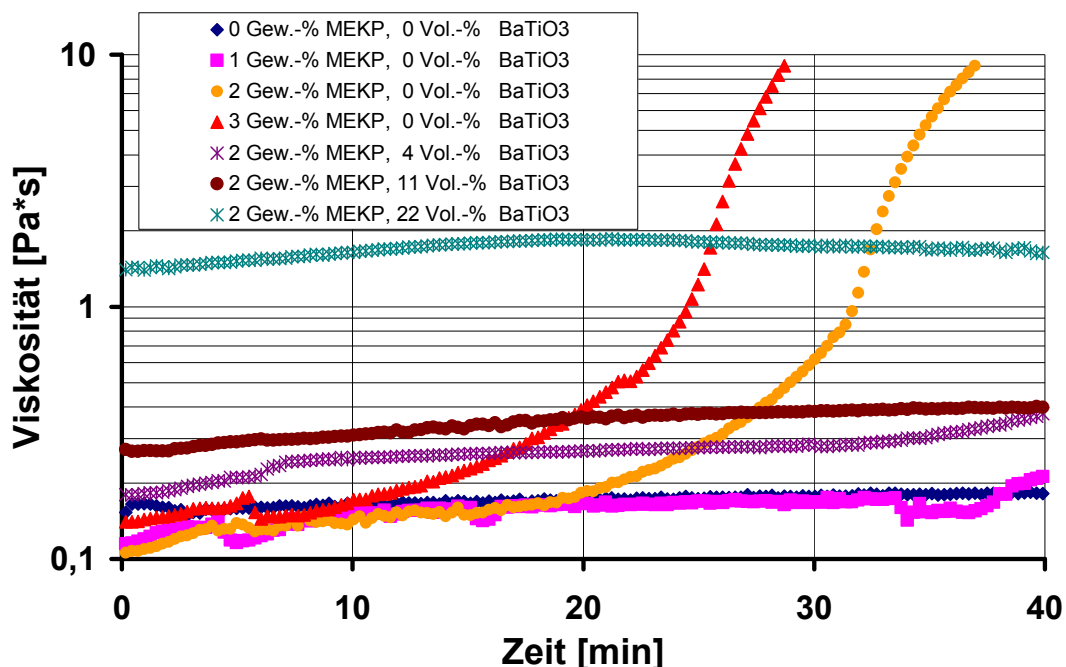


Abbildung 4.1: Abhängigkeit der Viskosität des UPM 2 von der Zeit bei unterschiedlichen MEKP- und BaTiO₃-gehalten und einer Scherrate von 100 s^{-1} und einer Temperatur von 20°C

Die Viskositätserhöhung der mit MEKP versetzten Proben ist auf die einsetzende Polymerisation zurückzuführen. Durch die Polymerisationsreaktion verlängern sich die Molekülketten des Polymers und weisen somit ein schlechteres Fließverhalten auf, das in einer höheren Viskosität sichtbar wird. Die Verschiebung der Viskositätszunahme mit steigendem MEKP-Gehalt zu kürzeren Zeiten lässt sich dadurch erklären, dass der Verlauf einer radikalischen Polymerisation und deren Wachstumsreaktionen sehr stark von der Anzahl der vorhandenen Radikale abhängen. Durch die höhere Zugabe an MEKP werden dem System vermehrt Initiator-moleküle zugegeben, wodurch mehr Radikale entstehen und die Kettenbildung zu einem früheren Zeitpunkt stärker ausgeprägt ist. Bei den mit Bariumtitanat gefüllten Proben ist kein ausgeprägter Anstieg der Viskosität zu verzeichnen, sondern die Viskositäten bleiben in dem betrachteten Zeitfenster annähernd konstant. Allerdings ist in der Abbildung 4.1 deutlich zu erkennen, dass die Viskosität des Komposit mit steigen-

dem Füllgrad an Bariumtitanat zunimmt. Basierend auf diesen Messergebnissen wurde die maximale Verarbeitungszeit des Komposit auf 25 min festgelegt.

4.2.2 Ausdehnungskoeffizient

Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient ist eine wichtige Materialkenngröße, der besonders bei der Verbindung von verschiedenen Materialien eine große Rolle spielt. Auf Grund von Temperaturunterschieden können unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten zu mechanischen Spannungen zwischen den Materialien führen und letztendlich Risse zwischen den Materialien bzw. in den Materialien verursachen. Deshalb ist ein ähnlicher thermischer Ausdehnungskoeffizient bei der Verbindung von unterschiedlichen Materialien wünschenswert. In Abbildung 4.2 ist der aus den Dilatometermessungen berechnete lineare thermische Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit vom Füllgrad an Bariumtitanat dargestellt.

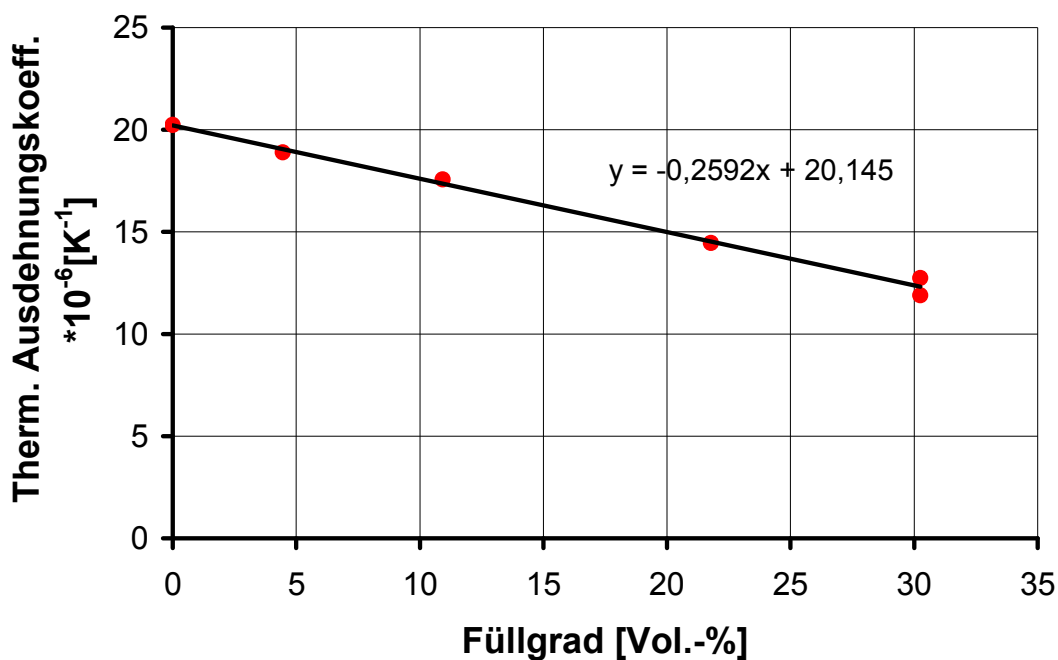


Abbildung 4.2: Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient (zwischen 30 und 100°C) des Komposit in Abhängigkeit vom Füllgrad an Bariumtitanat

Der thermische Ausdehnungskoeffizient nimmt mit steigendem Füllgrad von $20,23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (0 Vol.-%) auf $11,88 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (30,25 Vol.-%) ab. Zusätzlich wurde aus den Messwerten eine Regressionsgerade berechnet. Die lineare Regression ist dabei eine gute Näherung im Bereich von 0 Vol.-% bis 30 Vol.-%. Zum Vergleich

sind in der Tabelle 4.2 Literaturwerte für Kupfer, eine Epoxidharzplatte und Bariumtitanat aufgelistet.

Werkstoff	Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient *10⁻⁶ [K⁻¹]
Cu	16,8
Epoxidharzplatte FR4 (bezogen auf die Leiterplattenebene)	13 – 19
BaTiO ₃	10,1

Tabelle 4.2: Auflistung von verschiedenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten; Cu [19], Epoxidharz [18], BaTiO₃ [17]

Der Vergleich zeigt, dass der Ausdehnungskoeffizient des Komposit ab ca. 10 Vol.-% bis ca. 30 Vol.-% im Bereich der Epoxidharzplatte liegt.

4.2.3 Dielektrizitätsmessung

Die Anforderungen an integrierte Kondensatoren bestehen hauptsächlich in der Miniaturisierung und der optimalen Flächenausnutzung bei gleichzeitig ausreichend großen Kapazitätswerten. Die Kapazitätsdichte, also die Kapazität des Kondensators pro genutzter Fläche, ist deshalb ein wichtiges Kriterium für die spätere Verwendung eines Kondensatorsystems. Um die Kapazitätsdichte eines Kondensators zu erhöhen ist es daher besonders wichtig, dass im Aufbau eines Kondensators ein Dielektrikum mit hinreichend großen relativen Permittivitäten verwendet wird. Bei dielektrischen Kompositen wird deshalb meist ein Ferroelektrikum als Füllstoff benutzt um die relativen Permittivitäten des Komposits zu vergrößern. Die relative Permittivität des in diesen Versuchen verwendeten Komposits zeigt dabei eine Abhängigkeit von dem Füllgrad des ferroelektrischen Bariumtitanat auf (s. Abbildung 4.3). Mit steigendem Füllgrad vergrößert sich die relative Permittivität von 3,5 (0 Vol.-%) auf 19,20 (30,25 Vol.-%) bei einer Messfrequenz von 100 kHz. Die Abbildung 4.3 verdeutlicht ebenfalls, dass die eingezeichnete Regressionsgerade eine gute Näherung in diesem Bereich darstellt. Demnach ist für den Aufbau eines Kondensators mit den hier untersuchten Kompositen ein möglichst hoher Füllgrad zu wählen.

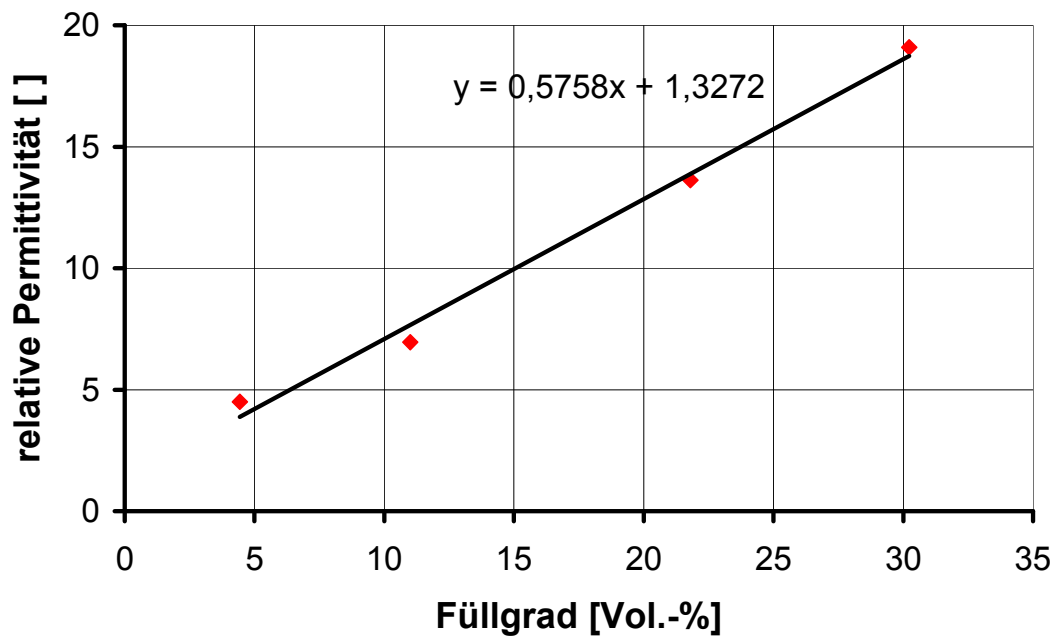


Abbildung 4.3: Abhängigkeit der relativen Permittivität vom Füllgrad an Bariumtitanat bei einer Frequenz von 100 kHz und 25°C.

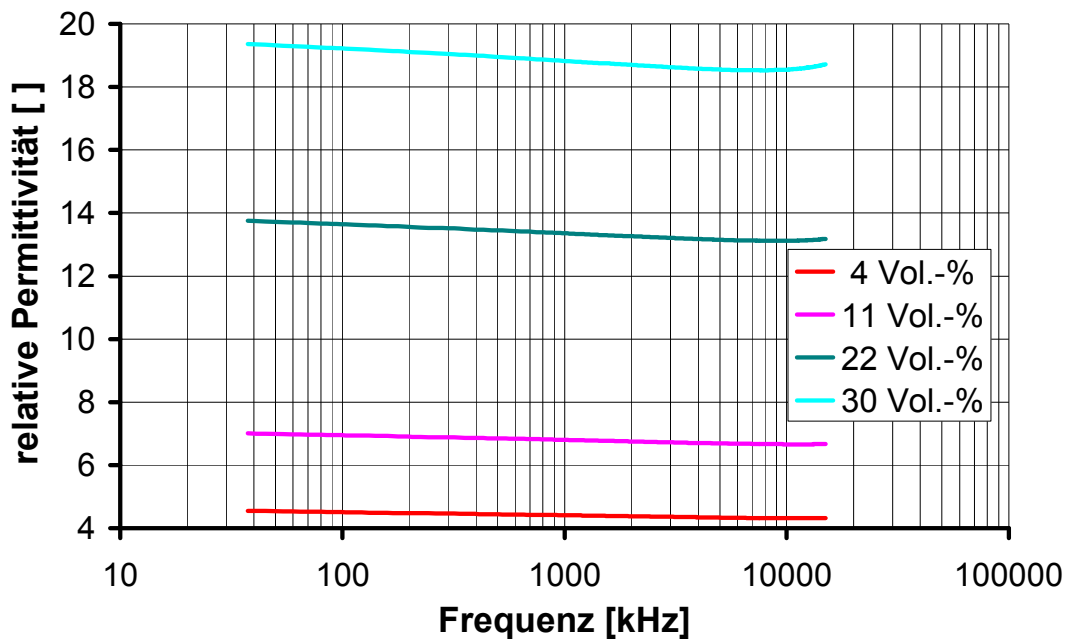


Abbildung 4.4: Abhängigkeit der relativen Permittivität von der Frequenz; Temperatur: 25°C

In weiteren Untersuchungen wurde das Frequenzverhalten des Dielektrikum erforscht. Eine Abhängigkeit des Kapazitätswertes von der Frequenz kann die An-

wendungsmöglichkeiten eines Kondensators in bestimmten Frequenzbereichen einschränken. Mit einer Abhängigkeit ist meistens eine Verringerung des Kapazitätswertes verbunden. Diese Abnahme der Kapazität wird durch das Impedanzverhalten eines realen Kondensators, d.h. durch parasitäre Effekte im Aufbau und der Kontaktierung, und durch Umpolarisierungseffekte im Dielektrikum verursacht. In Abbildung 4.4 ist die Frequenzabhängigkeit des Komposits bei unterschiedlichen Füllgraden zu sehen. Die relative Permittivität nimmt mit steigender Frequenz ab, wobei die Abnahme bei höheren Füllgraden extremer ist. Wird die relative Abnahme im Bereich zwischen 10 kHz und 8 MHz betrachtet, so beträgt diese für jede Probe zwischen 4 % und 5 %. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Abnahme der Permittivität von den Umpolarisierungseffekten im Ferroelektrikum verursacht wird. Abbildung 4.5 zeigt die Abnahme der Permittivität der Probe mit 30 Vol.-% in einer höheren Auflösung. Auffällig ist, dass die Kurve nach dem minimalen Permittivitätswert bei 8 MHz einen Knick aufweist und wieder stark ansteigt. Dies könnte auf parasitäre Induktivitäten im Messaufbau zurückzuführen sein, die zu einem Resonanzfall führen. Unter dem Kapitel 4.2.6 werden die parasitären Effekte näher betrachtet.

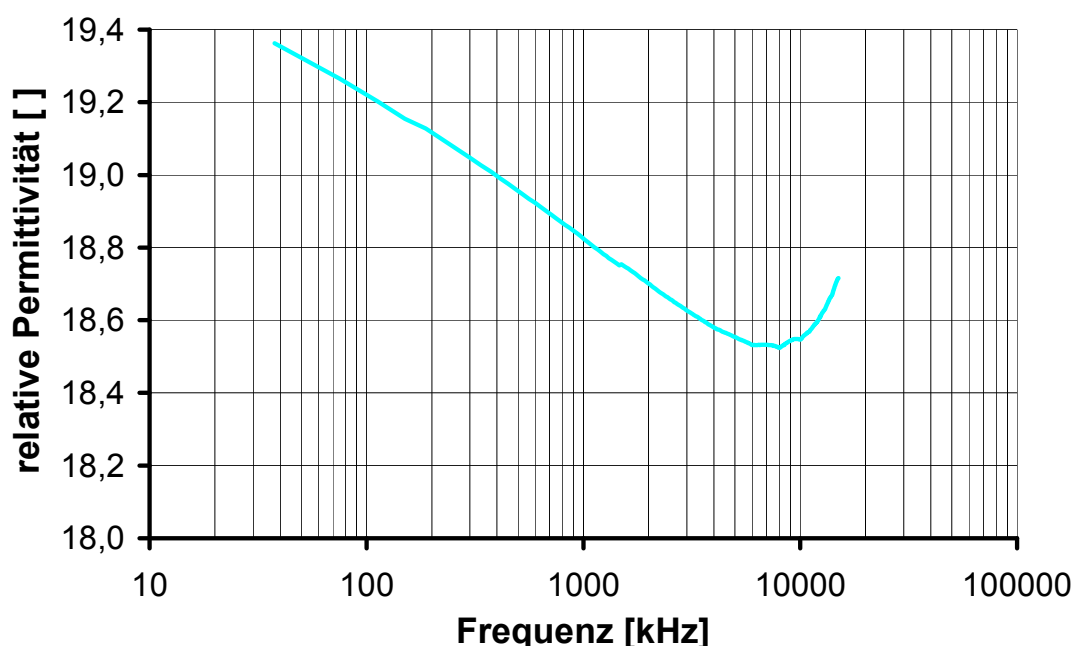


Abbildung 4.5: Abhängigkeit der relativen Permittivität von der Frequenz bei einem Füllgrad von 30 Vol.-% und 25°C

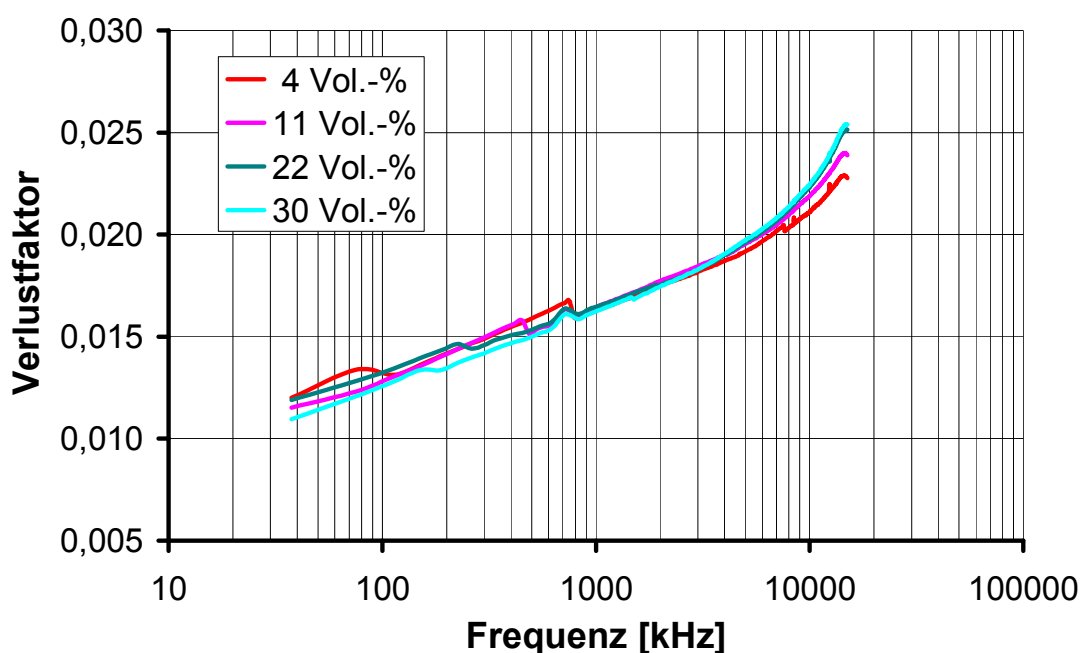


Abbildung 4.6: Verlustwinkel in Abhängigkeit von der Frequenz; Temperatur: 25°C

Reale Kondensatoren bzw. Dielektrika weisen im Gegensatz zu idealen Kondensatoren bzw. Dielektrika immer Verluste auf. Ein Maß für diese Verluste ist der Verlustfaktor, der sich aus der Phasenverschiebung berechnen lässt. Die Phasenverschiebung eines idealen Kondensators beträgt 90° und der daraus resultierende Verlustfaktor ist 0. In Abbildung 4.6 ist der Verlustfaktor über der Frequenz aufgetragen. Der Verlustfaktor steigt mit der Frequenz, übersteigt aber im Frequenzbereich von 10 kHz bis 15 MHz nicht den Wert von 0,03. Eine Abhängigkeit des Verlustfaktors von dem Füllgrad ist nicht zu erkennen. Demnach könnte der Verlustfaktor von der Matrix des Komposit bestimmt werden.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Permittivität eines Dielektrikums ist die Temperatur. Besonders bei Ferroelektrika spielt die Temperatur eine große Rolle, da die Ferroelektrika in verschiedenen Temperaturbereichen unterschiedliche Kristallstrukturen einnehmen. Die Kristallstrukturen unterhalb der jeweiligen Curietemperaturen sind dabei verzerrt und weisen eine spontane, anisotrope Polarisation auf. Die Polarisation ist in der Nähe der Curietemperatur am höchsten, die bei Bariumtitanat bei ca. 120°C liegt.

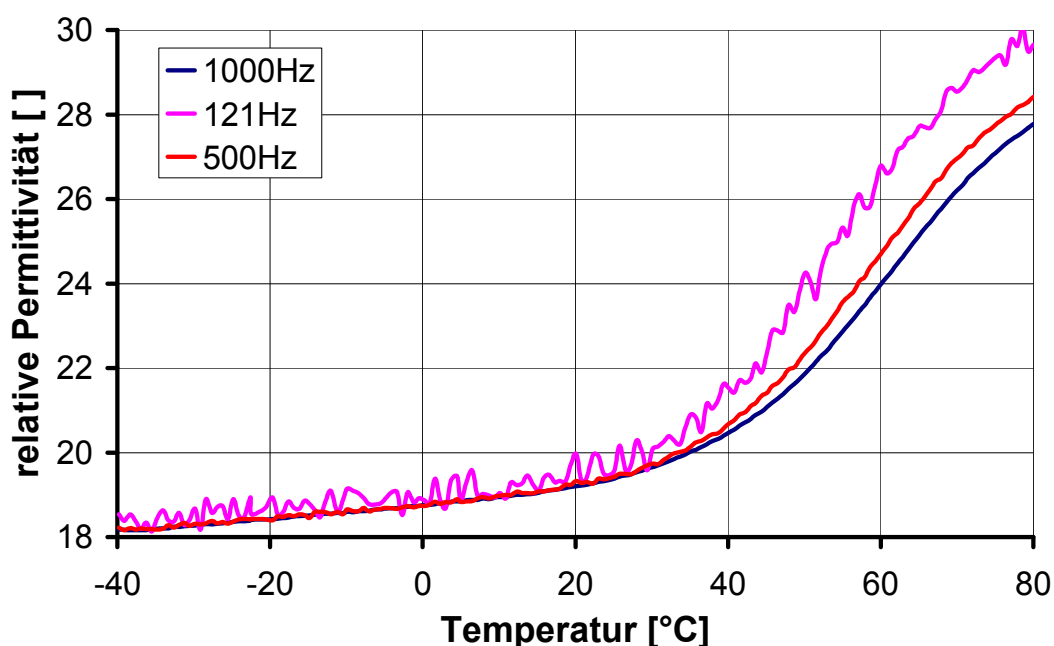


Abbildung 4.7: Temperaturabhängigkeit der relativen Permittivität bei einem Füllgrad von 30 Vol.-%

Die Temperaturcharakteristik des Komposit ist in dem Temperaturbereich zwischen -40°C und 30°C für alle drei gemessenen Frequenzen sehr stabil und sie haben auch ähnliche Permittivitäten (s. Abbildung 4.7). Die relative Permittivität ändert sich nur um einen Wert von 2. Ab einer Temperatur von ca. 30°C fangen die Permittivitäten mit zunehmender Temperatur sehr stark an zu steigen und die einzelnen Permittivitäten der drei Frequenzen auseinanderzudriften, wobei die kleineren Frequenzen höhere Permittivitäten aufweisen. Der Anstieg der Permittivitäten in der Nähe der Curietemperatur kann auf den oben erwähnten Polarisierungseffekt zurückgeführt werden. Das Dielektrikum sollte deshalb möglichst in einem Temperaturbereich unterhalb von 30°C verwendet werden, um einen Drift der Permittivität auf Grund von Temperaturschwankungen zu vermeiden.

4.2.4 Rheologie

Suspensionen und Pasten für den Schablonendruck müssen ganz besondere rheologische Eigenschaften vorweisen, damit ein qualitativ guter Druck ermöglicht wird. Beim Druckprozess wird mit einem Rakel die Druckpaste über die Schablone bewegt. Die Druckpaste wird dabei durch den Druck und die Bewegung des Rakels

geschert. Damit die Druckpaste, wenn sie in die Kavitäten gerakelt wird, nicht unter die Schablone laufen kann, sondern ihre vorgegebene Form beibehält, ist es wichtig, dass die Paste ein strukturviskoses Verhalten aufzeigt. Das bedeutet, dass die Viskosität der Paste unter der Beanspruchung des Rakels sehr niedrig sein muss. Ist jedoch die Kavität gefüllt und die Scherkräfte des Rakels nehmen ab, so muss die Viskosität der Paste schlagartig wieder zunehmen um ein Verlaufen der Struktur zu verhindern. Hohe Viskositäten sind dabei besser geeignet als niedrigere. Die rheologischen Eigenschaften des Komposit wurden deshalb mit einem Rheometer vermessen. Die Abbildung 4.8 zeigt das Verhalten des Komposit mit unterschiedlichen Füllgraden bei einer Temperatur von 20°C.

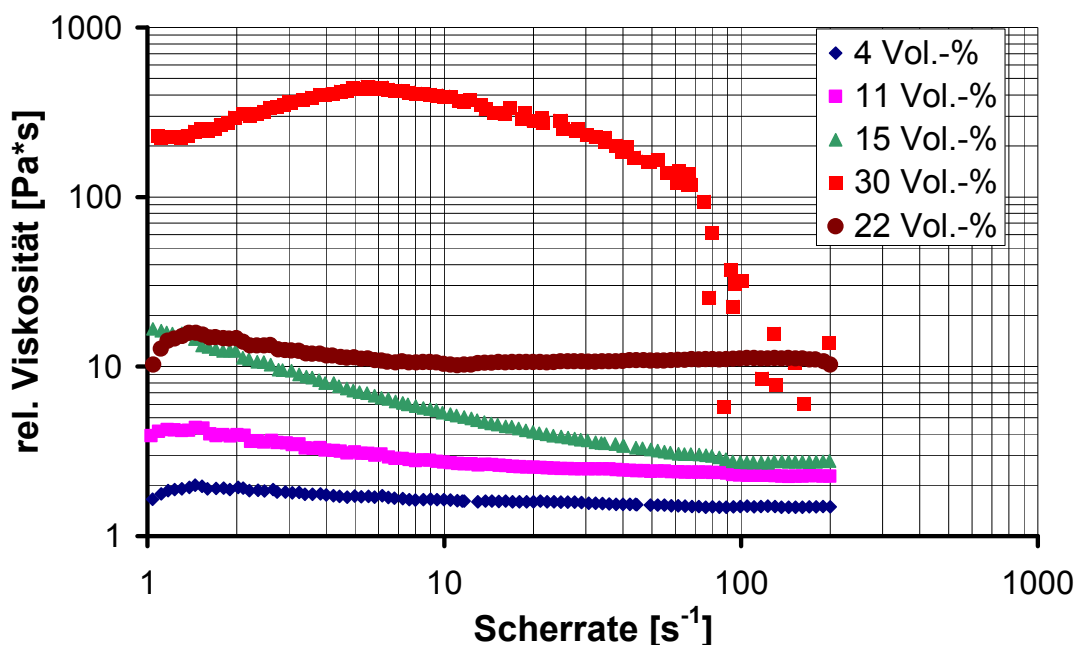


Abbildung 4.8: Relative Viskosität in Abhängigkeit von der Scherrate bei einer Temperatur von 20°C.

Bis auf die Probe mit 15 Vol.-% steigen die Werte der relativen Viskosität zuerst mit der Scherrate an, um dann ab einem bestimmten Punkt mit weiter steigender Scherrate wieder abzufallen (Strukturviskosität). Die in dem hier verwendeten Schablondruck auftretenden Scherraten wurden in einem vereinfachten Modell berechnet (s. Tabelle 4.3). Dabei wurde die Annahme getroffen, dass durch die Bewegung des Füllbehälters das Komposit ausreichend geschert wird und das Komposit vollständig in die Kavitäten laufen kann. Das hintere Teil des Füllbehälters schert dann das Komposit an der Oberkante der Kavität ab. Zur Berechnung der Scherrate wurde die

Rakelgeschwindigkeit und die Schablonendicke in die Formel (2.20) eingesetzt. Die kleinste berechnete Scherrate beträgt 52 s^{-1} . Diese Scherrate reicht aus um bei dem Schablonendruck in den strukturviskosen Bereich zu überschreiten.

		Scherrate [s^{-1}]	Rakelgeschwindigkeit [mm/s]		
			3,93	6,66	9,40
Schablonendicke [μm]	25	157	266	376	
	50	78	133	188	
	75	52	185	125	

Tabelle 4.3: Berechnete Scherraten der einzelnen Prozessparameter, die beim Schablonendruck verwendet wurden.

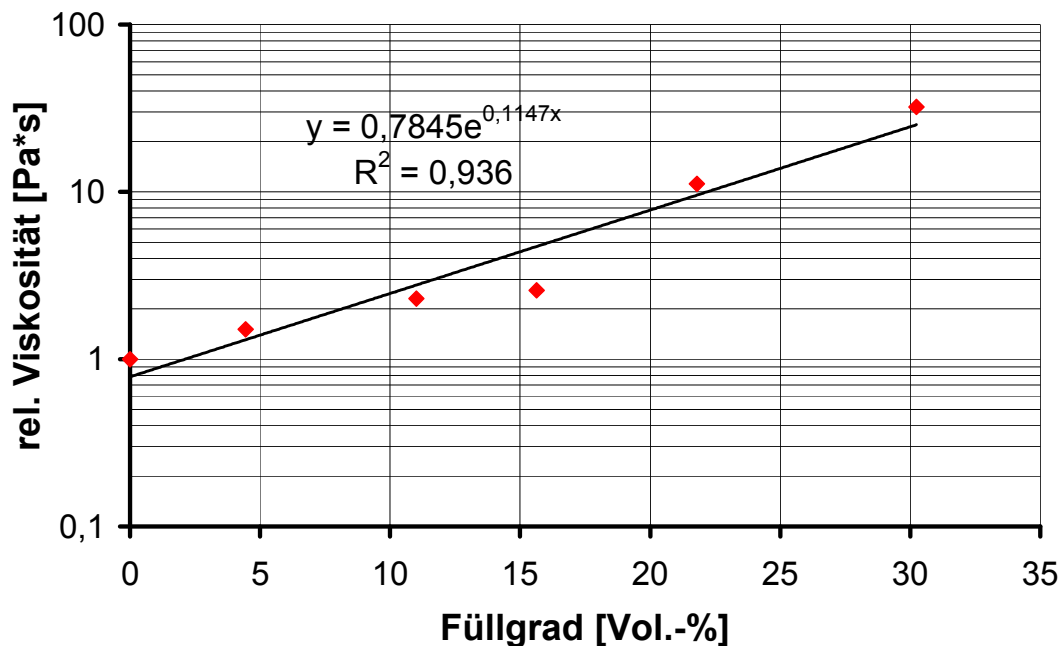


Abbildung 4.9: Abhängigkeit der relativen Viskosität von dem Füllgrad bei 20°C und einer Scherrate von 100 s^{-1} .

In Abbildung 4.9 ist der Zusammenhang zwischen der relativen Viskosität und dem Füllgrad zu sehen. Die Messungen haben ergeben, dass die Viskosität des Kompo-

sit mit steigendem Füllgrad exponentiell zunimmt. Dies stimmt mit dem Modell von Mooney für Suspensionen überein (2.24).

4.2.5 Schichtdickenmessung

Für die Herstellung von integrierten Kondensatoren müssen Prozesse entwickelt werden mit denen das Dielektrikum bzw. in dem Fall das Komposit auf Leiterplatten abgeschieden werden kann. Die Schichten sollten dabei möglichst dünn sein, um große Kapazitäten auf einer kleinen Fläche realisieren zu können. Ein vorstellbares Verfahren, das in dieser Arbeit angewandt wurde, ist der Schablonendruck. Der Schablonendruck wird technisch in der Surface Mount Technology (SMT) verwendet um Lotpasten auf Leiterplatten aufzubringen, die dann die Surface Mount Devices (SMD) mit der Leiterplatte verkleben und elektrisch kontaktieren sollen. Bei der Verwendung des Schablonendrucks zur Abscheidung von dielektrischen Schichten wird zunächst nur die Schichtdicke und die darauf Einfluss nehmenden Parameter Schablonendicke, Füllgrad und Rakelgeschwindigkeit untersucht und versucht diese zu optimieren. Weitere Qualitätsmerkmale wie z.B. das abgeschiedene Volumen oder die Positioniergenauigkeit des Schablonendrucks spielen in dieser Arbeit nur eine untergeordnete Rolle.

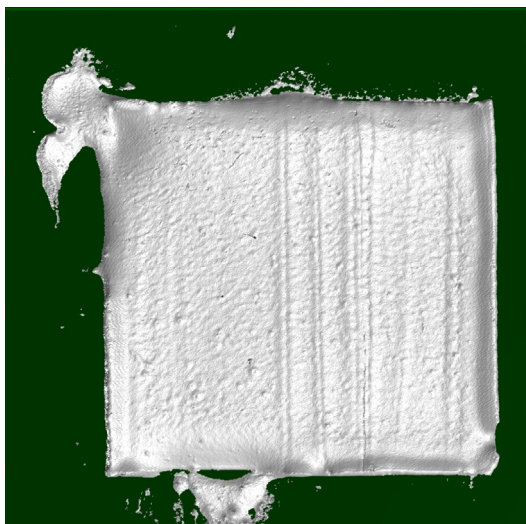


Abbildung 4.10: Flächenscan der Struktur D4 mit einem chromatisch Weißlichtsensor; Schablonendicke 25 μm , Rakelgeschwindigkeit 3,9 mm/s, Füllgrad 30 Vol.-%; z-Achse siebenfach überhöht

Abbildung 4.10 zeigt eine typische Aufnahme einer mittels Schablonendruck hergestellten Schicht. Um die Schichtdicken der Strukturen zu ermitteln, werden die Strukturen sowohl in Rakelrichtung (y) als auch quer zur Rakelrichtung (x) einmal abgescant. Die Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 zeigen exemplarisch Messwerte aus der gerade erwähnten Messung, wobei in den Abbildungen auch die korrigierten Messwerte erfasst sind. Eine Korrektur der Messwerte wurde deshalb erforderlich, weil durch die Probensubstratgröße ein Verkippungsfehler am Messplatz auftrat (s. Abbildung 4.12). Um die Vergleichbarkeit der Schichtdicken bei unterschiedlichen Prozessierungen zu gewährleisten, werden in dieser Arbeit nur die gemittelten Schichtdicken der Strukturen D4 (s. Abbildung 3.6) betrachtet.

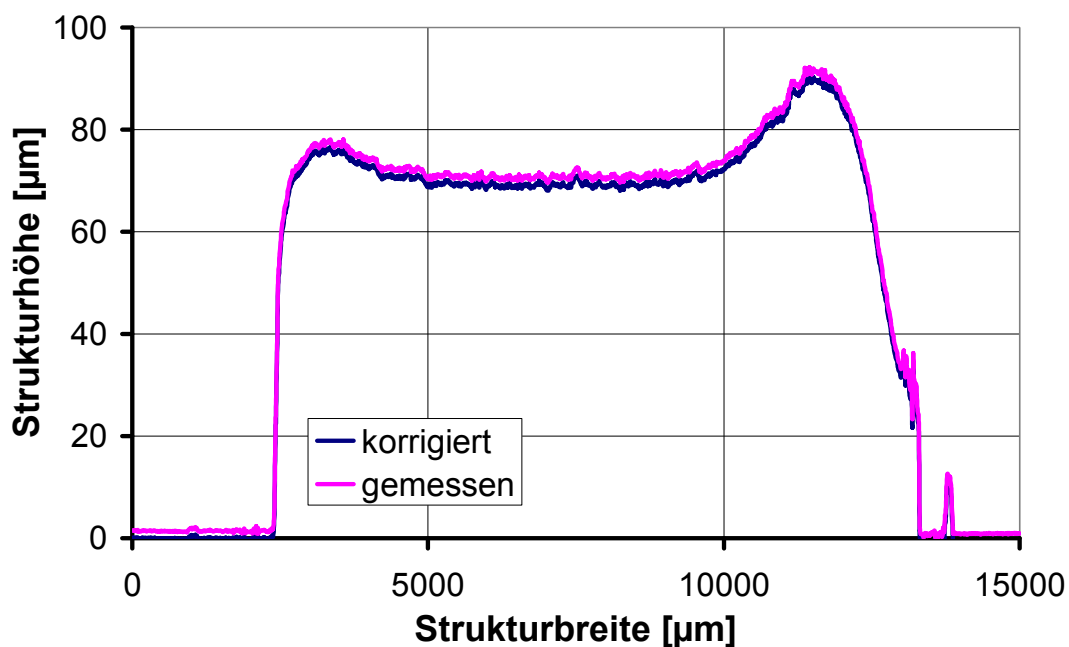


Abbildung 4.11: Profil der Struktur D4 in Rakelrichtung; Schablonendicke 25 µm, Rakelgeschwindigkeit 3,9 mm/s, Füllgrad 30 Vol.-%

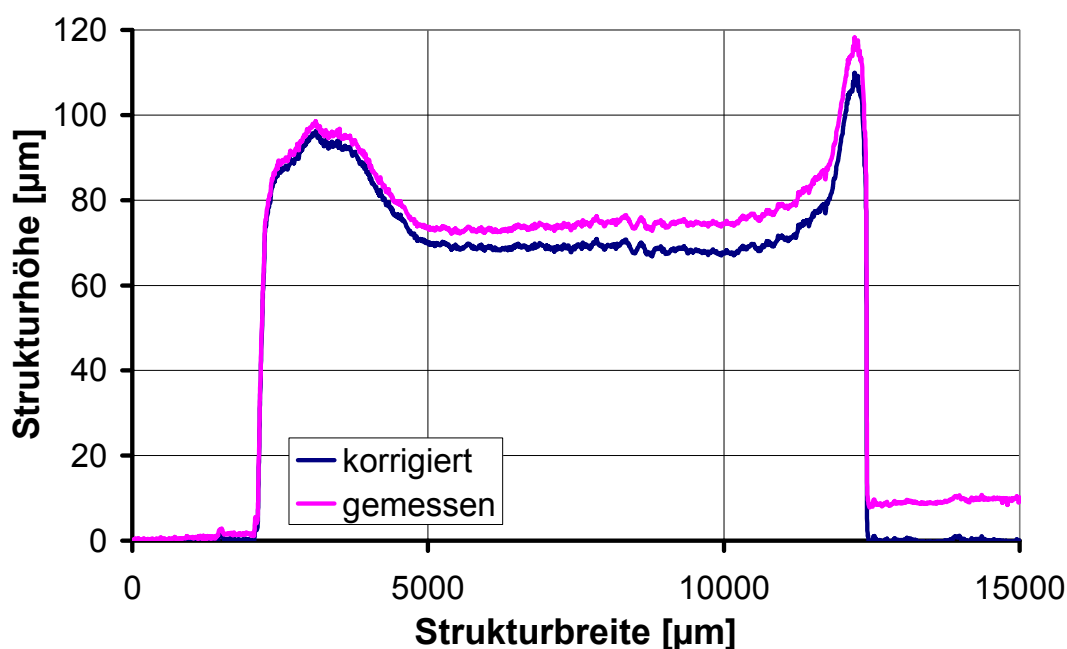


Abbildung 4.12: Profil der Struktur D4 quer zur Rakelrichtung; Schablonendicke 25 μm , Rakelgeschwindigkeit 3,9 mm/s, Füllgrad 30 Vol.-%

In Abbildung 4.13 ist die Abhängigkeit der Schichtdicke von der Schablonendicke dargestellt (s auch Kapitel 6.3). Im Diagramm sind sowohl die Schichtdicken für unterschiedliche Rakelgeschwindigkeiten als auch die Messungen in und quer zur Rakelrichtung dargestellt. Auffallend ist, dass fast keine der prozessierten Schichten eine Dicke im Bereich der Schablonen hat. Deshalb wurden die Kaptonfolien ebenfalls mit dem Messgerät vermessen und die Herstellerangaben von 25 μm , 50 μm und 75 μm bestätigt. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die kleinste Schichtdicke mit der 50 μm Folie hergestellt werden kann. Die Rakelgeschwindigkeit spielt bei dieser Folie keine große Rolle. Einen größeren Einfluss auf die Schichtdicke hat die Rakelgeschwindigkeit bei der 75 μm Folie. Hier variieren die Schichtdicken zwischen 96 μm und 73 μm , wobei mit den 73 μm die vorgegebene Foliendicke erreicht wird. Die Strukturen, die mit der 25 μm Schablone hergestellt wurden, weichen am stärksten von der Schablonendicke ab.

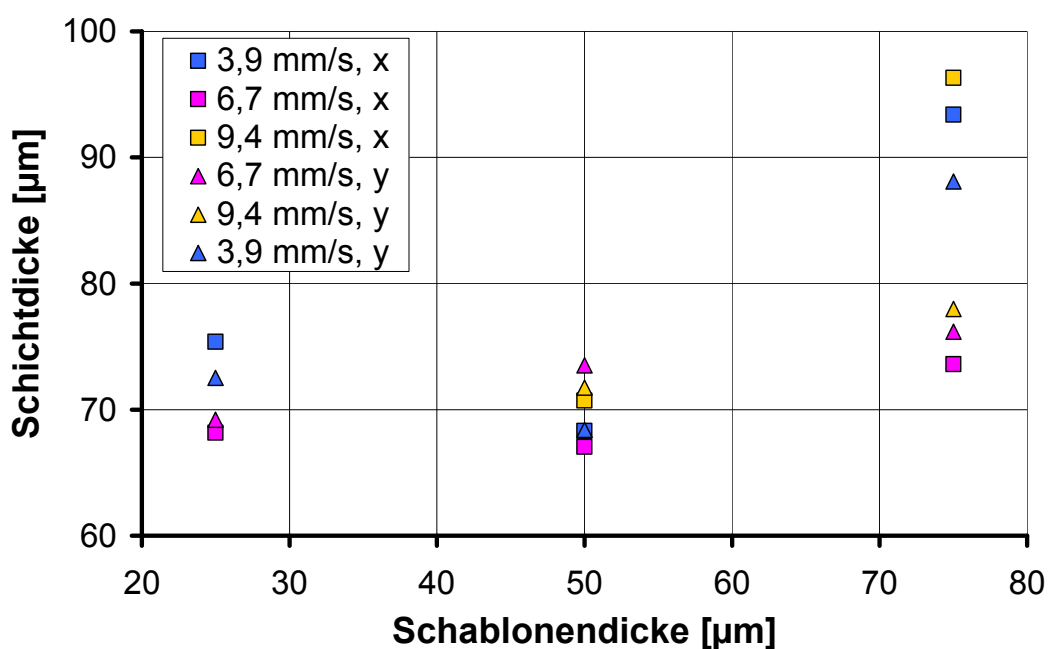


Abbildung 4.13: Abhängigkeit der Schichtdicke von der Schablonendicke bei unterschiedlichen Rakelgeschwindigkeiten; Füllgrad 30 Vol.-%; x entspricht der Messung quer zur Rakelrichtung, y entspricht der Messung in Rakelrichtung

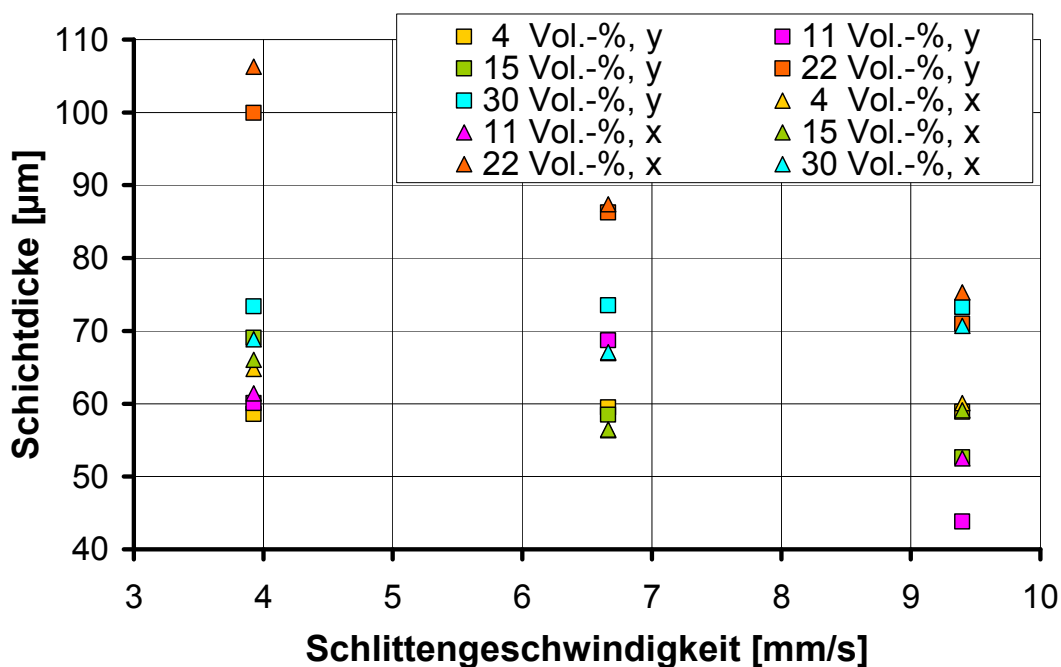


Abbildung 4.14: Abhängigkeit der Schichtdicke von der Rakelgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Füllgraden; Schablonendicke 50 µm, x entspricht der Messung quer zur Rakelrichtung, y entspricht der Messung in Rakelrichtung

Eine mögliche Erklärung für diese Abweichungen könnte sein, dass beim Druckprozess das Eigengewicht des Rakels (209 g) nicht ausreichte und der Rakel anstatt auf der Schablone auf einem Kompositfilm lief. Dies würde auch mit Beobachtungen zu den Druckprozessen übereinstimmen. Ein dünner Kompositfilm blieb nach dem Rakeln auf der Schablone haften.

In der Abbildung 4.14 ist die Schichtdicke über der Schlittengeschwindigkeit aufgetragen. Außer bei einem Füllgrad von 30 Vol.-% nehmen die Schichtdicken bei höheren Rakelgeschwindigkeiten ab. Die Schichtdicke der Probe mit einem Füllgrad von 30 Vol.-% bleibt in diesem Geschwindigkeitsbereich unbeeinflusst von der Rakelgeschwindigkeit. Eine minimale Schichtdicke wird bei einer Rakelgeschwindigkeit von 9,4 mm/s und einem Füllgrad von 11 Vol.-% erreicht. In Abbildung 4.15 ist die Schichtdicke in Abhängigkeit vom Füllgrad aufgetragen. Auch ist die Schichtdicke der 4 Vol.-% und der 30 Vol.-% Probe relativ unbeeinflusst von der Rakelgeschwindigkeit. Zwischen 10 Vol.-% und 25 Vol.-% steigt die Schichtdicke mit zunehmendem Füllgrad an, wobei die höchste Rakelgeschwindigkeit die kleinste Schichtdicke aufweist.

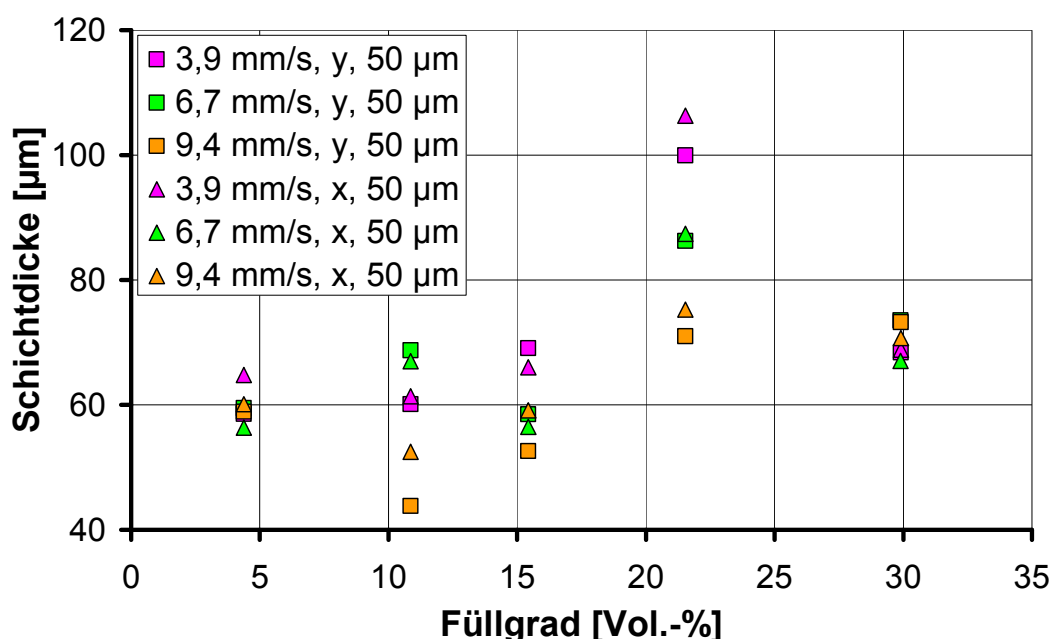


Abbildung 4.15: Abhängigkeit der Schichtdicke von dem Füllgrad bei unterschiedlichen Rakelgeschwindigkeiten; Schablonendicke 50 µm, x entspricht der Messung quer zur Rakelrichtung, y entspricht der Messung in Rakelrichtung

4.2.6 Kapazitätsmessung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das Komposit für verschiedene Füllgrade untersucht und festgestellt, dass das Komposit mit einem Füllgrad von 30 Vol.-% am geeignetsten für die Herstellung eines Kondensators ist, weil bei diesem Füllgrad die höchste relative Permittivität gemessen wurde. In einem ersten Versuch wurde ein Kondensator hergestellt, indem auf eine PMMA Platte als Substrat Silberleitlack aufgespritzt wurde und die dielektrische Schicht mittels Folienguss (0,2 mm Spalt, Schlittengeschwindigkeit 6,7 mm/s) auf die Elektrode gegossen worden ist. Die Gegenelektrode wurde ebenfalls mit Silberleitlack auf das ausgehärtete Komposit aufgebracht. Ein Leitfähigkeitstest ergab einen Kurzschluss für das Bauteil. In der Abbildung 4.16 ist ein Schliff des Kondensators zu sehen.

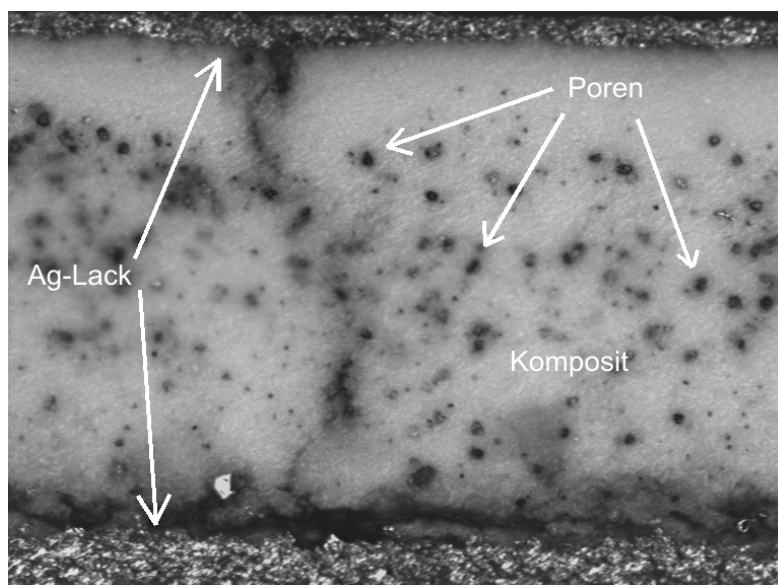


Abbildung 4.16: Schliff eines mit Folienguss und Silberleitlack hergestellten Kondensators; Füllgrad 30 Vol.-%, Rakelgeschwindigkeit 6,7 mm/s, Spaltöffnung 0,2 mm

An den mikroskopierten Schliffen ist zu erkennen, dass die dielektrische Schicht sehr inhomogen ist. Die Schicht weist sehr viele Risse auf, die vertikal und horizontal zu den Elektroden verlaufen. Des Weiteren ist das Dielektrikum mit sehr vielen Poren durchzogen. Die Entgasung im Exsikkator reichte demnach nicht aus um Luftblasen vollständig aus dem Komposit zu entfernen. Die Risse und die Poren könnten dafür verantwortlich sein, dass beim Auftrag der Gegenelektrode Silberleit-

lack durch das Dielektrikum hindurchfließen kann und somit einen Kurzschluss verursacht, der den Kondensator unbrauchbar macht.

In einem zweiten Versuch wurden aus zwei strukturierten Leiterplatten integrierte Kondensatoren hergestellt (s. Kapitel 3.2.7) und mit unterschiedlichen Messverfahren charakterisiert. In Abbildung 4.18 ist exemplarisch die Kapazität der Elektrode E1 über der Frequenz aufgetragen. Die Kapazität des Kondensator wurde dabei über die Kontaktierungselektroden A1-B1 (L) und über die Kontaktierungselektroden D1-D1 (S) (s. Anhang 6.2) gemessen. Der Impedanzanalyzer bietet darüber hinaus die Möglichkeit die Parameter einer äquivalenten Schaltung aus den Messwerten zu berechnen und die Frequenzcharakteristik zu simulieren. Diese simulierten Kurven sind ebenfalls in der Abbildung 4.18 zu sehen. Als äquivalente Schaltung wurde das folgende Schaltbild gewählt.

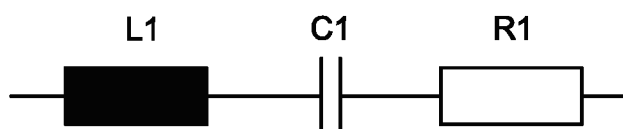


Abbildung 4.17: Äquivalentes Schaltbild zur Berechnung der einzelnen Parameter und zur Simulation der Frequenzabhängigkeit.

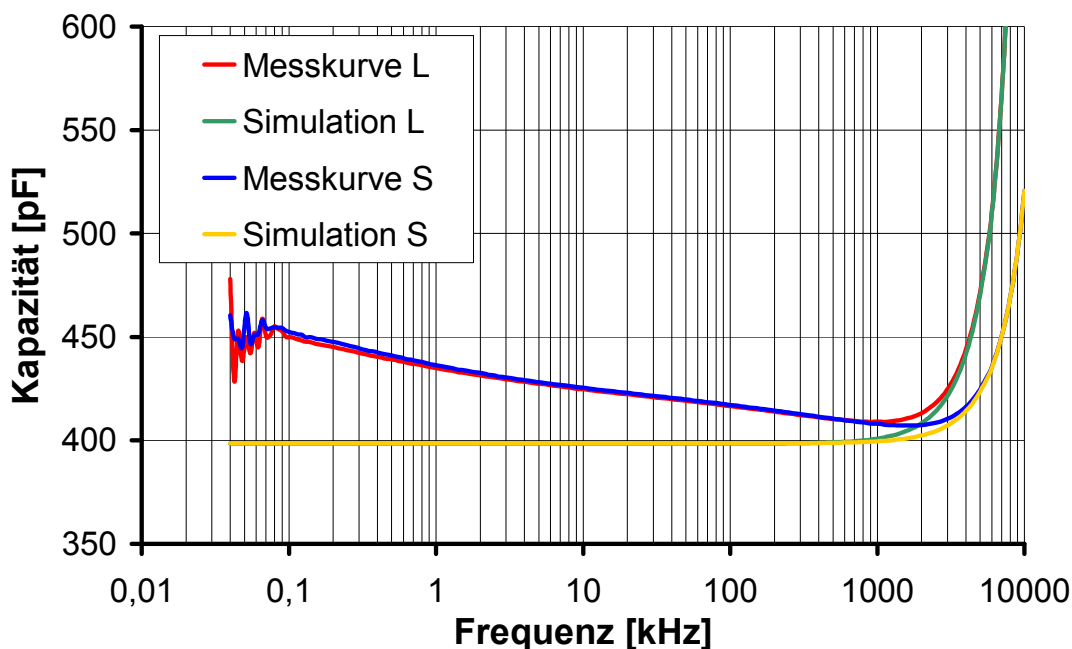


Abbildung 4.18: Kapazität des Kondensators E1 in Abhängigkeit von der Frequenz

Bei kleinen Frequenzen (40 Hz bis ca. 100 Hz) weisen die Messkurven L und S ein sehr großes Rauschen der Kapazitätswerte auf (s. Abbildung 4.18). Im Großsignalverhalten und bei großen elektrischen Feldern sind solche Schwankungen ein typisches Verhalten für Ferroelektrika. Durch das Anlegen eines elektrischen Feldes klappen die ferroelektrischen Domänen um und ein Rauschen ist bemerkbar. Das hier gemessene Rauschen bei kleinen Frequenzen könnte auf dieses Verhalten zurückzuführen sein. Wird die Frequenz erhöht sind die Domänen zu träge und können dem äußeren Feld nicht mehr folgen, deshalb verschwindet das Rauschen ab einer bestimmten Frequenz. Bei weiterer Erhöhung der Frequenz wird die relative Permittivität und somit die Kapazität durch elektronische und ionische Polarisation bestimmt (vgl. Abbildung 4.5). Die Kapazitäten steigen ab ca. 1 bzw. 2 MHz stark an. Dieser Anstieg der Kapazität ist auf parasitäre Induktivitäten der Zuleitungen zurückzuführen. Die Induktivitäten und die Kondensatoren ergeben dann die in Abbildung 4.17 gezeigte Schaltung und bilden einen Bandpass mit einer Resonanzfrequenz f_0 . Unterhalb der Resonanzfrequenz dominiert der Kondensator die Schaltung und oberhalb die Induktivität. Da die Induktivitäten in den Messergebnissen nicht kompensiert werden, steigt die Kapazität in der Nähe der Resonanzfrequenz an und erreicht dann bei der Resonanzfrequenz den Maximalwert. Die Berechnung der Parameter für die äquivalente Schaltung ergab die in Tabelle 4.4 stehenden Werte. Der Vergleich der simulierten Kurven mit den Messkurven zeigt, dass in der Simulation die Abnahme der Permittivität mit steigender Frequenz nicht berücksichtigt wird und eine große Differenz zwischen den Kurven besteht. Mit zunehmender Frequenz verringert sich der Abstand der Kurven, bis sie nahezu identisch sind.

Durch die Messungen mit unterschiedlich langen Zuleitungen L und S verändert sich die parasitäre Induktivität und somit die Frequenz, ab der der Anstieg der Kapazität eintritt. Mit längeren Zuleitungen verschiebt sich der Anstieg zu kleineren Frequenzen, d.h. der Einfluss der Induktivitäten nimmt zu. Dies spiegelt auch die Tabelle 4.4 wieder, in der die Induktivitäten aufgeführt sind und bei der die längeren Zuleitungen größere Werte annehmen. Kürzere Zuleitungen minimieren somit die parasitären Effekte. Auf die Messung der Kapazität im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 1 MHz hat die Leitungslänge nur einen geringen Einfluss.

	E1 L	E1 S	E2 L	E2 S	E3 L	E3 S
R1 [Ω]	1,3357	0,969976	1,72013	1,88657	1,62812	1,49206
C1 [pF]	398,445	398,608	266,687	266,745	302,141	301,639
L1 [nH]	386,689	148,945	423,597	168,421	363,601	173,915
f₀ [MHz]	12,8	20,7	15,0	23,7	16,8	22,0

Tabelle 4.4: Berechnete Parameterwerte der äquivalenten Schaltung zur Kapazitätsmessung

Zusätzlich zu der Kapazitätsmessung wurde der Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Frequenz bestimmt (s. Abbildung 4.19). Im Bereich von 40 Hz bis 100 Hz schwankt der Verlustfaktor zwischen 6 % und 0 %. Diese extremen Schwankungen könnten vom Umklappen der Domänen auf Grund von Feldänderungen hervorgerufen werden. Im Bereich von 100 Hz bis 10 MHz fällt der Verlustfaktor leicht ab, erreicht bei 20 kHz ein Minimum und steigt dann wieder leicht an bis ca. 2 MHz. Ab 2 MHz steigt der Verlustfaktor exponentiell an. Dieser Verlauf lässt sich anhand des universellen Ersatzschaltbildes eines Kondensators gut nachvollziehen (s. Abbildung 2.9).

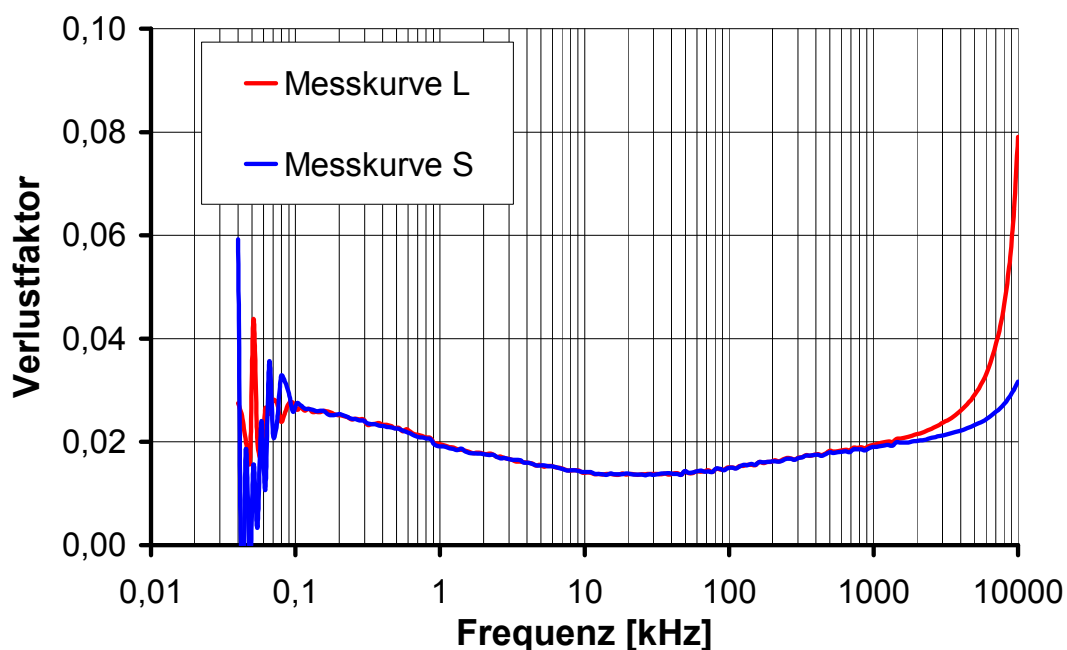


Abbildung 4.19: Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors bei dem Kondensator E1

Die durch die Umpolarisierungen entstehenden Verluste im Dielektrikum kommen vor allem bei kleinen Frequenzen zum Tragen und lassen den Verlustfaktor mit steigender Frequenz sinken. Daran sind die elektronischen und ionischen Polarisierungen beteiligt, deren Beitrag zum Verlustfaktor frequenzabhängig ist und ein resonantes Verhalten aufweist. Bei hohen Frequenzen sinkt die Impedanz der Kapazität. Dadurch wird ein größerer Stromfluss ermöglicht, der an dem Leitungswiderstand R_s größere Verluste bewirkt. Beide Effekte überlagern sich und kompensieren sich im Minimum bei 20 kHz. Im MHz-Bereich wird der Beitrag der Induktivität zum Verlustfaktor so groß, dass der Verlustfaktor exponentiell ansteigt. Demnach liegt der Arbeitsbereich des Kondensators zwischen 100 Hz und 1 MHz, wobei die kleinen Frequenzen höhere Kapazitäten hervorrufen, jedoch bei ca. 20 kHz die kleinsten Verluste auftreten.

Um die Kapazität der Kondensatoren im Großsignalverhalten zu bestimmen, wurde die Aufladespannung des Kondensators ermittelt und daraus die Kapazität berechnet (s. Abbildung 3.9 und s. Abbildung 4.20).

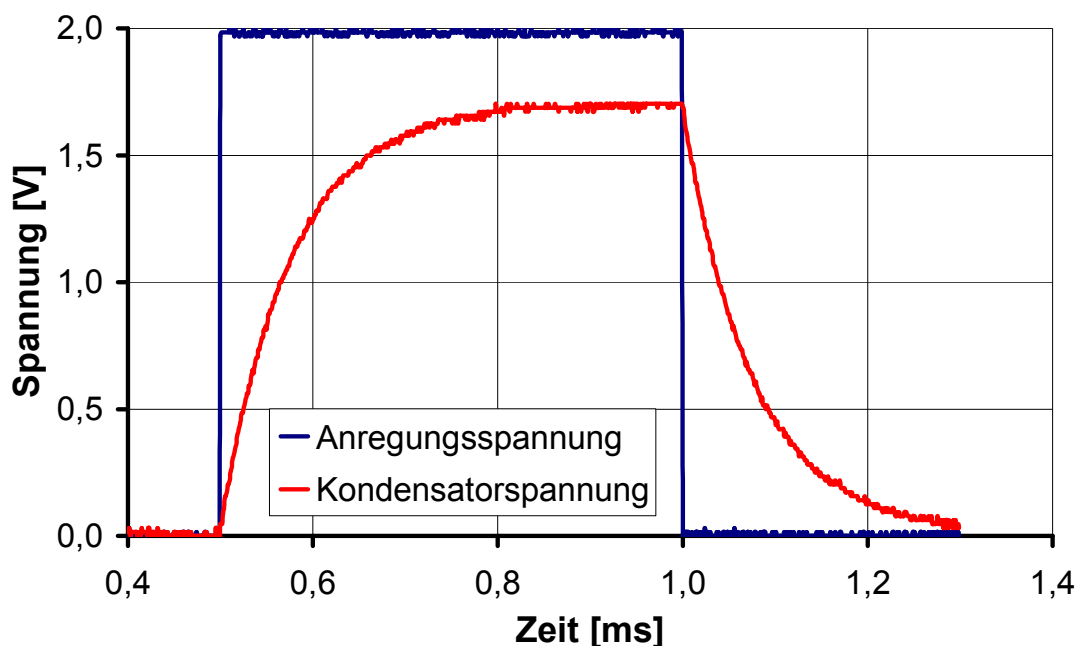


Abbildung 4.20: Aufladespannung des Kondensators E1 bei einer Anregung von 2 V.

Auf Grund von dem Messaufbau nimmt das Messgerät Einfluss auf die Messgröße und muss in der Berechnung der Kapazität berücksichtigt werden. Ein schematischer Aufbau der Messung mit Berücksichtigung des Innenwiderstands R_2 des

Messgerätes ist in Abbildung 4.21 zu sehen. Als Innenwiderstand des Messgerätes wurde die Herstellerangabe von $1\text{ M}\Omega$ übernommen..

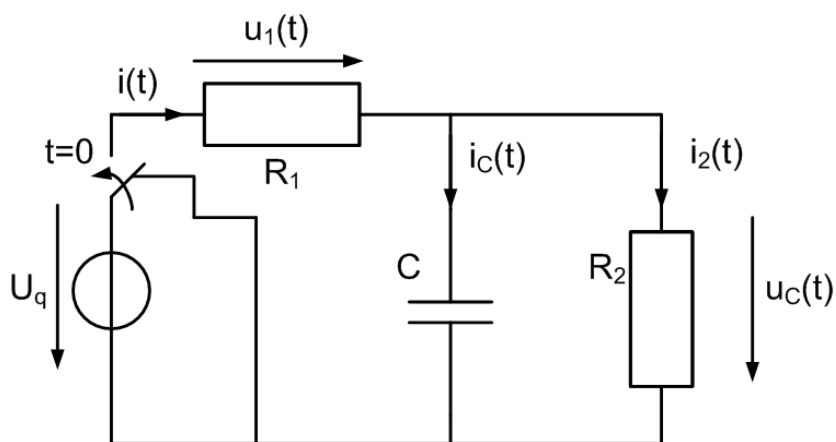


Abbildung 4.21: Schematischer Aufbau der Messschaltung mit Berücksichtigung des Innenwiderstands R_2 des Messgerätes

Der Einfluss des Messgerätes ist in der Abbildung 4.20 zu erkennen. Durch den zur Kapazität C parallelen Innenwiderstand R_2 erreicht die Kapazität nicht die volle Anregungsspannung von 2 V , sondern an dem Widerstand R_1 ($179,87\text{ k}\Omega$) fallen ca. $0,3\text{ V}$ ab. Die Herleitung für die Berechnung der Kapazität aus den Messwerten ist im Anhang 6.4 einzusehen. Die Ergebnisse dieser Messreihe und die daraus berechneten Kapazitätsdichten λ sind in Tabelle 4.5 aufzufinden. Bei der Berechnung der Kapazitätsdichten wurde davon ausgegangen, dass die Kondensatorelektroden kongruent übereinander liegen.

C_{E1}	λ_{E1}	C_{E2}	λ_{E2}	C_{E3}	λ_{E3}
[pF]	[nF/cm ²]	[pF]	[nF/cm ²]	[pF]	[nF/cm ²]
461	0,147	355	0,113	403	0,128

Tabelle 4.5: Berechnete Kapazitätswerte C und Kapazitätsdichten λ aus der Aufladekurve

In einem weiteren Schritt wurden von den Kondensatoren Schliffe angefertigt und mit einem Lichtmikroskop an verschiedenen Stellen die Profile mikroskopiert. Anhand der Aufnahmen wurde zusätzlich mit einer entsprechenden Software die Schichtdicke des Komposit und der Klebeschicht (UPM2) gemessen. Dazu wurde von dem Kondensator E1 ein Schliff quer (x) und von dem Kondensator E2 längs (y)

der Rakelrichtung hergestellt. Von dem Kondensator E3 wurde sowohl längs (y) als auch quer (x) zur Rakelrichtung ein Schliff hergestellt. In Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23 sind zwei beispielhafte Aufnahmen abgebildet.

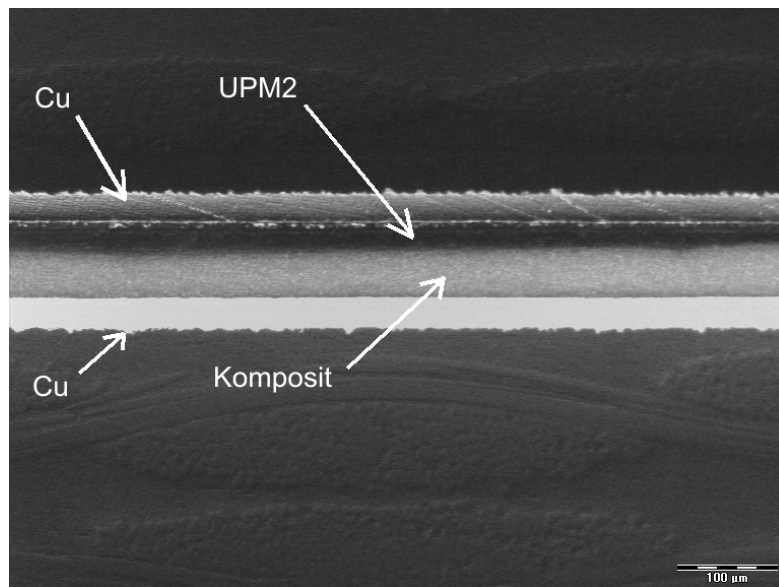


Abbildung 4.22: Mikroskopaufnahme eines Schliffs des Kondensators E1 quer zur Rakelrichtung; 100 fache Vergrößerung

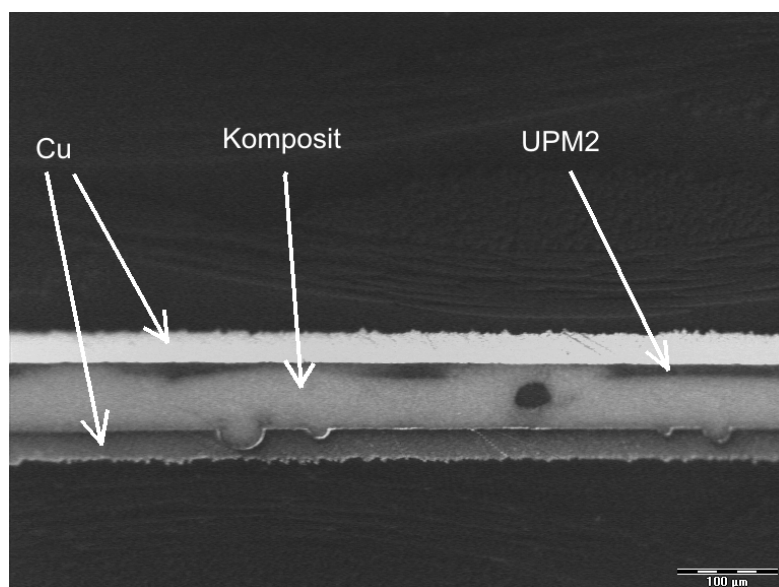


Abbildung 4.23: Mikroskopaufnahme eines Schliffs des Kondensators E3 längs zur Rakelrichtung; 100 fache Vergrößerung

Die Auswertung der Mikroskopaufnahmen ergab, dass die durch den Schablonendruck hergestellten Kompositschichten sehr homogen auf das Kupfer aufgebracht wurden und die Oberflächen überwiegend eben sind (s. Abbildung 4.22). Die Schichtdicken d des Komposit betragen bei allen Kondensatoren um die $55\ \mu\text{m}$. Dagegen variiert die Schichtdicke des UPM2 stärker. Die Ergebnisse der Schichtdickenmessung sind in Tabelle 4.6 aufgeführt.

	$d_{E1\ x}\ [\mu\text{m}]$	$d_{E2\ y}\ [\mu\text{m}]$	$d_{E3\ x}\ [\mu\text{m}]$	$d_{E3\ y}\ [\mu\text{m}]$
Komposit	53,61	55,46	54,35	56,95
UPM2	26,22	27,95	43,52	14,81
Gesamt	79,84	83,41	97,87	71,77

Tabelle 4.6: Schichtdickenmessung des Komposit und des UPM2 auf den Kondensatoren E1, E2 und E3; x entspricht Messung quer zur Rakelrichtung, y entspricht Messung längs zur Rakelrichtung

Die Inhomogenität der Kleberschichtdicken kann vom Klebverfahren stammen. Beim Verkleben wurden die Leiterplatten mit zwei Gewichten zusammengepresst. Durch die eventuelle nicht gleichmäßige Verteilung der Gewichte kann dieser Unterschied in der y-Richtung des E3 Kondensators verursacht worden sein. Zu erwähnen ist auch, dass stellenweise, wie in Abbildung 4.23 zu sehen, die Kompositschichten Unregelmäßigkeiten aufweisen. Das Komposit ist an diesen Stellen dicker aufgetragen und kontaktiert direkt die gegenüberliegende Elektrode. Zudem sind auch Luftblasen in den Kompositschichten beobachtet worden (s. Abbildung 4.23).

Um die Fehlausrichtung der Leiterplatten zu quantifizieren wurden die Alignmentstrukturen unter einem Durchlichtmikroskop mikroskopiert (s. Abbildung 4.24). Die schlechte Transparenz der Leiterplatte lässt allerdings keine genaue Messung des Misalignment zu. Die Fehlausrichtung kann nur grob abgeschätzt werden und bewegt sich im Millimeterbereich.

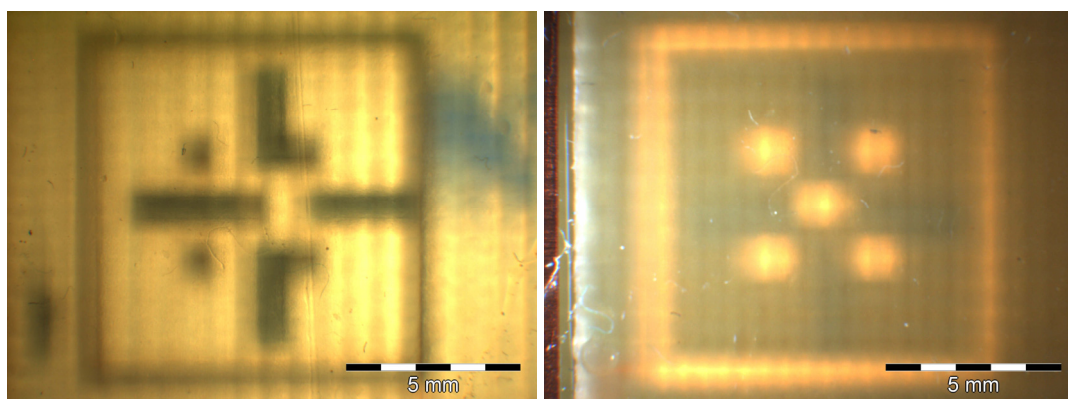


Abbildung 4.24: Mikroskopaufnahme der Alignmentstrukturen zur Quantifizierung der Fehlausrichtung

Messgerät/ Berechnung	f [Hz]	C _{E1} [pF]	λ _{E1} [nF/cm ²]	C _{E2} [pF]	λ _{E2} [nF/cm ²]	C _{E3} [pF]	λ _{E3} [nF/cm ²]	C _{E3g} [pF]
Agilent 4249A	120	448,15	0,143	305,82	0,097	343,33	0,109	
	1000	434,82	0,138	295,86	0,094	332,32	0,106	
Escort ELC-3131D	120	443	0,141	306	0,097	344	0,109	325
	1000	436,6	0,139	296,3	0,094	331,2	0,105	337
Ladekurve		461,02	0,147	355,16	0,113	402,85	0,128	
Berechnet real	40k	161	0,051	228	0,073	242	0,077	
Berechnet ideal	40k	550	0,175	646	0,206	675	0,215	
Berechnet Max.	40k	991	0,315	971	0,310	1000	0,318	

Tabelle 4.7: Auflistung von berechneten und gemessenen Kapazitäten und Kapazitätsdichten nach verschiedenen Methoden.

In der Tabelle 4.7 sind nochmals sämtliche gemessenen Kapazitätswerte der Kondensatoren aufgelistet. Zum Vergleich wurden theoretische Kapazitätswerte für verschiedenen Konstellationen aus den Messwerten berechnet. Für die Berechnungen wurde ein Permittivitätswert für das Komposit von 19,36 und für das UPM2 von 3 angenommen. Dieser Wert wurde aus den Permittivitätsmessungen (s. Kapitel 2.2.4) des Komposit bei einem Füllgrad von 30 Vol.-% und bei 40 kHz abgelesen. Des Weiteren wurde davon ausgegangen, dass die Kondensatorplatten übereinander liegen und keine Fehlausrichtung vorhanden ist. Die reale Berechnung gibt den theoretischen Wert an, den der Kondensator in dieser Form haben müsste. Für die Berechnungen wurden die Schichtdicken des UPM2 und des Komposit aus der Tabelle 4.6 entnommen und die dielektrischen Schichten als in Reihe liegende Kondensatoren behandelt. Die ideale Berechnung gibt an, welchen Kapazitätswert die Kondensatoren haben müssten im Falle, dass das Klebemittel (UPM2) durch das Komposit als Kleber ersetzt werden würde. Als Schichtdicke wurde von der gemessenen Gesamtschichtdicke ausgegangen. Für die Berechnung der maximalen Kapazität wurde angenommen, dass durch diverse andere Verbindungstechniken die Leiterplatten miteinander verbunden werden. Der Abstand der Kondensatorplatten wird dann durch die Schichtdicke des reinen Komposit bestimmt.

Anhand dieser Berechnungen kann festgestellt werden, dass die gemessenen Kapazitäten größer sind als die durch die „reale Berechnung“ prognostizierten. Dieser Unterschied kann von den Unregelmäßigkeiten des Komposit (s. Abbildung 4.23) stammen, die als zusätzliche parallele Kapazität wirken und somit die Gesamtkapazität erhöhen. Darüber hinaus kann die Kapazität durch eine verbesserte Verbindung der Leiterplatten erhöht werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Integration von passiven Bauelementen gewinnt immer größeres wirtschaftliches Interesse. Faktoren wie die Minimierung von parasitären Effekten, erhöhte Zuverlässigkeiten und die Verkleinerung von ganzen Systemen wie z.B. Leiterplatten sind der Antriebsmotor für dieses Interesse.

Für die Integration von passiven Bauelementen müssen neue Materialien entwickelt werden, die zum einen die Anforderungen an die einzelnen Bauelemente erfüllen und zum anderen deren Prozessierung kompatibel zu dem Gesamtsystem ist. Polymer-Keramik-Komposite gelten daher als aussichtsreichster Werkstoff um Kondensatoren in Leiterplatten zu integrieren. Sie kombinieren die Prozessierungsmöglichkeiten bei niedrigen Temperaturen mit den dielektrischen Eigenschaften der Keramiken.

Das Ziel dieser Arbeit bestand in der Entwicklung eines integrierten Kondensators. Als Dielektrikum sollte dabei ein Polymer-Keramik-Komposit, das sich aus einem Polyesterharz und Bariumtitanat zusammensetzt, verwendet werden.

In ersten Untersuchungen wurde das Materialsystem charakterisiert. Dazu wurden die Dichte und die spezifische Oberfläche des Bariumtitanats bestimmt. Diese Messungen ergaben eine Dichte von $5,94 \text{ g/cm}^3$ und eine spezifische Oberfläche von $1,75 \text{ m}^2/\text{g}$.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Prozessierung des Materials ist die Verarbeitungszeit. Als messbare Größe für die maximale Verarbeitungszeit wurde die zeitabhängige Viskosität bei einer konstanten Scherrate gewählt. Die maximale Verarbeitungszeit wurde anhand von der signifikanten Veränderung der rheologischen Eigenschaften bezüglich einer Referenzprobe festgelegt. Als Referenzprobe wurde das Polymer ohne Zusatzstoffe genommen. Bei diesen Untersuchungen wurden die Einflüsse des MEKP-Gehalts und des Füllgrades des Komposits auf die Verarbeitungszeit analysiert. Es konnte festgestellt werden, dass bei steigendem MEKP-Gehalt die Verarbeitungszeit kürzer wird. Die Zugabe von dem Füllstoff verlängert

hingegen die Verarbeitungszeit. Bei Raumtemperatur und einem MEKP-Gehalt von 2 Gew.-% wurde eine maximale Verarbeitungszeit von 25 Minuten ermittelt.

In Dilatometermessungen wurde das thermische Ausdehnungsverhalten des Materialsystems untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sich die thermische Ausdehnung mit dem Füllgrad verändert. Die Ausdehnung der Proben sinkt dabei mit steigendem Füllstoffgehalt. Der aus diesen Messungen berechnete thermische Ausdehnungskoeffizient für das Komposit mit einem Füllgrad von 30 Vol.-% liegt dabei im Bereich einer Epoxidharzplatte.

In weiteren Untersuchungen wurden die dielektrischen Eigenschaften des Komposits anhand von Bulk Proben erforscht. Dabei wurden der Füllgrad, die Messfrequenz und die Temperatur variiert. Die Messungen ergaben, dass der relative Permittivitätswert mit steigendem Füllgrad zunimmt, wohingegen der Verlustfaktor unabhängig vom Füllgrad ist. Die frequenzabhängige Messung der Permittivität ergab eine leichte Abnahme der Permittivität zu höheren Frequenzen hin. Dahingegen zeigte die Temperaturmessung eine ausgeprägte Permittivitätserhöhung mit steigender Temperatur.

Abschließend zur Materialcharakterisierung wurde die Kompositviskosität gemessen. Es hat sich herausgestellt, dass die Viskosität der Proben mit höheren Füllgraden zunimmt, wobei alle Proben ein strukturviskoses Verhalten zeigten.

Als Schichtgebungsverfahren für die spätere Herstellung von integrierten Kondensatoren wurden der Schablonendruck und das Foliengießen ausgewählt. Um den Schablonendruck für die Herstellung der Kondensatoren zu etablieren und den Prozess zu optimieren, wurden Teststrukturen bei unterschiedlichen Prozessparametern (Schablonendicke, Rakelgeschwindigkeit und Füllgrad) auf PMMA Platten gedruckt. Anschließend wurden die Schichtdicken der Teststrukturen vermessen.

Abschließend wurden integrierte Kondensatoren in einer Leiterplatte hergestellt. Dazu wurde per Schablonendruck auf die Kupferelektroden einer vorstrukturierten Leiterplatte das Komposit abgeschieden. Eine ebenfalls vorstrukturierte Leiterplatte wurde als Gegenelektrode auf das Komposit gelegt und mit dem reinen Polymer (Matrix des Komposit) verklebt. Die Charakterisierung der Kondensatoren ergab eine Kapazität im Bereich von 461 pF bis 296 pF. Dies entspricht einer Kapazitätsdichte von 0,147 nF/cm² bis 0,094 nF/cm². Nach der dielektrischen Charakterisierung wurden von den Kondensatoren Schlitze angefertigt und die Schichtdicken der Dielektrika bestimmt. Die Messungen ergaben, dass das Komposit mit einer

Schichtdicke von ca. 50 μm auf die Kupferelektroden aufgetragen wurde. Zusätzlich wurde eine 20 μm dicke Schicht, die durch das Verkleben aufgetragen wurde, gemessen.

Mit dieser Arbeit konnte somit gezeigt werden, dass eine Herstellung eines integrierten Kondensators in eine Leiterplatte mittels Schablonendruck und Polymer-Keramik-Kompositen möglich ist. Die erzielten Kapazitätsdichten und Schichtdicken reichen allerdings für industrielle Anwendungszwecke noch nicht aus. Dazu muss sowohl der Prozess als auch das Komposit verbessert werden.

Verbesserungen im Prozess könnten erzielt werden, indem als Klebemittel das Komposit anstatt des reinen Polymers verwendet wird. Zusätzlich könnte beim Verkleben durch höhere Drücke mehr Klebemittel verdrängt werden und somit für einen kleineren Abstand zwischen den Elektroden sorgen. Eine weitere Verbesserung des Druckergebnisses könnten bessere Rakel mit einstellbarem Anpressdruck liefern.

Das größte Verbesserungspotential liegt allerdings im Komposit. Ein Vergleich mit Literaturwerten zeigt, dass durch Modifizierung des Komposits eine Erhöhung der relativen Permittivität um den Faktor 6,5 möglich ist (im Vergleich zum hier verwendeten Komposit).

6 Anhang

6.1 Rakelgeschwindigkeit

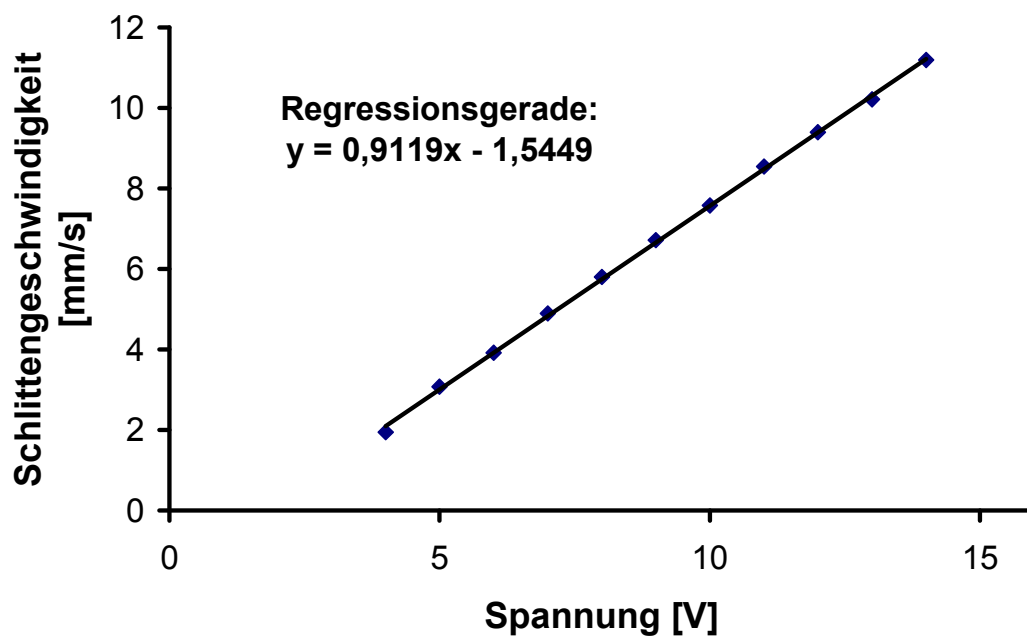
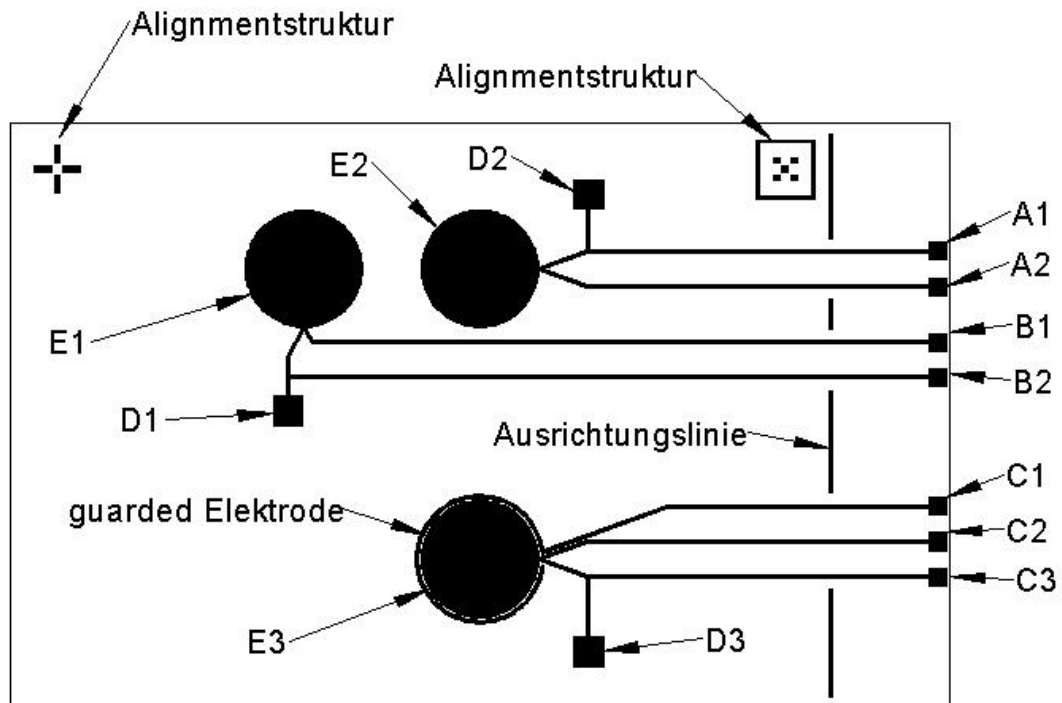


Abbildung 6.1: Abhängigkeit der Schlittengeschwindigkeit von der Spannung

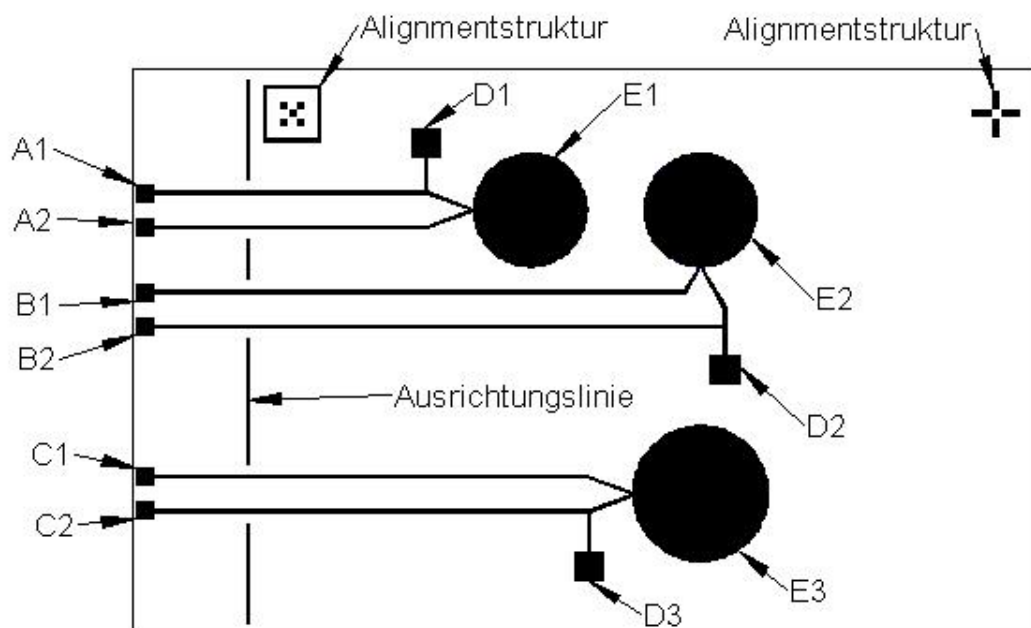
6.2 Leiterplattendesign



Struktur	Dimensionierung
A1	3 mm*3 mm
A2	3 mm*3 mm
B1	3 mm*3 mm
B2	3 mm*3 mm
C1	3 mm*3 mm
C2	3 mm*3 mm
C3	3 mm*3 mm
D1	5 mm*5 mm
D2	5 mm*5 mm
D3	5 mm*5 mm

7 Anhang

E1	10 mm (Radius)
E2	10 mm (Radius)
E3	10 mm (Radius)
Abstand guarded Elektrode/E3	0,5 mm
Breite guarded Elektrode und Leiterbahnen	0,5 mm



Struktur	Dimensionierung
A1	3 mm*3 mm
A2	3 mm*3 mm
B1	3 mm*3 mm
B2	3 mm*3 mm
C1	3 mm*3 mm
C2	3 mm*3 mm

D1	5 mm*5 mm
D2	5 mm*5 mm
D3	5 mm*5 mm
E1	10 mm (Radius)
E2	10 mm (Radius)
E3	12 mm (Radius)
Abstand guarded Elektrode/E3	0,5 mm
Breite guarded Elektrode und Leiterbahnen	0,5 mm

6.3 Schichtdicke

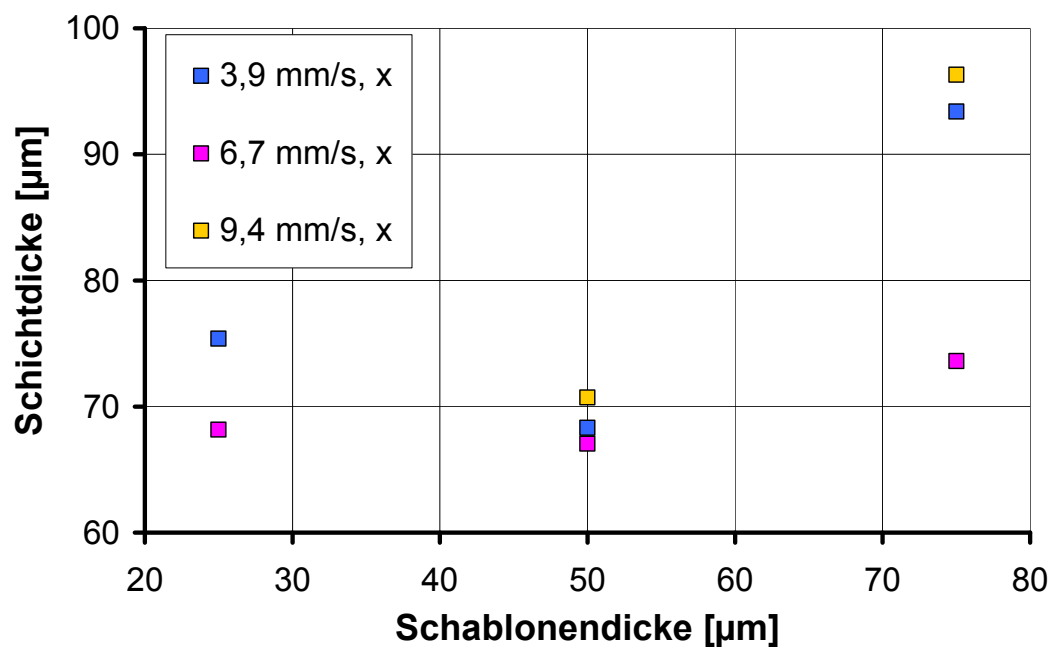


Abbildung 6.2: Abhängigkeit der Schichtdicke von der Schablonendicke quer zur Rakelrichtung

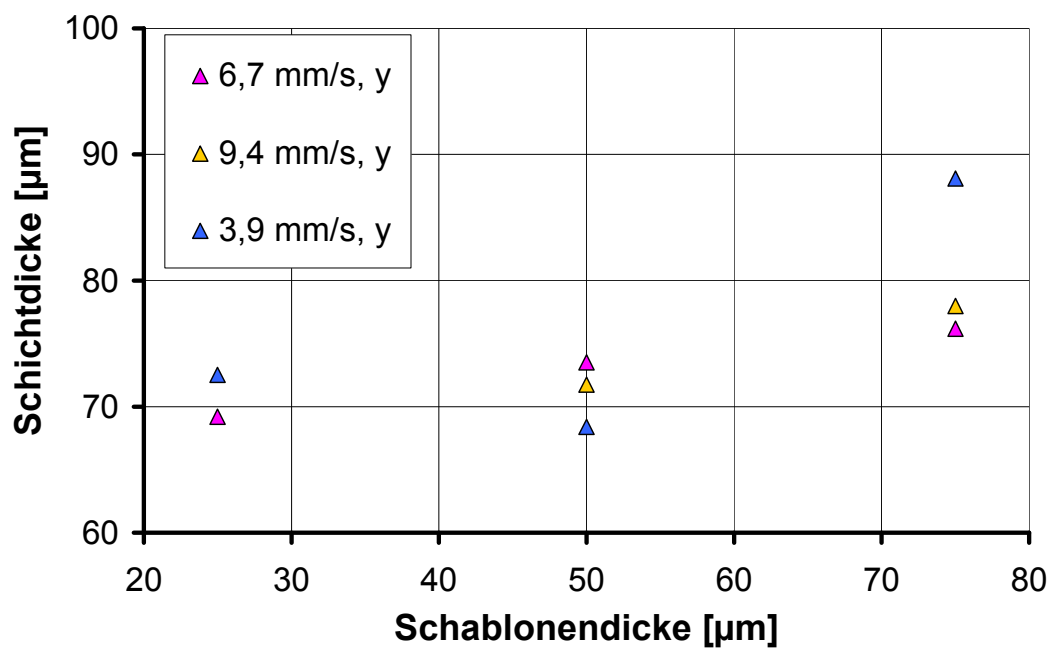


Abbildung 6.3: : Abhängigkeit der Schichtdicke von der Schablonendicke in Rakelrichtung

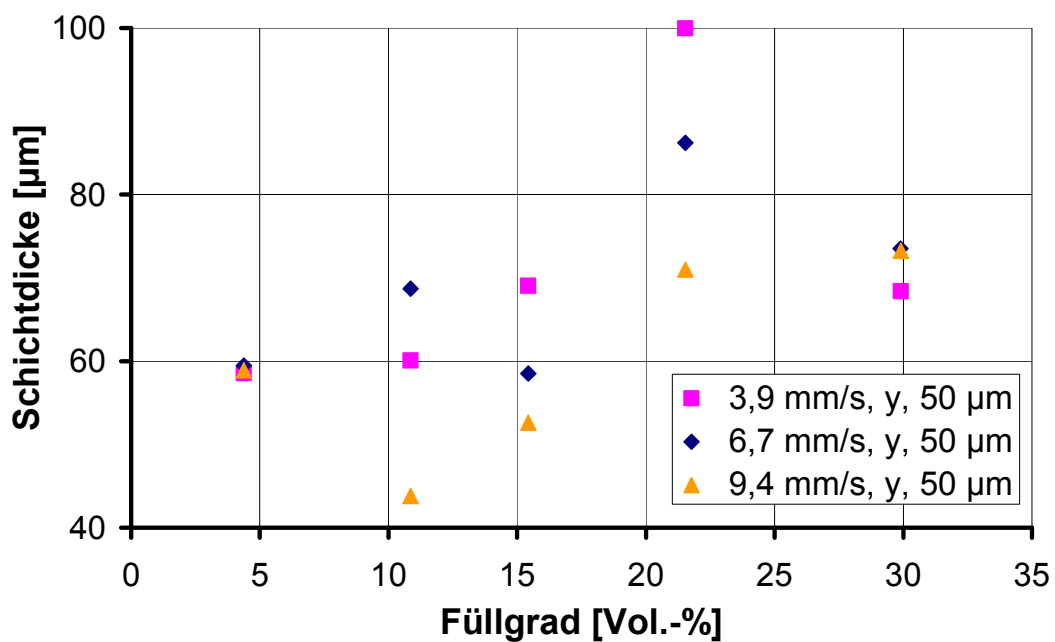


Abbildung 6.4: : Abhängigkeit der Schichtdicke von dem Füllgrad in Rakelrichtung

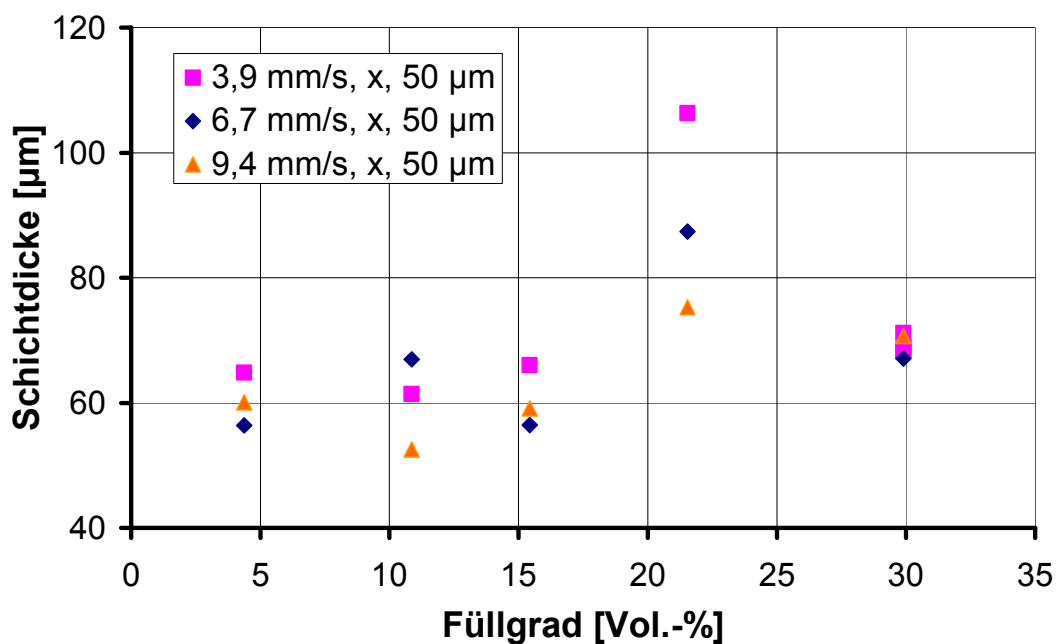


Abbildung 6.5: Abhängigkeit der Schichtdicke von dem Füllgrad quer zur Rakelrichtung

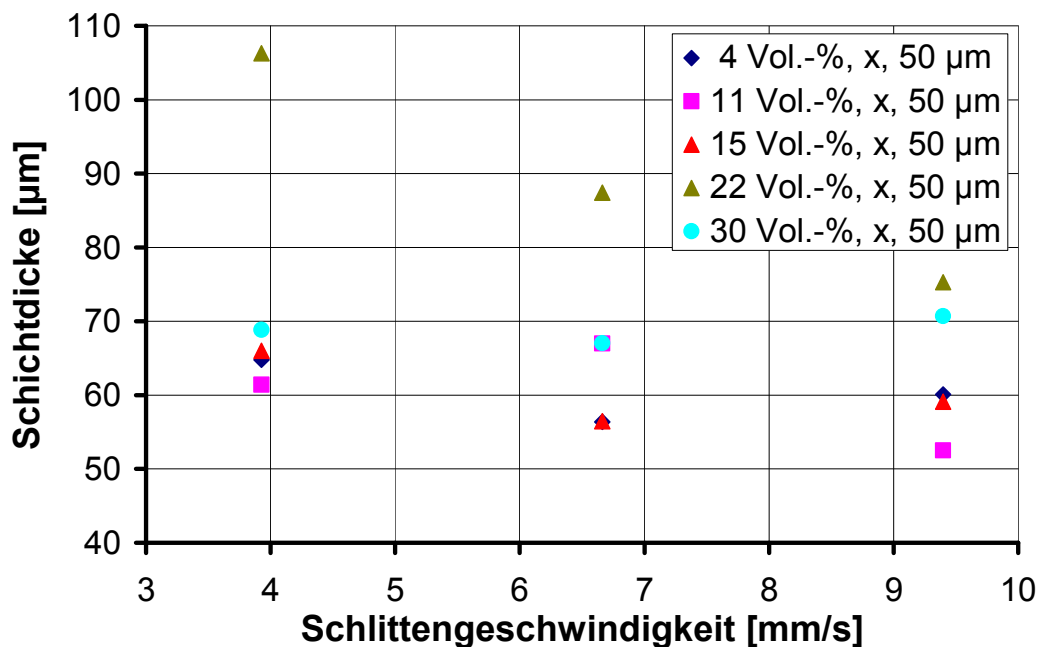


Abbildung 6.6: Abhängigkeit der Schichtdicke von der Schlittengeschwindigkeit quer zur Rakelrichtung

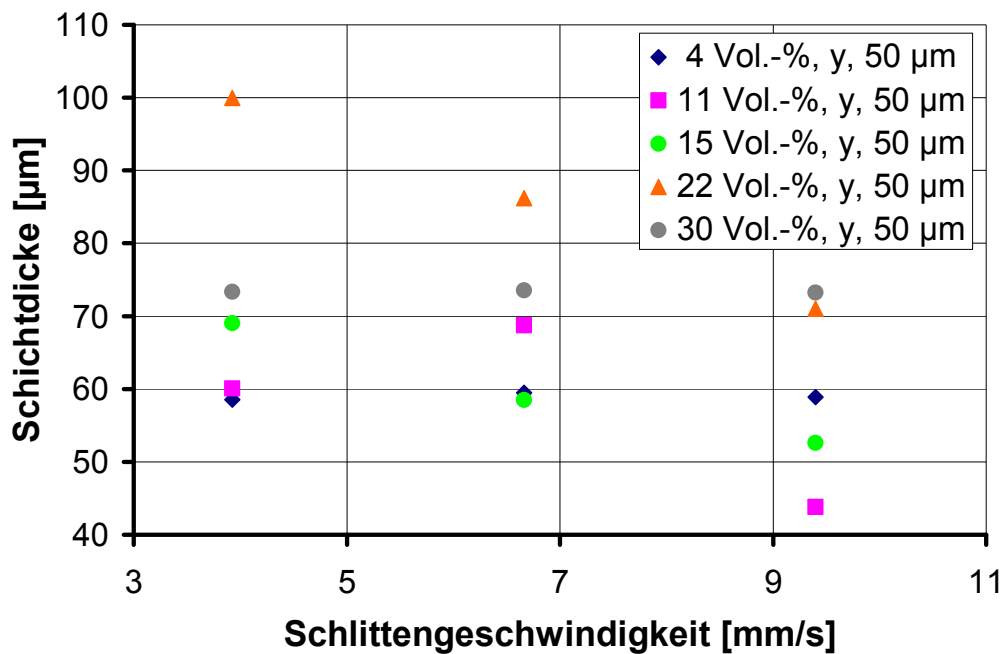


Abbildung 6.7: Abhängigkeit der Schichtdicke von dem Füllgrad in Rakelrichtung

6.4 Kapazitätsmessung

$$U_q = u_1(t) + u_C(t)$$

$$U_q = i(t) \cdot R_1 + u_C(t)$$

$$U_q = (i_C(t) + i_2(t)) \cdot R_1 + u_C(t)$$

$$U_q = C \cdot R_1 \cdot \frac{du_C(t)}{dt} + \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \cdot u_C(t)$$

$$\text{mit } u_C(0) = 0$$

$$u_C(t) = - \frac{\left(-1 + e^{\left(-\frac{1}{C \cdot R_1} - \frac{1}{C \cdot R_2} \right) t} \right) \cdot R_2 \cdot U_q}{R_1 + R_2}$$

$$C = \frac{-R_1 \cdot t - R_2 \cdot t}{R_1 \cdot R_2 \cdot \ln \left(- \frac{(R_1 + R_2) \cdot \left(-\frac{R_2 \cdot U_q}{R_1 + R_2} + u_C(t) \right)}{R_2 \cdot U_q} \right)}$$

7 Literaturverzeichnis

- [1] S. K. Bhattacharay, R. R. Tummala: *Next generation integral passives: materials, processes, and integration of resistors and capacitors on PWB substrates*; Journal of Materials Science: Materials in Electronics **11**: 253-268; 2000
- [2] C. K. Chiang, R. Popielarz: *Polymer Composites with High Dielectric Constant*, Ferroelectrics **275**:1-9, 2002
- [3] Y. Rao, S. Ogitani, P. Kohl, C. P. Wong: *Novel Polymer-Ceramic Nanocomposite Based on High Dielectric Constant Epoxy Formula for Embedded Capacitor Application*: Journal of Applied Polymer Science **83**: 1084-1090;
- [4] R. Pregla: *Grundlagen der Elektrotechnik*, Hüthig; 64 ff ; 2001;
ISBN 3-7785-2811-4
- [5] R. Kories und H. Schmidt: *Taschenbuch der Elektrotechnik*, Verlag Harri Deutsch, 20; 2000;
ISBN 3-8171-1626-8
- [6] Prof. Dr. H. Gesch: Vorlesungsmanuskript: *Elektronische Bauelemente*, Fachhochschule Landshut, Kap. 2; 1-13; WS 2002/2003
- [7] H. Schaumburg: *Keramik*; B.G. Teubner Stuttgart; 277-394; 1994;
ISBN 3-519-06127-9
- [8] Prof. L. J. Gauckler, Prof. K. Conder: Vorlesungsmanuskript *Ceramics II*, ETH Zürich; 1-52
- [9] PD. Dr.-Ing. T. Hanemann: Habilitationsschrift: *Polymerbasierte Mikro- und Nanokomposite für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik*; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; 50-52; 2004

- [10] M. Pahl, W. Gleißle; H.M. Laun: *Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere*; VDI-Verlag; 391-392; 1991
ISBN 3-18-234192-8
- [11] T.A. Nguty, M.H.A. Riedlin, N.N. Ekere: *Evaluation of Process Parameters for Flip Chip Stencil Printing*; IEEE/ CPMT Int'l Electronics Manufacturing Technology Symposium; 206-216; 1998
- [12] R.P. Prasad: *Surface mount technology: principles and practice*; New York, NJ [u.a.] Chapman & Hall; 383-443; 1997;
ISBN 0-412-12921-3
- [13] L.G. Barajas, M.B. Egerstedt, E.W. Kamen, A. Goldstein: *Stencil Printing Process Modelling and Control Using Statistical Neural Networks*; IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing; **31**: 9-17;
- [14] H. Friedrich: Dissertation: *Wässriges Foliengießen von BaTiO₃ - Untersuchungen zur Entwicklung von Schlickerzusammensetzungen mit optimierten rheologischen Eigenschaften*; Julius-Maximilians-Universität Würzburg; 7-30; 2004
- [15] J.R. Reed: *Principles of Ceramics Processing*; Wiley-Interscience; 525-539; 1995
ISBN 0-471-59721-X
- [16] A. Heritage: *Einführung in die praktische Rheologie*, Bohlin Instruments 1995
- [17] O. Trithaveesak: Dissertation: *Ferroelektrische Eigenschaften von Kondensatoren mit epitaktischen BaTiO₃-Dünnschichten*; Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen; 20; 2004
- [18] Prof. Dr. J. Wilde, J. Dahlin: *Zuverlässigkeit bleifrei gelöteter Leistungsbaugruppen*; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; 23; 2007
- [19] Dax, Gundelfinger, Häffner, Itschner, Kotsch, Stanczek: *Tabellenbuch für Metalltechnik*; Handwerk und Technik; W2;1991;
ISBN 3-582-03291-4