



**DLR-IB-FA-BS-2019-104**

**Quantifizierung eines Sensors zur  
Messung von  
Feuchtigkeit in Klebstoffen und  
Faserverbundmaterialien mittels  
kapazitivem Effekt  
Studienarbeit**

Prinz, Sonja  
Schollerer, Martin Johannes



**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-BS-2019-104

## Quantifizierung eines Sensors zur Messung von Feuchtigkeit in Klebstoffen und Faserverbundmaterialien mittels kapazitivem Effekt

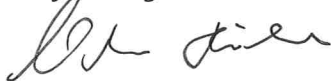
Zugänglichkeit:

**Stufe 1 Allgemein zugänglich:** Der Interne Bericht wird elektronisch ohne Einschränkungen in ELIB abgelegt. Falls vorhanden, ist je ein gedrucktes Exemplar an die zuständige Standortbibliothek und an das zentrale Archiv abzugeben.

Braunschweig, 07, 2019

Abteilungsleiter:

Prof. Dr-Ing. Christian Hühne



Der Bericht umfasst: 99 Seiten

Autoren:

Sonja Prinz B.Sc.



Betreuer:



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt



## Zusammenfassung

In der vorliegenden Studienarbeit im Rahmen des Masterstudiums der Luft- und Raumfahrttechnik wird ein Sensor zur Feuchtigkeitsmessung in Klebschichten und Faserverbundschichten auf Basis von Epoxidharz mittels des kapazitiven Effekts quantifiziert. Zu diesem Zweck wird eine Schicht Filmklebstoff respektive Faserverbundmaterial zur Verbindung zweier Metallplatten verwendet; das zu untersuchende Material befindet sich so zwischen zwei elektrischen Leitern und die Baugruppe bildet einen Plattenkondensator. Mithilfe des kapazitiven Effekts können für verschiedene Feuchtigkeitsanteile in der Klebschicht unterschiedliche Kapazitäten gemessen werden. Die Baugruppe dient somit als Feuchtigkeitssensor.

In der Voruntersuchung wird nach einer geeigneten Geometrie für den Sensor gesucht. Zu diesem Zweck werden mehrere Proben verschiedener Geometrie und Dimension gefertigt und auf Feuchtigkeitsaufnahme untersucht. Nach Auswahl einer Geometrie wird für diese in der Hauptuntersuchung eine Quantifizierung der Feuchtigkeitsmessung vorgenommen.

Ergebnis der Arbeit ist der Verlauf der relativen Permittivität des Filmklebstoffs, bzw. des Faserverbundmaterials über der Zeit sowie der Aufbau eines Prüfprogramms mithilfe dessen eine Quantifizierung der Proben vorgenommen werden kann. Weiterhin werden Aussagen über die Machbarkeit und Einsetzbarkeit des Sensors getroffen. Während der Versuche traten Probleme in Form von zerbrechenden Proben und Oxidation des Metalls auf; dies verfälschte und behinderte die Messung der Kapazität. Diesen Problemen kann durch Wahl anderer Materialien und eine Oberflächenvorbehandlung der Metallplatten vorgebeugt werden. Aufbauend auf den Untersuchungen, welche in dieser Arbeit durchgeführt werden, soll ein Zusammenhang zwischen der relativen Permittivität eines Werkstoffes und dessen Feuchtigkeitsgehalt hergestellt werden.

## **Abstract**

The aim of this assignment is to quantify a sensor of humidity in adhesive layers and fibre composites which are based on epoxy. For this purpose, an adhesive layer respectively a layer of fibre composite is placed between two metal plates; the material to be studied is thus arranged between two conductive layers and the assembly functions as a plate capacitor. Using the capacitive effect different capacities can be measured for different humidity ratios. Hence the assembly serves as a sensor of humidity.

During the pre-examination an ideal geometry for the sensor is searched for. For this purpose, multiple specimen of changing geometry and dimension are manufactured and studied with respect to their humidity absorption. After choosing an ideal geometry the respective specimen are quantified during the main-examination.

The result of this assignment is the course of the relative permittivity of the adhesive layer respectively the fibre composite layer over time as well as the establishment of a test routine which can be used to quantify specimen. Furthermore, the sensor is to be tested with respect to its feasibility as well as its applicability. During the experiments problems due to breaking specimen as well as oxidation occurred. They can be prevented by changing the used material and by pretreating the metal plates before usage. Based on the examinations made in this assignment a relation between the relative permittivity of a material and its humidity ratio is to be established.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Diffusion . . . . .	2
2.2	Kapazitiver Effekt . . . . .	4
2.3	Stand der Technik . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Voruntersuchung des Probenprogramms</b>	<b>9</b>
3.1	Festlegung der grundlegenden Sensorgeometrie . . . . .	9
3.2	Fertigung des ersten Probensatzes . . . . .	12
3.3	Auswahl einer optimalen Probengeometrie . . . . .	16
3.3.1	Kapazitätsänderung . . . . .	18
3.3.2	Massenänderung . . . . .	22
3.3.3	Längenänderung . . . . .	23
3.3.4	Auswertung . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Hauptuntersuchung des Probenprogramms</b>	<b>29</b>
4.1	Fertigung des zweiten Probensatzes . . . . .	29
4.2	Feuchtigkeitsaufnahme . . . . .	30
4.3	Sensor mit Kohlefasern . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Ergebnisauswertung</b>	<b>36</b>
5.1	Filmklebstoffproben . . . . .	37
5.2	GFK-Proben . . . . .	42
5.3	Zusatzuntersuchung . . . . .	46
5.4	Versuchsbewertung . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>54</b>
6.1	Ausblick und Verbesserungen . . . . .	54
	<b>Literatur</b>	<b>57</b>

<b>Anhang</b>	<b>60</b>
<b>A Anhang</b>	<b>60</b>
A.1 Life Data Sheet - Strukturelles Kleben . . . . .	60
A.2 Mikroskop-Aufnahmen der Klebschicht . . . . .	81
A.3 Halb-logarithmische Darstellung der relativen Permittivität der Filmklebstoff- Proben . . . . .	86
A.4 Mikroskop-Aufnahmen der GFK-Schicht . . . . .	87
A.5 Messungen der ersten Messreihe - Klebschicht . . . . .	89
A.6 Messungen der zweiten Messreihe und der Zusatzuntersuchung - Klebschicht . . . . .	93
A.7 Messungen der zweiten Messreihe - GFK-Schicht . . . . .	97



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Exemplarische Konzentrationsprofile zwischen zwei unterschiedlichen Konzentrationen . . . . .	2
2.2	Grundlegender Aufbau eines Plattenkondensators . . . . .	4
2.3	Erster Entwurf des Feuchtigkeitssensors auf Basis von Kopfzugproben [1] . . . . .	7
2.4	Verschiedene Sensoren zur Feuchtigkeitsmessung . . . . .	8
3.1	Vollzylinder ( <i>links</i> ) und Hohlzylinder ( <i>rechts</i> ) . . . . .	10
3.2	Vorhandene Proben . . . . .	10
3.3	Vorbereiten des Materials . . . . .	13
3.4	Gereinigte Platte ( <i>links</i> ) und sandgestrahlte Platte ( <i>rechts</i> ) . . . . .	13
3.5	Auftragen des Klebstoffs . . . . .	14
3.6	Vorbereiten der Struktur auf die Presse . . . . .	14
3.7	Pressen der Struktur . . . . .	15
3.8	Fertigung der Proben . . . . .	15
3.9	Proben im Ofen . . . . .	16
3.10	Proben im Wasserbad . . . . .	17
3.11	Messplatz mit Feinwaage ( <i>l.</i> ), Bügelmessschraube ( <i>m.</i> ) und LCR-Meter ( <i>r.</i> ) . . . . .	17
3.12	Normierte und gemittelte Kapazität der Vollproben über der Zeit . . . . .	18
3.13	Normierte und gemittelte Kapazität der Hohlproben über der Zeit . . . . .	20
3.14	Vergleich der normierten Kapazität von Voll- und Hohlproben miteinander . . . . .	21
3.15	Normierte und gemittelte Masse der Proben über der Zeit . . . . .	22
3.16	Normierte und gemittelte Länge der Proben über der Zeit . . . . .	23
3.17	Aluminiumoxid auf Trennflächen zerbrochener Proben . . . . .	26
3.18	Nach der Voruntersuchung zerbrochene Proben . . . . .	26
4.1	Fertigung des zweiten Probensatzes . . . . .	30
4.2	Behandlung oxidierter Proben vor der Messung . . . . .	31

4.3	Nach der Hauptuntersuchung zerbrochene Proben . . . . .	31
4.4	Normierte und gemittelte Kapazität der Filmklebstoff-Proben über der Zeit . . . . .	32
4.5	Normierte und gemittelte Kapazität der GFK-Proben über der Zeit	33
4.6	Normierte Kapazität der einzelnen GFK-Proben . . . . .	34
4.7	Messen des CFK-Würfels . . . . .	35
5.1	Untersuchung der Klebschichtdicke über der Platte . . . . .	37
5.2	Messen der Klebschichtdicke mithilfe des Mikroskops . . . . .	38
5.3	Klebschichtdicke über der Plattenfläche . . . . .	38
5.4	Gemittelte relative Permittivität der Filmklebstoff-Proben über der Zeit mit Trendlinie . . . . .	39
5.5	Verlauf der relativen Permittivität von reinen Epoxidharzen über der Wurzel der Zeit mit eingezeichnetem Zeitpunkt der Grenzwerterei- chung [2] . . . . .	40
5.6	Gemittelte relative Permittivität der GFK-Proben über der Zeit mit Trendlinie . . . . .	43
5.7	Anstieg der relativen Permittivität von GFK über dem Feuchtege- halt [2] . . . . .	44
5.8	Vergleich der Messergebnissen nach erster und nach dritter Rück- trocknung . . . . .	47
5.9	Vergleich anhand von Charge 6: Verlauf der normierten Kapazität der rückgetrockneten Proben in Leitungswasser, VE-Wasser und zu Beginn der Messreihe . . . . .	49
5.10	Kapazitätsabnahme bei Spaltbildung mit Zuwachs von $0,001\text{ mm}$ bei unterschiedlichen Dielektrika . . . . .	50
A.1	Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 1 . . . . .	81
A.2	Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 2 . . . . .	81
A.3	Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 3 . . . . .	82
A.4	Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 4 . . . . .	82
A.5	Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 1 . . . . .	83
A.6	Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 6 . . . . .	83
A.7	Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 7 . . . . .	84
A.8	Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 8 . . . . .	84

A.9	Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 9 . . . . .	85
A.10	Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 10 . . . . .	85
A.11	Halb-logarithmische Darstellung der gemittelten relativen Permittivität der Filmklebstoff-Proben über der Zeit mit Trendlinie . . . . .	86
A.12	Mikroskop-Aufnahme der GFK-Schichtdickenprobe 1 . . . . .	87
A.13	Mikroskop-Aufnahme der GFK-Schichtdickenprobe 2 . . . . .	87
A.14	Mikroskop-Aufnahme der GFK-Schichtdickenprobe 3 . . . . .	88



# Tabellenverzeichnis

2.1	Relative Permittivitätswerte verschiedener Dielektrika[3][4] . . . . .	6
3.1	Gewählte Probenabmessungen . . . . .	11
3.2	Kapazitätsmessung vor Beginn der Arbeit . . . . .	19
3.3	Einfluss der Änderung des Plattenabstands $d$ auf die Kapazität $C$ .	24
5.1	Durchgeführte Untersuchungen an den verschiedenen Probentypen	36
5.2	Einfluss einer Frequenzschwankung des Messgeräts auf die angezeigte Kapazität . . . . .	41
5.3	Absolute Kapazitäten nach der dritten Rücktrocknung im Vergleich zu absoluten Kapazitäten nach der ersten Rücktrocknung . . . . .	46

## Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$c$	$[mol\ m^{-3}]$	Stoffkonzentration
$F$	$[mol\ m^{-2}\ s^{-1}]$	Teilchenstromdichte
$D$	$[m^2\ s^{-1}]$	Diffusionskoeffizient
$x$	$[m]$	Räumliche Koordinate
$\frac{\partial c}{\partial x}$	$[mol\ m^{-4}]$	Konzentrationsgefälle
$k_B$	$\left[\frac{J}{K}\right]$	Boltzmann-Konstante
$T$	$[K]$	Absolute Temperatur
$r$	$[m]$	Effektiver Teilchenradius
$\eta$	$[Pa\ s]$	Viskosität des Lösungsmittels
$t$	$[s]$	Zeit
$R_m$	$\left[\frac{kg\ m^2}{s^2\ mol\ K}\right]$	Allgemeine Gaskonstante
$N_A$	$[mol^{-1}]$	Avogadro-Konstante
$C$	$[F]$	Elektrische Kapazität
$Q$	$[C]$	Elektrische Ladung
$U$	$[V]$	Elektrische Spannung
$\varepsilon$	$[F\ m^{-1}]$	Permittivität
$\varepsilon_0$	$\left[\frac{A\ s}{V\ m}\right]$	Elektrische Feldkonstante
$\varepsilon_r$	[ ]	Relative Permittivität
$X_C$	$[\Omega]$	Kapazitiver Blindwiderstand
$\omega$	$[rad\ s]$	Kreisfrequenz
$f$	$[Hz]$	Frequenz

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik e.V.
iAF	Institut für Adaptronik und Funktionsintegration
LDS	Life Data Sheet
CFK	Kohlenstofffaserverbundwerkstoff
GFK	Glasfaserverbundwerkstoff
VE	Vollentsalzt
LGR	<i>Induktivität-Kapazität-Widerstand</i>
bzw.	beziehungsweise
vgl.	vergleiche
Abb.	Abbildung
s.	siehe
Diagr.	Diagramm
Abschn.	Abschnitt
ca.	circa
d.h.	das heißt
Hrsg.	Herausgeber





# 1 Einleitung

Im Rahmen der vorliegenden Studienarbeit wird ein Feuchtigkeitssensor untersucht und quantifiziert. Die Feuchtigkeitsmessung findet dabei über den kapazitiven Effekt statt.

Der in dieser Studienarbeit betrachtete Effekt wurde im Rahmen einer Untersuchung zur Dickenmessung von Faserverbundschichten mittels elektrischer Kapazität beobachtet. Bei fortschreitender Lagerung von Kopfzugproben aus Aluminium und einer Schicht Filmklebstoff im Büro konnte bei wiederholter Messung an verschiedenen Tagen eine Änderung der Kapazität beobachtet werden. Als Grund für diese Änderung wurde die Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Luft festgestellt. Dies wurde durch eine Konditionierung im Wasserbad nachgestellt, indem einige Proben in einem Wasserbad ausgelagert und deren Kapazität gemessen wurde.[1]

In der vorliegenden Arbeit soll die Aufnahme von Feuchtigkeit in Filmklebstoff und Glasfaserverbundwerkstoff untersucht werden. Zu diesem Zweck soll ein Sensor entworfen und im Zuge eines Probenprüfprogramms quantifiziert werden. Der Sensor soll robust, einfach zu fertigen und empfindlich gegenüber Änderungen des Feuchtegehalts sein. Anhand der experimentellen Untersuchung im Rahmen eines Probenprogramms wird der Sensor hinsichtlich seiner Umsetzbarkeit und praktischen Anwendbarkeit bewertet. Basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit soll ein Zusammenhang zwischen der relativen Permittivität von Filmklebstoff, bzw. Glasfaserverbundwerkstoff und dem Feuchtegehalt dieser hergestellt werden. Der Sensor soll so der Feuchtigkeitsmessung dienen und kann zudem für die Messung von Klebschichtdicken eingesetzt werden.

## 2 Theoretische Grundlagen

Im nachfolgenden Kapitel werden die Grundlagen der Diffusion und des kapazitiven Effekts erläutert. Dies dient der späteren wissenschaftlichen Bewertung der Messungen. Weiterhin wird der Stand der Technik erläutert.

### 2.1 Diffusion

Unter Diffusion versteht man den Transport von Molekülen von einem Teil eines Systems mit der Stoffkonzentration  $c_1$  zu einem anderen Teil desselben Systems mit der Stoffkonzentration  $c_2$  durch zufällige molekulare Bewegung[5]. Diese resultiert aus der Wärmebewegung der Lösungsmittelpartikelchen, welche die Moleküle des zu lösenden Mittels anstoßen und so zu einer Lageänderung dieser führen[6]. Es handelt sich dabei um eine konduktive Stoffübertragung, d.h. eine Stoffübertragung ohne Strömung. Voraussetzung für die Diffusion ist dabei das Vorhandensein eines Konzentrationsgefälles (s. Abb. 2.1)[7].

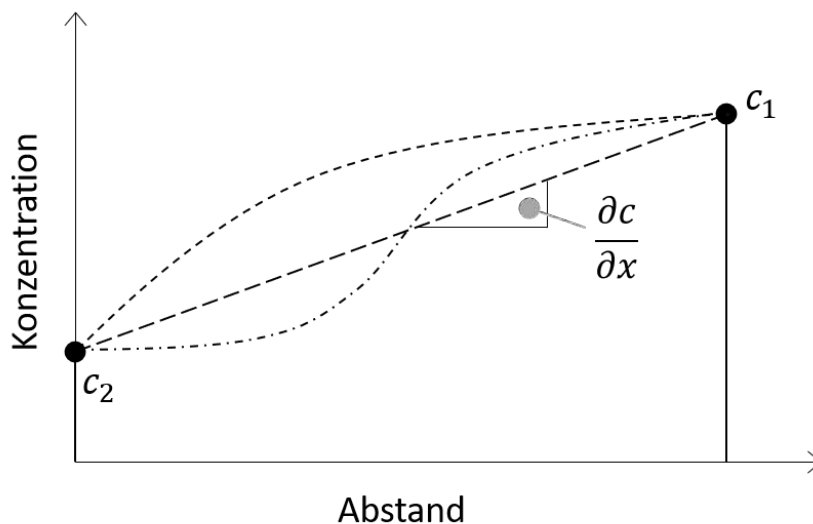


Abb. 2.1: Exemplarische Konzentrationsprofile zwischen zwei unterschiedlichen Konzentrationen

In Abbildung 2.1 sind exemplarisch drei Konzentrationsprofile in einem System dargestellt. Der Verlauf von Konzentrationsprofilen ist werkstoffabhängig. Der Gradient eines Profils heißt Konzentrationsgefälle  $\frac{\partial c}{\partial x}$ ;  $x$  ist dabei die räumliche Koor-

dinate normal zur Diffusionsfläche. Die Teilchenstromdichte  $F$  bewegt sich entlang des Konzentrationsgefälles;  $F$  und  $\frac{\partial c}{\partial x}$  sind also proportional zueinander. Der Proportionalitätsfaktor heißt Diffusionskoeffizient  $D$ . Die Beziehung kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$F = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.1)$$

Dabei handelt es sich um das *1. Fick'sche Gesetz*. Das negative Vorzeichen ergibt sich dadurch, dass Diffusion entgegen der Richtung steigender Konzentration auftritt.[5][7]

Die Diffusionsgleichung ergibt sich mithilfe der Kontinuitätsgleichung wie folgt:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2.2)$$

Für einen konstanten Diffusionskoeffizienten lautet die Diffusionsgleichung:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

Der Ausdruck in Gleichung 2.2 beschreibt den eindimensionalen Fall von Diffusion. Für den dreidimensionalen Fall ergibt sich:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla c) \quad (2.4)$$

Die Formulierung in Gleichung 2.4 entspricht dem *2. Fick'schen Gesetz* in seiner allgemeinen Schreibweise[5]. Diffusion ähnelt in seinem Grundprinzip der Wärmeleitung. Die Analogie zwischen den Prozessen kann anhand von Gleichung 2.4 gut erkannt werden, da der Aufbau beider Gleichungen für den dreidimensionalen Fall identisch ist<sup>1</sup>.

Wie bereits erwähnt wurde, findet Diffusion aufgrund von zufälliger molekularer Bewegung statt. Diese wird auch als *Brown'sche Bewegung* bezeichnet und kann mathematisch wie folgt beschrieben werden[7]:

$$x^2 = \frac{k_B T}{3 \cdot r \pi \eta} \cdot t \quad (2.5)$$

Darin ist  $k_B$  die *Boltzmann-Konstante*. Es gilt:

$$R_m = N_A \cdot k_B \quad \rightarrow \quad k_B = \frac{R_m}{N_A} \quad (2.6)$$

<sup>1</sup>Dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung:  $\frac{\partial q}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$

Mithilfe der *Stokes-Einstein-Beziehung* kann der folgende Zusammenhang für die Diffusion gefunden werden[6]:

$$x^2 = 2 \cdot \frac{R_m T}{6\pi\eta r N_A} \cdot t = 2 \cdot D \cdot t \quad (2.7)$$

Die Geschwindigkeit, mit der Diffusion voranschreitet, ist demnach abhängig von der Steilheit des Konzentrationsgefälles. Je steiler das Gefälle ist, desto schneller findet die Diffusion statt. Der Diffusionskoeffizient setzt sich aus der universellen Gaskonstante  $R_m$ , der Temperatur  $T$ , der Viskosität des Lösungsmittels  $\eta$ , dem effektiven Teilchenradius  $r$  und der Avogadro-Konstante  $N_A$  zusammen.

## 2.2 Kapazitiver Effekt

Unter elektrischer Kapazität versteht man das elektrische Fassungsvermögen eines Körpers[8]. Elektrische Kapazität wird als Verhältnis der gespeicherten Ladung zu der von ihr erzeugten Spannung definiert:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (2.8)$$

Darin ist  $C$  die elektrische Kapazität,  $Q$  ist die elektrische Ladung und  $U$  ist die erzeugte elektrische Spannung.[8]

Das Bauteil, welches in der Elektrotechnik mit der Kapazität assoziiert wird, ist der *Kondensator*. Ein Kondensator setzt sich in seiner Grundform aus zwei elektrischen Leiteranordnungen zusammen, welche durch ein Dielektrikum voneinander getrennt sind. Als Leiter können bspw. Metallplatten verwendet werden.[9]

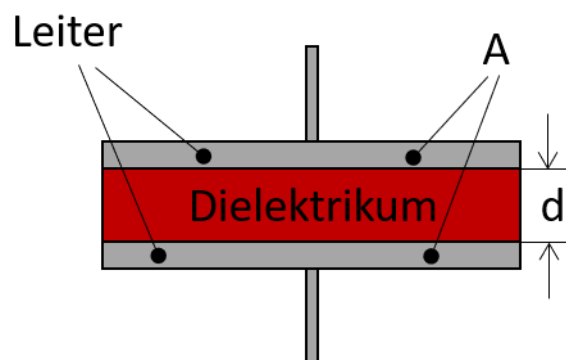


Abb. 2.2: Grundlegender Aufbau eines Plattenkondensators

Zusätzlich zu der Unterscheidung nach Bestandteilen können Kondensatoren auch nach ihrer geometrischen Anordnung unterschieden werden. Die drei häu-

figsten Anordnungen sind Platten-, Zylinder- und Kugelkondensatoren.[9]

In der vorliegenden Arbeit wird der Plattenkondensator betrachtet. Für die Kapazität eines Plattenkondensators gilt[8]:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (2.9)$$

Darin ist  $\varepsilon$  die Dielektrizitätskonstante,  $A$  ist die Plattenfläche und  $d$  der Plattenabstand. Die Dielektrizitätskonstante wird auch *Permittivität* genannt und kann wie folgt aufgeteilt werden[8]:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (2.10)$$

$\varepsilon_r$  ist die relative, stoffabhängige Permittivität;  $\varepsilon_0$  ist die Permittivität des Vakuums und somit eine konstante Größe. Die relative Permittivität beschreibt das Verhalten des Dielektrikums bei elektrischer Polarisierung durch ein äußeres elektrisches Feld. Wird von außen ein elektrisches Feld angelegt, so werden die im Dielektrikum enthaltenen Ladungen verschoben und bilden zusätzliche Ladungen auf den Kondensatorplatten, diese werden *gebundene Ladungen* genannt. Es gibt verschiedene Formen von Polarisation, eine davon ist die sogenannte *Grenzflächenpolarisation*. Diese tritt auf, wenn das Dielektrikum über Einschlüsse guter Leitfähigkeit verfügt. Werden diese polarisiert, so wandern die freien Ladungsträger der Einschlüsse zu den Grenzen dieser und agieren dort als gebundene Ladungen. Grenzflächenpolarisation kann zu einer sehr viel höheren relativen Permittivität führen als das Dielektrikum eigentlich hat.[10]

$\varepsilon_r$  ist eine komplexe Größe:

$$\varepsilon_r = \text{Re}(\varepsilon_r) - j \cdot \text{Im}(\varepsilon_r) \quad (2.11)$$

Der Realteil ist die *Dielektrizitätskonstante* und Maß für das Speichervermögen des Dielektrikums. Der Imaginärteil ist die *Verlustzahl* und beschreibt den Energieverlust. Das Verhältnis von Verlustzahl und Dielektrizitätszahl wird als *Verlustfaktor*  $\tan \delta$  bezeichnet.[11] Sowohl die Dielektrizitätskonstante als auch die Verlustzahl ändern sich unter dem Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur. Bei steigendem Feuchtigkeitsgehalt steigen sowohl Real- wie auch Imaginärteil an, d.h. die relative Permittivität erhöht sich.[12]

In der nachfolgenden Tabelle sind exemplarisch Permittivitätswerte unterschiedlicher Dielektrika aufgeführt:

Material	$\epsilon_r$
Diamant	16,5
Glas	5 – 10
Plexiglas	3,4
Hartgummi	2,5 – 3,5
Epoxidharz	4,3 – 5,4
Wasser (0°C)	88
Wasser (18°C)	81,1
Wasser (40°C)	73,4

Tab. 2.1: Relative Permittivitätswerte verschiedener Dielektrika[3][4]

Anhand der Werte, welche in der obigen Tabelle dargestellt sind, kann der große Unterschied zwischen der relativen Permittivität von Epoxidharz und der von Wasser gesehen werden. Dieser beträgt ungefähr Faktor 20. Ebenfalls ist der Einfluss von Temperaturänderungen auf die relative Permittivität ersichtlich; für Wasser sinkt  $\epsilon_r$  bei einem Anstieg der Temperatur von 0°C auf 18°C um 7,841%.

Die Kapazität wird mithilfe eines Multimeters gemessen. Die Einheit ist Farad  $[1 F] = [1 \frac{A \cdot s}{V}]$ ; übliche Werte befinden sich im Bereich von pF bis  $\mu F$ .

Kapazität kann nicht direkt gemessen werden, sondern muss über die Messung von Hilfsgrößen bestimmt werden. Es existieren verschiedene Methoden zur Messung der Kapazität; das Multimeter, welches in der vorliegenden Arbeit verwendet wird, hat eine eingebaute Funktion zur Messung der Kapazität. Bei dem Messgerät handelt es sich um ein LCR-Meter, welches zur Messung von Induktion ( $L$ ), Kapazität ( $C$ ) oder Widerstand ( $R$ ) eines Stromkreises verwendet wird. LCR-Meter funktionieren über das Messen des kapazitiven Blindwiderstands  $X_C$ [13]: Der Widerstand eines Kondensators ist im Gleichstromkreis unendlich groß, da kein Strom durch den Kondensator fließen kann. In einem Wechselstromkreis wird der Kondensator durch die ständig wechselnde Stromrichtung aufgeladen und sofort wieder entladen. Es kann somit ein Stromfluss stattfinden, jedoch ohne eine tatsächliche Wirkung. Der Kondensator funktioniert also auch hier wie

ein Widerstand, der *Blindwiderstand*  $X_C$  genannt wird. Der kapazitive Blindwiderstand ist von seiner eigenen Kapazität und der Frequenz der anliegenden Wechselfspannung abhängig. Der Zusammenhang lautet[14]:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (2.12)$$

Durch Umstellen der Gleichung wird so indirekt durch Messung des kapazitiven Blindwiderstands die Kapazität des Kondensators bestimmt.

### 2.3 Stand der Technik

Gegenstand dieser Arbeit ist ein Sensor zur Feuchtigkeitsmessung. Dieser soll als Maß für den Feuchtigkeitsgehalt in Strukturen aus Faserverbundmaterialien dienen, indem er in der Nähe der Struktur platziert und so denselben Bedingungen ausgesetzt ist wie die Struktur selbst.

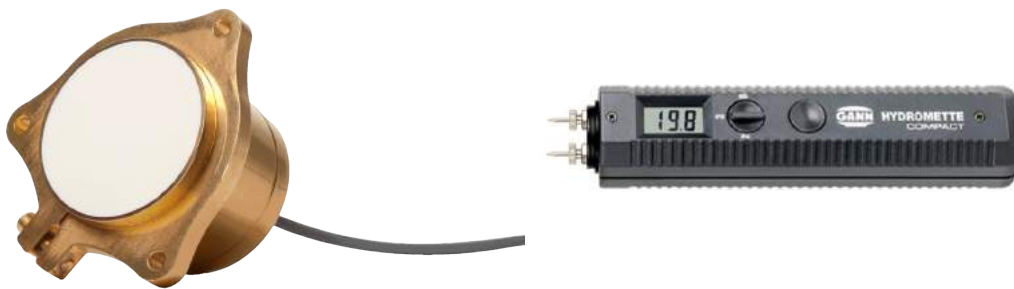
Der Sensor besteht aus zwei Metallplatten zwischen denen sich eine Schicht Faserverbundmaterial respektive eine Schicht Filmklebstoff befindet (vgl. Abb. 2.3).



Abb. 2.3: Erster Entwurf des Feuchtigkeitsensors auf Basis von Kopfzugproben [1]

Sowohl der Klebstoff, als auch die Matrix des Faserverbundwerkstoffs sind auf Epoxidharzbasis. Der Aufbau entspricht dem eines Plattenkondensators. Die Messung des Feuchtigkeitsgehalts geschieht durch Messen der Kapazität und Abgleichen des Messwertes mit einer Referenzlinie.

Kapazitive Sensoren werden üblicherweise zur Druck-, Abstands- oder Beschleunigungsmessung verwendet. In der Feuchtigkeitsmessung werden kapazitive Sensoren hauptsächlich zur Messung der Restfeuchte in Schüttgut oder der Bodenfeuchte eingesetzt. Sie finden auch Anwendung in Form von kapazitiven Hygrometern. Mit Hygrometern wird die Luftfeuchtigkeit gemessen. Feuchtigkeitsmessung in Strukturen findet hauptsächlich im Bereich des Bauwesens statt. Messgeräte haben in der Regel zwei Elektroden, welche in Baumasse gesteckt werden können. Die Elektroden messen den Widerstand, der zwischen ihnen herrscht. Von diesem kann auf den Feuchtigkeitsgehalt geschlossen werden.



(a) Sensor für Schüttgut[15]

(b) Sensor für Baustrukturen[16]

Abb. 2.4: Verschiedene Sensoren zur Feuchtigkeitsmessung



## 3 Voruntersuchung des Probenprogramms

Ziel der Arbeit ist die Quantifizierung des Sensors. Diese ist Ergebnis der Durchführung des Probenprogramms. Entscheidendes Element ist hierbei die Sensorgeometrie, welche zunächst grundlegend festgelegt und schließlich als Folge einer Voruntersuchung innerhalb des Probenprogramms ausgewählt wird.

### 3.1 Festlegung der grundlegenden Sensorgeometrie

Der Sensor soll eine einfach zu fertigende Geometrie haben, die ohne großen Aufwand mit hoher Genauigkeit reproduziert werden kann; als Grundkörper wird deshalb ein rotationssymmetrischer Körper gewählt. Die einfachste Form eines rotationssymmetrischen Körpers ist der Zylinder.

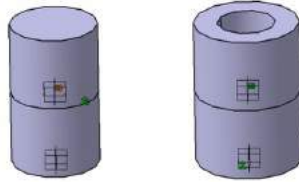
Wie bereits in 2.2 erläutert wurde, ergibt sich die Kapazität eines Plattenkondensators in Abhängigkeit von dessen Geometrie wie folgt:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (3.1)$$

Aus dem Formelzusammenhang ist ersichtlich, dass die Kapazität für eine große Plattenfläche  $A$  steigt, wohingegen sie für einen großen Plattenabstand  $d$  sinkt. Dies ist bei der Auswahl der Sensorgeometrie zu beachten, da die Kapazität ausschlaggebende Messgröße ist. Um Messungenauigkeiten weitestgehend zu vermeiden, wird eine Messung großer Höhe benötigt. Es ist also ein möglichst großer Zylinderdurchmesser bei möglichst geringer Klebschichtdicke anzustreben. Ein minimaler Plattenabstand ist durch die Dicke des Filmklebstoffes vorgegeben. Der Durchmesser des Sensors verbleibt als variable Größe.

Der Sensor dient der Feuchtigkeitsmessung. Es wird daher eine möglichst gleichmäßige Feuchtigkeitsverteilung über der Querschnittfläche des Sensors angestrebt. Die Feuchtigkeit dringt über die Klebränder des Sensors in die Klebschicht ein. Bei Vollzylindern besteht hier die Gefahr einer ungleichmäßigen Feuchtigkeitsverteilung über dem Querschnitt. Aus diesem Grund werden zusätzlich zu

den Vollzylindern Hohlzylinder als mögliche Sensorgeometrie untersucht (vgl. Abb. 3.1).



*Abb. 3.1: Vollzylinder (links) und Hohlzylinder (rechts)*

Die Feuchtigkeit hat bei den Hohlzylindern so die Möglichkeit über die inneren und äußeren Klebränder in die Klebschicht einzudringen. Es wird daher ein deutlich sensitiveres Verhalten der hohlen Proben erwartet.

Vor Beginn der Studienarbeit stehen bereits Sensorproben aus Vollmaterial mit einem Durchmesser von  $12\text{ mm}$  zur Verfügung (vgl. Abb. 3.2).



*Abb. 3.2: Vorhandene Proben*

Die Proben wurden zu einem früheren Zeitpunkt auf ihre Feuchtigkeitsaufnahme untersucht. Die Messreihe lief dabei über fünfzig Tage. Da mehrere Messreihen eines solchen Ausmaßes den Zeitrahmen der vorliegenden Studienarbeit überschreiten würden, werden die vorhandenen Proben als Referenz verwendet. Das für die Fertigung der neuen Sensorproben vorhandene Material unterscheidet sich in seiner Dicke von dem der bereits vorhandenen. Um dennoch auf die bisherigen Messergebnisse referenzieren zu können, muss ein Teil des ersten Probensatzes denselben Durchmesser aufweisen wie die vorhandenen Proben.

Um den Einfluss der Querschnittfläche auf die Feuchtigkeitsaufnahme sowie die Messbarkeit der Kapazität untersuchen zu können, werden unterschiedliche Probenmaße betrachtet. Die Probenart sowie die Maße sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

	<b>Charge</b>	$D_a$ in $mm$	$D_i$ in $mm$	$A$ in $mm^2$
<b>Vollprobe</b>	1	5	-	19,63
	3	12	-	113,10
	5	19	-	283,53
	7	33	-	855,30
<b>Hohlprobe</b>	2	10	3	71,47
	4	14,42	8	113,10
	6	22,47	12	283,53

Tab. 3.1: Gewählte Probenabmessungen

Ausgang für die Auswahl der Abmessungen sind die bereits vorhandenen Vollproben mit einem Außendurchmesser von  $12\text{ mm}$ . Wie bereits erläutert wurde, ist eine gleichmäßige Feuchtigkeitsverteilung über dem Querschnitt erstrebenswert. Die Feuchtigkeit dringt durch die Klebränder in die Klebschicht ein. Es wird daher vermutet, dass sich für Vollproben eines großen Durchmessers eine ungleichmäßigere Feuchtigkeitsverteilung ergibt als für Vollproben eines geringen Durchmessers. Um diese Vermutung zu überprüfen, werden Vollproben eines kleineren und größeren Durchmessers als  $12\text{ mm}$  gefertigt. Der kleinere Durchmesser wird unter Berücksichtigung des Fertigungsaufwands auf  $5\text{ mm}$  festgelegt. Als größerer Durchmesser wird eine Probe mit  $19\text{ mm}$  ausgewählt; die Durchmesser der größeren und der kleineren Probe haben dieselbe Differenz zum Durchmesser der Ausgangsprobe von  $12\text{ mm}$ . Für die größte Probe wird die doppelte Differenz, also  $14\text{ mm}$ , gewählt.

Die Maße der Hohlproben werden von den Vollproben abgeleitet. Um eine Vergleichbarkeit der Vollproben und der Hohlproben möglich zu machen, werden die Maße der Hohlproben so ausgelegt, dass Voll- und Hohlproben dieselbe Querschnittfläche haben. Dies ist aus Tabelle 3.1 ersichtlich. Die kleinste Hohlprobe

wird unter Berücksichtigung einer fertigungstechnischen Einschränkung ausgelegt, die verlangt, dass ein Rand von mindestens  $3\text{ mm}$  bestehen bleibt.

Die Hohlproben werden gebohrt, der Außendurchmesser wird abhängig vom Bohrungsdurchmesser festgesetzt.

Jede Probencharge enthält fünf Proben. Es wurde diese Chargengröße ausgewählt, da sie groß genug ist, um den Ausfall von einer oder zwei Proben zu tragen. Gleichzeitig ist sie nicht zu groß um so den Arbeitsaufwand enorm zu erhöhen.

## 3.2 Fertigung des ersten Probensatzes

Für die Auswahl der optimalen Probengeometrie werden, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, Proben unterschiedlicher Maße gefertigt. Der Sensor soll in seiner Endausführung aus Aluminium-Leiterplatten mit einer Faserverbundschicht als Dielektrikum bestehen. Der erste Probensatz dient der Bestimmung der optimalen Sensorgeometrie und wird aus zwei verklebten Aluminium-Platten gefertigt. Die Platten sind aus EN-AW 5083 Guss und werden durch einen Filmklebstoff miteinander verbunden. Es handelt sich dabei um den Filmklebstoff EA 9695 auf Basis von Epoxidharz.

Die Platten müssen miteinander verklebt werden, bevor die Proben gefertigt werden können. Das Verkleben der Platten geschieht nach Angaben im dazugehörigen *Life Data Sheet* (**LDS**). Der Klebstoff wird gekühlt gelagert, um ein frühzeitiges Aushärten zu vermeiden. Vor der Benutzung muss der Klebstoff aus der Kühlung genommen werden und auftauen (vgl. Abb. 3.3a). Währenddessen können die Platten vorbereitet werden. Sie werden erst mit Ethanol ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ) und dann mit Isopropanol ( $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$ ) gereinigt, um Fett und Verschmutzungen von der Oberfläche zu entfernen (vgl. Abb. 3.3b).



(a) Material



(b) Reinigung der Platten

Abb. 3.3: Vorbereiten des Materials

Die Oberflächen, welche miteinander verklebt werden sollen, werden nach der Reinigung mit Edelmetall sandgestrahlt. Die so entstehende Rauigkeit auf der Oberfläche ermöglicht eine bessere Haftung des Klebstoffs am Metall. Nach dem Sandstrahlen werden die Platten erneut gereinigt, um feine Korundkörner von der Oberfläche zu entfernen.

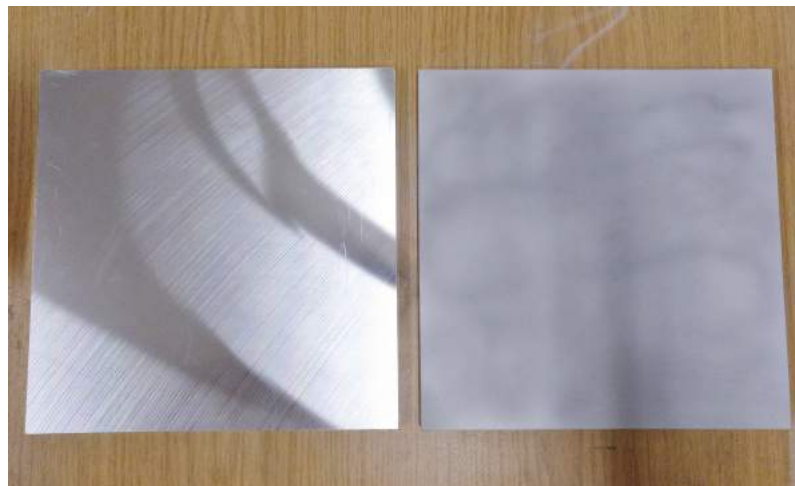


Abb. 3.4: Gereinigte Platte (links) und sandgestrahlte Platte (rechts)

Der Filmklebstoff ist von beiden Seiten mit einer Schutzfolie abgedeckt. Die erste Schutzfolie wird vorsichtig abgezogen und der Klebstoff wird bündig auf einer der Platten platziert. Mithilfe einer Handwalze wird der Klebstoff auf die Platte gedrückt. Es wird von der Mitte zum Rand gewalzt, um Luft zwischen Platte und Klebstoff heraus zu drücken. Nachdem der Klebstoff festgedrückt ist, wird die zweite Schutzfolie entfernt (vgl. Abb. 3.5b).



(a) Platte mit angedrücktem Klebstoff



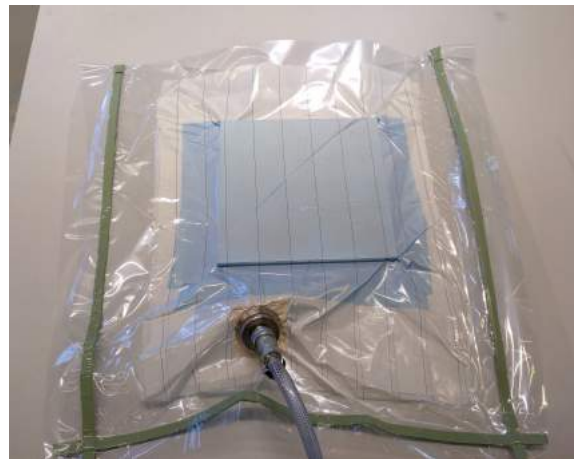
(b) Entfernen der zweiten Schutzschicht

Abb. 3.5: Auftragen des Klebstoffs

Die zweite Platte wird auf dem freigelegten Klebstoff aufgelegt und bündig ausgerichtet. Analog zur ersten Platte wird die zweite Platte auf der Klebschicht mithilfe einer Handwalze angedrückt. Die verklebte Struktur ist in Abbildung 3.6a zu sehen. Diese wird in einem Vakuumsack an eine Pumpe angeschlossen und bei  $\Delta p = 1 \text{ bar}$  für mindestens eine Stunde kompaktiert um die Luft zu entfernen (vgl. Abb. 3.6b).



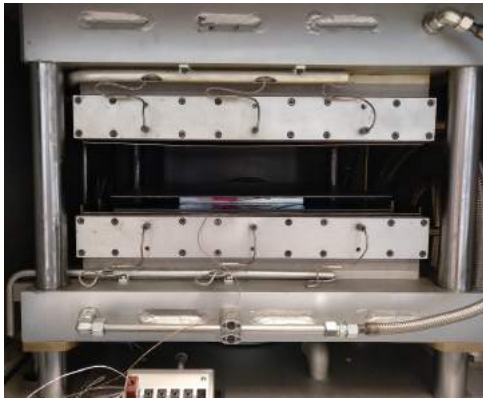
(a) Händisch verklebte Platten



(b) Verklebte Platten im Vakuumsack

Abb. 3.6: Vorbereiten der Struktur auf die Presse

Der Klebstoff wird in der Presse ausgehärtet. Die Platten werden in Trennfolie eingeschlagen und mit Thermosensoren beklebt (vgl. Abb. 3.7a). Die Presse wird unter Vakuum auf  $130^\circ\text{C}$  aufgeheizt. Bei Erreichen der Temperatur wird das Vakuum abgelassen und die Temperatur für zweieinhalb Stunden gehalten. Anschließend wird die Presse wieder abgekühlt.



(a) Struktur in der Presse

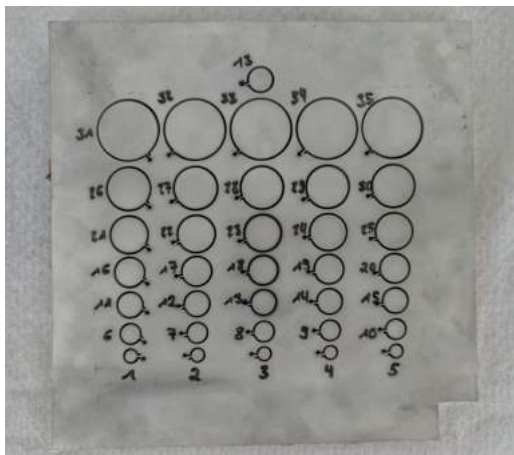


(b) Fertig verklebte Platten

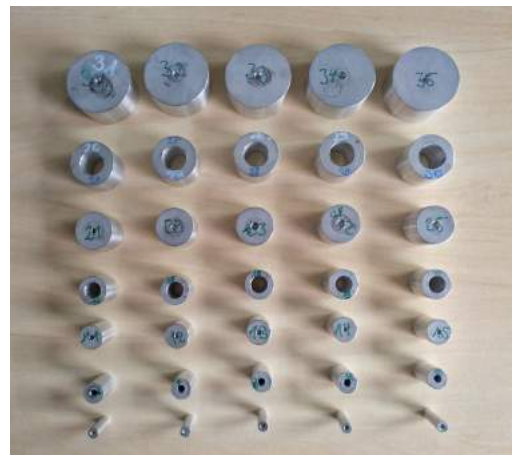
Abb. 3.7: Pressen der Struktur

Die fertig verklebte Struktur ist in Abbildung 3.7b zu sehen. An den Rändern ist der überschüssige Klebstoff ausgetreten. In den Klebresten sind deutliche Poren zu sehen; dabei handelt es sich um Luft, welche sich zwischen den Platten befand und während des Pressens ausgetreten ist.

Die Proben werden aus den verklebten Platten gefertigt. Zu diesem Zweck wird die Platte zunächst in einem fremden Unternehmen in grobe Geometrien wasserstrahlgeschnitten. Da der Strahl beim Wasserstrahlschneiden leicht konisch verläuft, werden größere Geometrien ausgeschnitten. Diese werden im Anschluss am DLR auf der Drehmaschine auf Maß gedreht.



(a) Proben nach dem Wasserstrahlschneiden



(b) Proben nach dem Drehen

Abb. 3.8: Fertigung der Proben

Nach Fertigstellung der Proben können diese zur Bestimmung der optimalen Sensorgeometrie verwendet werden.



### 3.3 Auswahl einer optimalen Probengeometrie

Die Auswahl der optimalen Probengeometrie geschieht auf Basis der Messungen zur Feuchtigkeitsaufnahme des ersten Probensatzes im Rahmen der Voruntersuchung. Die Aufnahme der Messwerte geschieht über einen Zeitraum von zwölf Tagen. Zu Beginn der Messreihe werden die Proben bei  $60^{\circ}\text{C}$  für acht Stunden rückgetrocknet, um einen Feuchtegehalt von 0% zu erhalten (s. Abb. 3.9). Es wird dasselbe Programm für Rücktrocknung verwendet wie für Reparaturarbeiten von Faserverbundwerkstoffen in der Industrie.



Abb. 3.9: Proben im Ofen

Die Proben werden anschließend in einem Wasserbad ausgelagert und mit fortlaufender Zeit herausgenommen und gemessen. Wie in Abschnitt 2 erwähnt wurde, ist Diffusion ein langsamer Prozess. Durch die Auslagerung der Proben im Wasserbad und eine Umgebungsfeuchtigkeit von 100% wird der Prozess im Vergleich zur Auslagerung an der Luftfeuchtigkeit beschleunigt.

Um auf die bereits vorhandenen Proben referenzieren zu können, wird die ursprüngliche Messumgebung möglichst genau nachgestellt. Das Wasserbad wird daher mit Leitungswasser befüllt.

Wie in Abschnitt 2.2 erwähnt wurde, ist die relative Permittivität temperaturabhängig. Das Wasserbad mit den Proben wird daher in einen Raum mit Temperaturregelung gestellt. Die Raumtemperatur beträgt konstant  $23^{\circ}\text{C}$ . Das Wasserbad wird eine Stunde im Voraus befüllt und in die klimatisierte Umgebung gestellt, um die



Wassertemperatur an die Umgebungstemperatur anzupassen. Das Wasserbad wird mit einem Deckel abgedeckt damit keine Fremdkörper hineinfallen.



*Abb. 3.10: Proben im Wasserbad*

Gemessen wird die Kapazität bei einer Wechselstromfrequenz von  $100\text{ kHz}$  und das Gewicht der Probe mithilfe einer Feinwaage. Zusätzlich wird das Längsmaß der Probe genommen, um die Klebschicht auf Aufquellen zu prüfen. Das Längsmaß wird mit einer Bügelmessschraube gemessen. Die Messwerte werden handschriftlich notiert.



*Abb. 3.11: Messplatz mit Feinwaage (l.), Bügelmessschraube (m.) und LCR-Meter (r.)*

Um die Proben messen zu können, müssen diese aus dem Wasserbad herausgenommen und abgetrocknet werden. Zum Abtrocknen werden fusselfreie Tücher verwendet. Für die kleinsten Hohlproben werden Pfeifenreiniger zur Trocknung der Bohrung verwendet. Sowohl die Tücher als auch die Pfeifenreiniger wurden auf ihre Löslichkeit in Wasser untersucht, um eine Kontamination des Wasserbads durch Fremdkörper zu vermeiden. Zu diesem Zweck wurden kleine Stücke

der Materialien in Wasser gelegt und dort für eine Woche ausgelagert. Es wurde keine Auflösung der Tücher oder der Pfeifenreiniger bemerkt.

### 3.3.1 Kapazitätsänderung

Aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten kann es zu Schwankungen innerhalb einer Geometriecharge kommen. Die Proben werden daher alle auf ihre Anfangskapazität bei 0% Feuchtigkeit normiert und anschließend arithmetisch gemittelt. Zusätzlich wird die mittlere absolute Abweichung der Messwerte zum arithmetischen Mittel dargestellt.

Die Proben wurden gleichzeitig erstmalig ins Wasserbad gegeben. Das Messen einer Geometriecharge dauerte durchschnittlich zehn Minuten; dieser Zeitunterschied ist in den Diagrammen berücksichtigt. Das nachfolgende Diagramm enthält die normierten und gemittelten Werte für die Kapazität der Vollproben mit zunehmender Zeit im Wasserbad. In der Legende sind die Chargen mit ihren Querschnittflächen gegeben. Der Buchstabe hinter der Querschnittfläche spezifiziert den Probenotyp: (V) steht für *Vollprobe*. Die Fehlerbalken stellen die absolute Abweichung vom arithmetischen Mittel dar.

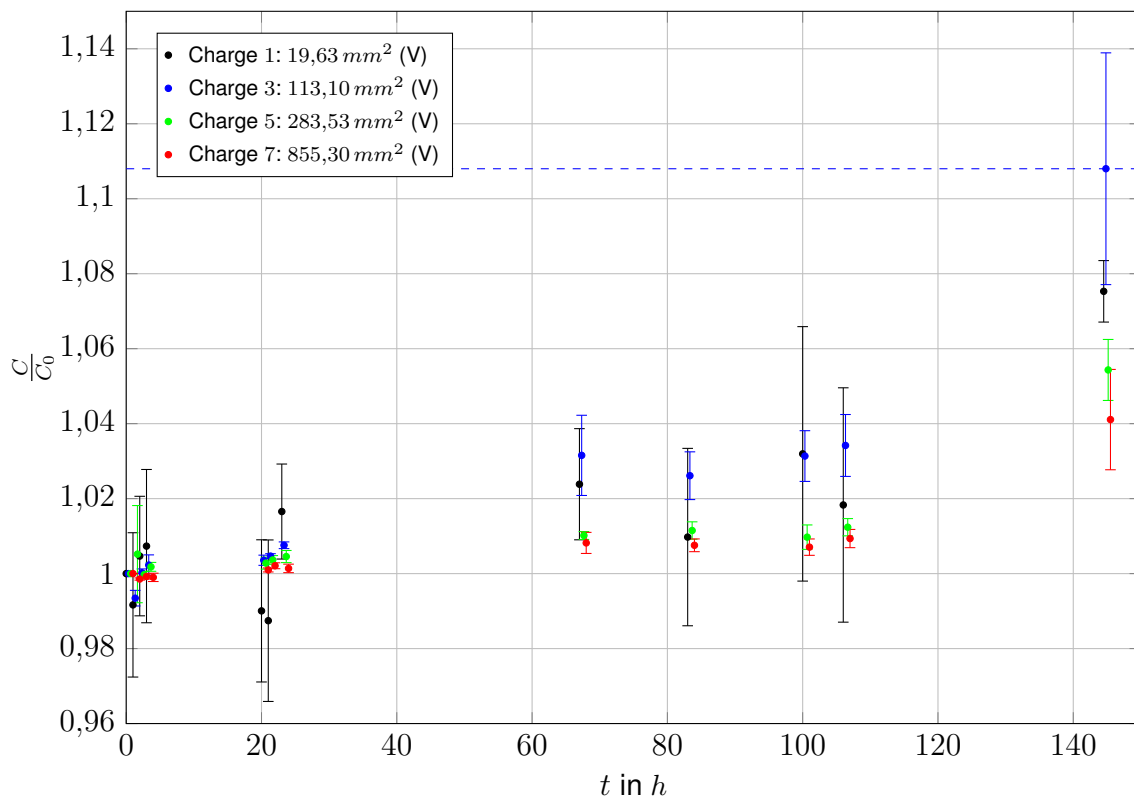


Abb. 3.12: Normierte und gemittelte Kapazität der Vollproben über der Zeit

Wie gut zu erkennen ist, verlaufen die Kurven flach mit einem maximalen Ausschlag von ungefähr 10,8%; dieser ist durch die blaue gestrichelte Linie in Diagramm 3.12 gekennzeichnet. Weiterhin ist zu erkennen, dass eine größere Querschnittfläche in einer geringeren Schwankung der Messwerte um das arithmetische Mittel resultiert. Bei Aufnahme der Messwerte wurde für große Querschnittflächen ein besseres Messverhalten beobachtet als für kleine Querschnittflächen; so war die Messung von Charge 7 eindeutiger als die von Charge 1.

Die Unregelmäßigkeit der Messzeitpunkte ergab sich dadurch, dass alle Messungen händisch und nicht automatisch durchgeführt wurden. So konnte beispielsweise nicht während der Wochenenden gemessen werden, was zu großen Lücken im Zeitverlauf führte.

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben wurde, existieren vor Beginn der Arbeit bereits Proben mit einem Außendurchmesser von 12 mm. Diese Proben wurden als Ausgang zur Festlegung der grundlegenden Geometrie in Abschnitt 3.3 verwendet und haben dieselbe Querschnittfläche wie die Proben aus Charge 3.

Eine der bestehenden Proben wurde vor Beginn der vorliegenden Arbeit im Wasserbad ausgelagert. Für diese wurden die folgenden Kapazitätswerte aufgenommen:

<b>Zeit</b>	<b><math>C</math> in <math>pF</math></b>
Fertigung	-
Tag 0	38,81
Tag 7	39,00
Tag 30	41,60
Rücktrocknung	37,40

*Tab. 3.2: Kapazitätsmessung vor Beginn der Arbeit*

Die Kapazität der Probe liegt bei Tag 0 mit 38,81 pF sehr viel höher als das arithmetische Mittel von Charge 3, welches 33,881 pF beträgt. Grund dafür ist einerseits, dass das Material vor der ersten Messung circa dreihundert Tage in der Fertigungshalle gelagert wurde und Luftfeuchtigkeit gezogen hat. Andererseits handelt es sich bei der bestehenden Probe um einen anderen Probensatz, welcher von einer anderen Person gefertigt wurde. Dies kann beispielsweise Einfluss

auf die Klebschichtdicke der Probe haben und so die Kapazität beeinflussen. Die Klebschichtdicke der Probe ist unbekannt und kann nicht mehr festgestellt werden, da die Probe für eine zerstörende Prüfung verwendet wurde. Zu beachten ist weiterhin, dass das Wasserbad Temperaturänderungen ausgesetzt war, was die Kapazität ebenfalls beeinflussen kann. Die Größenordnung der Kapazität stimmt dennoch für die alten und die neuen Proben überein. Die neuen Proben sind somit für die Untersuchung geeignet. Weiterhin deutet die ähnliche Größenordnung darauf hin, dass die Dicke der Metallplatten wenig bis gar keinen Einfluss auf die Messungen hat.

Aus Tabelle 3.2 ist ersichtlich, dass sich die Kapazität bei fortlaufender Zeit zunehmend weniger verändert. Dies deutet darauf hin, dass sich die Kapazität nichtlinear verhält und sich mit zunehmender Zeit an einen Sättigungszustand annähert. Für Epoxidharze wird dieses Verhalten auch in der Literatur beschrieben.

Im folgenden Diagramm ist analog zu Diagramm 3.12 die normierte und gemittelte Kapazität der Hohlproben dargestellt. In diesem Fall steht  $(H)$  für *Hohlprobe*.

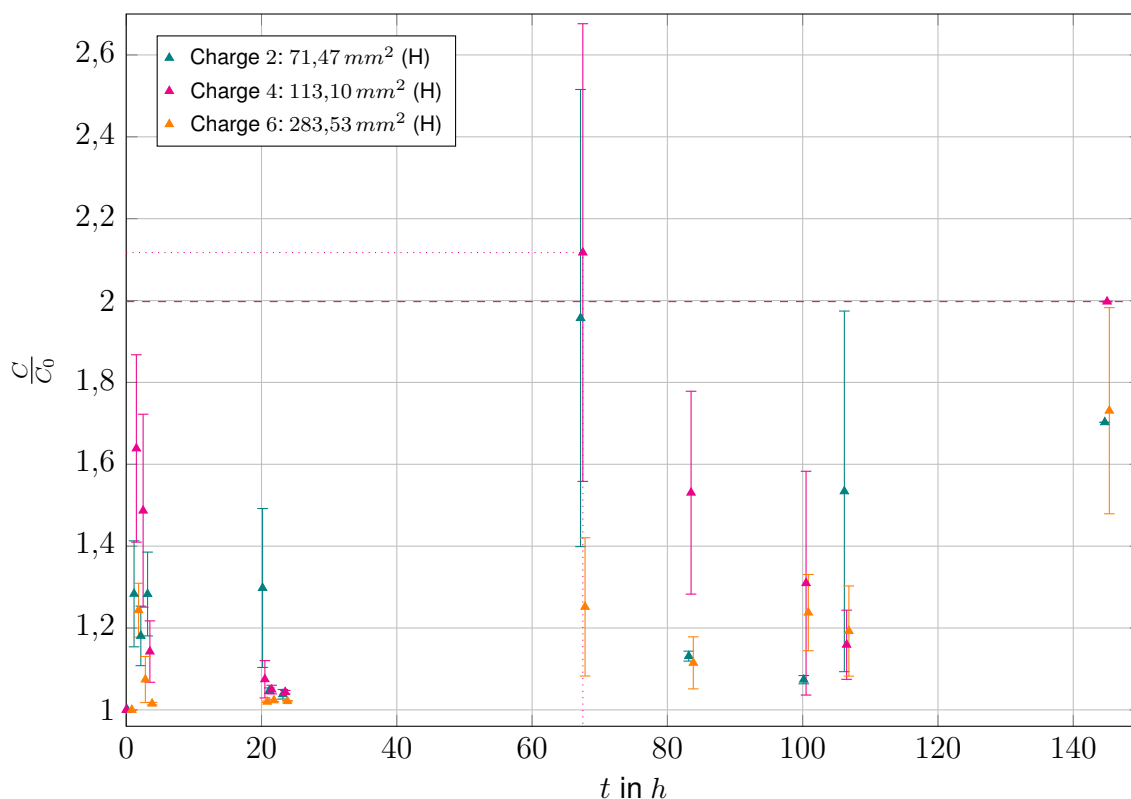


Abb. 3.13: Normierte und gemittelte Kapazität der Hohlproben über der Zeit

Vergleicht man die Diagramme 3.12 und 3.13 miteinander, so fällt auf, dass die

Kapazität der Hohlproben wesentlich schneller ansteigt als die der Vollproben. Der Anstieg der Kapazität verläuft für die Hohlproben außerdem auch sehr viel unruhiger. Besonders bei 67h ist ein hoher Ausschlag zu sehen, der für Charge 4 eine Vergrößerung der Kapazität im Vergleich zum Anfangswert von ungefähr 211,7% beträgt. Zudem weisen die Hohlproben enorme Schwankungen um das arithmetische Mittel auf; so hat der genannte Ausschlag bei 67h eine absolute Abweichung von 55,9%. Zum besseren Verständnis der Werte können diese in der Tabelle im Anhang eingesehen werden.

Vergleicht man den höchsten Endpunkt der Messreihe beider Probentypen miteinander, fällt der Unterschied im Kapazitätsanstieg besonders auf: Während die Vollproben eine Kapazitätserhöhung von maximal 10,8% aufweisen, ergibt sich für die Hohlproben eine Erhöhung von ungefähr 99,7%, was beinahe der doppelten totalen Kapazität im Vergleich zum Anfang entspricht.

Um ein besseres Verständnis des unterschiedlichen Verhaltens der Hohlproben gegenüber den Vollproben zu erhalten, werden nachfolgend die Verläufe der beiden Probentypen gleicher Querschnittfläche dargestellt.

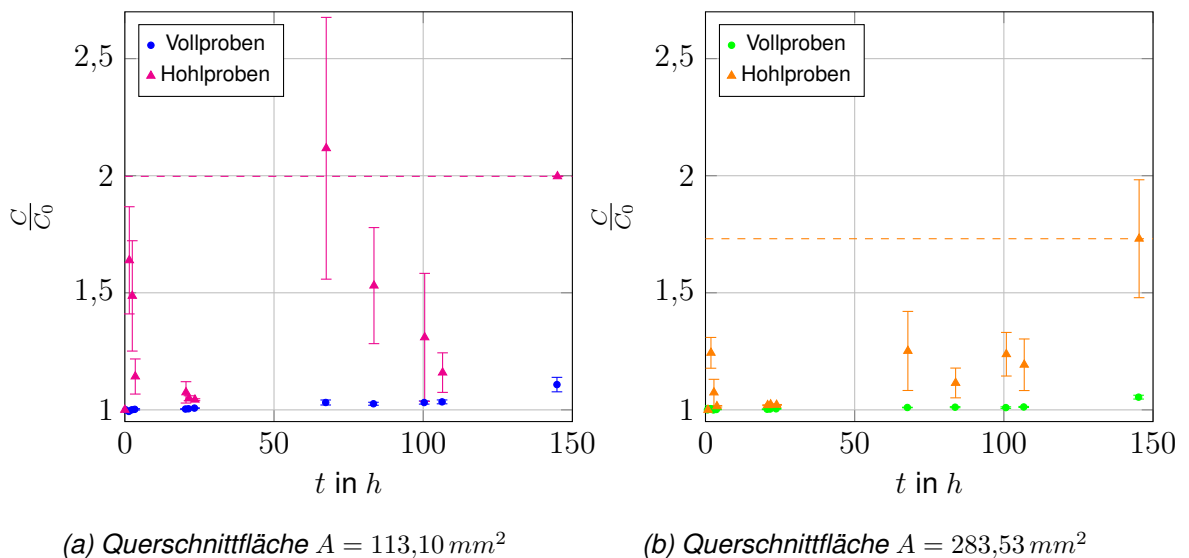


Abb. 3.14: Vergleich der normierten Kapazität von Voll- und Hohlproben miteinander

Wie bereits erwähnt wurde, ergeben sich für die Hohlproben wesentlich höhere Kapazitätsänderungen als für die Vollproben. Dies ist in den obigen Diagrammen gut zu erkennen. Ebenfalls wird der Unterschied in der Schwankung um das arithmetische Mittel deutlich und auch der unruhigere Verlauf der Kapazitätsänderung der Hohlproben ist gut zu sehen.

Der Einfluss der zu durchdringenden Fläche konnte bereits in Diagramm 3.12 gut beobachtet werden, jedoch wird er auch anhand des Vergleichs der Diagramme 3.14a und 3.14b veranschaulicht: Eine größere Randdicke der Hohlproben resultiert in einer geringeren Kapazitätserhöhung als eine geringere. So hat Charge 6 mit einem Bohrungsdurchmesser von  $12\text{ mm}$  nach  $144,5\text{ h}$  eine Kapazitätserhöhung von  $73,1\%$ , wohingegen Charge 4 nach derselben Zeit eine Erhöhung von  $99,7\%$  aufweist.

### 3.3.2 Massenänderung

Wie vorangehend erwähnt wurde, wurde zusätzlich zur Kapazität auch die Masse der Proben gemessen. Die Masse wurde aufgenommen, um zu prüfen, ob eine Feuchtigkeitsaufnahme diese merklich beeinflusst. Zur Aufnahme der Masse wurde eine Feinwaage verwendet, welche Werte bis auf ein  $\left[\frac{g}{10\,000}\right]$  genau angibt. Analog zur Kapazität wurden die absoluten Massen pro Probe auf deren Anfangswert bei  $0\%$  Feuchtigkeit normiert und im Anschluss gemittelt. Die Verläufe über der Zeit sind nachfolgend dargestellt.

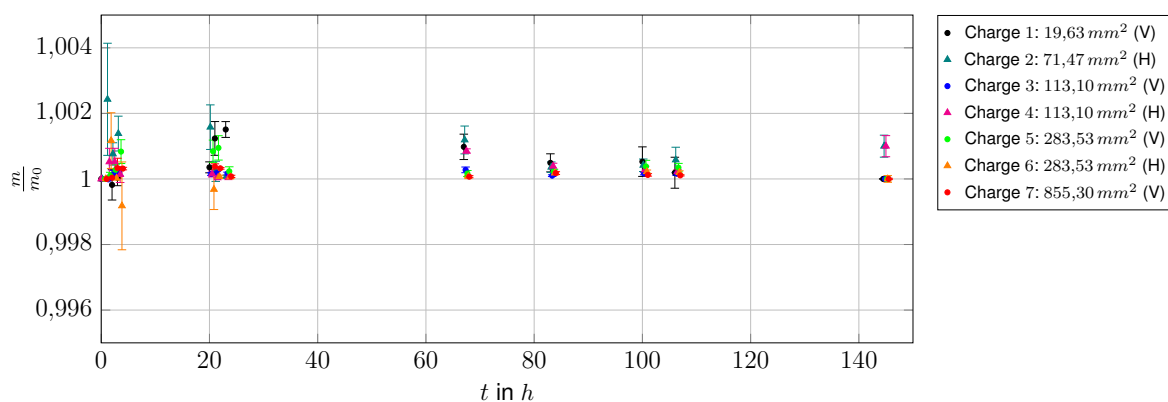


Abb. 3.15: Normierte und gemittelte Masse der Proben über der Zeit

Wie gut zu erkennen ist, ändert sich die Masse für keine Probe maßgeblich bei Aufnahme von Feuchtigkeit in die Klebschicht. Ein merklicher Einfluss der Feuchtigkeitsaufnahme auf die Masse wird bei den kleinsten Proben erwartet, jedoch kann dieser auch dort nicht beobachtet werden.

Eine Zunahme der Masse durch aufgenommene Feuchtigkeit kann zur Beschreibung der Diffusion genutzt werden. In der Literatur werden Massenzuwächse von bis zu  $3,2\%$  aufgenommen (vgl. [2]); rechnet man dies auf den vorhandenen An-

teil an Harz im betrachteten Sensor um, so ergibt sich bei einer Dichte von ca.  $1,2 \frac{g}{cm^3}$  [17] für die Proben aus Charge 7, also die größte Geometrie, eine Massenänderung von  $\Delta = 0,000299 g$ .

Es handelt sich dabei um einen sehr geringen Wert. Dieser kann mit der Feinwaage gemessen werden, ist jedoch auch sehr anfällig für Messungenauigkeiten, da die Feinwaage sehr anfällig für Umgebungsbedingungen wie zum Beispiel Luftzirkulation ist.

Die Masse als zusätzliche Messgröße zur Einschätzung der Feuchtigkeitsaufnahme ist bei Proben dieser Größenordnung demnach nicht sinnhaft.

### 3.3.3 Längenänderung

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert wurde, hat neben der Querschnittfläche  $A$  auch der Plattenabstand  $d$  Einfluss auf die Kapazität eines Plattenkondensators. Aus diesem Grund wird als dritte Messgröße der Voruntersuchung das Längsmaß der Proben aufgenommen. Zur Messung wird eine Bügelmessschraube verwendet, welche bis auf ein  $\left[ \frac{mm}{1000} \right]$  genau misst. Es wurde für alle Längenmessungen dieselbe Bügelmessschraube verwendet.

Die Werte wurden erneut für jede Probe auf ihren Anfangswert normiert und anschließend gemittelt. Die Verläufe der Längsmaße sind im nachfolgenden Diagramm dargestellt.

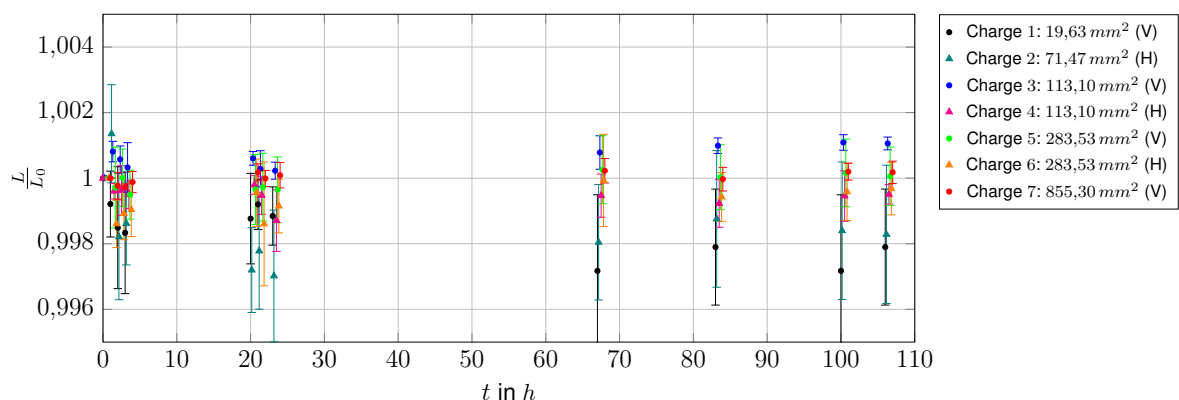


Abb. 3.16: Normierte und gemittelte Länge der Proben über der Zeit

Bei Auswertung der im obigen Diagramm dargestellten Messwerte ist zu beachten, dass die Oberflächen der Proben nach der Fertigung nicht nachbearbeitet wurden. Demnach können sich Kratzer und Unebenheiten auf den Messflächen befinden. Weiterhin begannen die Proben nach einigen Tagen im Wasser zu oxi-

dieren; auch dies hat Einfluss auf die Messgenauigkeit der Bügelmessschraube. Aufgrund starker Oxidation gegen Ende der Voruntersuchung wurde das Längsmaß der Proben am letzten Tag nicht mehr aufgenommen. Aufgrund der genannten Faktoren sind die aufgenommenen Längsmaße als solche nicht aussagekräftig.

Um den Einfluss des Plattenabstands  $d$  im Zusammenhang mit der Querschnittfläche zu untersuchen wird exemplarisch für das arithmetische Mittel der Kapazität von Proben unterschiedlicher Querschnittfläche berechnet wie stark sich die Kapazität bei Änderungen des Plattenabstands verändert. Die entsprechende relative Permittivität wird wie folgt berechnet:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad \Leftrightarrow \quad \varepsilon_r = \frac{C}{\varepsilon_0} \cdot \frac{d}{A} \quad (3.2)$$

Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

$A$ in $mm^2$	$\varepsilon_r$	$d$ in $mm$				$C$ in $pF$
		0,15	0,16	0,17	0,20	
19,63	6,55	7,59	7,12	6,70	5,69	
71,47	5,10	21,52	20,17	18,98	16,14	
113,10	5,08	33,91	31,79	29,92	25,44	
283,53	4,95	82,84	77,67	73,10	62,13	
855,30	4,82	243,35	228,14	214,72	182,51	

Tab. 3.3: Einfluss der Änderung des Plattenabstands  $d$  auf die Kapazität  $C$

Abhängig von der jeweiligen Plattenfläche einer Charge und deren absoluter Kapazität bei 0% Feuchtigkeit wird jeweils die relative Permittivität berechnet. Da Charge 3 und 4, ebenso wie Charge 5 und 6, dieselbe Querschnittfläche haben, wird die Rechnung nur für die fünf Querschnittflächen durchgeführt und nicht für alle sieben Chargen. Der Plattenabstand wird, von der nominellen Filmklebstoffdicke von 0,15 mm ausgehend, schrittweise vergrößert und mithilfe von  $A$  und  $\varepsilon_r$  jeweils die neue absolute Kapazität ermittelt.

Für die Vergrößerung des Plattenabstands um ein Hundertstel ergibt sich für alle Querschnittflächen eine Verringerung der Kapazität um circa 6,23%. Dabei handelt es sich um eine maßgebliche Abweichung. Die Bügelmessschraube hat jedoch eine Genauigkeit von einem Tausendstel; eine Längenänderung von einem



Hundertstel muss demnach bei der Messung klar erkennbar auftreten. Aus Diagramm 3.16 geht hervor, ist dies trotz der geschilderten Einflüsse nicht der Fall. Die größte Abweichung, welche aufgenommen wurde, beträgt 0,135%, was einer Längenänderung von  $0,0002025\text{ mm}$  entspricht. Diese Abweichung wurde für die Proben mit der Querschnittfläche  $71,47\text{ mm}^2$  aufgenommen. Mit der relativen Permittivität aus Tabelle 3.3 ergibt sich eine Kapazität von  $21,49\text{ pF}$ ; dies entspricht einer Änderung von 0,14%. Da es sich dabei um einen vernachlässigbar kleinen Wert handelt, wird angenommen, dass die Klebschicht nicht genug aufquillt um Einfluss auf die gemessene Kapazität zu nehmen.

Weiterhin fällt auf, dass sich für alle Chargen unterschiedliche  $\epsilon_r$ -Werte ergeben. Dies deutet darauf hin, dass die Proben unterschiedlich dicke Klebstoffdicken aufweisen und die nominelle Klebschichtdicke von  $0,15\text{ mm}$  nicht zur Auswertung verwendet werden kann. Auf diesen Sachverhalt wird in Abschnitt 5 näher eingegangen.

### 3.3.4 Auswertung

Die Auswahl der optimalen Geometrie wird einerseits auf Basis der Erkenntnisse, welche in den vorangegangenen Abschnitten präsentiert wurden, ausgewählt, andererseits werden praktische Aspekte bei der Entscheidung berücksichtigt. Dazu zählen unter anderem wie gut eine Probe gefertigt oder abgetrocknet werden kann und wie schnell das Messgerät einen stabilen Messwert anzeigt.

Während der ersten Messreihe traten hauptsächlich zwei Probleme auf: die Oxidation des Aluminiums und das Auseinanderbrechen von Proben. Wie bereits erwähnt wurde, beeinträchtigte die Oxidation hauptsächlich die Längenmessung, jedoch erschwerte sie auch die Messung der Kapazität, da Aluminiumoxid nicht leitend ist. Das Auseinanderbrechen der Proben trat erstmalig nach 100 Stunden bei den kleinsten Hohlproben auf. Anhand der Trennflächen ist gut zu sehen, dass es sich nicht um einen üblichen Bruch aufgrund von unzulässiger Beanspruchung handelt: an einigen Stellen ist Wasser zwischen Klebschicht und Metall gedrungen; dort ist Aluminiumoxid entstanden, welches die Klebschicht vom Metall getrennt hat (vgl. Abb. 3.17).



Abb. 3.17: Aluminiumoxid auf Trennflächen zerbrochener Proben

Ein Versagen der Klebschicht mit fortlaufender Zeit betraf primär Vollproben mit geringem Durchmesser und Hohlproben mit geringer Randstärke. Die Messreihe wurde nach zwölf Tagen abgebrochen, da zu diesem Zeitpunkt nicht mehr genug Proben aller Geometriechargen vorhanden waren, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten. In dem nachfolgenden Bild ist zu sehen, welche Proben am Ende der Messreihe noch vorhanden und welche zu diesem Zeitpunkt bereits zerbrochen waren.

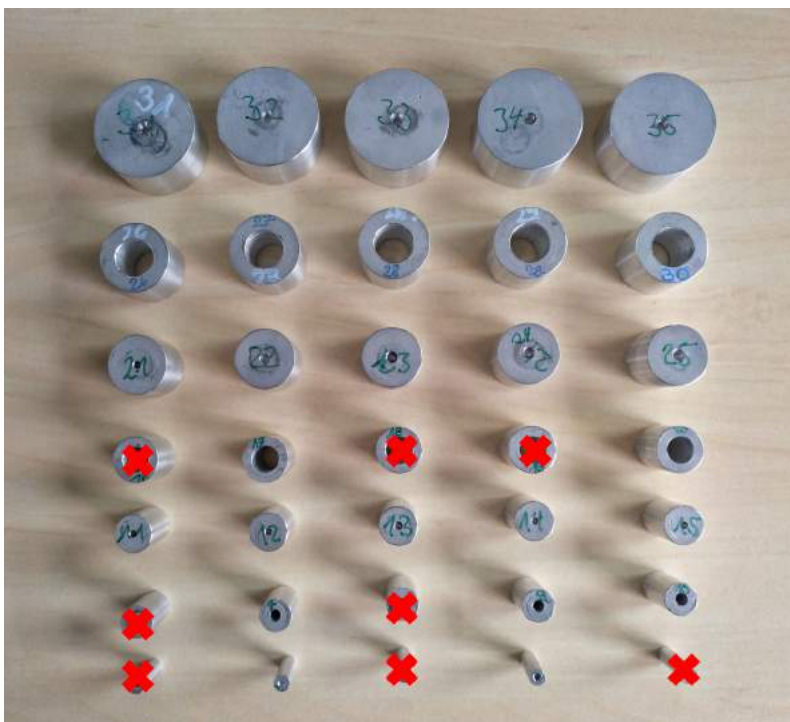


Abb. 3.18: Nach der Voruntersuchung zerbrochene Proben

Die zerbrochenen Proben sind durch ein rotes Kreuz markiert. Anhand der Abbildung ist zu erkennen, dass drei Geometriechargen durch eine besonders hohe Anzahl an zerbrochenen Proben auffallen: dabei handelt es sich um die Chargen 1, 2 und 4.

Ebenfalls fiel auf, dass Chargen mit kleinem Durchmesser oder geringer Randstärke bei der Messung der Kapazität stark schwankten. So musste bei kleinen Proben längere Zeit gewartet werden bis sich ein stabiler Messwert ablesen ließ. Dies verlängerte die Dauer der Messung und beeinträchtigt zudem die Aussagekraft der Messergebnisse. Proben größerer Abmessung zeigten diesbezüglich weniger Probleme; Charge 7 zeigte die geringsten Schwankungen.

In Charge 2 erwiesen sich außerdem bereits zu Beginn der Messreihe zwei Proben als unbrauchbar, da diese negative Kapazitäten aufwiesen. Dies deutet auf eine Verbindung zwischen den Leitern hin. Diese Verbindung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Span, der beim Bohren der Probe in der Bohrung hängen geblieben ist. Aufgrund des geringen Bohrungsdurchmessers war es nicht möglich dieses Problem einzusehen oder zu beheben.

Aufgrund der genannten Probleme können die Chargen 1, 2 und 4 als optimale Geometrie für den Sensor ausgeschlossen werden.

Es verbleiben vier weitere Chargen für die optimale Geometrie. Diese werden nach ihren Kapazitätsverläufen und ihrer Handhabung bewertet. *Handhabung* beschreibt den Aufwand beim Abtrocknen der Proben, ebenso wie die benötigte Zeit um einen stabilen Messwert zu erhalten.

Für die Vollproben steigt die Genauigkeit mit dem Durchmesser der Probe. Gleichzeitig sinkt der Ausschlag, welcher gemessen werden kann. Vergleicht man die Chargen 3, 5 und 7 miteinander, so ist deutlich zu sehen, dass Charge 3 den höchsten Ausschlag hat, jedoch schwankt diese wesentlich stärker um ihr arithmetisches Mittel als die anderen beiden Chargen. Die Verläufe der drei Chargen ähneln sich in ihrem allgemeinen Aussehen sehr, dies weist auf eine einfache Handhabung ohne hohen Aufwand hin.

Die Hohlproben weisen im Vergleich zu den Vollproben unruhigere Verläufe auf; das Messgerät benötigt zudem wesentlich länger bis es einen stabilen Messwert anzeigt als bei den Vollproben. Grund dafür ist, dass verbleibende Feuchtigkeit auf den Proben die Messung der Kapazität stark beeinflussen kann. Besonders

bei den Chargen 2 und 4 ergeben sich Schwierigkeiten beim Abtrocknen der Proben, da die Bohrungen sehr klein sind. Da diese Chargen jedoch bereits aufgrund weiterer, oben genannten Mängel ausgeschlossen wurden, verbleibt von den Hohlproben lediglich Charge 6 als mögliche Geometrie für den Sensor.

Die erste Wahl für eine optimale Sensorgeometrie fällt auf Charge 3, da diese einen vergleichsweise hohen Ausschlag bei gleichmäßigem Verlauf anzeigt. Die stärkere Schwankung um das arithmetische Mittel als bei Chargen 5 und 7 wird zugunsten des höheren Ausschlags vernachlässigt.

Zusätzlich wird Charge 6 als mögliche optimale Geometrie ausgewählt, da sie einen wesentlich höheren Ausschlag aufweist als jede andere Charge. Sie ist demnach sehr empfindlich und bietet so die Möglichkeit auch bei kleinen Änderungen im Feuchtegehalt der Umgebung messbare Ergebnisse aufzunehmen.

## 4 Hauptuntersuchung des Probenprogramms

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Untersuchungen, welche in Abschnitt 3 durchgeführt wurden, wurde die optimale Geometrie für den Feuchtigkeitssensor ausgewählt. Es wurden je eine Voll- und eine Hohlprobe ausgewählt. Als Vollprobe wurde die Charge 3 ausgewählt, als Hohlprobe Charge 6.

In diesem Kapitel werden die gesammelten Ergebnisse vorgestellt, die Auswertung dieser folgt in Kapitel 5.

### 4.1 Fertigung des zweiten Probensatzes

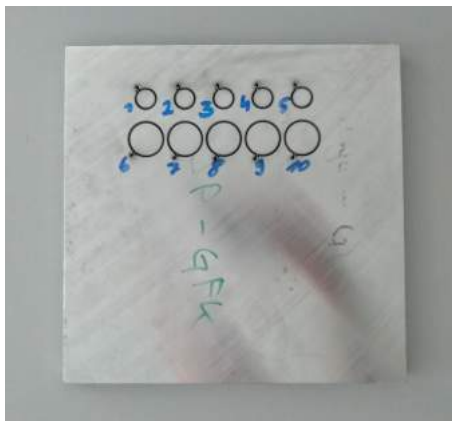
Aus Gründen der Zeitersparnis und zur Maximierung der Messdauer werden die bereits vorhandenen Proben mit den betreffenden Geometrien weiter im Wasserbad ausgelagert und gemessen. Parallel dazu werden weitere Proben gefertigt. Diese haben denselben Aufbau wie der erste Probensatz, jedoch befindet sich zwischen den Platten statt des Filmklebstoffes eine Schicht Prepreg-Material. Dabei handelt es sich um Fasern, welche bereits gelegt und in Matrix getränkt sind. Prepreg-Material wird mit einer Orientierung von  $0^\circ$  gelegt und den Fertigungsvorgaben entsprechend in beliebige Lagenausrichtungen zugeschnitten.

In der Luft- und Raumfahrttechnik wird üblicherweise *Kohlenstofffaserverbundwerkstoff* (**CFK**) verarbeitet, da die Kohlefasern eine hohe Zugfestigkeit besitzen. Jedoch sind sie elektrisch leitend, weswegen zunächst untersucht werden muss, ob der bisherige Aufbau des Feuchtigkeitssensors auch für CFK geeignet ist. Ein weiteres Faserverbundmaterial, welches häufig Anwendung findet, ist der *Glasfaserverbundwerkstoff* (**GFK**). Glasfasern haben eine geringere Zugfestigkeit als Kohlefasern und sind kostengünstiger; sie sind elektrisch nicht leitend.

Es werden zwei Platten gefertigt, um beide Faserverbundwerkstoffe zu untersuchen. Die Platten werden nach dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Vorgehen vorbereitet. Jedoch werden die Platten dieses Mal im Autoklaven ausgehärtet und nicht in der Presse. Dies hat den Vorteil, dass beide Platten gleichzeitig aushär-

ten können. In der Presse hätte zunächst sichergestellt werden müssen, dass beide Platten exakt die gleiche Dicke haben, um zu verhindern, dass eine Platte nicht vollständig gepresst wird. Die Platten bleiben vier Stunden bei  $130^{\circ}\text{C}$  im Autoklaven. Es wird ein Druck von  $3\text{ bar}$  aufgebracht und Vakuum gezogen.

Die Platte mit GFK-Schicht wird an ein fremdes Unternehmen geschickt, wo die groben Geometrien mittels Wasserstrahlschneiden ausgeschnitten werden (vgl. Abb. 4.1a). Die genauen Geometrien werden am DLR auf der Drehmaschine gefertigt.



(a) GFK-Platte



(b) GFK-Proben

Abb. 4.1: Fertigung des zweiten Probensatzes

Die fertiggestellten GFK-Proben sind in 4.1b zu sehen.

Während der Bearbeitung der Vollproben auf der Drehmaschine fiel auf, dass diese durch die spanende Bearbeitung so stark erhitzt werden, dass die Matrix des Prepreg weich wird. Durch die Einspannung der Proben in Längsrichtung werden diese zusammengedrückt; durch die seitliche Bearbeitung mit dem Drehmeißel kann es zudem zu einer leichten Biegung der Probe kommen.

## 4.2 Feuchtigkeitsaufnahme

Analog zur Voruntersuchung werden die GFK-Proben bei  $60^{\circ}\text{C}$  für acht Stunden rückgetrocknet. Nach Entnahme der Proben aus dem Ofen wird die Kapazität  $C_0$  dieser gemessen. Es wird von einem Feuchtigkeitsgehalt von  $0\%$  ausgegangen. Die Proben werden anschließend im Wasserbad ausgelagert.

Die Filmklebstoff-Proben verbleiben im Wasserbad. Aus den Betrachtungen in

den Abschnitten 3.3.2 und 3.3.3 geht hervor, dass eine Aufnahme von Masse und Länge der Proben nicht sinnvoll ist. Es wird daher nur die Kapazität der Proben gemessen. Wie in Abschnitt 3.3.4 beschrieben wurde, wurde die Kapazitätsmessung durch die Bildung einer Oxidschicht auf dem Aluminium stark beeinträchtigt. Um die Proben dennoch weiter verwenden zu können, wird auf jeder Probe nach dem Trocknen auf beiden Seiten der Klebschicht das Aluminiumoxid mittels Schleifvlies an einer Stelle entfernt (vgl. Abb. 4.2b).



(a) Oxidierte Probe



(b) Geschliffene Probe

Abb. 4.2: Behandlung oxidierter Proben vor der Messung

Die Messreihe aus Abschnitt 3.3 wird fortgeführt bis von Charge 3 nur noch eine Probe vorhanden ist. Die ausgefallenen und verbliebenen Proben sind in der nachfolgenden Abbildung gezeigt.

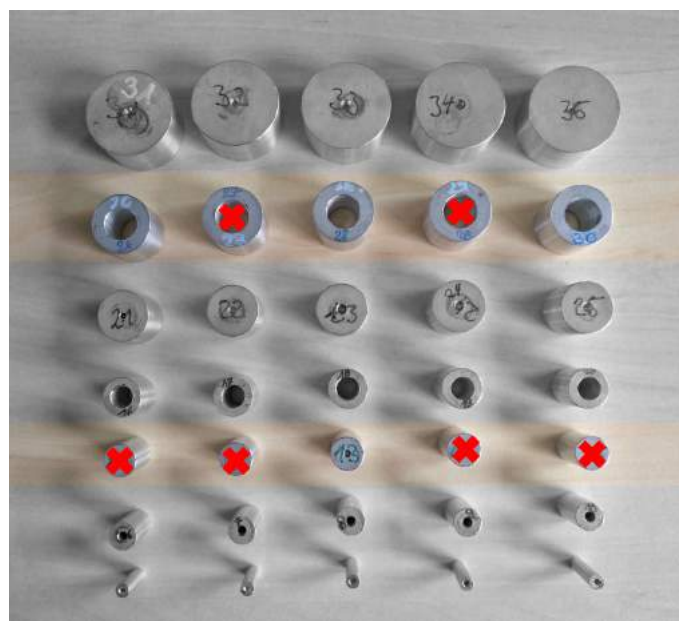


Abb. 4.3: Nach der Hauptuntersuchung zerbrochene Proben

In der Abbildung sind die Proben, welche während der Hauptuntersuchung zerbrochen sind, durch ein rotes Kreuz markiert. Die Probenchargen, welche nicht Teil der Hauptuntersuchung waren, sind ausgegraut.

Die Hauptuntersuchung wird an diesem Punkt abgebrochen, um die Probe später wiederverwenden zu können. Die Messreihe betrug so eine Dauer von siebenunddreißig Tagen. Die normierte Kapazität ist im nachfolgenden Diagramm dargestellt.

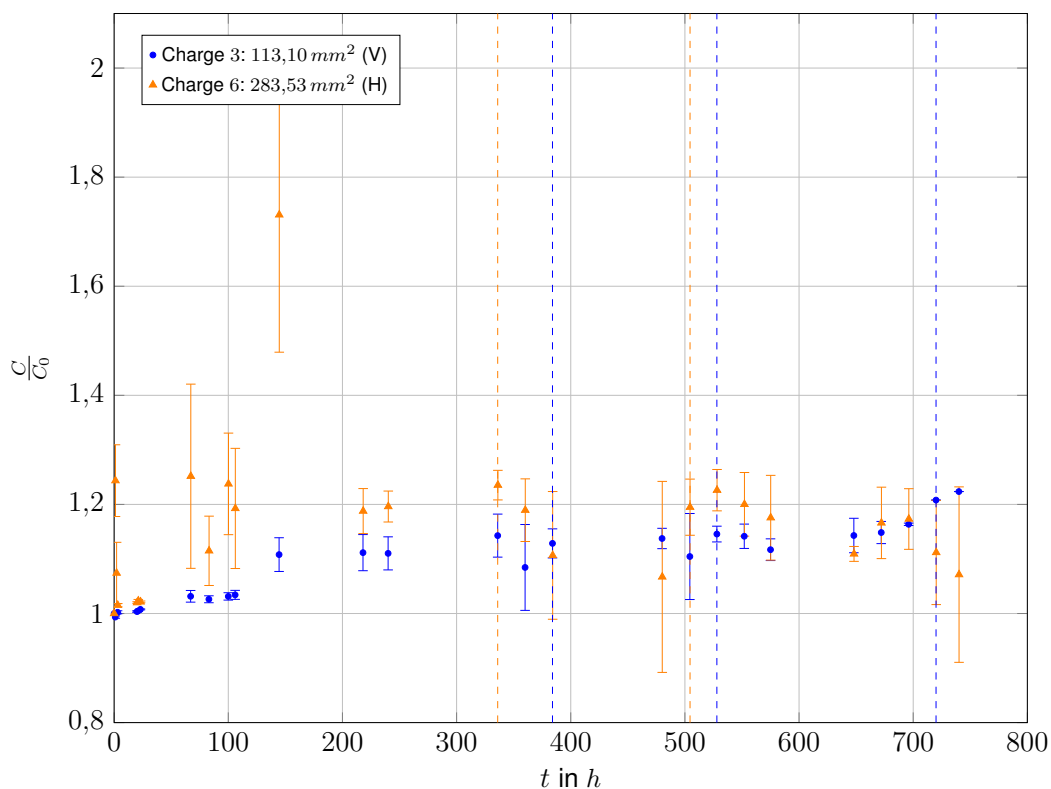


Abb. 4.4: Normierte und gemittelte Kapazität der Filmklebstoff-Proben über der Zeit

In der Literatur wird für die relative Permittivität von reinem Epoxidharz ein maximaler Anstieg von 25% aufgenommen[2]. Da es sich bei  $\epsilon_0$  um eine Konstante handelt und  $A$  und  $d$  ebenfalls als konstante Größen angenommen werden, kann der Anstieg von  $\epsilon_r$  auch aus dem Verlauf der normierten Kapazität abgelesen werden. Der genannte Wert von 25% findet sich im obigen Diagramm wieder.

Die vertikalen Linien markieren das Versagen von Proben. Die erste Probe versagt in Charge 6, jedoch weist diese zu Ende der Messreihe drei verbliebene Proben auf wohingegen aus Charge 3 nur eine Probe übrig bleibt.

Wie in Abbildung 3.17 zu sehen ist, findet Oxidation zwischen den Metallplatten und der Klebschicht statt, was zum Zerbrechen der Proben führt. Obwohl das



Oxid sich zwischen Metall und Filmklebstoff bildet und somit den Plattenabstand vergrößert, kann eine klar erkennbare Abnahme der Kapazität vor Auseinanderbrechen der Proben nicht definitiv festgestellt werden.

Die aufgenommenen Kapazitätswerte der GFK-Proben sind in dem nachfolgenden Diagramm dargestellt. Da die Proben erst nach Auswahl der optimalen Geometrie gefertigt werden konnten, ist die Dauer der Messwertaufnahme sehr viel kürzer als bei den Filmklebstoff-Proben. Dies hat auch zur Folge, dass keine Probe vor Ende der Messreihe versagt hat. Die Kapazität der vierten GFK-Hohlprobe wird von Beginn an nicht berücksichtigt, da sie einen negativen Anfangswert aufwies. Eine wahrheitsgetreue Normierung der weiteren Messwerte ist für diese Probe somit nicht möglich gewesen.

Vergleicht man die Diagramme 4.4 und 4.5 miteinander, so ist gut zu erkennen, dass die GFK-Proben einen sehr viel schnelleren Anstieg der Kapazität aufweisen als die Filmklebstoff-Proben. Auch hier fällt auf, dass die Kapazität der Hohlproben schneller ansteigt als bei den Vollproben.

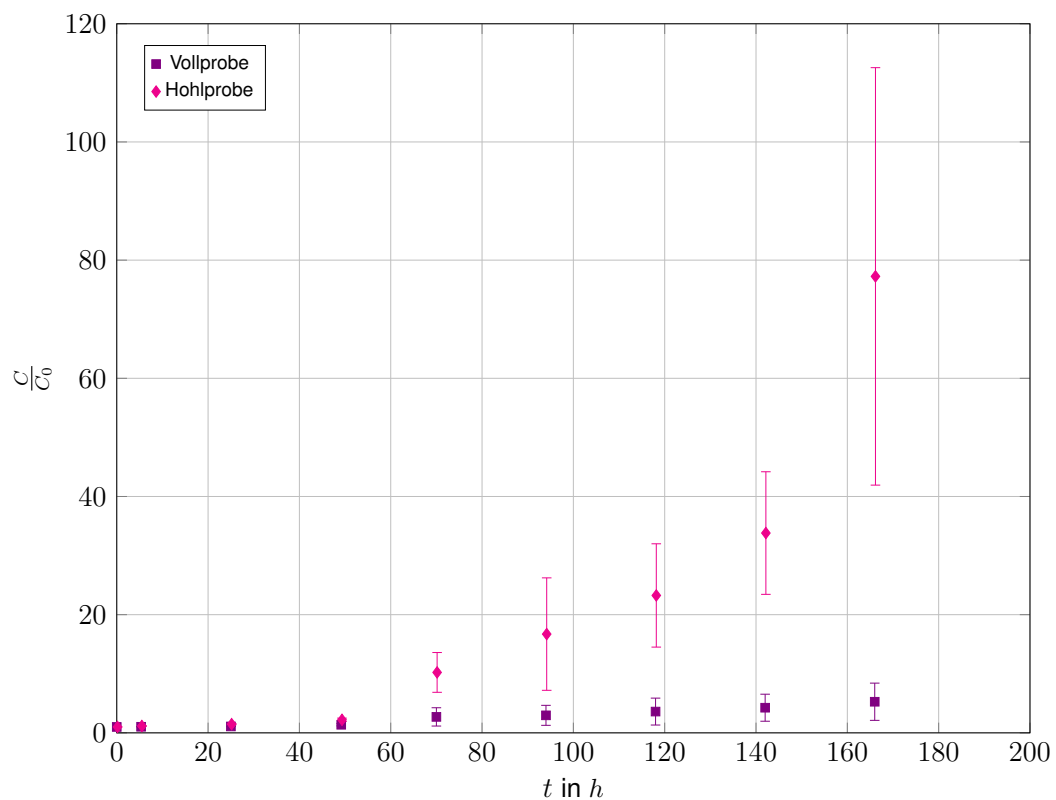


Abb. 4.5: Normierte und gemittelte Kapazität der GFK-Proben über der Zeit

Wie in Diagramm 4.5 gut zu sehen ist, weisen die Verläufe der GFK-Proben große

Schwankungen um ihr jeweiliges arithmetisches Mittel auf. Um dies weiter zu untersuchen sind nachfolgend die normierten Kapazitäten der einzelnen Proben dargestellt.

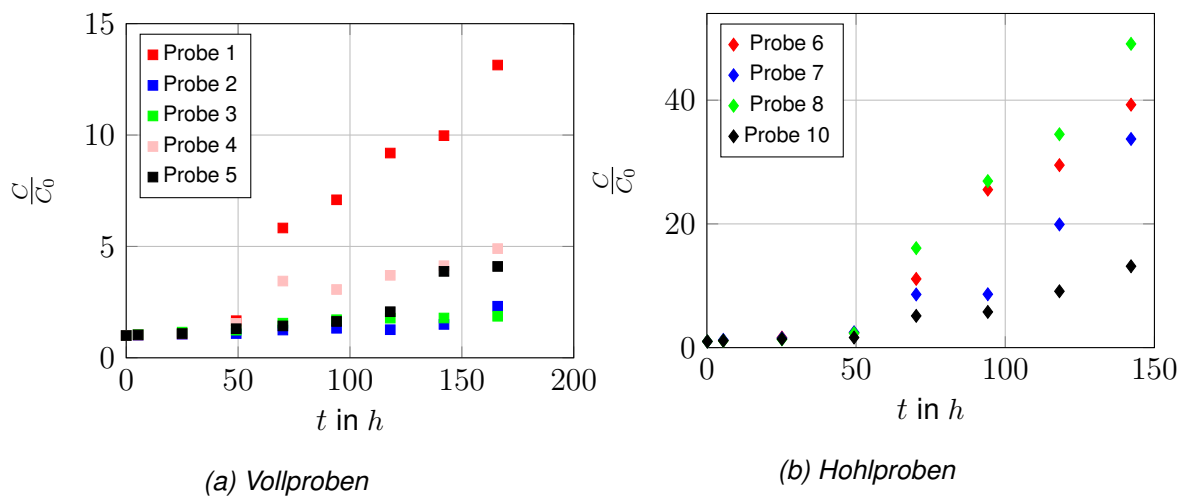


Abb. 4.6: Normierte Kapazität der einzelnen GFK-Proben

Wie aus den obigen Diagrammen hervorgeht, unterscheiden sich die einzelnen GFK-Proben einer Charge untereinander zum Teil enorm. Bis zu einer Zeit von ungefähr  $5\text{ h}$  verhalten sich die Proben sehr ähnlich, danach steigen die Kapazitäten sehr stark an und die Proben weisen hohe Abweichungen untereinander auf. Bei den Vollproben fällt besonders Probe 6 auf (vgl. 4.6a), während bei den Hohlproben Probe 10 abweichendes Verhalten aufweist (vgl. 4.6b). Durch die hohen Unterschiede der Messwerte zwischen den einzelnen Proben wird das arithmetische Mittel stark verzerrt, was eine hohe mittlere absolute Abweichung der Messwerte von diesem hervorruft.

Eine Einsicht der Messwerte zur besseren Übersicht und detaillierten Betrachtung ist in den Tabellen im Anhang möglich.

### 4.3 Sensor mit Kohlefasern

Um zu untersuchen, ob der bisherige Aufbau des Sensors auch für CFK geeignet ist, wird eine Platte mit CFK-Schicht analog zu den Schichten mit Filmklebstoff und GFK-Schicht gefertigt. Diese wird am DLR besäuml; anschließend wird ein Würfel der Kantenlänge  $2\text{ cm}$  aus der Platte ausgeschnitten. Mithilfe des LCR-Meters wird der Würfel auf sein kapazitives Verhalten untersucht (vgl. Abb. 4.7).



*Abb. 4.7: Messen des CFK-Würfels*

Wie im Bild gut zu sehen ist, zeigt das Messgerät einen negativen Kapazitätswert an. Die CFK-Schicht schafft demnach eine leitende Verbindung zwischen den zwei Metallplatten.

Um den Sensor auch für CFK verwenden zu können, müssen das CFK und die Leiteranordnung voneinander isoliert werden. Dies könnte bspw. durch Filmklebstoff, der sich zwischen CFK-Schicht und Metallplatte befindet, erreicht werden.

## 5 Ergebnisauswertung

Ziel ist, basierend auf den Ergebnissen aus der vorliegenden Arbeit einen Zusammenhang zwischen der relativen Permittivität und dem Feuchtegehalt des Dielektrikums herzustellen, um so auf den enthaltenen Anteil an Feuchtigkeit in einer Struktur schließen zu können. Die relative Permittivität kann mithilfe der Kapazität bestimmt werden.

Nachfolgend wird das Verhalten der relativen Permittivität mit zunehmender Zeit im Wasserbad untersucht und ausgewertet. Zum besseren Verständnis sind tabellarisch die durchgeführten Untersuchungen in chronologischer Reihenfolge aufgeführt:

	<i>Voruntersuchung</i>		<i>Hauptuntersuchung</i>		<i>Zusatzuntersuchung</i>		
	Rück-trocknung 1	Mess-reihe 1	Rück-trocknung 2	Mess-reihe 2	Rück-trocknung 3	Leitungs-wasser	VE-Wasser
Charge 1	x	x					
Charge 2	x	x					
Charge 3	x	x		x	x	x	
Charge 4	x	x					
Charge 5	x	x					
Charge 6	x	x		x	x	x	x
Charge 7	x	x					
GFK Voll			x	x			
GFK Hohl			x	x			

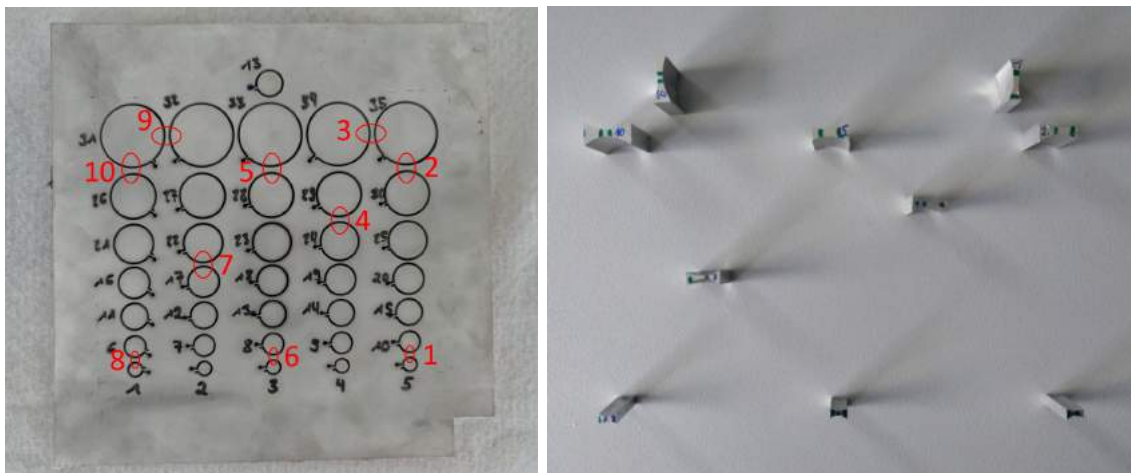
*Tab. 5.1: Durchgeführte Untersuchungen an den verschiedenen Probenotypen*

Für die Chargen 3 und 6 ging die erste Messreihe aus der Voruntersuchung nahtlos in die zweite Messreihe aus der Hauptuntersuchung über, weswegen sie nicht im Rahmen der Hauptuntersuchung rückgetrocknet wurden.

## 5.1 Filmklebstoffproben

Die relative Permittivität  $\epsilon_r$  wird mithilfe von Gleichung 3.2 bestimmt. In Abschnitt 3.3.3 wird so unter Verwendung der nominellen Klebschichtdicke von  $0,15\text{ mm}$  untersucht, welchen Einfluss ein Aufquellen der Klebschicht auf die gemessene Kapazität hätte. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Es werden für unterschiedliche Proben-Chargen unterschiedliche relative Permittivitäten berechnet. Das deutet darauf hin, dass entweder die Klebschichtdicke über die Platte variiert oder der Klebstoff über inhomogene Materialeigenschaften verfügt. Um dies zu untersuchen, werden Materialproben zwischen den Ausschnitten der Proben aus den Platten geschnitten.

In den nachfolgenden Bildern sind die Materialproben und deren Position auf der Platte mit einer Schicht Filmklebstoff zu sehen.



(a) Positionen der Materialproben

(b) Materialproben

Abb. 5.1: Untersuchung der Klebschichtdicke über der Platte

Die Proben werden an den Seiten feingeschliffen und anschließend unter dem Mikroskop betrachtet. Die Software, an die das Mikroskop gekoppelt ist, verfügt über eine optische Messvorrichtung. Nach Scharfstellen des Mikroskops können parallele Linien auf das Bild gelegt werden und der Abstand dieser gemessen werden. Nachfolgend ist die Methodik anhand von Materialprobe 3 dargestellt. Die Mikroskop-Aufnahmen der weiteren Proben befinden sich im Anhang.

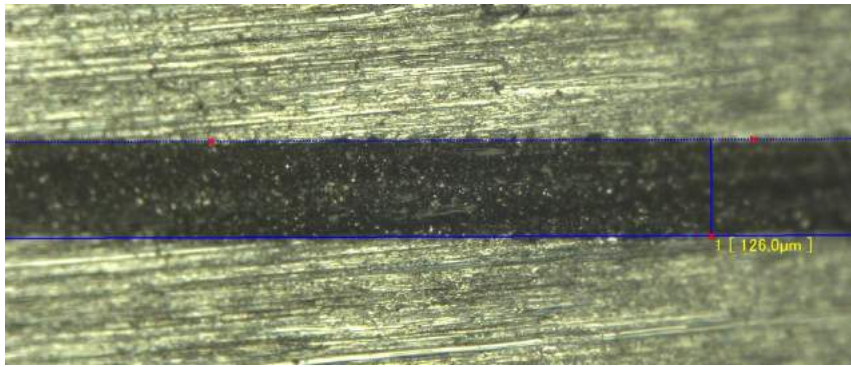


Abb. 5.2: Messen der Klebschichtdicke mithilfe des Mikroskops

Bei Untersuchung aller Proben kann beobachtet werden, dass die Klebschichtdicke über die Plattenfläche variiert. Grund dafür ist vermutlich eine ungleichmäßige Bearbeitung beim Sandstrahlen; diese lässt sich gut in Abbildung 3.4 erkennen. Es werden die folgenden Klebschichtdicken gemessen:

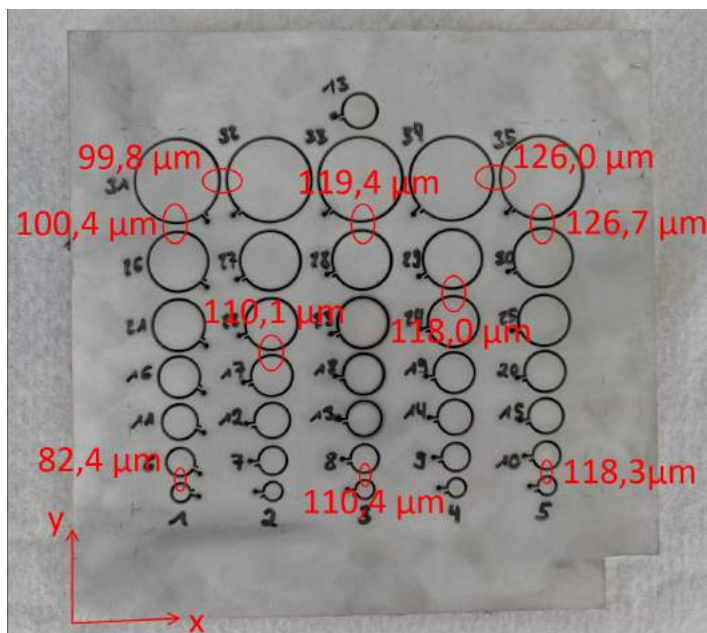


Abb. 5.3: Klebschichtdicke über der Plattenfläche

Die Klebschichtdicke variiert entlang der  $x$ - und  $y$ -Koordinate der Platte. Dies muss bei Berechnung der relativen Permittivität beachtet werden. Die Klebschichtdicke der Proben wird aus den Messwerten mittels linearer Interpolation ermittelt.

Mithilfe der aktualisierten Klebschichtdicken wird die relative Permittivität errechnet. Zur besseren Veranschaulichung der Messwerte, wird für beide Chargen jeweils eine Regressionslinie durch die Messwerte gelegt. Vorher werden die

Messwerte von Ausreißern bereinigt; es werden Messwerte entfernt, die nicht sinnvoll sind. Dies gilt für unrealistische Messwerte, die einen Anstieg weit über 25% im Vergleich zum Anfangswert aufweisen (vgl. Abschn. 4.2) und auf die ein wesentlich geringerer Wert folgt. Es werden zwei Messwerte von Charge 6 entfernt, die stark nach oben abweichen. Sie sind nicht sinnvoll, da die Kapazität besonders zu Anfang kontinuierlich steigt und nicht sinkt. Ausreißer, welche nicht in die Auswertung einbezogen wurden, sind farblich in den Tabellen im Anhang markiert.

Aus der Literatur ist bekannt, dass sich die relative Permittivität von Epoxidharzen bei Aufnahme von Feuchtigkeit asymptotisch an einen Höchstwert annähert (vgl. [2]). Der Anstieg von  $\epsilon_r$  ähnelt dabei einer logarithmischen Funktion. Die entsprechende Trendlinie wird bei *MS Excel* erstellt.

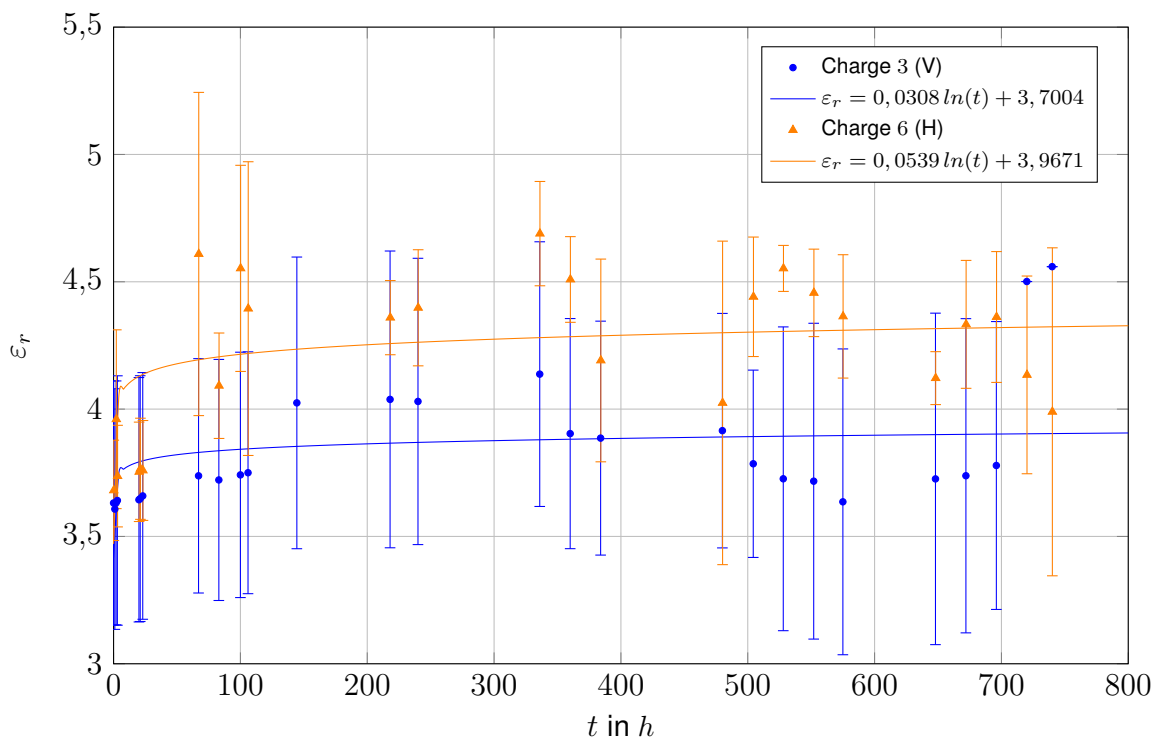


Abb. 5.4: Gemittelte relative Permittivität der Filmklebstoff-Proben über der Zeit mit Trendlinie

Anhand der Trendlinien ist erneut gut erkennbar, dass die Hohlproben schnell eine höhere relative Permittivität aufweisen als die Vollproben, obwohl beide bei einem  $\epsilon_r$ -Wert von ca. 3,6 starten. Eine halb-logarithmische Darstellung des Verlaufs, welche im Anhang gefunden werden kann, unterstreicht dies. Dieses Verhalten ist nicht verwunderlich, da die Hohlproben durch den größeren Außen-

durchmesser und die Bohrung eine größere Eindringfläche bieten, durch die Wasser in den Klebstoff diffundieren kann.

Die Trendlinien scheinen sich bereits bei Beginn der Messreihe an einen Grenzwert anzunähern. Als Referenz für die Zeit, die benötigt wird damit reines Epoxidharz einen Grenzwert erreicht, wird ein  $\epsilon_r$ -Verlauf aus der Literatur betrachtet:

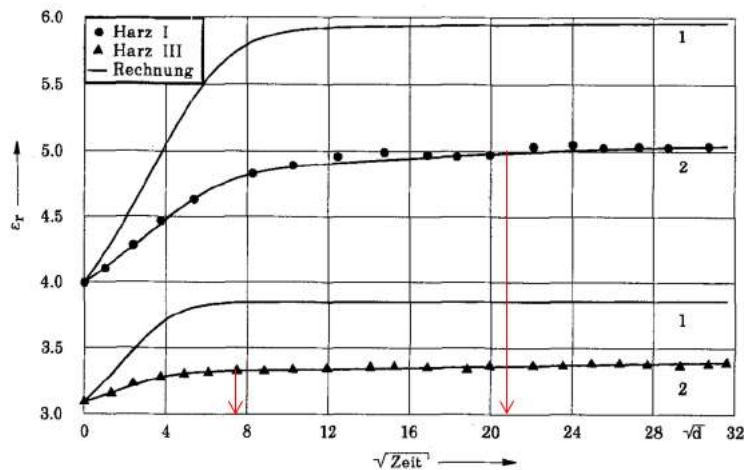


Abb. 5.5: Verlauf der relativen Permittivität von reinen Epoxidharzen über der Wurzel der Zeit mit eingezeichnetem Zeitpunkt der Grenzwertterreichung [2]

Wie in dem Bild zu sehen ist, erreichen die beiden Reinharze ihre  $\epsilon_r$ -Grenzwerte einmal nach ungefähr 49 Tagen und einmal nach ungefähr 441 Tagen. Unter Berücksichtigung, dass die für Abbildung 5.5 verwendeten Proben mit  $35\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  sehr viel größer waren als die, welche den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit zugrunde liegen, kann das schnelle Erreichen der relativen Grenzpermittivität als möglich angesehen werden. Ebenfalls fällt auf, dass der allgemeine Verlauf der Graphen in Diagramm 5.4 und Bild 5.5 sehr ähnlich ist:  $\epsilon_r$  steigt zunächst nahezu linear an und nähert sich dann einem Grenzwert. Auch dies weist darauf hin, dass der Grenzwert der relativen Permittivität der Proben während Durchführung der Messreihe erreicht wird.

Bei Betrachtung der Verläufe in Diagramm 5.4 fällt auf, dass sich die Trendlinien scheinbar zwei unterschiedlichen Grenzwerten annähern. Da beide Probenchargen jedoch über dasselbe Dielektrikum, den Filmklebstoff, verfügen, wird erwartet, dass sich die Trendlinien demselben Grenzwert annähern. Dies tun sie jedoch nicht. Grund dafür sind die starken Schwankungen der relativen Permittivität.

Diese Schwankungen ergeben sich dadurch, dass die relative Permittivität aus den Messwerten der Kapazität errechnet wird und diese sich innerhalb der Char-



gen zum Teil stark voneinander unterscheiden. Grund dafür ist mit hoher Wahrscheinlichkeit die Fertigung der Proben. In Abschnitt 4.1 wurde beschrieben, dass bei der Fertigung der kleineren GFK-Proben Probleme aufgrund zu hoher Hitze während der spanenden Bearbeitung Probleme mit der Harzmatrix auftraten. Auch wenn dies nicht bei der Fertigung der Filmklebstoff-Proben beobachtet werden konnte, so kann nicht ausgeschlossen werden, dass dieses Problem auch dort auftrat. Dies kann also Einfluss auf die Messwerte der Charge 3 gehabt haben. Weiterhin ist nicht gesichert, dass der Klebstoff über die gesamte Plattenfläche dieselben Materialeigenschaften aufgewiesen hat. Durch das Ausschneiden vergleichsweise kleiner Geometrien kann es daher sein, dass vereinzelt auftretende Inhomogenitäten in Form von Verunreinigungen oder Einschlüssen die Messergebnisse stark verfälschen.

Ein weiterer Grund für die Schwankung der Messwerte innerhalb einer Probencharge kann das Messgerät sein: Wie in Abschnitt 2.2 erläutert wurde kann die Kapazität nicht direkt, sondern nur indirekt über den Blindwiderstand  $X_C$  bestimmt werden. Um den Blindwiderstand bestimmen zu können wird eine Wechselspannung der Frequenz  $f$  durch das Messgerät an den Kondensator angelegt. Die Kapazität berechnet sich dann wie folgt (vgl. Abschn. 2.2):

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi f \cdot X_C} \quad (5.1)$$

Für eine Kapazität von  $33 \text{ pF}$ , was dem  $C_0$  zweier Proben aus Charge 12 entspricht, wird ein Blindwiderstand von  $48\,228,77 \Omega$  berechnet. Das verwendete Messgerät hat eine Genauigkeit von  $0,1\%$  [18]. So kann untersucht werden, welchen Einfluss eine maximale Schwankung der Wechselspannungsfrequenz auf die Kapazität hat:

$f$ in $\text{kHz}$	$C$ $\text{pF}$
99,9	33,033
100	33
100,1	32,967

*Tab. 5.2: Einfluss einer Frequenzschwankung des Messgeräts auf die angezeigte Kapazität*

Wie zu sehen ist ändert sich die Kapazität bei einer Frequenzschwankung von  $\pm 0,1 \text{ kHz}$  um etwa  $0,03 \text{ pF}$ . Dabei handelt es sich um sehr kleine Änderungen

der Kapazität, welche vernachlässigt werden können. Die Messschwertschwankungen innerhalb der Chargen sind demnach mit hoher Wahrscheinlichkeit Folge der Fertigung.

Die starke Schwankung um das arithmetische Mittel mindert die Aussagekraft der berechneten relativen Permittivitäten sowie der Trendlinien enorm. Die Daten sind außerdem aufgrund der auftretenden Probleme nicht reproduzierbar. Die Werte eignen sich nicht für eine anschließende Weiterverarbeitung.

## 5.2 GFK-Proben

Analog zu den Filmklebstoff-Proben wird auch für die GFK-Proben eine Untersuchung der Prepreg-Dicke vorgenommen. Dies ist bei den GFK-Proben besonders wichtig, da keine nominelle Dicke für das Prepreg-Material vorliegt. Es werden drei Materialproben aus den Zwischenräumen der wasserstrahlgeschnittenen Geometrien ausgesägt, feingeschliffen und unter dem Mikroskop betrachtet. Aufgrund der Glasfasern, welche teilweise aus der Prepreg-Schicht herausragen, ist die Prepreg-Schicht schwer zu erkennen und die Messung erweist sich als schwierig. Zwei der Proben ergeben denselben Wert von  $56 \mu\text{m}$  für die Schichtdicke. Der dritte Wert weicht mit  $40 \mu\text{m}$  davon ab und die Schichtdicke der betreffenden Proben wird durch lineare Interpolation ermittelt. Mithilfe der ermittelten Schichtdicken kann die relative Permittivität bestimmt werden.

Die zugehörigen Mikroskop-Aufnahmen befinden sich im Anhang.

In Abschnitt 4.1 wurde erwähnt, dass bei der Fertigung der GFK-Proben Probleme in Form einer starken Erhitzung der Vollproben bei der spanenden Bearbeitung auftraten. Dabei konnte beobachtet werden, dass die Proben durch die Einspannung weiter zusammengedrückt wurden. Die GFK-Schichtdicke wird analog zum vorherigen Abschnitt mithilfe von Ausschnitten der Stege zwischen den wasserstrahlgeschnittenen Geometrien bestimmt. Da die Proben jedoch danach spanend bearbeitet wurden, ist nicht gesichert, dass die ermittelten GFK-Schichtdicken denen der Proben entsprechen. Dies mindert die Aussagekraft der berechneten relativen Permittivität.

Der Verlauf der relativen Permittivität für die GFK-Proben ist nachfolgend dar-

gestellt. Auch für diese beiden Probensätze wurden Trendlinien erstellt.

Wie aufgrund der Beobachtungen aus Abschnitt 4.2 zu erwarten war, weist auch der  $\varepsilon_r$ -Verlauf der GFK-Proben starke Schwankungen auf.

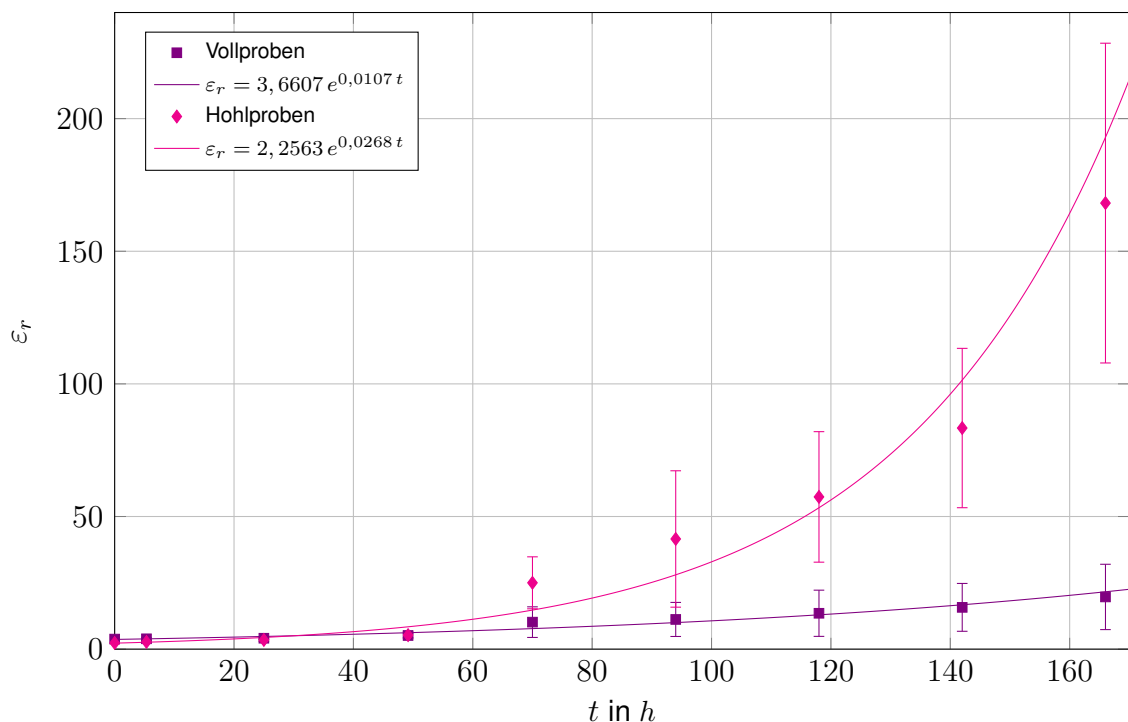


Abb. 5.6: Gemittelte relative Permittivität der GFK-Proben über der Zeit mit Trendlinie

Wie aus Diagramm 4.5 ersichtlich ist, ähnelt der Verlauf der Kapazitätsänderung für beide Geometrietypen eher einer Exponentialfunktion als einer Logarithmusfunktion. Dies spiegelt sich auch im Verlauf der relativen Permittivität wieder. Es wurden daher exponentielle Trendlinien an die berechneten  $\varepsilon_r$ -Werte angepasst. Auch diese Trendlinien wurden mit *MS Excel* erstellt.

Erneut weisen die verschiedenen Probentypen unterschiedliche Verläufe auf und auch hier steigt die relative Permittivität für die Hohlproben sehr viel schneller an als für die Vollproben. Anders als bei den Filmklebstoffproben ist jedoch für die GFK-Proben eine Annäherung an einen Grenzwert auf den ersten Blick nicht ersichtlich. Dies kann an der kürzeren Messdauer der zweiten Messreihe liegen oder aber materialspezifisch begründet sein.

Anders als bei den Filmklebstoff-Proben weisen die GFK-Proben zu Anfang einen gemäßigten  $\varepsilon_r$ -Verlauf an und steigen dann plötzlich sehr stark an. Diese Beobachtung deckt sich mit dem Verhalten von Reinharzen und glasfaserverstärkten Harzen, welches in der Literatur beschrieben wird (vgl. [2]): So wurde für Harze,

welche Glasfasern enthalten, zunächst ein mäßiger Anstieg gefolgt von einem sprungartigen Anstieg nach Überschreiten einer bestimmten Auslagerungszeit beobachtet. Nachfolgend ist der normierte Verlauf der relativen Permittivität von Glasfaserverbunden mit Epoxidharzmatrix über dem prozentualen Feuchtegehalt dargestellt.

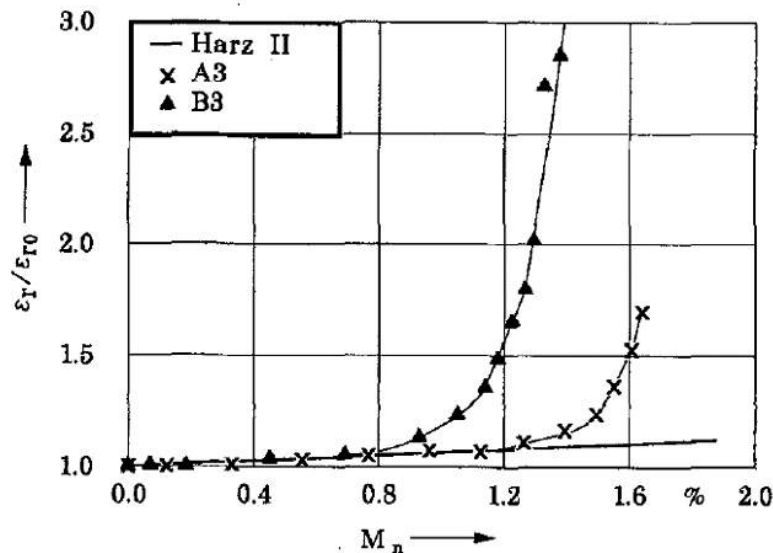


Abb. 5.7: Anstieg der relativen Permittivität von GFK über dem Feuchtegehalt [2]

Wie in Abbildung 5.7 gut zu sehen ist, steigt die relative Permittivität des GFK im Vergleich zum Reinharz sehr stark an; der Verlauf ähnelt einer Exponentialfunktion. Es kann eine Ähnlichkeit zwischen Diagramm 5.6 und dem Graph in Abbildung 5.7 erkannt werden, wenn in Betracht gezogen wird, dass aufgrund der geringen Menge an GFK in der Probe sehr früh ein hoher prozentualer Feuchtegehalt in der Faserverbundschicht erreicht werden kann. In beiden Fällen, dem experimentellen und dem aus der Literatur entnommenen, kann eine höhere Empfindlichkeit des GFK gegenüber Feuchtigkeit im Vergleich zum reinen Harz beobachtet werden. Schütz und Schultz führen dies auf die im Harz enthaltenen Fasern und die Phase zwischen den beiden Werkstoffen zurück. Als Effekte, die dort auftreten nennen Sie einen Anstieg der Leitfähigkeit durch Ausspülen von Ladungsträgern aus den Glasfasern und anschließende Grenzflächenpolarisation. Weiterhin fallen ihnen im Vergleich verschiedener GFK-Typen miteinander Unterschiede auf, welche sie auf die Schlichte, welche sich an den Fasern befindet, zurückführen. Dort vermuten sie chemische Reaktionen zwischen dem Harz

und der Schlichte, welche zu Ladungsträgern führen.[2]

Obwohl der Verlauf der relativen Permittivität wie er in Diagramm 5.6 dargestellt ist Verläufen aus der Literatur ähnelt (vgl. 5.7), so werden dennoch enorm hohe Werte erreicht, welche vermutlich unrealistisch sind. Als höchste errechnete relative Permittivität ergibt sich für die Hohlproben ein Wert von  $\varepsilon_r = 168,16$ , dies entspricht etwa 6600% des Anfangswerts  $\varepsilon_0 = 2,537$ . Im Gegensatz dazu kann aus dem Graph in Abbildung 5.7 als höchster Wert für einen Feuchtegehalt von 1,4% eine Zunahme der relativen Permittivität von ca. 250% beobachtet werden. Es ist zu vermuten, dass die Messungen einige Fehler aufweisen, insbesondere bei Betrachtung der Messwertschwankungen.

Die sehr hohen Messwerte sind vermutlich eine Folge der Auslagerung im Leitungswasser. Wie erwähnt wurde, führen Schütz und Schultz die starke Erhöhung der Kapazität auf eine Einlagerung von Ladungsträgern in der Zwischenphase des GFK zurück (vgl. [2]). Wie in Abschnitt 2 erläutert wurde, beschreibt die relative Permittivität das Verhalten des Dielektrikums bei Polarisierung durch ein äußeres elektrisches Feld. Wassermoleküle stellen elektrische Dipole dar, sie sind also polarisierbar [19]. Sammelt sich leitfähiges Wasser in einem Hohlraum zwischen Metall und Klebschicht so erhöht sich die Polarisierbarkeit der dielektrischen Schicht durch die Zunahme an elektrischen Dipolen, was wiederum die relative Permittivität erhöht [20]. Dies würde auch den Unterschied zwischen den Graphen in Diagramm 5.6 und Abbildung 5.7 erklären: Während die vorliegenden Messergebnisse Folge einer Auslagerung in leitfähigem Leitungswasser sind, wurden die Messergebnisse von Schütz und Schultz durch Auslagerung in nichtleitfähigem destilliertem Wasser erlangt (vgl. [2]). So ermöglicht eine Auslagerung im leitfähigem Medium eine größere Menge an eingelagerten Ladungsträgern im Dielektrikum und demnach auch eine höhere relative Permittivität.

Wie bereits in Abschnitt 4.2 aufgefallen ist, weisen die Messergebnisse der GFK-Proben sehr starke Schwankungen um das arithmetische Mittel auf. Diese sind noch höher als bei den Filmklebstoff-Proben und beeinträchtigen die Repräsentativität der Messwerte enorm. Es können lediglich allgemeine Aussagen über das Verhalten der GFK-Proben getroffen werden.

In Abschnitt 5.1 wurde als möglicher Grund für die Abweichung der Proben voneinander die Fertigung genannt. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben wurde, traten

bei der Fertigung der GFK-Proben Probleme aufgrund einer zu starken Erhitzung der Proben bei der spanenden Bearbeitung auf. So wurde beobachtet, dass die GFK-Schicht durch die Einspannung zusammengedrückt wurde. Weiterhin können die Proben aufgrund der seitlichen Bearbeitung durch den Drehmeißel eine Störung in ihrer Rotationssymmetrie aufweisen. Auch dies kann Einfluss auf die Messergebnisse der GFK-Proben haben.

Im Vergleich mit den Filmklebstoff-Proben weisen die GFK-Proben eine noch geringere Repräsentativität ihrer Messwerte auf. Aufgrund der Fertigungsfehler sind die generierten Ergebnisse zudem nicht reproduzierbar und eine weitere Verarbeitung der Daten ist nicht sinnvoll.

### 5.3 Zusatzuntersuchung

Um die Proben und ihr Verhalten weiter zu untersuchen werden die verbliebenen Filmklebstoff-Proben aus dem Wasserbad genommen und erneut im Ofen bei  $60^{\circ}C$  für acht Stunden rückgetrocknet. Es werden lediglich die Filmklebstoff-Proben verwendet, da diese über eine längere Zeit gemessen wurden. So können die GFK-Proben länger im Wasserbad bleiben.

Die Filmklebstoff-Proben werden im Anschluss an die dritte Rücktrocknung im Rahmen der Zusatzuntersuchung wie zu Beginn der ersten Messreihe (vgl. Abschnitt 3.3) gemessen. Theoretisch wird der anfängliche Kapazitätswert der Proben, also an Tag 0, für die Messung nach der dritten Rücktrocknung erwartet. Die gemessenen Werte nach der Rücktrocknung sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.  $C_{0,1}$  ist dabei die absolute Kapazität an Tag 0 nach der ersten Rücktrocknung und  $C_{0,3}$  ist die absolute Kapazität an Tag 40 nach der dritten Rücktrocknung.

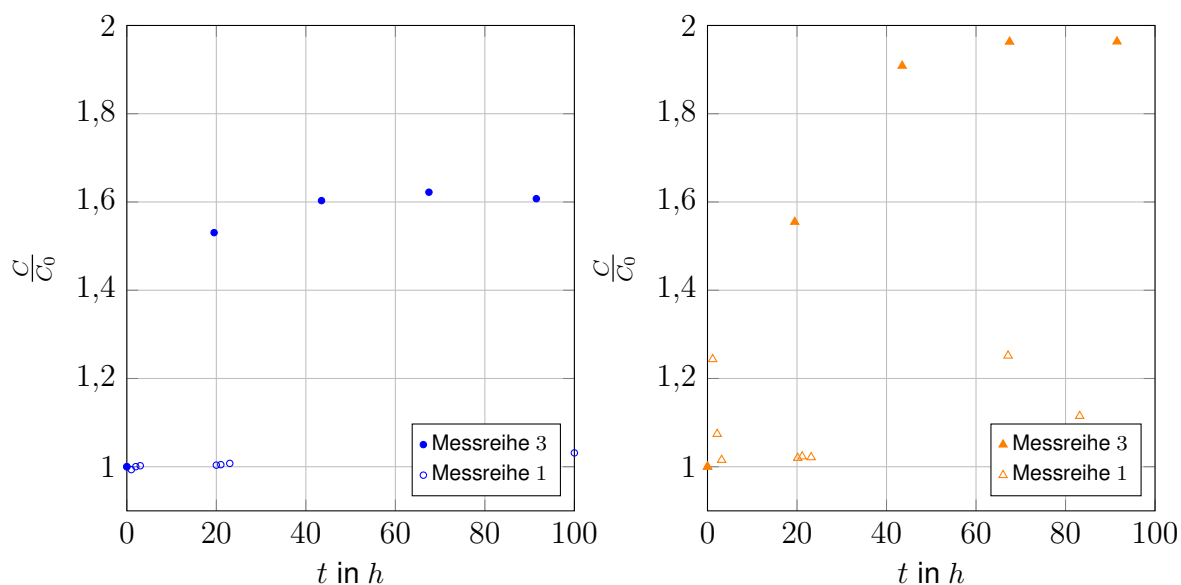
	$C_{0,1}$ in $pF$	$C_{0,1}$ in $pF$	$\frac{C_{0,3}}{C_{0,1}}$ in %
<b>Charge 3</b>	33,881	23,752	70,10
<b>Charge 6</b>	81,276	43,379	53,37

Tab. 5.3: Absolute Kapazitäten nach der dritten Rücktrocknung im Vergleich zu absoluten Kapazitäten nach der ersten Rücktrocknung

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, weicht die absolute Kapazität aller erneut rückgetrockneten Proben stark von den Werten nach der ersten Rücktrocknung ab. Als Grund für diese Abweichung von der Theorie wird die Lösung der Klebschicht aufgrund einer unzureichenden Verbindung zwischen dem Metall und dem Filmklebstoff sowie Oxidation vermutet. Dies kann zu einer Vergrößerung des Abstands zwischen den Metallplatten und somit einer Abnahme der Kapazität geführt haben. Eine Vergrößerung des Plattenabstands konnte bei der Längenmessung nicht beobachtet werden. Es wird vermutet, dass der Grund dafür ein Zusammendrücken des Spalts beim Einspannen in der Bügelmessschraube ist.

Im Anschluss an die trockene Messung werden die verbliebene Probe aus Charge 3 sowie eine Probe aus Charge 6 erneut in einem Wasserbad aus Leitungswasser ausgelagert. Nachfolgend sind die normierten Kapazitäten der beiden Proben dargestellt. Sie werden mit den normierten und gemittelten Kapazitäten ihrer Chargen zu Beginn der ersten Messreihe verglichen.

Die Kapazitäten werden alle auf den Anfangswert ihrer jeweiligen Messreihe normiert, d.h.  $\frac{C_1}{C_{0,1}}$  und  $\frac{C_3}{C_{0,3}}$ .



(a) Probe aus Charge 3 (V)

(b) Probe aus Charge 6 (H)

Abb. 5.8: Vergleich der Messergebnissen nach erster und nach dritter Rücktrocknung

Aus den obigen Diagrammen ist ersichtlich, dass die erneut rückgetrockneten Proben einen sehr viel schnelleren Anstieg der Kapazität aufweisen als zu Beginn der ersten Messreihe. Dies kann für beide Chargen beobachtet werden. Der

Unterschied zwischen den Messwerten nach dem ersten Rücktrocknen und denen nach dem dritten Rücktrocknen ergibt sich vermutlich aufgrund einer Ablösung der Klebschicht von den Metallplatten. So entstehen Hohlräume zwischen den Metallplatten, in welchen sich Wasser ansammeln kann, welches die relative Permittivität des Dielektrikums und so die Kapazität der Proben ändern kann. Anlass für die Vermutung, dass eine Ablösung stattfindet, gibt die hohe Anzahl an zerbrochenen Proben.

Basierend auf der Vermutung, dass sich Wasser zwischen den Metallplatten gesammelt hat und die relative Permittivität beeinflusst, können zwei Vermutungen zur Erhöhung von  $\epsilon_r$  gemacht werden: Wasser hat im Vergleich zu Epoxidharz eine zwanzigfach höhere relative Permittivität, was eine höhere absolute Kapazität erklären würde. Eine weitere Möglichkeit ist eine Erhöhung der relativen Permittivität durch eine erhöhte Polarisierung der dielektrischen Schicht aufgrund einer erhöhten Ansammlung an Ladungsträgern im Dielektrikum. Diese Vermutung wurde ebenfalls bereits bei Betrachtung der relativen Permittivität der GFK-Schicht im vorangegangenen Abschnitt geäußert.

Um die beiden genannten Vermutungen weiter zu untersuchen, werden die zwei verbliebenen rückgetrockneten Proben aus Charge 6 in einem Wasserbad mit *vollentsalztem (VE) Wasser* ausgelagert. VE-Wasser hat eine ähnlich hohe relative Permittivität wie Leitungswasser [21]. Ein Vergleich des Kapazitätsanstiegs der rückgetrockneten Proben in Leitungswasser mit dem in VE-Wasser ermöglicht demnach eine Aussage über den Einfluss der Leitfähigkeit des verwendeten Wassers.

Im nachfolgenden Diagramm sind die normierten und gemittelten Kapazitäten der rückgetrockneten Proben im Leitungswasser und im VE-Wasser gezeigt. Zusätzlich wird die normierte und gemittelte Kapazität der Proben zu Beginn der ersten Messreihe gezeigt. Es handelt sich bei allen Verläufen um Charge 6.



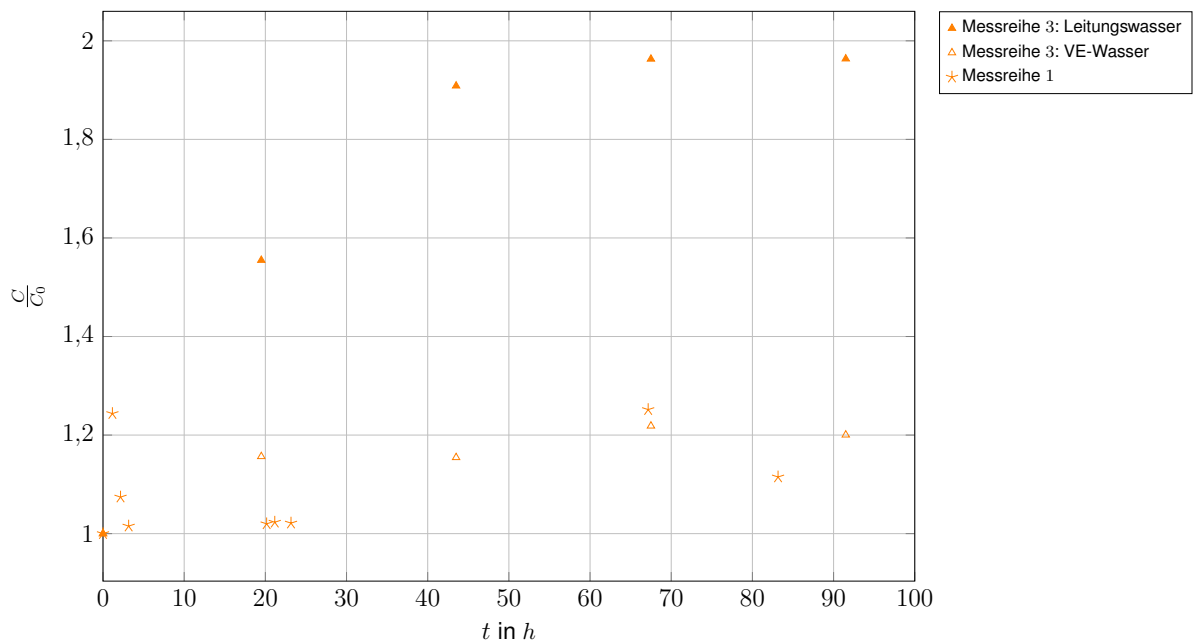


Abb. 5.9: Vergleich anhand von Charge 6: Verlauf der normierten Kapazität der rückgetrockneten Proben in Leitungswasser, VE-Wasser und zu Beginn der Messreihe

Wie im Diagramm zu sehen ist, liegt die normierte Kapazität der Probe im Leitungswasser deutlich über der der Proben im VE-Wasser. Dies deutet darauf hin, dass der starke Anstieg der Kapazität der rückgetrockneten Proben im Leitungswasser tatsächlich auf eine Polarisierung der Wassermoleküle zurückzuführen ist. Vergleicht man den Kapazitätsanstieg der Proben im VE-Wasser mit dem Verlauf zu Beginn der Messreihe, so fällt auf, dass dieser recht ähnlich ist.

Durch die hohe Anzahl an zerbrochenen Proben und Betrachtung der Bruchflächen besteht der begründete Verdacht, dass sich der Spalt zwischen den Metallplatten durch eine Ablösung der Klebschicht vom Metall und Bildung von Aluminiumoxid an dieser Stelle vergrößert hat. Diese Spaltbildung hätte eine Vergrößerung des Plattenabstands und somit eine Abnahme der Kapazität zur Folge. Jedoch wurde in Abschnitt 4.2 bereits festgestellt, dass eine starke Abnahme der Kapazität nicht beobachtet werden kann. Es wird daher vermutet, dass das Wasser, welches in den vermeintlichen Spalt gedrungen ist, den Kapazitätsabstieg durch seine hohe relative Permittivität ausgleicht.

Um diese Vermutung weiter zu untersuchen, wird exemplarisch betrachtet wie sich eine Probe bei einer Vergrößerung des Plattenabstands in drei verschiedenen Szenarien verhält: Im ersten Fall dringt Wasser in den entstandenen Spalt

ein, im zweiten befindet sich dort Luft und im dritten bildet sich kein Spalt, sondern die Dicke der Epoxidharzschicht nimmt zu. Die Kapazität der Kondensatoren mit Spalt wird mithilfe der Funktion zur Reihenschaltung von Kondensatoren berechnet [22]:

$$\frac{1}{C_{Ges}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (5.2)$$

Als relative Permittivität wird der zu Anfang dieses Abschnitts berechnete Wert von 3,6 verwendet. Die Berechnung wird für die Proben der Charge 6 durchgeführt, dies entspricht einer Plattenfläche von  $283,53 \text{ mm}^2$ , und der Startwert des Plattenabstands beträgt  $0,1 \text{ mm}$ . Der Plattenabstand wird kontinuierlich um  $1 \mu\text{m}$  geändert. Die Verläufe der drei Szenarien sind im nachfolgenden Diagramm gezeigt.

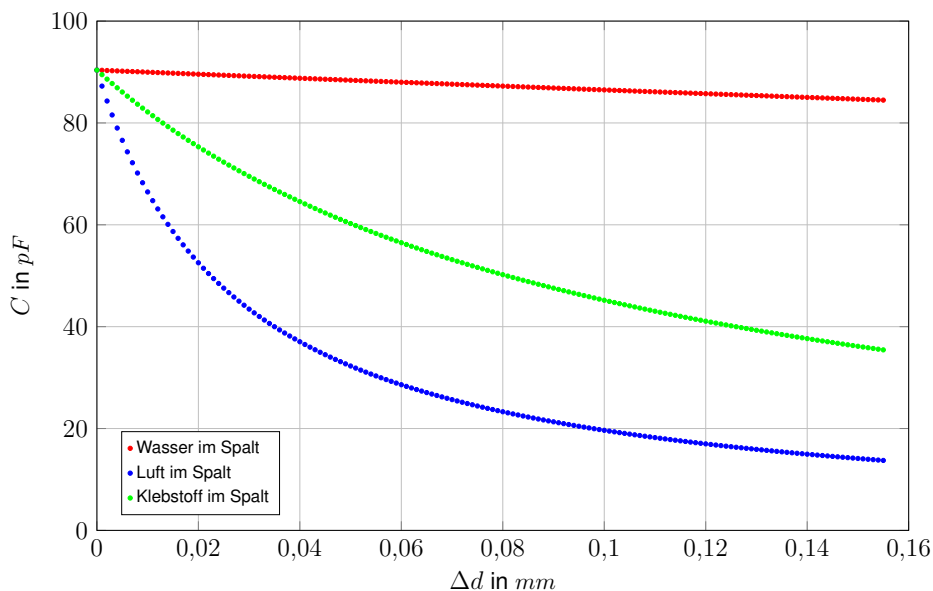


Abb. 5.10: Kapazitätsabnahme bei Spaltbildung mit Zuwachs von  $0,001 \text{ mm}$  bei unterschiedlichen Dielektrika

Wie gut zu sehen ist, hat Wasser im Spalt einen hohen Einfluss auf die Kapazität. Grund dafür ist dessen sehr viel höhere relative Permittivität im Vergleich zu Epoxidharz. Betrachtet man die Kurve für einen mit Luft gefüllten Spalt, so ist deutlich zu sehen, dass die Kapazität mit Vergrößerung des Spaltes stark abfällt. Betrachtet man die Kapazitätswerte der Proben nach der erneuten Rücktrocknung, so kann es durchaus sein, dass sich ein Spalt durch Ablösung der Klebschicht gebildet hat. Grund für diese Annahme bildet die geringe Kapazität, welche sich nach der zweiten Rücktrocknung ergibt und eine Folge von Luft zwischen den Metallplatten sein könnte.

Basierend auf den gemachten Erkenntnissen kann mit hoher Wahrscheinlichkeit gesagt werden, dass sich ein Spalt zwischen den Metallplatten und der Klebschicht gebildet hat. Diese Vermutung wird einerseits durch die zerbrochenen Proben gestärkt. Weiterhin würde sie den starken Abfall der Kapazität nach der dritten Rücktrocknung erklären (vgl. 5.3) und den darauffolgenden starken Anstieg der Kapazität (vgl. 5.8a und 5.8b). Zudem kann in Diagramm 5.9 der Unterschied zwischen Wasserbädern mit Leitungswasser und VE-Wasser gesehen werden. Der enorme Unterschied zwischen den rückgetrockneten Proben im Leitungswasser und denen im VE-Wasser weist auf eine hohe Konzentration von Wasser zwischen den Metallplatten hin, was ebenfalls die These einer Klebschichtablösung unterstützt.

## 5.4 Versuchsbewertung

Anhand der beiden Messreihen, eine für die Filmklebstoff-Proben und eine für die GFK-Proben, kann sehr gut der Unterschied zwischen Reinharz und faserverstärktem Harz gesehen werden. Besonders für die GFK-Proben ist ein deutlicher Anstieg der Kapazität zu sehen. Die Filmklebstoffproben weisen einen mäßigeren Verlauf auf; diese Beobachtungen können so in der Literatur wiedergefunden werden. Dort findet sich für reines Epoxidharz eine maximale Veränderung von etwa 25%, welche in den Messungen der vorliegenden Arbeit ebenfalls sichtbar ist (vgl. [2]). Ein Vergleich der Dauer bis zum Erreichen eines Grenzwertes zeigt, dass die Messdauer mit hoher Wahrscheinlichkeit für die Probengröße ausreichend ist und der Grenzwert tatsächlich erreicht wird.

Weiterhin war es möglich einen Näherungswert für die relative Permittivität des Filmklebstoffes zu bestimmen. Mithilfe dieses kann zukünftig über die Kapazitätsmessung die Klebschichtdicke bestimmt werden. Als Referenz für die relative Permittivität wird die Probe 29 ausgewählt. Dabei handelt es sich um eine Hohlprobe aus Charge 6. Für die Hohlproben wurden bei der Bearbeitung keine Probleme aufgrund zu hoher entstehender Hitze beobachtet. Es wird die Probe 29 ausgewählt, da diese aufgrund der Position der Proben zur Klebschichtdickenmessung mittels Mikroskop die höchste Genauigkeit bei der Klebschichtdickenbestimmung aufweist (vgl. Abb. 5.1a). Die Daten der Probe sind in der folgenden Tabelle gegeben.

Klebschichtdicke	0,120525 mm
Relative Permittivität	4,033

Die Verwendung dieser Werte empfiehlt sich jedoch nur für Abschätzungen. Obwohl die Probleme durch Erhitzung bei spanender Bearbeitung nur bei den GFK-Vollproben beobachtet werden konnten, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, dass ähnliche Probleme nicht auch bei sämtlichen weiteren Proben auftraten. Für einen sicheren Wert der relativen Permittivität des Filmklebstoffes sollten daher weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Zu beachten ist die Problematik der zerbrechenden Proben. Wie gut in Abbildung 3.17 zu sehen ist, hat sich auf den Bruchflächen vor dem Versagen der Proben Aluminiumoxid gebildet. Dies deutet stark auf eine Spaltbildung hin. Wie in Diagramm 5.10 gezeigt wurde, kann Wasser, welches sich in diesem Spalt befindet, eine Kapazitätsabnahme aufgrund der Plattenabstandsvergrößerung effektiv kassieren. Ein vermeintlicher Spalt kann mit bloßem Auge nicht entdeckt werden, demnach ist es auch nicht möglich Wasser, welches sich eventuell in diesem befindet, zu entfernen. Die generierten Messdaten können daher, insbesondere mit fortschreitender Zeit, nicht als repräsentativ gesehen werden.

Die vermeintliche Spaltbildung und das Auseinanderbrechen der Proben wird unter anderen auf eine unzureichende Verbindung zwischen dem Filmklebstoff und dem Metall zurückgeführt. Um die Klebverbindung zu verbessern und so die Gefahr einer Lösung zu verringern kann eine Vorbehandlung der Metalloberflächen vorgenommen werden. Dabei wird die Oberfläche in sogenanntem *So/Gel* getränkt, welches durch eine chemische Reaktion die Oberflächenrauigkeit der Platten vergrößert und so eine bessere Verbindung des Klebstoffs mit dem Metall ermöglicht. Die Oberflächenvorbehandlung konnte in der vorliegenden Arbeit aufgrund des stark eingeschränkten Zeitrahmens nicht durchgeführt werden.

Weitere Probleme traten während der Fertigung der GFK-Proben auf. Diese erhitzen stark bei der spanenden Bearbeitung an der Drehmaschine, wodurch die Harzmatrix wieder weich und eine Verformung der Proben möglich war. Eine Reproduzierung der Proben und ihrer Messergebnisse ist so nicht möglich. Auch wenn die Probleme erst bei der Fertigung des zweiten Probensatzes auffielen, so ist es möglich, dass sie auch schon unbemerkt bei der Fertigung des ersten Pro-

bensatzes auftraten. Einer Überhitzung der Proben bei der Fertigung kann durch den Einsatz geeigneter Kühlmittel vorgebeugt werden. Die Kühlung fand während der Fertigung nicht statt, da das DLR nicht über die nötige Anlage verfügte.

Zusätzlich zu den zerbrechenden Proben gab es Proben, welche aufgrund von Fehlern in der Fertigung unbrauchbar wurden oder wegen stark vom Mittel abweichender Messwerte für die Auswertung entfernt werden mussten. Dies mindert ebenfalls die Repräsentativität der gesammelten Messwerte.

Die Messungen erwiesen sich als sehr zeitaufwändig, da alle Proben einzelnen abgetrocknet und mit dem Schleifvlies nachbearbeitet werden mussten. Die Messung einer Probencharge dauerte dabei ungefähr zehn Minuten. Eine Automatisierung des Messvorgangs wäre hier von Vorteil. So wird einerseits der Arbeitsaufwand eingeschränkt und andererseits die Anzahl der Messwerte erhöht. Eine Automatisierung der Messung wäre in einem Wasserbad aus VE-Wasser möglich. Dort können Elektroden an den Proben angeschlossen werden, ohne dass ein Kurzschluss erzeugt wird. So bestünde auch die Möglichkeit die Chargengröße zu vergrößern. Weiterhin würde dem Effekt von Leitungswasser vorgebeugt werden.

Obwohl die Proben einen Trend zeigen, welcher sich mit den Beobachtungen aus der Literatur deckt, können die Daten aufgrund von mangelnder Repräsentativität nicht zur Entwicklung eines Sensors genutzt werden. Insbesondere das Zerbrechen der Proben hatte einen starken Einfluss auf die Qualität der Messergebnisse. Zudem wurde der Einfluss der Leitfähigkeit von Leitungswasser unterschätzt. Diesen Problemen kann durch die genannten Maßnahmen vorgebeugt werden. Mit Hinblick auf die Koppelung von relativer Permittivität und Feuchtegehalt sind außerdem höhere Anteile an Harz oder Faserverbund in den Proben zu empfehlen. Dies erlaubt eine Aufnahme der Massenänderung und gibt somit Aufschluss über die Menge an Wasser, welche in das Dielektrikum hinein diffundiert ist. Ein Feuchtigkeitssensor, welcher in der Praxis eingesetzt wird, wird niemals einem so hohen Maß an Feuchtigkeit ausgesetzt sein wie in einem Wasserbad mit 100% Feuchtigkeit. Dennoch ist das Wasserbad als Umgebung zur Quantifizierung des Sensors zu empfehlen, da dieser sich so in einer Umgebung mit definierter und fester Feuchtigkeit befindet.

## 6 Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Studienarbeit wurde ein Sensor zur Feuchtigkeitsmessung mittels kapazitivem Effekt quantifiziert. Ergebnis der Arbeit ist eine experimentelle Untersuchung des Sensors in Form eines Probenprogramms. Im Zuge der Arbeit wurden mehrere Arbeitsschritte absolviert. Die Voruntersuchung des Probenprogramms beinhaltete die Auswahl der grundlegenden Sensorgeometrie und Fertigung und Messung eines ersten Probensatzes unter Verwendung von Aluminiumplatten und Filmklebstoff auf Epoxidharzbasis. Die Proben wurden im Wasserbad ausgelagert und bei fortlaufender Zeit ihre elektrische Kapazität gemessen. Basierend auf den Messergebnissen der Voruntersuchung wurden zwei geeignete Sensorgeometrien ausgewählt. Anschließend wurde in der Hauptuntersuchung eine zweite Messreihe unter Verwendung der ausgewählten Proben durchgeführt, welche an die erste Messreihe anknüpfte. Zusätzlich wurden Proben aus Aluminium und Glasfaserverbund gefertigt, welche ebenfalls im Wasserbad ausgelagert und fortwährend gemessen wurden. Abschließend wurde ein Teil der Proben rückgetrocknet und auf sein anschließendes Verhalten untersucht.

Aufgrund ihrer starken Schwankungen können die aufgenommenen Messwerte nicht als repräsentativ gesehen werden; der Aufbau eines Sensors kann auf ihnen basierend nicht stattfinden. Es traten viele Probleme während der Messungen auf, welche durch Maßnahmen in der Fertigung und im Versuchsaufbau hätten vermieden werden können. Der Sensor in der Größe wie sie in der vorliegenden Arbeit untersucht wurde ist nicht reproduzierbar und zur Koppelung der relativen Permittivität mit dem Feuchtegehalt ungeeignet.

### 6.1 Ausblick und Verbesserungen

Für zukünftige Untersuchungen ist die Verwendung anderer Materialien und Fertigungsweisen aufgrund der genannten Problematiken in Betracht zu ziehen. Eine weitere Optimierung der Untersuchungen besteht in der Verwendung von VE-

Wasser für das Wasserbad. Durch die geringe Leitfähigkeit können so Elektroden im Wasserbad an die Proben angeschlossen werden, welche mit einem automatischen Messgerät verbunden sind. Dies würde den Arbeitsaufwand enorm verringern. Zur Erhöhung der Repräsentativität der Messdaten ist außerdem eine größere Chargengröße zu empfehlen.

Wie bereits erwähnt wurde, soll basierend auf der vorliegenden Arbeit ein Sachzusammenhang zwischen der relativen Permittivität und dem Feuchtegehalt von Epoxidharz beziehungsweise Faserverbunden mit Epoxidharzmatrix erstellt werden. Dies kann durch Erarbeitung der Gleichung für Diffusion von Wasser in Epoxidharz und Koppelung dieser mit dem Verlauf der relativen Permittivität über der Zeit erlangt werden. Zu diesem Zweck müssen jedoch die materialspezifischen Kenndaten des Harzes für die Diffusion ermittelt werden. Dies ist über eine Untersuchung der Gewichtszunahme durch diffundiertes Wasser möglich. Wie in Abschnitt 3.3.2 zu sehen ist, kann für die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Proben keine Gewichtszunahme beobachtet werden. Eine Vergrößerung des Harzanteils der Proben zur Bestimmung der Kenndaten ist daher zu empfehlen.





# Literaturverzeichnis

- [1] SCHOLLERER, Martin J.: *Beschreibung der Erfindungsmeldung - Feuchtigkeitsmessung* / DLR e.V. 2018. – Erfindungsmeldung
- [2] SCHÜTZ, SCHULTZ: Feuchtigkeitsaufnahme und Einfluss der Feuchtigkeit auf die dielektrischen Eigenschaften glasfaserverstärkter Kunststoffe. In: *Archiv für Elektrotechnik* 77 (1994)
- [3] SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT: *Dielektrizitätskonstante*. <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/dielektrizitaetskonstante/3040>, . – Zugriff: 12.06.2019, 11:02
- [4] CHEMIE.DE: *Permittivität*. [https://www.chemie.de/lexikon/Permittivit%C3%A4t.html#Relative\\_Permittivit.C3.A4t\\_ausgew.C3.A4hler\\_Materialien](https://www.chemie.de/lexikon/Permittivit%C3%A4t.html#Relative_Permittivit.C3.A4t_ausgew.C3.A4hler_Materialien), . – Zugriff: 21.06.2019, 09:44
- [5] CRANK, J.: *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, 1975
- [6] OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG, Chemisches Institut: Die Brownsche Molekularbewegung. Lehrstuhl für Physikalische Chemie,
- [7] PHYSIKALISCHE CHEMIE BY SCIFOX: *Wie schnell geht Stofftransport ohne Strömung? - Diffusion und Ficksche Gesetze*. <https://www.youtube.com/watch?v=plgZTNDEI2U>, . – Zugriff: 13.05.2019, 14:55
- [8] SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT: *Kapazität*. <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/kapazitaet/7773>, . – Zugriff: 14.05.2019, 16:07
- [9] SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT: *Kondensator*. <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/kondensator/8256>, . – Zugriff: 14.05.2019, 16:15
- [10] BÖGE, PLASSMANN ; FRIEDR. VIEWEG & SOHN VERLAG (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Elektronik*. Vieweg+Teubner, 2007
- [11] PERSCH, Christine: *Messung von Dielektrizitätskonstanten im Bereich von 0,2 bis 0,6 GHz und deren Bedeutung für die Mikrowellenerwärmung von Lebensmitteln*, Universität Fridericiana Karlsruhe, Doktorarbeit, 1997

- [12] KOCH, Maik: *Der Einfluss von Alterung und Materialeigenschaften auf dielektrische Messungen an Öl-Papier-Isolierungen* / Universität Stuttgart. 2008. – Forschungsbericht
- [13] KARANDIKAR, Deepa: *LCR Meter Working Principle and Uses*. <https://sciencestruck.com/lcr-meter-working-principle-uses>, . – Zugriff: 24.06.2019, 12:56
- [14] ELEKTRONIK KOMPENDIUM: *Kapazitiver Blindwiderstand*. <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/grd/1006231.htm>, . – Zugriff: 17.05.2019, 10:36
- [15] ACO AUTOMATION COMPONENTS JOHANNES MERGL E.K.: *MMS - Universeller Feuchtemesssensor*. <https://www.acoweb.de/produkte/feuchtesensor-mms>, . – Zugriff: 20.05.2019, 13:33
- [16] GANN MESS- U. REGELTECHNIK GMBH: *Hydromette Compact*. <https://www.gann.de/Produkte/ElektronischeFeuchtigkeitmessger%C3%A4te/CompactSerie/HydrometteCompact/tabid/59/language/de-DE/Default.aspx>, . – Zugriff: 20.05.2019, 13:44
- [17] CHEMIE.DE: *Epoxidharz*. <https://www.chemie.de/lexikon/Epoxidharz.html>, . – Zugriff: 12.07.2019, 18:02
- [18] B&L PRECISION CORPORATION: *878B, 879B, & 880 40,000 Count Dual Display Handheld LCR Meters Model 880*. <https://www.bkprecision.com/products/component-testers/880-dual-display-handheld-100khz-lcr-meter-with-esr.html>, . – Zugriff: 14.07.2019, 14:15
- [19] SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT: *Elektrischer Dipol*. <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/elektrischer-dipol/3947>, . – Zugriff: 09.07.2019, 23:17
- [20] COSMOS-INDIREKT.DE: *Permittivität*. <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Permittivit%C3%A4t>, . – Zugriff: 09.07.2019, 23:20

- [21] FORUM-SONDERMASCHINENBAU.DE: *Dielektrizitätszahlen verschiedener Werkstoffe.* <http://www.forum-sondermaschinenbau.de/seiten/Dielektrizitaetszahl.htm>, . – Zugriff: 14.07.2019, 15:57
- [22] ELEKTRONIK KOMPENDIUM: *Reihenschaltung von Kondensatoren.* <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/1006081.htm>, . – Zugriff: 09.07.2019, 23:36

# A Anhang

## Inhaltsverzeichnis

A.1	Life Data Sheet - Strukturelles Kleben . . . . .	60
A.2	Mikroskop-Aufnahmen der Klebschicht . . . . .	81
A.3	Halb-logarithmische Darstellung der relativen Permittivität der Filmklebstoff- Proben . . . . .	86
A.4	Mikroskop-Aufnahmen der GFK-Schicht . . . . .	87
A.5	Messungen der ersten Messreihe - Klebschicht . . . . .	89
A.6	Messungen der zweiten Messreihe und der Zusatzuntersuchung - Klebschicht . . . . .	93
A.7	Messungen der zweiten Messreihe - GFK-Schicht . . . . .	97

### A.1 Life Data Sheet - Strukturelles Kleben



# LDS- Life Data Sheet Strukturelles Kleben

## Q2- hohe Anforderungen

- Diese Akte ist am Bauteil mitzuführen -

Programm / Projekt: ECHO

# Thick Adherent Lap Shear Joint (TAST)

LDS Bezeichnung: TAST\_1

LDS Revisionsnummer: 1.0

Projektverantwortlicher: Schollerer

Bezeichnung Fügepartner:

Aluminiumplatten 2024- T351

Bezeichnung des geklebten Produkts:

Siehe LDS Bezeichnung

Kostenträger:

3012845

Datum Fertigungsbeginn: XXX

Datum Fertigungsende:

LDS erstellt durch:

Name: Martin Schollerer

Datum & Unterschrift:

Ausführung/Fertigung durch:

Name: Tobias Weidner

Unterschrift:

LDS geprüft durch:

Name: Dirk Holzhüter

Datum & Unterschrift:



DLR TAST – RT –0,1

Dok.-Nr.	LDS-TAST
Ausgabe	1.0
Datum	23.01.2018
Seite	2 von 20

## Mitgeltende Unterlagen:

- I. [MH-FA-43-AA01](#) Strukturen und Probekörper kleben
- II. [MH-FA-35-PB01](#) Arbeitssicherheit gewährleisten
- III. [MH-FA-34-PB03](#) Fehlerhafte Produkte lenken
- IV. [MH-FA-40-AA02](#) Material lagern
- V. [MH-FA-35-AA04](#) Regeln z. Arbeitsaufnahme in Laboren von FA-FVT
- VI. [MH-FA-35-AA08](#) Umgang mit reaktionskritischen Harzsystemen
- VII. [MH-FA-35-AA03](#) Allgemeine Laborregeln des Institutes FA

Dieses Dokument dient der Dokumentation einzelner Prozessschritte und als Arbeitsanweisung für strukturelles Kleben von TAST Proben.



# 1 Inhaltsverzeichnis

Mitgeltende Unterlagen: .....	3
1 Inhaltsverzeichnis .....	4
2 Fertigungsablauf .....	5
3 Allgemeine Informationen.....	6
3.1 Zweck und Geltungsbereich.....	6
3.2 Fertigungsrandbedingungen (Anforderungen).....	6
4 Verwendete Materialien.....	7
4.1 Verwendete Fügepartner .....	7
4.2 Verwendete Klebstoffe .....	7
4.3 Verwendete Hilfsstoffe und Hilfsmittel .....	7
5 Klebprozess.....	8
5.1 Prüfung der Klebstoffe .....	8
5.2 Prüfung der Fügepartner .....	8
5.3 Akklimatisierung der Fügeteile .....	9
5.4 Feuchtigkeitsmanagement.....	9
5.5 Oberflächenvorbereitung .....	9
5.6 Oberflächennachbehandlung .....	10
5.8 Klebprozess für Filmklebstoffe.....	10
5.8.1 Klebstoffvorbereitung (Auftauen) .....	10
5.8.2 Applikation.....	11
5.8.4 Fixieren .....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
5.8.5 Aushärten .....	12
5.9 Bauteilbezeichnung.....	13
6 Qualitätskontrolle .....	17
6.1 Sichtprüfung.....	17
6.2 Zerstörungsfreie Prüfung der Verklebung .....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
7 Abweichungen .....	18
8 Bauteilverbleib.....	19
9 Ablage und Archivierung .....	20



## 2 Fertigungsablauf

Die Fertigstellung der wesentlichen Teilschritte des Klebprozesses ist vom Ausführenden in Tabelle 1 abzuzeichnen:

Tabelle 1 Teilschritte zur Fertigung der Klebverbindung, Ausführende, Daten und Unterschriften

Nr.	Teilschritt	Ausführender	Datum	Erledigt
1	Vorbereitung von Komponenten, Material und Hilfsstoffe (5.1 -5.4)			
2	Komponentenvorbereitung (5.5- 5.6 )			
3	Ausführung Kleben ( 5.7)			
4	Bezeichnung und Beschriftung Fü-geprodukt (0)			
5	Qualitätssicherung (6)			
6	Dokumentation von Abweichungen (9)			
7	Angabe zu Bauteilverbleib (8)			

### 3 Allgemeine Informationen

#### 3.1 Zweck und Geltungsbereich

Diese Lebenslaufakte (LDS) beinhaltet die Anweisungen für die Abwicklung, Umsetzung und Prüfung struktureller Klebverbindungen zwischen Faserverbundbauteilen bzw. Metallen. Die gefertigten TAST Proben dienen zur Materialkennwertermittlung des Klebstoffes.

#### 3.2 Fertigungsrandbedingungen (Anforderungen)

Zusätzlich zu den Allgemeinen Laborregeln des Instituts ist folgendes zu beachten:

Für die Ausführung von Klebungen ist eine entsprechende Einweisung notwendig, in welcher der Ausführende bezüglich sensibler Prozessschritte informiert wird.

Für die Fertigungsumgebung im Allgemeinen gilt:

- Die Klimabedingungen gemäß Abbildung 3-1-Q2 sind einzuhalten.
- Es dürfen keine silikonhaltigen Substanzen, Öle und Trennmittel, insbesondere Aerosole, verwendet werden.
- Staubbelastungen (z.B. durch Schleifarbeiten) sind zu minimieren.
- Essen, Trinken und Rauchen ist nicht gestattet.

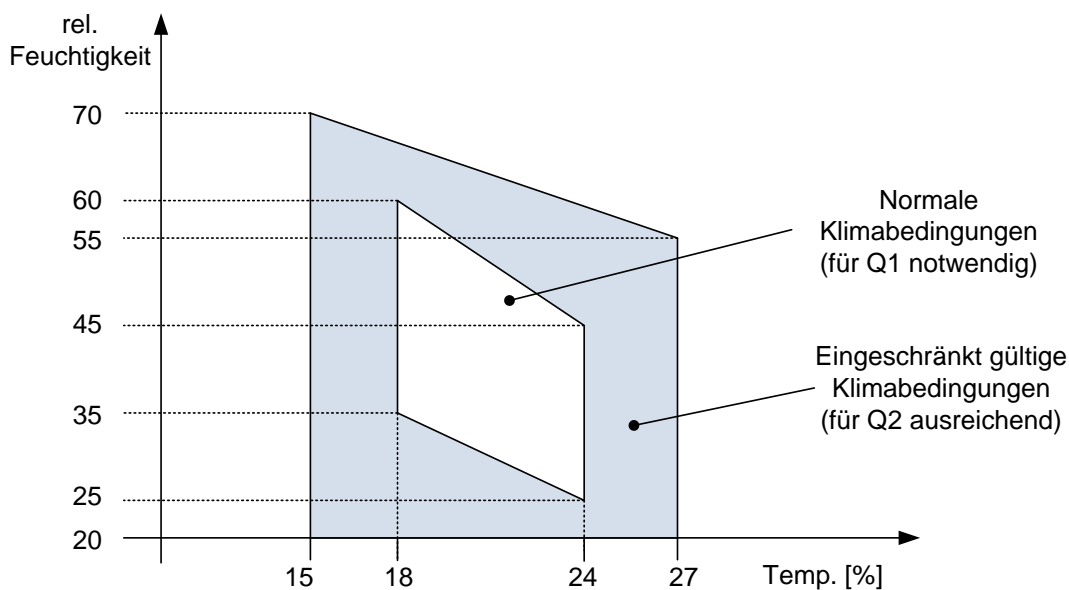


Abbildung 3-1: Erlaubte Klimabedingungen bei Klebarbeiten der Stufe Q1 und Q2

Alle verwendeten Werkzeuge müssen den Anforderungen aus (I – Arbeitsanweisung strukturelles Kleben) entsprechen.

## 4 Verwendete Materialien

Es sind ausschließlich die durch die Arbeitsanweisung oder durch den Bauteilverantwortlichen freigegebene Hilfsstoffe und Hilfsmittel zu verwenden.

### 4.1 Verwendete Fügepartner

Nr.:	Bezeichnung	Ggf. Hersteller	LDS - Bezeichnung/ Seriennummer	Ggf. Globale Abmessungen
1	Aluminiumplatte	Kann abweichen 2024 T351		250x250 mm t=10mm

### 4.2 Verwendete Klebstoffe

Alle bei der Klebung verwendeten Klebstoffe sind aufzulisten.

Nr.:	Bezeichnung	Hersteller	Sonstiges
1	EA 9695	Henkel	Filmklebstoff

### 4.3 Verwendete Hilfsstoffe und Hilfsmittel

Es sind nur Hilfsstoffe zulässig die in (I – Arbeitsanweisung strukturelles Kleben) gelistet oder von dem LDS-Ersteller freigegeben sind.

Nr.:	Hersteller / Bezeichnung	Typ / Funktion	Bemerkung
1	Aceton	Reinigung	
2	Isopropanol	Reinigung	
3	Sandstrahlanlage Kleblabor Edelkorund F180	Oberflächenvorbehandlung Metall	
4			

## 5 Klebprozess

Teilschritte des Klebprozesses sind nach Vorgabe zusätzlich mit Fotos zu dokumentieren.

### 5.1 Prüfung der Klebstoffe

Folgende Arbeitsschritte sind durchzuführen:

- 1) Prüfung der Verpackung auf Beschädigung
- 2) Prüfung des Klebstoffs auf Identität

Identifikation des Klebstoffs					
Nr.	Materialbezeichnung	Hersteller	Batch- / Rollen Nr.:	Haltbarkeitsdatum	Resthaltbarkeit bei RT
1	EA9695	Henkel	JH6DAA4580	10.04.2017	

Prüfung gemäß Vorgabe erfolgt:			
Datum:	Uhrzeit:	Name:	Unterschrift

### 5.2 Prüfung der Fügepartner

Die Fügepartner müssen auf Identität, Verwendbarkeit, Beschädigungen / Abweichungen kontrolliert werden. Im Zweifelsfall ist der LDS Ersteller zu kontaktieren

Identifikation der Fügepartner			
Nr.	Bezeichnung	I.O.	Auffälligkeiten
1	Platte A		
2	Platte B		



Prüfung gemäß Vorgabe erfolgt:			
Datum:	Uhrzeit:	Name:	Unterschrift

### 5.3 Akklimatisierung der Fügeteile

Die Fügeteile sind vor dem Klebprozess zu Akklimatisieren, dies ist in (I – Arbeitsanweisung strukturelles Kleben) beschrieben. Vor der Verarbeitung müssen die Platten Raumtemperatur besitzen.

Akklimatisierung der Fügeteile nach Vorgabe durchgeführt:			
Datum:	Uhrzeit:	Name:	Unterschrift

### 5.4 Feuchtigkeitsmanagement

Da die Platten aus Aluminium, findet keine Feuchtigkeitsaufnahme statt.

### 5.5 Oberflächenvorbereitung

#### 5.5.1 Platten QS

Zu aller erst müssen die Platten auf Ebenheit geprüft werden.

Dazu auf einen Tisch legen. Es darf kein erkennbarer Spalt zwischen Tisch und Platte zu erkennen sein.

Die Platten mit einem Ceranfeldschaber von Kleberückständen und grober Verschmutzung befreien.

#### 5.5.2 Platten entfetten

Die Platten sind mit ölhaltigen Herstellungsrückständen kontaminiert. Schmutzpartikel mit Papiertüchern mit Aceton und dann mit Isopropanol entfernen.

Bei Bedarf Vorgang wiederholen.

#### 5.5.3 Oberfläche sandstrahlen

Anschließend zu verklebende Oberflächen sandstrahlen. Sandstahlanlage „Kleblabor“ mit Edelkorund F180 ist zu verwenden.

Strahlparameter:

- Anlagendruck: 4bar



- Strahlwinkel: 45°
- Abstand: 10 cm
- Strahlzeit max. 30 s/gleiche Fläche

Nach dem Sandstrahlprozess auf gleichmäßiges Strahlbild der Oberfläche achten, bei Bedarf nacharbeiten.

### 5.5.4 Platten spülen

Nach dem Sandstrahlen haften feinste Korundkörner an der Probe. Diese müssen vollständig entfernt werden. Die Oberfläche in einem separaten Aceton und Isopropanolbad unter dem Abzug spülen und mit Pinsel leicht abstreifen. Kein Nachwischen der gestrahlten Oberfläche mit Tüchern. Die Durchführung der Punkte aus Kapitel 5.5. werden in folgender Tabelle bestätigt. Die ungestrahlte Plattenseiten sind mit einem permanenten Marker mit Zahlen zu versehen:

Nr.	Bauteil	Uhrzeit	Datum
1	Plattenseite A		
2	Plattenseite B		

## 5.6 Oberflächennachbehandlung

Eine Nachbehandlung entfällt. Alle Proben einer Charge müssen in einem Fertigungsgang vorbereitet, gereinigt und verklebt werden.

## 5.7 Klebprozess für Filmklebstoffe

### 5.7.1 Klebstoffvorbereitung (Auftauen)

Materialbereitstellung:

Der Filmklebstoff ist vor der Verklebung aus dem Gefrierraum zu entnehmen und darf erst nach Akklimatisierung auf Raumtemperatur geöffnet werden. Bei Rollenware wird eine Auftauzeit von 24h empfohlen, Zuschnitte einige Stunden.

Entnahme des Klebfilms aus der Kühlzelle:			
Datum:	Uhrzeit	Name	Unterschrift



**Entnahme des Klebfilms aus der Verpackung:**

Datum:	Uhrzeit	Name	Unterschrift

**Materialzuschnitt:**

Zuschnitte sind nach dem folgenden Zuschnittplan zu erstellen. Jeder Zuschnitt ist mit seiner jeweiligen Bezeichnung zu versehen. Die Kennzeichnung erfolgt auf Seite der Schutzfolie.

Bei CNC Cutter Zuschnitt sollte die Datei mit archiviert werden.

**Zuschnittplan**

Bezeichnung	Abmessungen	Zuschnitt erfolgt
Quadrat	250 x 250 mm	

Die Klimabedingungen sind zu Beginn der Arbeiten in folgendem Feld einzutragen und auf Konformität zu prüfen:

**Klimabedingungen zu Beginn der Zuschnitt-Arbeiten:**

Datum:	Uhrzeit	Name	Unterschrift

**5.7.2 Applikation in Leichtbaumontagelabor**

- Auf Platte A den Klebstoff positionieren und mit Roller andrücken.
- Zweite Schutzfolie abziehen und Platte B positionieren. Auf gleichmäßige Ausrichtung der Walzrichtung achten.
- Mit Vakuumaufbau  $\Delta p = 1 \text{ bar}$  min. 1h kompaktieren
- Beide Platten in Trennfolie einschlagen und seitlich, mittig mit Thermosensoren bekleben. Als Unterlage eignet sich ein Edelstahlblech. Wichtig, es dürfen keine Unebenheiten auf Ober- und Unterseite sein.
- 

Direkter (ungeschützter) Kontakt zum Klebstoff ist zu vermeiden. Es sind Schutzhandschuhe zu tragen.

**Klebstoff appliziert und Bauteile gefügt**

Datum:	Uhrzeit	Name	Unterschrift

Foto angefertigt:

### 5.7.3 Aushärten

Programm Nr.: EA9695\_TAST  
 Härtezyklus: EA9695

Zyklusbeschreibung:

1. Aufheizen auf 130°C in 43, min Vakuum an
2. Halten auf 130°C in 150 min, Vakuum aus
3. Abkühlen auf 50°C in 30 min

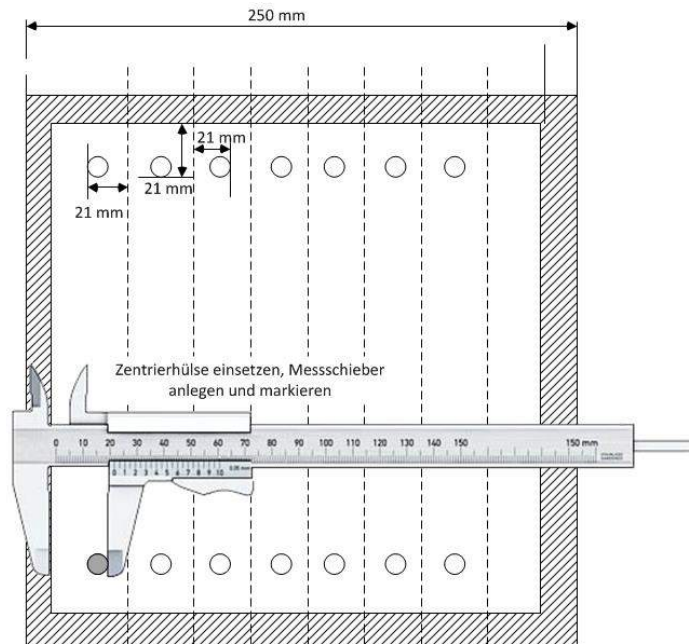
<b>Programm geprüft</b>			
Datum:	Uhrzeit	Name	Unterschrift
<b>Datensatz ist abgespeichert unter folgenden Namen:</b>			
<b>EA9695_TAST_(Nummer)</b>			



## 5.8 Fertigen der Couponproben

Die Verklebte Platte wird grob von ausgelaufenem Klebstoff gereinigt und weiterbearbeitet.

1. Auf PASO spannen und **Programm Bohrungen** fräsen. Die Proben müssen in Walzrichtung ausgerichtet sein.
2. Nach Sägeschablone grob in Streifen schneiden. Zwischen den grob markierten Bereichen sollte etwa 4-6 mm Abstand sein.



3. Gesägte Rohlinge auf die Fügevorrichtung schrauben. Dazu die Zentrierhülsen einsetzen und mit Schrauben handfest anziehen. Auf Saubere Oberflächen achten. Fräsvorrichtung vorher auf Tisch ausrichten. Kurze Seite darf 1/100mm Spiel besitzen.



4. **Programm Konturfräsen** ausführen

5. **Programm Nutenfräsen** ausführen



6. Proben umdrehen und wieder **Programm Nutenfräsen** ausführen, untere Nut darf nicht wieder an der **roten** Markierung liegen



7. Proben müssten wie in Abbildung oben aussehen.
8. Proben demontieren, Fügevorrichtung reinigen und Probe nach folgender Abbildung in Tasche positionieren und mit Schrauben handfest anziehen. Zum Schutz der Probe kleine Pappstückchen zwischen Schraube und Probe positionieren.



9. Programm Senken ausführen
10. Fertige Proben leicht entgraten (nicht an Überlappungsstelle!)
11. Proben müssten wie folgt aussehen:



### 5.9 Bauteilbezeichnung

Die gefügten Bauteile sind mit folgender Bezeichnung am DLR mit Labelmaschine zu versehen. Die Proben müssen seitlich, ca 30 mm von den Enden entfernt, Beschriftet werden. Der Überlappungsbe- reich muss frei sein.

Bau- teil Nr.	Bezeichnung	Unterschrift
1	ECHO_TAST_TEN_RT_0,1_1	



2	ECHO_TAST_TEN_RT_0,1_2	
3	ECHO_TAST_TEN_RT_0,1_3	
4	ECHO_TAST_TEN_RT_0,1_4	
5	ECHO_TAST_TEN_RT_0,1_5	
6	ECHO_TAST_TEN_RT_0,1_6	
7	ECHO_TAST_TEN_RT_0,1_7	

## 6 Qualitätskontrolle

In diesem Abschnitt werden die erforderlichen Qualitätssicherungsmaßnahmen für das Bauteil dokumentiert. Alle Prozessschritte müssen in den dafür vorgesehenen Spalten dokumentiert und abgezeichnet werden

### 6.1 Sichtprüfung

Das gesamte Bauteil ist einer Sichtprüfung zu unterziehen. Hierbei ist das Bauteil auf Fehlstellen wie Klebstoffanreicherungen u.ä. zu Prüfen. Auffälligkeiten sind nach Ermessen zu dokumentieren. Bei festgestellten Abweichungen ist der LDS Ersteller über die Abweichungen zu informieren

<b>Die Sichtprüfung wurde nach Vorgabe geprüft:</b>		
<b>Datum:</b>	<b>Name</b>	<b>Unterschrift</b>
<b>Festgestellte Mängel:</b>		

Foto angefertigt:

## 7 Abweichungen

Abweichungen von den LDS Vorgaben sind zu hier zu dokumentieren. D

Dazu zählen:

- Abweichungen der Fügepartner (z.B. geometrische Abweichungen)
- Abweichungen der Klebstoffqualität (z.B. Verfärbungen, Verschmutzungen, fehlerhafte Lagerung)
- Prozessabweichungen (z.B. beim Mischen, beim Klebstoffauftrag, im Aushärteprozess)
- Fehlstellen im Klebspalt (z.B. Poren, Fremdeinschlüssen, Ablösungen)
- Klebgeometrieabweichungen (z.B. Klebstoffaustritt, Klebspaltdicke)

Über die Abweichungen ist der LDS Ersteller zu informieren.

<b>Festgestellte Abweichungen</b>		
Ereignis:	Name:	Unterschrift

<b>Abweichungen sind protokolliert / LDS Ersteller wurde informiert.</b>			
Datum:	Uhrzeit	Name	Unterschrift

Foto angefertigt:

## 8 Bauteilverbleib

Die Proben werden dem LDS Ersteller übergeben

.

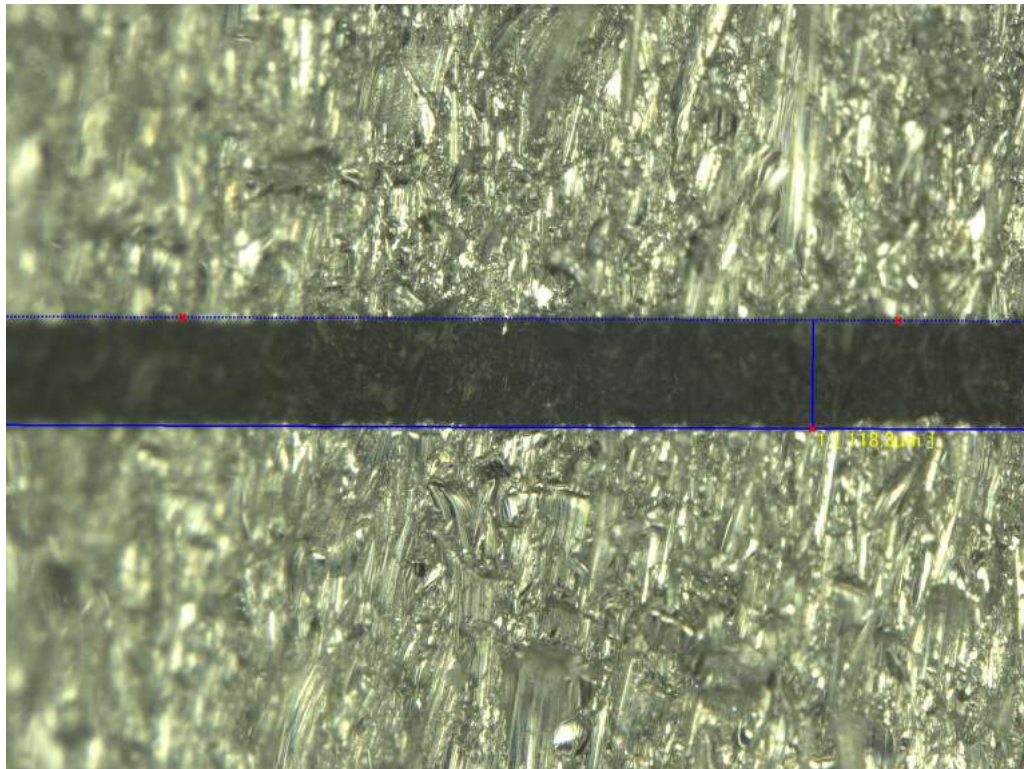
## 9 Ablage und Archivierung

Folgende Dokumente sind zu archivieren/ dem LDS Ersteller zu übergeben:

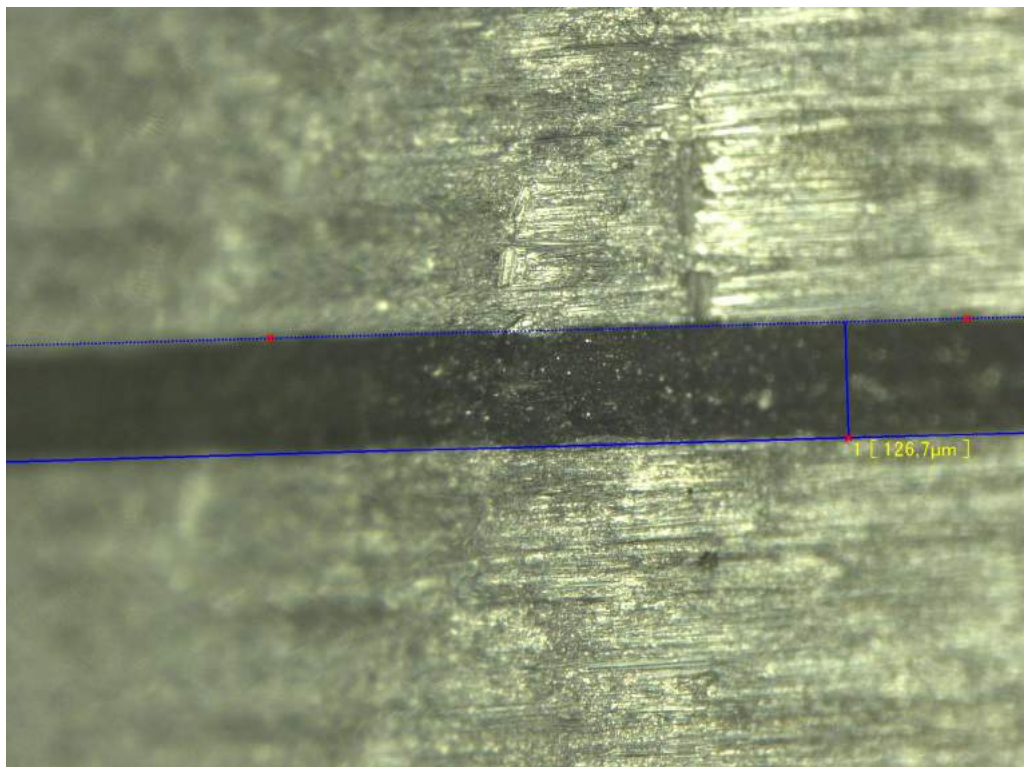
<b>Prozessdokumentation</b>		
	Name	Unterschrift
LDS eingescannt und gesichert		
Ofenprotokolle gesichert		
Fotos gesichert		
Sonstige Dateien gesichert		



## A.2 Mikroskop-Aufnahmen der Klebschicht

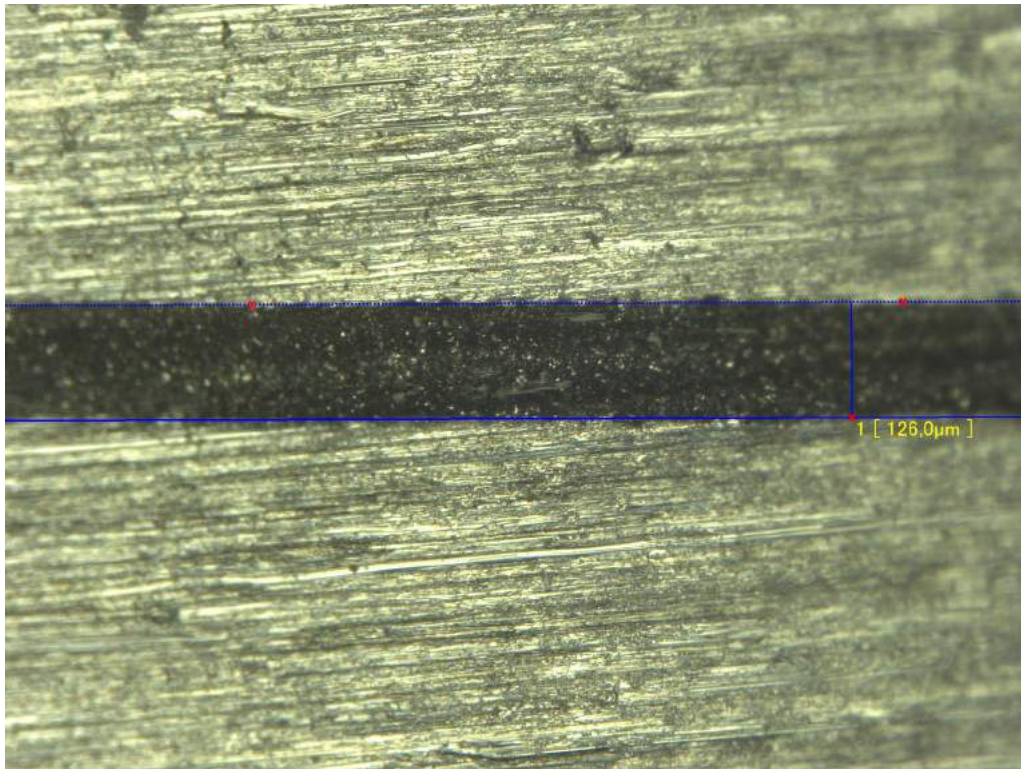


*Abb. A.1: Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 1*

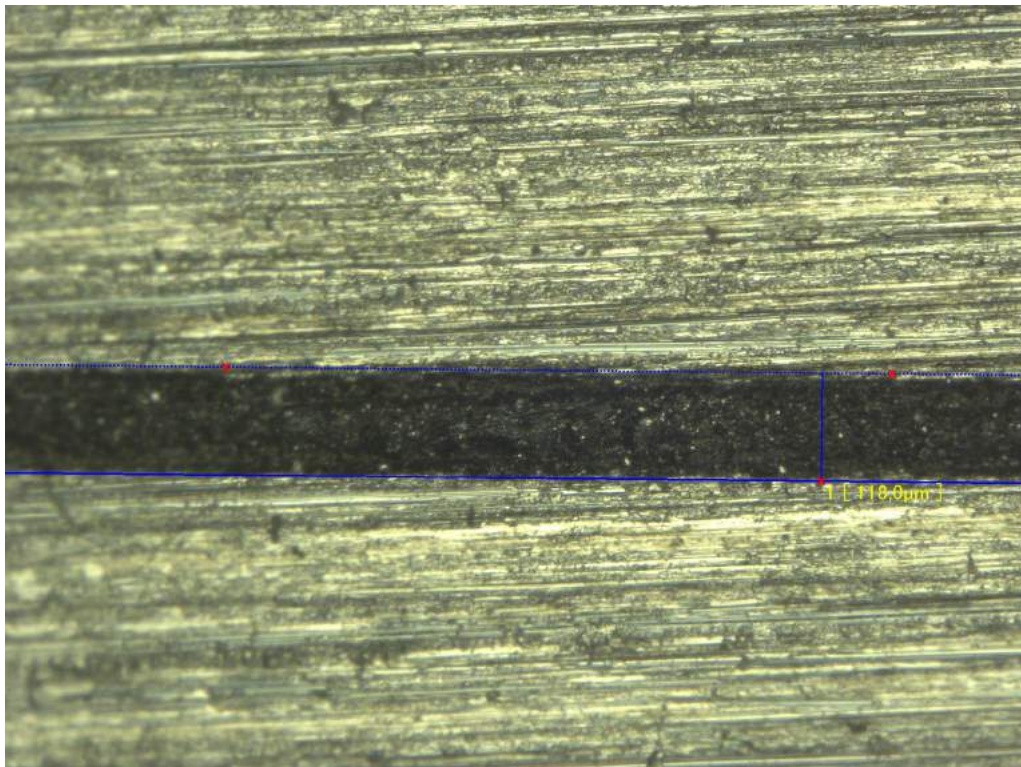


*Abb. A.2: Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 2*



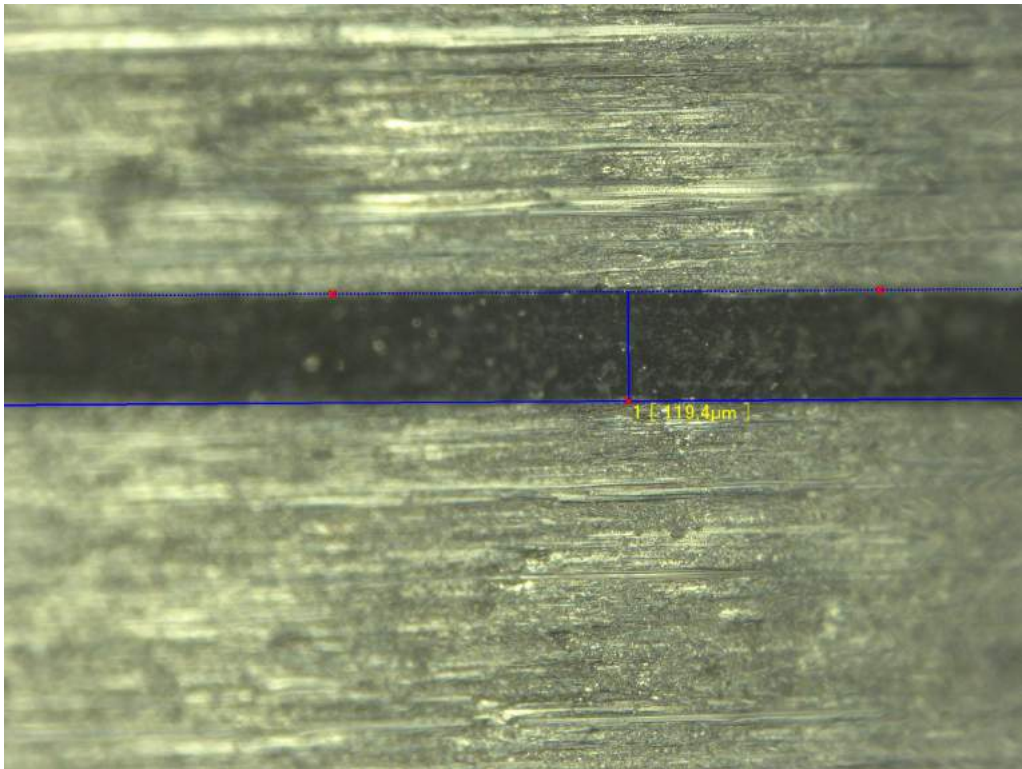


*Abb. A.3: Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 3*

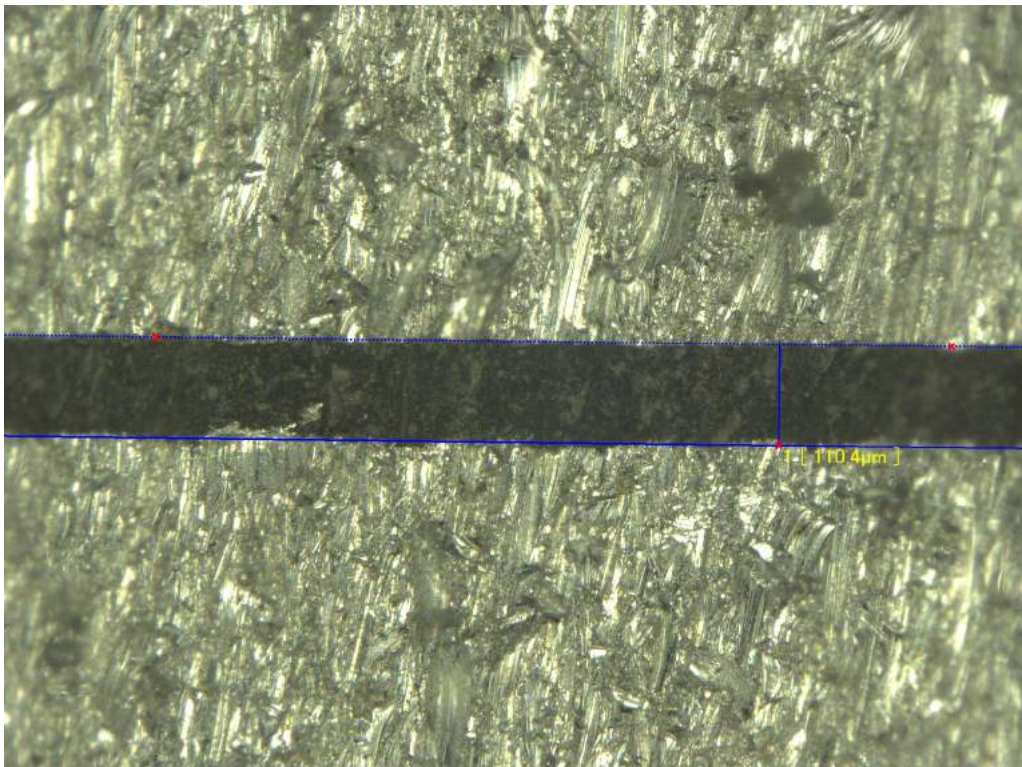


*Abb. A.4: Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 4*



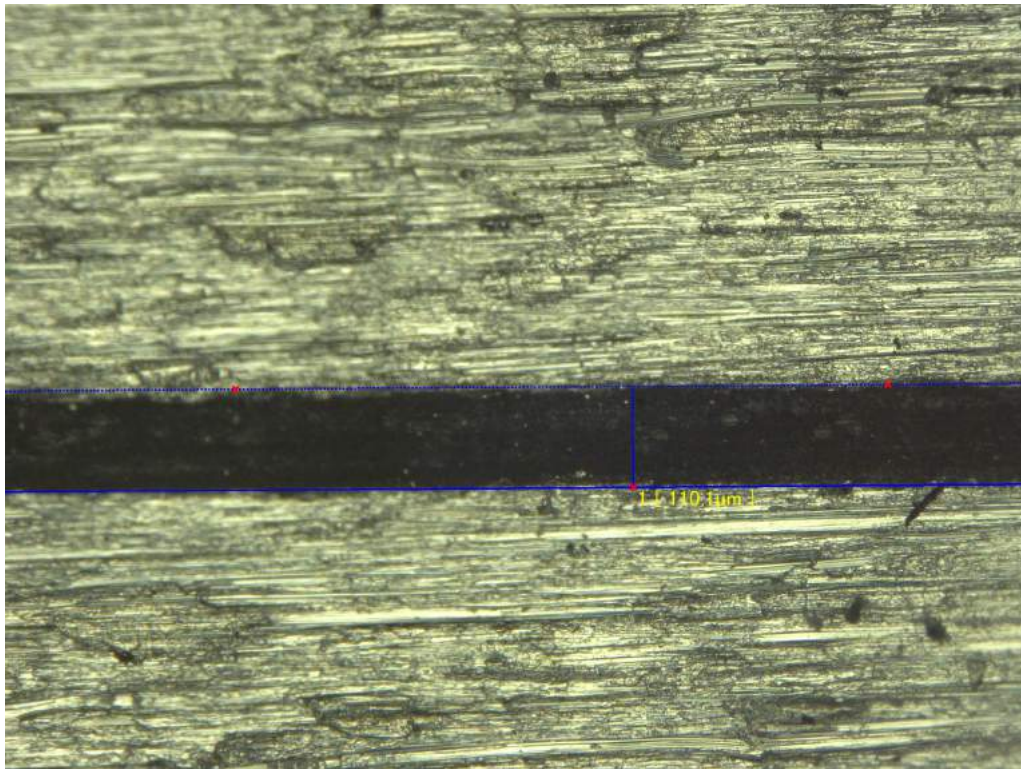


*Abb. A.5: Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 1*

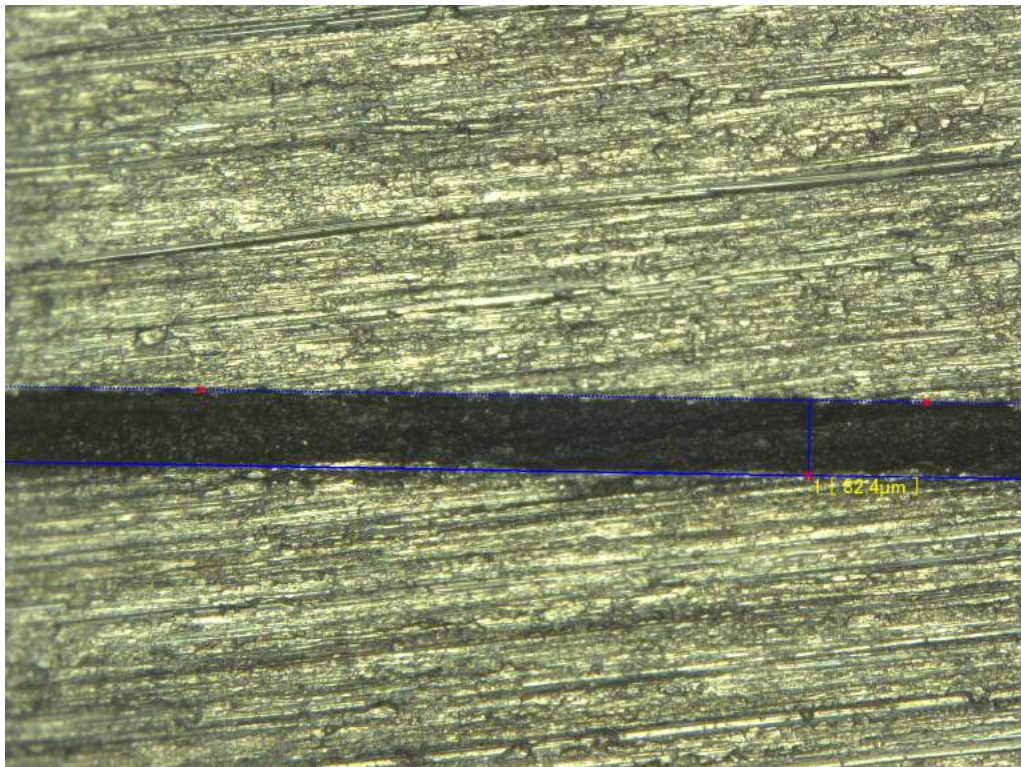


*Abb. A.6: Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 6*



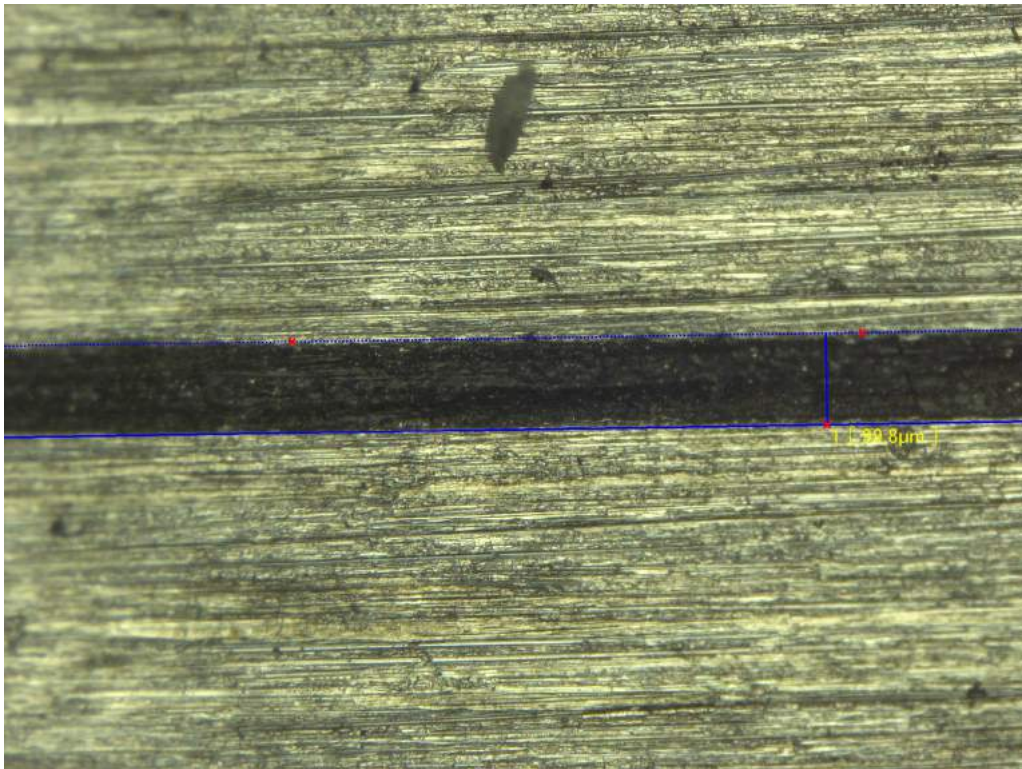


*Abb. A.7: Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 7*

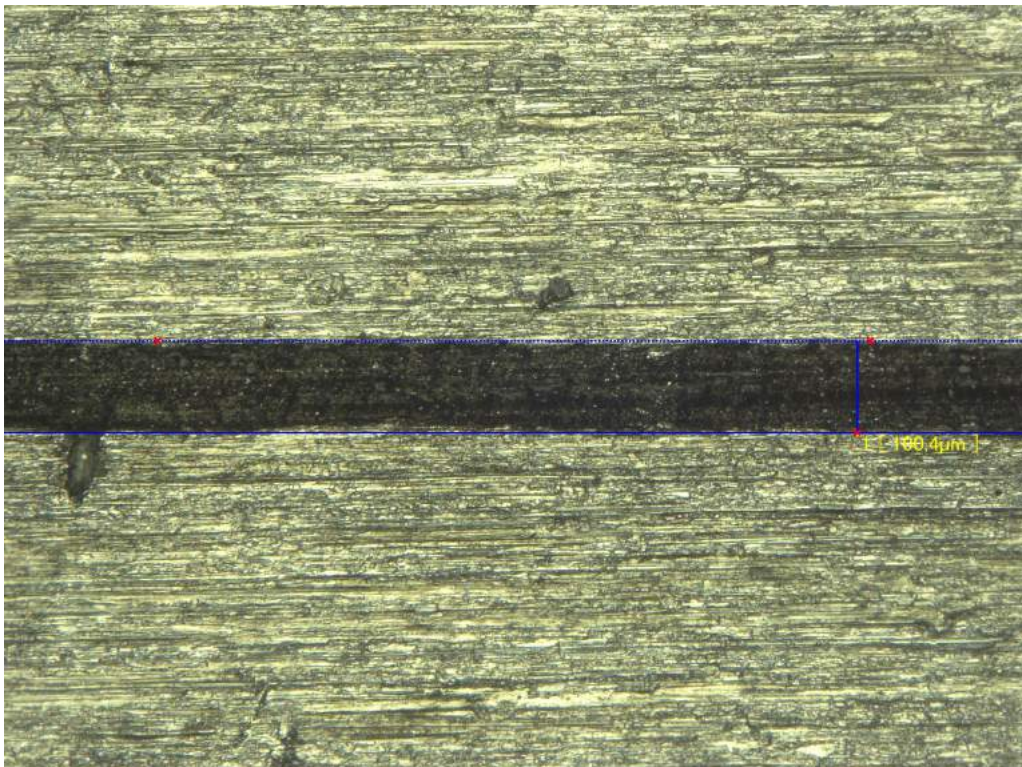


*Abb. A.8: Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 8*





*Abb. A.9: Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 9*



*Abb. A.10: Mikroskop-Aufnahme der Klebschichtdickenprobe 10*

### A.3 Halb-logarithmische Darstellung der relativen Permittivität der Filmklebstoff-Proben

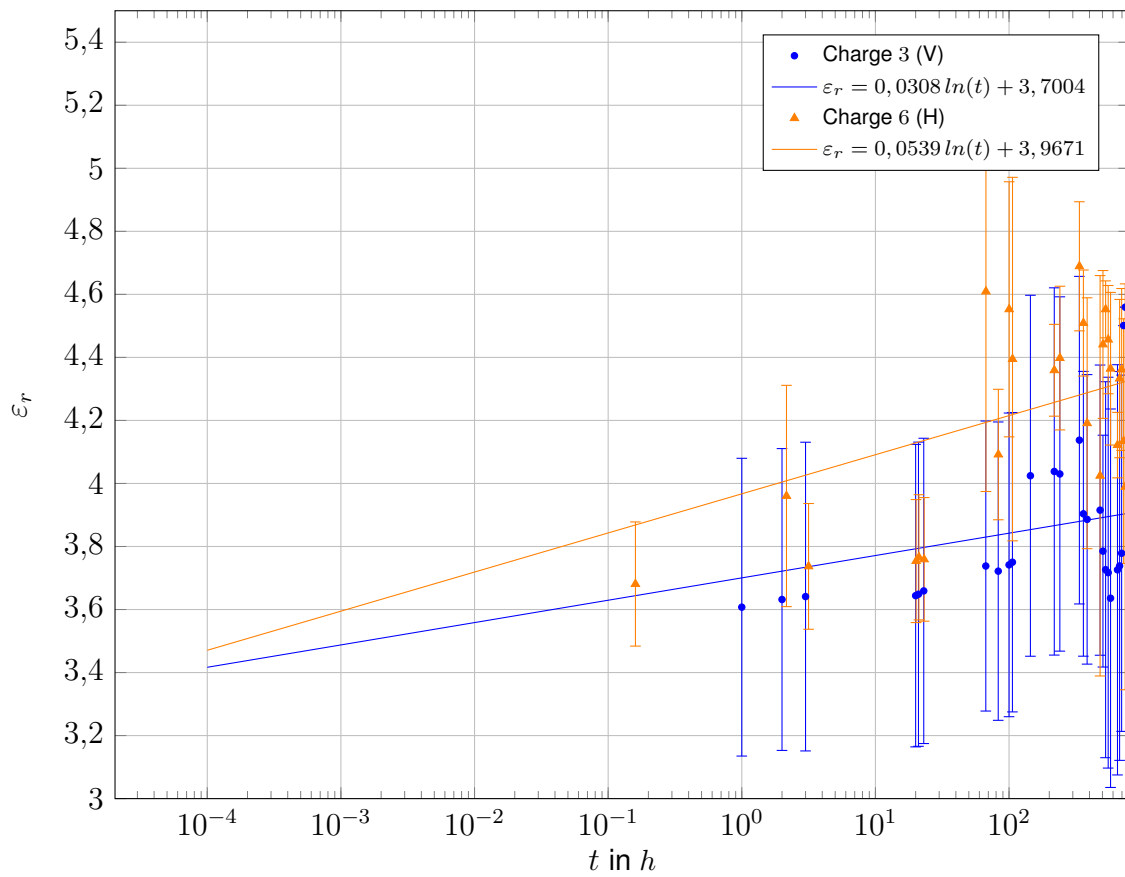


Abb. A.11: Halb-logarithmische Darstellung der gemittelten relativen Permittivität der Filmklebstoff-Proben über der Zeit mit Trendlinie



#### A.4 Mikroskop-Aufnahmen der GFK-Schicht

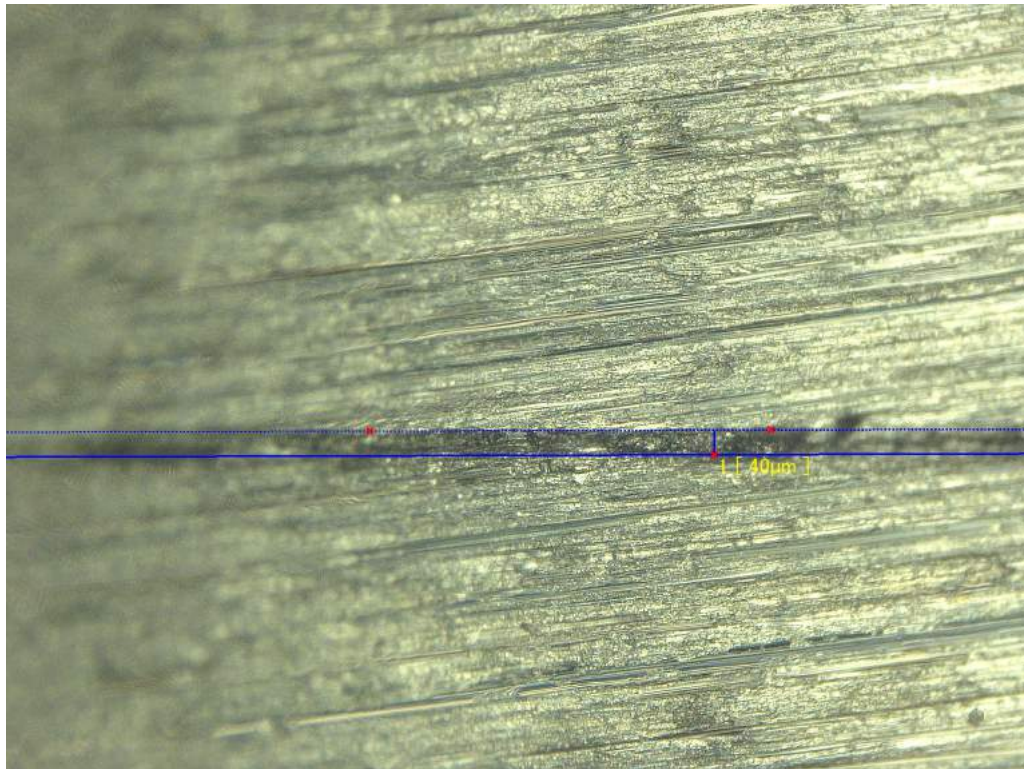


Abb. A.12: Mikroskop-Aufnahme der GFK-Schichtdickenprobe 1

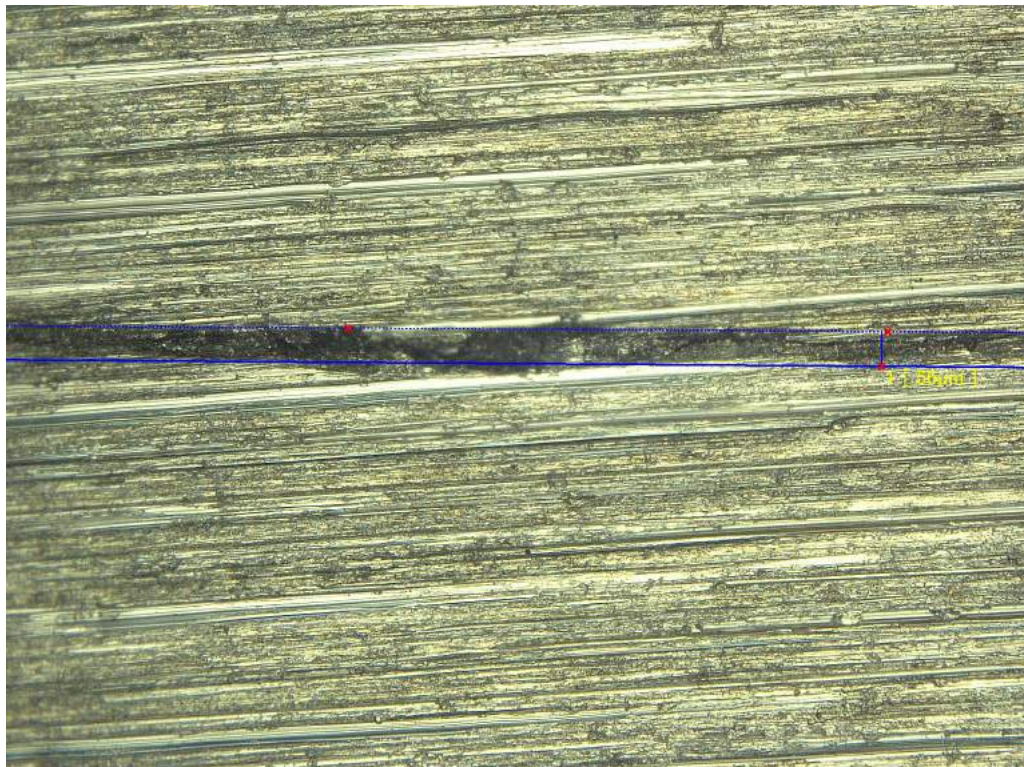
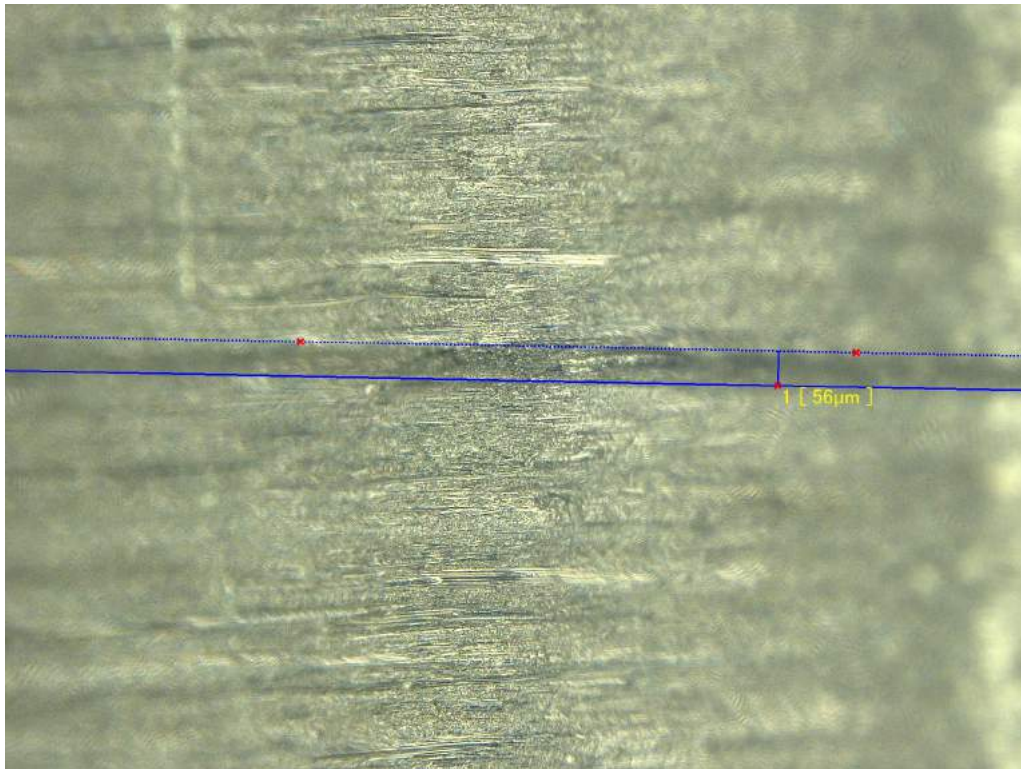


Abb. A.13: Mikroskop-Aufnahme der GFK-Schichtdickenprobe 2



*Abb. A.14: Mikroskop-Aufnahme der GFK-Schichtdickenprobe 3*



## **A.5 Messungen der ersten Messreihe - Klebschicht**



		Tag 1 (23.05.2019)												Tag 2 (24.05.2019)												Tag 5 (27.05.2019)												Tag 6 (28.05.2019)												Tag 12 (03.06.2019)	
Probe	Zeit	Kapazität [pF]				Gewicht [g]				Länge [mm]				Kapazität [pF]				Gewicht [g]				Länge [mm]				Kapazität [pF]				Gewicht [g]				Länge [mm]		Kapazität [pF]	Gewicht [g]														
		0h	1h	2h	3h	0h	1h	2h	3h	0h	1h	2h	3h	20h	21h	23h	20h	21h	23h	20h	21h	23h	20h	21h	23h	67h	83h	67h	83h	67h	83h	100h	106h	100h	106h	100h	106h	144,5h	144,5h												
Ø5	1	7,072	7,301	7,361	7,425	1,0270	1,028	1,0272	1,0275	20,200	20,195	20,199	20,197	7,337	7,321	7,413	1,0294	1,0284	1,0285	20,205	20,197	20,195	7,241	7,302	1,029	1,0275	20,207	20,185	7,493	7,495	1,0287	1,0281	20,148	20,177																	
	2	7,413	7,406	7,261	7,28	1,0154	1,0151	1,0153	1,0155	20,210	20,205	20,203	20,203	7,169	7,365	7,534	1,0165	1,0158	1,0169	20,216	20,21	20,208	7,483	7,36	1,016	1,0166	20,206	20,211	7,246	7,259	1,0158	1,0157	20,212	20,215	8,0320	1,0157															
	3	7,351	7,215	7,365	7,215	0,9953	0,9948	0,995	0,9957	20,298	20,231	20,173	20,17	7,172	7,229	7,438	0,9965	0,9971	0,9967	20,246	20,243	20,239	7,693	7,674	0,9962	0,9957	20,208	20,199	7,775	7,615	0,9957	0,9946	20,233	20,228																	
	4	7,660	7,484	7,724	7,739	1,0131	1,0122	1,0136	1,0137	20,148	20,143	20,127	20,128	7,554	7,306	7,787	1,0139	1,0139	1,0142	20,132	20,132	20,13	7,669	7,411	1,0136	1,0131	20,036	20,124	7,672	7,501	1,013	1,013	20,082	20,107	8,174	1,0134															
	5	8,460	8,192	8,399	8,569	1,0415	1,0413	1,0414	1,0417	20,265	20,267	20,266	20,254	8,324	8,217	8,374	1,0432	1,0434	1,0437	20,197	20,258	20,232	8,783	8,561	1,0425	1,0419	20,178	20,189	8,997	8,776	1,0418	1,0419	20,236	20,236																	
	Normierung	1	1,000	1,032	1,041	1,050	1,000	1,001	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,037	1,035	1,048	1,002	1,001	1,001	1,000	1,000	1,000	1,024	1,033	1,002	1,000	1,000	0,999	1,060	1,060	1,002	1,001	0,997	0,999																
Mittel	1,000	0,992	1,005	1,007	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,001	1,001	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,075	1,000														
Abweichung	0	0,0192498	0,01594258	0,02044418	0	0,00046184	0,00024453	0,00016723	0	0,00100471	0,00185953	0,00185551	0,0189653	0,02154162	0,01267224	0,00046002	0,0005153	0,00024153	0,00138021	0,00076404	0,00080085	0,01482789	0,02366159	0,00038727	0,00027635	0,000232141	0,00176915	0,003945089	0,03126021	0,00045089	0,00047258	0,00112867	0,00094449	0,00820064	0,0009499	0,00820064	3,35374E-07														
Ø10	6	20,832	24,800	24,92	25,84	3,7798	3,7832	3,7816	3,7851	20,216	20,229	20,242	20,229	23,328	21,991	21,996	3,7832	3,78	3,78	20,166	20,213	20,203	23,556	23,19	3,7814	3,7804	20,223	20,218	22,581	22,777	3,7801	3,7801	20,227	20,226																	
	7	(-14,09 µF)	-15,264	-14,432	-18,009	3,7404	3,755	3,7431	3,7424	20,289	20,327	20,196	20,271	-14,539	-14,215	-11,955	3,7436	3,7405	3,7405	20,211	20,206	20,209	-5,063	-14,081	3,7467	3,7419	20,23	20,217	-13,204	-13,924	3,7418	3,7416	20,219	20,218	-13,832	3,7441															
	8	21,770	25,742	23,332	25,52	3,7543	3,7589	3,7552	3,7577	20,253	20,304	20,211	20,173	25,789	22,572	22,408	3,7599	3,7544	3,7547	20,191	20,169	20,141	42,37	24,936	3,7592	3,7562	20,18	20,27																							
	9	21,926	32,401	27,944	31,501	3,7177	3,721	3,7209	3,7254	20,197	20,266	20,196	20,182	34,842	22,986	22,576	3,7228	3,7179	3,7181	20,199	20,2	20,191	61,28	24,897	3,7238	3,7183	20,2	20,208	23,324	43,29	3,7198	3,7198	20,206	20,203	37,331	3,7207															
	10	(-12,927 µF)	-16,972	-14,203	-17,571	3,6888	3,7081	3,6944	3,6962	20,256	20,222	20,185	20,216	-14,522	-14,721	-14,161	3,7009	3,6925	3,6892	20,16	20,198	20,165	-4,158	-13,403	3,6921	3,6909	20,18	20,172	-12,955	-13,684	3,6912	3,6938	20,176	20,172	-15,376	3,6949															
	Normierung	1	1,000	1,190	1,196	1,240	1,000	1,001	1,000	1,001	1,000	1,001	1,001	1,001	1,120	1,056	1,056	1,001	1,000	1,000	0,998	1,000	0,999	1,131	1,113	1,000	1,000	1,000	1,000	1,084	1,093	1,000	1,001	1,000	1,000																
Mittel	1,000	1,284	1,181	1,283	1,000	1,002	1,001	1,001	1,000	1,001	1,001	1,001	1,000	1,001	1,000	1,000	1,000	1,000	0,997	0,997	0,997	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,703	1,001														
Abweichung	0	0,12945723	0,07271222	0,10238612	0	0,0017105	0,00034088	0,00053103	0	0,0014977	0,00192281	0,00126405	0,19415937	0,00673347	0,01173324	0,00068019	0,00030817	3,2496E-05	0,00129339	0,00177632	0,00200886	0,55837648	0,01212183	0,00042455	0,00015939	0,00176105	0,00208423	0,01009873	0,44050118	0,00019046	0,00038766	0,00209733	0,00210952	0	0,000335813																
Ø12	11	32,135	31,893	32,215	32,08	5,9760	5,9761	5,9761	5,976	20,235	20,253	20,248	20,21	32,332	32,256	32,36	5,9764	5,9765	5,9764	20,254	20,213	20,243	34,008	33,486	5,9784	5,9767	20,225	20,257	33,64	33,809	5,9773	5,9774	20,261	20,259	36,393	5,9784															
	12	32,985	32,889	32,938	32,967	5,9469	5,9469	5,9471	5,948	20,205	20,218	20,196	20,215	33,056	33,145	33,221	5,9484	5,9482	5,9481	20,212	20,211	20,219	33,986	33,781	5,9491	5,9473	20,224	20,218	33,836	34,03	5,9481	5,9476	20,222	20,223	35,482	5,9484															
	13	33,222	32,865	33,221	33,308	5,9963	5,9964	5,9968	5,9974	20,194	20,212	20,211	20,218	33,28	33,354	33,508	5,9972	5,9978	5,9974	20,21	20,207	20,199	34,104	34,004	5,9976	5,9971	20,213	20,215	34,111	34,227	5,9974	5,9977	20,218	20,216	35,316	5,9983															
	14	33,478	33,311	33,46	33,69	5,9908	5,9908	5,9933	5,9927	20,182	20,211	20,196	20,206	33,592	33,659	33,689	5,9916	5,9917	5,9917	20,191	20,202	20,18	34,428	34,28	5,9919	5,9912	20,206	20,197	34,576	34,714	5,9914	5,9912	20,197	20,197	38,484	5,9925															
	15	37,587	37,340	37,607	37,764	6,0404	6,0398	6,0414	6,0418	20,162	20,166	20,185	20,162	37,752	37,789	37,816	6,0413	6,0415	6,0417	20,172	20,174	20,16	38,119	38,223	6,0417	6,0411	20,189	20,191	38,512	38,338	6,0412	6,0414	20,19	20,19	42,070	6,0426															
	Normierung	1	1,000	0,992	1,002	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,001	1,001	1,001	1,006	1,004	1,007	1,000	1,000	1,000	1,001	1,000	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,133	1,000																
Mittel	1,000	0,993	1,001	1,005	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,119	1,000																
Abweichung	0	0,00207998	0,00104401	0,00272257	0	3,4459E-05	0,00011849	7,3396E-05	0	0,00031282	0,00040804	0,00075613	0,00135628	0,00064376	0,00089337	4,0749E-05	4,8002E-05	4,3952E-05	0,00020937	0,00055006	0,00026133	0,0106972	0,00636944	8,667E-05	2,6463E-05	0,00051091	0,00023768	0,00676455	0,00825701	4,062E-05	5,7053E-05	0,00023763	0,00019409	0,030913136	4,72574E-05																
Ø14,42	16	30,833	49,840	42,1	32,94	5,9066	5,9086	5,9086	5,9064	20,258	20,253	20,273	20,231	34,167	33,184	32,151	5,908	5,9068	5,9066	20,248	20,248	20,206	42,69	37,878	5,9117	5,9083	20,221	20,214	33,209	38,715	5,9078	5,9085	20,231	20,247																	
	17	30,695	41,470	35,848	34,774	5,7215	5,7222	5,7222	5,7212	20,223	20,205	20,231	20,213	31,996	32,089	31,984	5,7216	5,7218	5,7218	20,22	20,214	20,214	74,84	54,55	5,7267	5,724	20,228	20,232	54,42	39,106	5,7236	5,7229	20,23	20,228	61,28	5,7281															
	18	30,580	46,340	44,8	38,318	5,6506	5,656	5,656	5,6509	20,244	20,24	20,233	20,25	31,502	31,7	31,731	5,6511	5,6508	5,6511	20,238	20,204	20,196	50,38	41,85	5,6547	5,6538	20,226	20,222	32,478	32,621	5,6518	5,652	20,21	20,224																	
	19	33,025	49,530	44,9	40,27	5,8880	5,8946	5,8946	5,8924	20,204	20,194	20,187	20,189	38,157	34,556	34,802	5,8897	5,8883	5,8883	20,193	20,202	20,201	63,48	45,42	5,8936	5,8903	20,198	20,192	50,52	36,401	5,8907	5,8886	20,202	20,191	72,80	5,8909															
	20	36,429	80,540	75,62	37,84	5,8879	5,8883	5,8883	5,8877	20,195	20,192	20,162	20,191	37,807	38,006																																				



## **A.6 Messungen der zweiten Messreihe und der Zusatzuntersuchung - Klebschicht**









## **A.7 Messungen der zweiten Messreihe - GFK-Schicht**



Probe		Tag 1		Tag 2	Tag 3	Tag 6	Tag 7	Tag 8	Tag 9	Tag 10
Datum		26.06.2019		27.06.2019	28.06.2019	01.07.2019	02.07.2019	03.07.2019	04.07.2019	05.07.2019
Stunde		0h	5,33h	25h	49,16h	70h	94h	118h	142h	166h
Ø12	1	68,67	70,63	74,62	114,4	400,2	487,1	631,2	684,8	902,5
	2	82,27	83,66	85,82	89,63	102,55	109,03	103,74	123,31	190,49
	3	69,74	73,27	80,38	86,54	108,47	119,21	124,11	124,63	130,04
	4	75,19	77,04	79,64	116,1	259,04	230,56	278,43	310,92	368,63
	5	75,4	77,65	82,06	98,49	107,98	123,05	156,02	292,51	309,22
Normierung	1	1	1,0285423	1,086646279	1,665938547	5,827872433	7,093344983	9,191786806	9,97233144	13,14256589
	2	1	1,0168956	1,043150602	1,089461529	1,246505409	1,325270451	1,260969977	1,498845266	2,315424821
	3	1	1,0506166	1,152566676	1,240894752	1,555348437	1,709349011	1,77960998	1,787066246	1,864640092
	4	1	1,0246043	1,059183402	1,54408831	3,445138981	3,066365208	3,703019018	4,135124352	4,902646629
	5	1	1,0298408	1,088328912	1,306233422	1,432095491	1,631962865	2,069230769	3,879442971	4,101061008
Mittel		1	1,0300999	1,085975174	1,369323312	2,70139215	2,965258504	3,60092331	4,254562055	5,265267689
Abweichung		0	0,0082067	0,027846538	0,188552093	1,548090846	1,691677274	2,277183682	2,287107754	3,150919282
ε <sub>r</sub>	1	3,840	3,950	4,173	6,397	22,380	27,239	35,297	38,295	50,469
	2	4,601	4,678	4,799	5,012	5,735	6,097	5,801	6,896	10,652
	3	3,900	4,097	4,495	4,839	6,066	6,666	6,940	6,969	7,272
	4	3,604	3,693	3,817	5,565	12,416	11,051	13,346	14,903	17,669
	5	3,012	3,102	3,278	3,934	4,313	4,915	6,232	11,684	12,351
Mittel		3,791	3,904	4,112	5,150	10,182	11,194	13,523	15,749	19,683
Abweichung		0,387	0,405	0,452	0,665	5,773	6,418	8,710	9,018	12,314
Ø22,47	6	115,92	134,82	187,25	277,8	1287,1	2960,2	3419,9	4552	8745
	7	111,32	138,49	170,06	275,55	956,6	960,7	2216,9	3754,4	3782
	8	113,98	126,17	153,11	264,97	1833,3	3068,7	3931,2	5597	5891
	9		156,32	172,66	407,2	1376,7	2342	2882	5299	8395
	10	111,09	124,19	154,64	181,09	569,8	640,8	1011,9	1461,1	16430
Normierung	6	1	1,1630435	1,615338164	2,396480331	11,10334714	25,53657695	29,50224293	39,26846101	75,43995859
	7	1	1,2440711	1,527667984	2,475296443	8,5932447	8,630075458	19,91466044	33,72619475	33,97412864
	8	1	1,1069486	1,343305843	2,324706089	16,08440077	26,92314441	34,49026145	49,10510616	51,68450605
	9									
	10	1	1,1179224	1,392024485	1,630119723	5,129174543	5,768295976	9,108830678	13,15239896	147,8981006
Mittel		1	1,1579964	1,469584119	2,206650646	10,22754179	16,7145232	23,25399887	33,81304022	77,24917348
Abweichung		0	0,0455609	0,101918955	0,288265462	3,366332166	9,515337482	8,742253315	10,37374336	35,32446358
ε <sub>r</sub>	6	2,586	3,007	4,177	6,197	28,711	66,033	76,288	101,541	195,074
	7	2,483	3,089	3,794	6,147	21,339	21,430	49,452	83,749	84,365
	8	2,543	2,814	3,415	5,911	40,895	68,453	87,693	124,852	131,410
	9									
	10	1,770	1,979	2,464	2,885	9,079	10,210	16,123	23,280	261,788
Mittel		2,345	2,722	3,462	5,285	25,006	41,532	57,389	83,356	168,159
Abweichung		0,2876761	0,3718529	0,52277941	1,199751658	9,797214367	25,71147363	24,60130431	30,0376286	60,2717974

Probe	Dicke
1	0,056
2	0,056
3	0,056
4	0,048
5	0,04
6	0,056
7	0,056
8	0,056
9	0,048
10	0,04