

Braincells

# ***Kapazitiv Messverfahren***

# Inhalt

<b>Kapazitiv- Messungen im Produktionsprozessen .....</b>	<b>3</b>
<i>Das Messverfahren .....</i>	<i>5</i>
Das Material ist ein Isolator (Verschiebungspolarisation).....	6
Das Material enthält polare Moleküle. (Orientierungspolarisation).....	6
Verluste .....	7
Leitfähigkeit.....	7
Randeffekte.....	7
Zusammengesetzte Materialien.....	8
Aufbau der Antwortkurve .....	9
Anwendungen im Textilbereich.....	10
Weiter Anwendungen .....	10
<i>Beispiele:.....</i>	<i>11</i>
Verschiebungspolarisation.....	11
Orientierungspolarisation.....	13
Verluste .....	14
<i>Auswertung .....</i>	<i>15</i>
Arten der Auswertung .....	15
Physikalische Auswertung .....	17
Multivariate Auswertung .....	19
Kalibrierprogramm .....	22
<i>Möglichkeiten und Grenzen .....</i>	<i>23</i>
<b>Physikalische Grundlagen.....</b>	<b>25</b>
<i>Aufbau von Messkondensatoren.....</i>	<i>25</i>
Konventioneller Kondensator.....	25
Offene Ausführung:.....	26
Beispiele von Messungen mit offenen Sensoren .....	27
<b>Feuchte- Messungen an Geweben .....</b>	<b>29</b>
<i>Trocknungsverlauf.....</i>	<i>30</i>
Restfeuchte .....	33
Hochfeuchte .....	36
<b>Vlies .....</b>	<b>39</b>
<i>Flächengewicht .....</i>	<i>39</i>
<i>Wolkigkeit.....</i>	<i>40</i>
<i>Avivage-Auftrag.....</i>	<i>40</i>
<b>Messung an Filamenten.....</b>	<b>41</b>
<i>Messung von trockenen Fäden.....</i>	<i>41</i>
Übersicht.....	41
Kalibrierung.....	42
<i>Online Messungen .....</i>	<i>44</i>

## Kapazitiv- Messungen im Produktionsprozessen

Präzisions- Kapazitiv- Messungen werden in Produktionsprozessen derzeit noch selten eingesetzt. Dabei lassen sich mit Kapazitiv-Messungen recht genau viele unterschiedliche Produktionsparameter ermitteln. *Flächengewicht, Feuchte, Schichtdicken* sind nur wenige der vielen möglichen Einsatzgebiete.

Die Ursache für den wenig breiten Einsatz dürfte sein, dass bei konventioneller Kapazitiv-Messung nur ein einziger Parameter (die Kapazität) ermittelt wird.

Das von uns entwickelte und zum Patent angemeldete Messverfahren ermöglicht hingegen die „gleichzeitige“ Ermittlung mehrerer Parameter.

Mit ihm können online wichtige Daten für das **Qualitätsmanagement** sowie für die **Prozess- Kontrolle** und **Regelung** gewonnen werden. Insbesondere besticht die Möglichkeit mit der gleichen Messung Aussagen über unterschiedliche Parameter wie **Titer** und **Auflage** oder **Restfeuchte** und **Flächengewicht** machen zu können.

Während bei der Qualitätskontrolle im Labor Fehler nur erkannt werden können, lassen sich mit den Daten, die beim Einsatz des Messverfahrens anfallen Fehler vermeiden. Eine Online Prozessregelung ist möglich.

Einsparungen sind auf vielen Gebieten möglich.

- Wenn man durch geeignete Daten sicherstellen kann, dass eine Charge als erste und nicht als zweite Wahl verkauft werden kann, ergeben sich Kostenvorteile.
- Die Einsparung von Energie und Rohmaterialien wird immer wichtiger.
- Eine kontinuierliche Überwachung hilft Kundenvertrauen zu gewinnen.
- Immer mehr Kunden wie die Automobilindustrie fordern eine lückenlose Qualitätsüberwachung.

Für ein optimales Qualitätsmanagement gibt es viele weitere Gründe.

Einsparpotenziale können an vielen Stellen erschlossen werden. Stellen Sie sich beispielsweise vor, wie viel Energie gespart werden kann, wenn durch bessere Kontrolle der Restfeuchte Trocknungsvorgänge optimiert werden können.

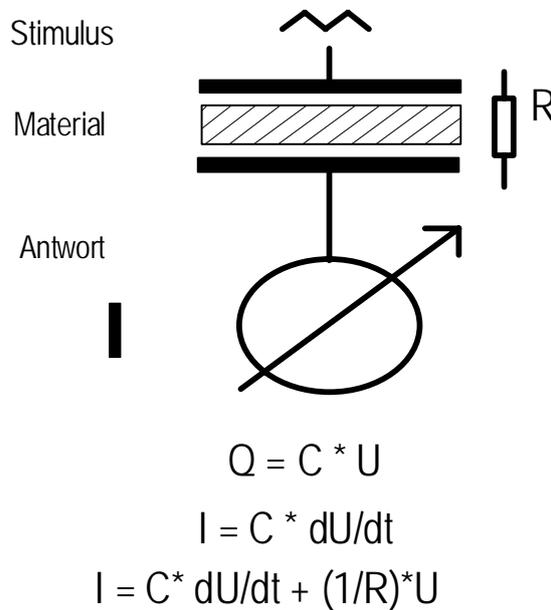
Bei derzeitigen Energiekosten von über \$50/Barrel Erdöl wird dies immer mehr zum Thema.

Um potenziellen Anwendern einen schnellen Überblick über das Messverfahren zu geben, haben wir die vorliegende Dokumentation in die folgenden Teile untergliedert:

- **Das Messverfahren:** soll einen Überblick über die Grundlagen des Kapazitiv-Messverfahrens geben. Dabei wird auf Materialeigenschaften eingegangen und darauf, wie sie sich messen lassen.  
Anwendungs-Beispiele werden gezeigt und es wird auf die Auswertung der Messwerte eingegangen.  
Zum Schluss wird auf die Möglichkeiten und die Grenzen des Messverfahrens eingegangen.  
Die Lektüre dieses Kapitels empfiehlt sich als Einstieg
- **Physikalische Grundlagen:** geht auf den Aufbau von Messkondensatoren ein. Hier wird auch gezeigt, welcher Messkondensator für welche Anwendung am geeignetsten sind.  
Dieser Abschnitt ist für den Einsteiger ebenfalls zu empfehlen.  
Im Abschnitt Berechnungsgrundlagen werden mathematische Kenntnisse vorausgesetzt.
- **Die nächsten Kapitel:** gehen auf unterschiedliche Anwendungen ein. Wenn man an der Messung von Spinnpräparationen interessiert ist, kann man z. B. das Kapitel Vlies überspringen. Diese Kapitel werden mit der Zeit erweitert und ergänzt.

## Das Messverfahren

Die physikalischen Grundlagen sind relativ einfach. Das Verfahren arbeitet folgendermaßen:



Ein Kondensator besteht aus zwei voneinander isolierten Platten der Fläche  $F$ , die im Abstand  $d$  parallel zueinander angeordnet sind. Der Kondensator kann eine Ladung aufnehmen, die proportional zur angelegten Spannung ist. Den Proportionalitätsfaktor nennt man Kapazität. ( $C = Q/U$ )

Die Kapazität ist proportional zur Fläche und umgekehrt proportional zum Plattenabstand:

$$C = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{F}{d}$$

Der Faktor  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$

ist gerade so gewählt, dass die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  für Vakuum 1 wird. Bringt man Material (z.B. Glas) zwischen die Platten, so erhöht sich die Kapazität und damit der Strom um den Faktor  $\epsilon$  wenn der Zwischenraum zwischen den Platten vollständig ausgefüllt wird.

Bei Glas mit  $\epsilon=6$  erhöht sich die Kapazität um den Faktor 6 gegenüber dem leeren Kondensator. (Luft hat eine Dielektrizitätszahl von annähernd 1).

Die Dielektrizitätszahlen sind für: Gummi: ca. 3, bei Glas ca. 6, bei Benzol 2,3, bei Wasser = 81, bei Eis = 3. Weitere Dielektrizitätszahlen können einschlägigen Tabellen entnommen werden.

Das Messprinzip besteht nun aus folgendem:

Beaufschlagt man den Kondensator mit einer dreieckförmigen Spannung, so fließt durch den Kondensator ein rechteckförmiger Strom gemäß;

$$Q = C \cdot U \quad \text{umgeformt: } dQ/dt = I = C \cdot dU/dt$$

Da bei einer dreieckförmigen Spannung  $dU/dt$  konstant ist, ist der Strom  $I$  direkt proportional zur Kapazität.

Bringt man z.B. Glas zwischen die Kondensatorplatten, so erhöht sich die Kapazität und damit der Strom um den Faktor 6.

Bringt man Material zwischen die Kondensatorplatten, so muss man zwischen folgenden Fällen unterscheiden:

### **Das Material ist ein Isolator (Verschiebungspolarisation)**

Physikalisch besteht das Material aus Molekülen, die ohne externe Spannung kein Dipolmoment aufweisen. Positive und negative Ladung kann man sich in einem Punkt befindlich vorstellen. Bringt man ein solches Molekül in das Feld eines Kondensators, so zieht die positive Platte die negative Ladung an, die negative Platte die positive Ladung. Dadurch verschieben sich die Ladungen gegeneinander. Es bildet sich ein Dipolmoment, das bei Abschalten des externen Feldes sofort wieder verschwindet.

Man nennt dieses Verhalten „Verschiebungspolarisation“. Diese ist sehr schnell, da keine Masse bewegt wird, sowie temperatur- unabhängig. Die Verschiebungspolarisation ist somit frequenz-unabhängig. Die meisten Trägermaterialien wie z.B. PE sind recht gute Isolatoren.

### **Das Material enthält polare Moleküle. (Orientierungspolarisation)**

Wasser und viele Tenside sind polar. Bei Wasser entsteht dieses Verhalten dadurch, dass die beiden negativen Wasserstoffatome nicht im Winkel von  $180^\circ$  sondern im Winkel von  $104^\circ$  an dem positiven Sauerstoff Atom angeordnet sind. Dadurch entsteht ein elektrisches Moment.

Wird polares Material in ein elektrisches Feld gebracht, so versuchen sich die Moleküle so zu drehen, dass sich die negative Ladung zur positiven und die positive Ladung zur negativen Kondensatorplatte ausrichtet.

Im Gegensatz zur Verschiebungspolarisation gibt es eine Bewegung der Moleküle die längere Zeit benötigt bis sich alle Moleküle umorientiert haben. Die Bewegung wird durch thermische Stöße gestört. Man nennt diesen Effekt Orientierungspolarisation, da die Moleküle in einem elektrischen Feld umorientiert werden.

Die Orientierungspolarisation ist temperatur- und frequenzabhängig. Sie ist aber auch abhängig von der Bindung des Moleküls an seine Umgebung

Bei Wasser ist die Dielektrizitätskonstante:

- Im Gleichfeld bei  $0^\circ$                     81
- Im Gleichfeld bei  $50^\circ$                     71
- Bei 100 kHz und  $20^\circ$                     30 (in gebundener Form)
- Bei Eis im Gleichfeld  $-20^\circ$             16
- Bei Eis im Gleichfeld  $-60^\circ$             4

Wassermoleküle in flüssigem Wasser sind sehr gut beweglich. Eine Frequenzabhängigkeit tritt erst im Mikrowellenbereich ein (Mikrowellenherd). Die hohe Beweglichkeit bewirkt die hohe Dielektrizitätszahl von 80.

Anders sieht es aus, wenn das Wasser in Eis gebunden ist. Da dort die Wassermoleküle relativ unbeweglich sind, kann sich keine Orientierungspolarisation ausbilden. Es verbleibt die viel kleinere Verschiebungspolarisation.

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch bei Restfeuchte (z.B. in Stoffen). Liegt das Wasser in nicht gebundener Form vor, etwa zwischen den Maschen des Gewebes, so gibt es erst im GHz-Bereich eine Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätszahl. Ist das Wasser jedoch im Stoff oder an dessen Oberfläche gebunden, tritt die Frequenzabhängigkeit bereits im kHz-Bereich ein. Diese Frequenzabhängigkeit kann zur Untersuchung vieler Trocknungsvorgänge genutzt werden (Restfeuchte in Textilien oder Holz, dem Präparationsauftrag auf Spinnfasern usw.). Man beobachtet in diesem Fall einen exponentiellen Anstieg des Messsignals.

Bei der Umpolung des Stimulus-Signals werden polare Moleküle umorientiert und entziehen damit dem Feld Energie, was sich in hohen Verlusten während der Umorientierungs-Phase äußert.

## Verluste

Hat das Material Verluste, so lässt es sich wie ein elektrischer Widerstand betrachten, der seriell zu den Platten des Kondensators geschaltet ist. Gemäß dem Ohmschen Gesetz addiert sich dann ein dreieckförmiger Strom gemäß  $I = U / R$  wobei  $R$  der Widerstand des Materials,  $U$  die dreieckförmige Spannung ist.

## Leitfähigkeit

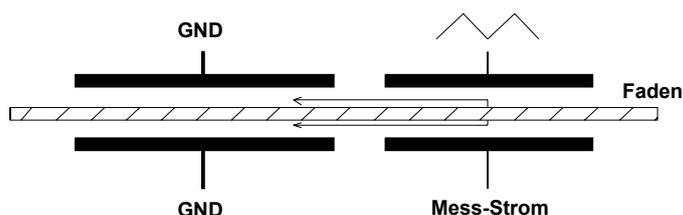
Die Moleküle sind teilweise dissoziiert. Die negativ geladenen Teile bewegen sich zur positiven Elektrode, die positiv geladenen zur negativen Elektrode. Dadurch entstehen Verluste.

Selbst reines Wasser ist in geringem Maße dissoziiert und trägt zu Verlusten bei. Dies lässt sich u. A. zur Bestimmung der Restfeuchte in Textilien ausnutzen

## Randeffekte

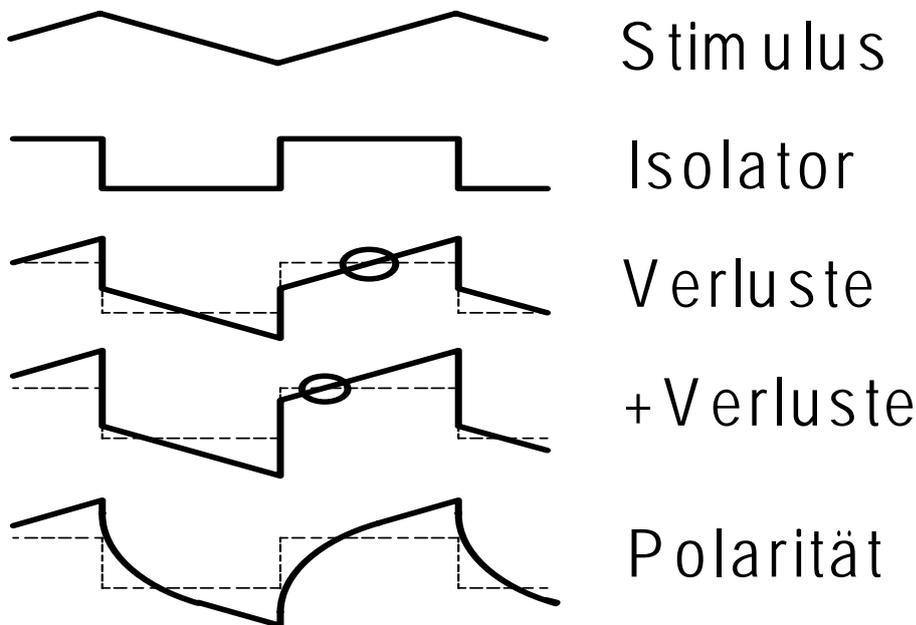
Leitfähigkeit bewirkt zusätzlich einen Rand-Effekt:

Ist das Material leitend, so fließt Strom über das Material aus dem Kondensator heraus. Dieser Strom kann über umgebende Maschinenteile oder parasitäre Kapazitäten abgeleitet und daher nicht mehr an der Messelektrode des Sensors nachgewiesen werden. Dieser Effekt kann störend sein, man kann ihn aber auch gezielt nutzen um genauere Messungen im Hochfeuchtebereich durchzuführen.



## Zusammengesetzte Materialien

Das folgende Bild zeigt schematisiert die Antwortkurven auf ein dreieckförmiges Stimulus- Signal für den Fall unterschiedlicher Materialien im Kondensator.



- Die oberste Kurve zeigt das dreieckförmige Stimulus- Signal mit dem der Kondensator beaufschlagt wird.
- Hat das Material keine Verluste, so erhält man ein rechteckförmiges Antwort-Signal (Kurve 2). Beispiel: trockenes Vlies unbeschichtet, Folie.
- Hat das Material dagegen Verluste, so überlagert sich dem Rechteck ein Dreieckförmiger Anteil. Der mittlere Punkt (eingekreist) gibt die Materialdicke an, denn an diesem Punkt ist die Amplitude des Stimulus-Signals = 0. Damit verschwinden an dieser Stelle die Verluste.
- Wird ein verlustfreier Träger (Isolator) mit verlustbehaftetem Material beschichtet, so bewirkt die Kapazität der Trägers, dass sich die Kurvenhöhe in der Mitte vergrößert. Gleichzeitig „kippt“ die Kurve wegen der Verluste. Dies bewirkt, dass sich der Schnittpunkt der Antwortsignale von unbeschichtetem und beschichtetem Material nach links verschiebt (Kreis). Der Schnittpunkt wird in folgendem charakteristischer Punkt (X-Punkt) genannt. Dieser charakteristische Punkt hat an mehreren Stellen eine Bedeutung, da aus ihm das Verhältnis von Kurvenhöhe und Steigung hervorgeht. Der Messwert am charakteristischen Punkt spiegelt das Flächengewicht, der Abstand von der Mitte des Kurven- Astes die Verluste. Bei Feuchte- Messungen definiert dieser Punkt den Restfeuchte- Bereich.
- Die unterste Kurve zeigt den Fall, bei dem sich polares Material im Kondensator befindet. In diesem Fall ist der Anstieg der Kurve verlangsamt (exponentieller Anstieg).

## Aufbau der Antwortkurve

In den seltensten Fällen hat man es mit reinen Isolatoren zu tun. In der Regel wird Material vorliegen, das sowohl zusätzlich Verluste als auch Polaritätseffekte aufweist. Die einzelnen Effekte sind dann an unterschiedlichen Stellen der Antwortkurve unterschiedlich ausgeprägt.

Dies wird in der nächsten Abbildung für den positiven Ast des Stimulus-Signals gezeigt

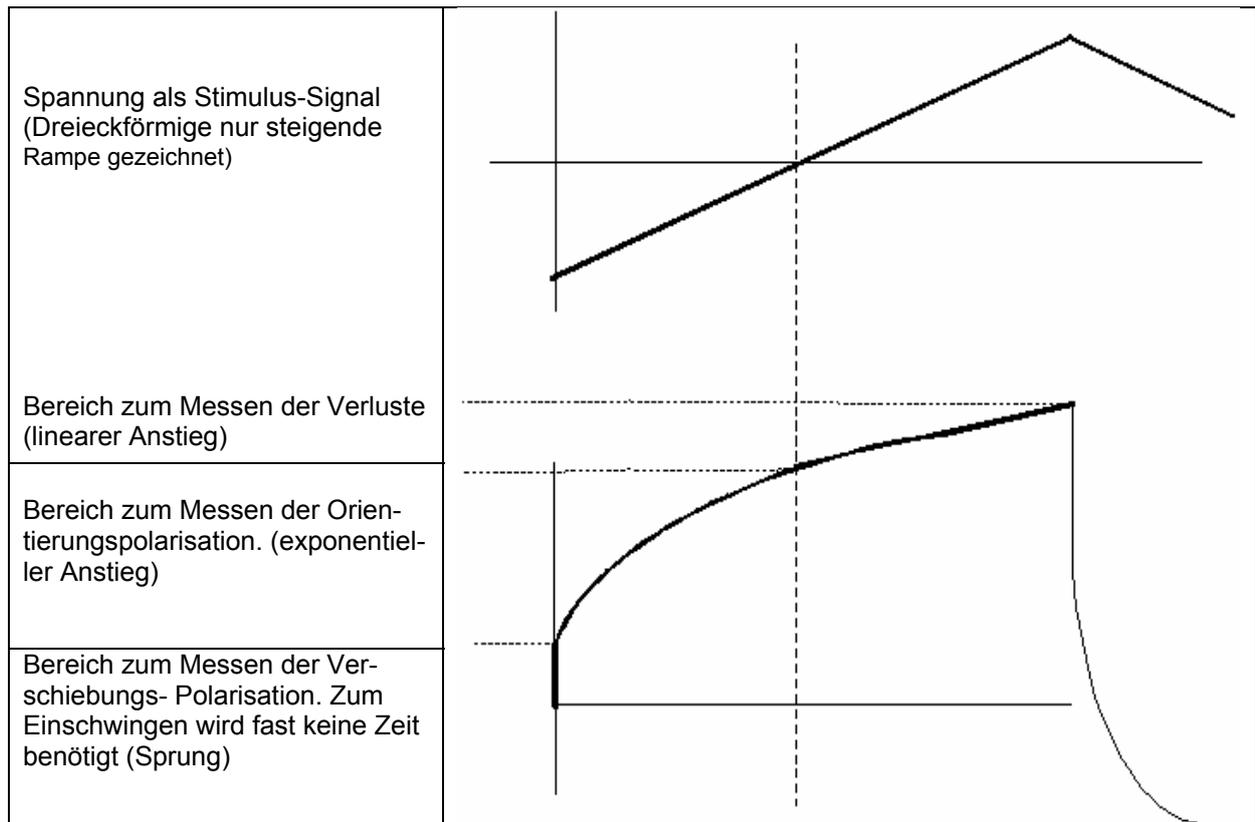


Abbildung 1: Antwort auf ein Stimulus- Signal

Ganz am Anfang der Kurve erfolgt ein steiler Anstieg. Dieser ist durch die Verschiebungspolarisation bedingt.

Danach wird die Kurve im Wesentlichen durch die Orientierungspolarisation sowie die Verluste bestimmt. Beim 0-Durchgang des Stimulus- Signals verschwinden die Verluste, denn in diesem Punkt liegt keine Spannung an. Die Orientierungspolarisation ist temperaturabhängig, denn die Umorientierung wird durch thermische Stöße verlangsamt.

Nimmt man weiter an, dass die Moleküle in der Mitte der Kurve weitgehend ausgerichtet sind, wird der Rest der Kurve im Wesentlichen durch die Verluste bestimmt.

In der Praxis ist das gezeigte Verhalten leider nicht so ausgeprägt. Die Übergänge sind fließend, so dass empirische Untersuchungen für die jeweilige Anwendung erforderlich sein können.

## Anwendungen im Textilbereich

Die gezeigten Eigenschaften des Meßsystems lassen sich für verschiedene Messungen in textilen Prozessen einsetzen:

In der Regel kann man davon ausgehen, dass das Trägermaterial ein Isolator ist. Dessen Dicke kann dann recht einfach bestimmt werden, wenn er trocken und ohne Auflage ist. Bei vorhandener Auflage oder Restfeuchte ist diese aus den Verlusten und der Polarität des Materials zu bestimmen.

Die folgende Tabelle gibt Anwendungsbereiche innerhalb der textilen Kette.

### **Beispiel:**

Soll die Auflage auf Filamente im Spinnprozess ermittelt werden, so kann man dies mit Hilfe der Messung von dielektrischen Verlusten erreichen. Diese wiederum misst man mit Hilfe der Kurvensteigung.

Zur Bestimmung des Flächengewichts von Vlies wird die Kapazität des Messkondensators ermittelt. Dies geschieht dadurch, dass der Hub der Messkurve ausgewertet wird.

Art	Filament Prozess	Filament Trocken	Vlies	Gewebe
Kapazität	Titer	Titer	Flächengew.	Flächengew./Feuchte
Verluste	Auflage	Auflage	Avivage	Avivage
Polarität	Trocknung	--	Restfeuchte	Restfeuchte

Messgröße	Bedeutung
Steigung der Kurve	Verluste
Hub der Kurve	Kapazität
Anstieg der Kurve	Polarität

Das Sensorsystem kann somit für viele Messaufgaben eingesetzt werden. Entsprechend diesen Aufgaben sind unterschiedliche Auswerteverfahren erforderlich. Damit dies auch in der Praxis erfolgen kann, sind in der Software mehrere Auswertefunktionen fest installiert, die über eine Funktionsnummer angewählt werden können.

## Weiter Anwendungen

- Bestimmung von Foliendicken
- Trocknung von Wasserlacken
- Messung der Druckvorbehandlung von Folien

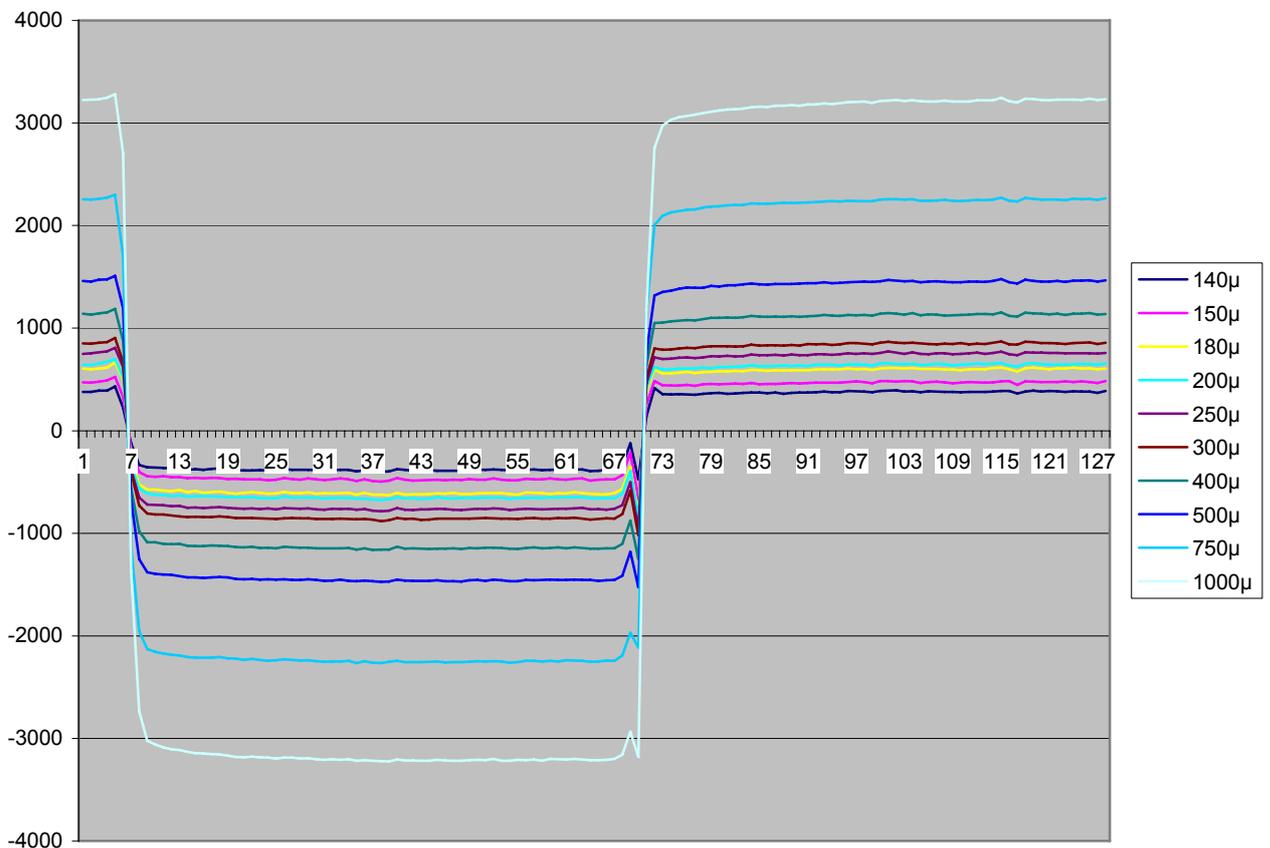
## Beispiele:

### Verschiebungspolarisation

Das folgende Bild zeigt die Antwortkurven des Meßsystems bei der Messung eines Isolators. In diesem Fall sind es Hart PVC-Folien unterschiedlicher Dicke.

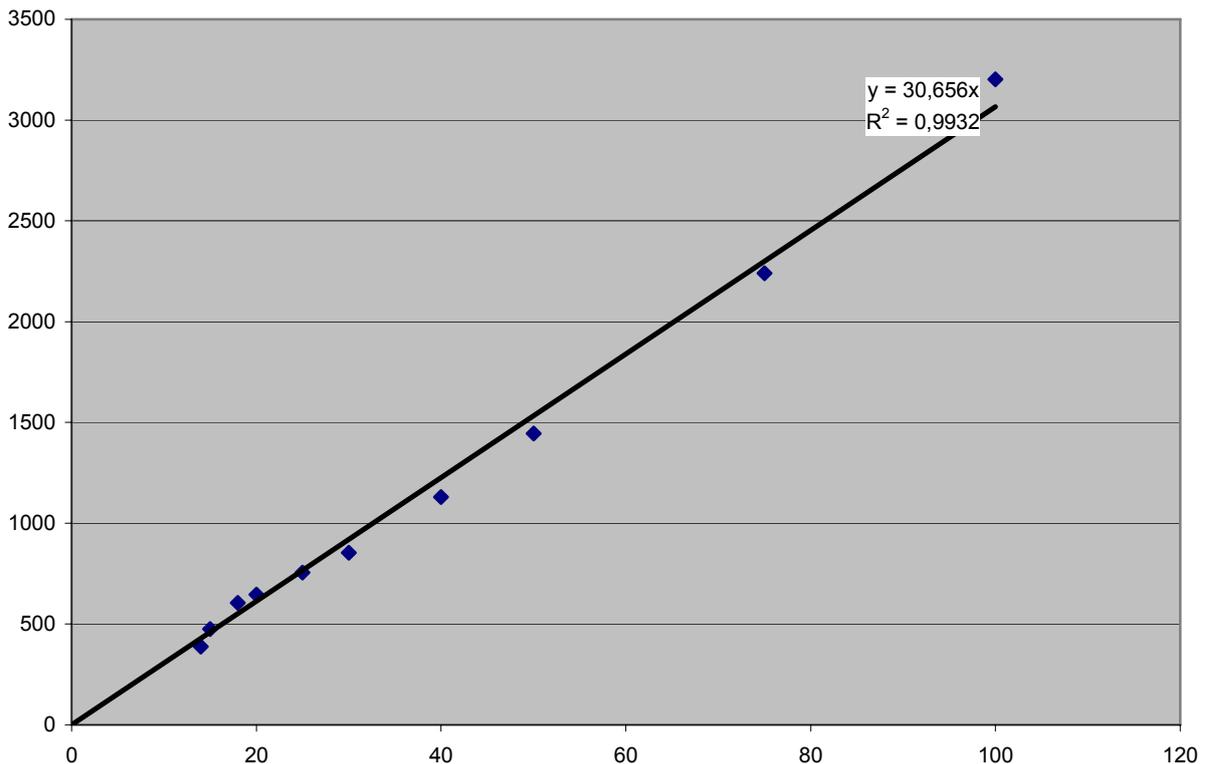
Der Anstieg des Messsignals ist in Wirklichkeit noch sehr viel schneller als auf dem Bild zu sehen ist. Dies liegt an der Wandlungszeit der benutzten ADC's. Auch der Überschwinger beim Wechsel der Rampe ist nicht echt, sondern durch das Einschwingverhalten der benutzten Operationsverstärker bedingt.

Man sieht aber das Plateau, wie es von reiner Verschiebungspolarisation zu erwarten ist.



Aus dieser Kurvenschar lässt sich wegen dem horizontalen Plateau nur ein Parameter gewinnen, nämlich die Dicke des Materials. Der leichte Anstieg des Plateaus deutet allerdings auch auf eine bestimmte Restfeuchte hin.

Trägt man nun die Spannungswerte in der Mitte des Plateaus (Messpunkt 96) gegen die Dicke ab, so erhält man das folgende Diagramm.



In dem Diagramm sind die Messwerte als Punkte eingetragen. Auf der X-Achse ist die mit Hilfe einer Mikrometerschraube ermittelte Foliendicke in  $\mu\text{m}/10$  abgetragen, auf der Y-Achse der Messwert, den der Sensor liefert.

Die Messpunkte werden statistisch ausgewertet, da jede Messung fehlerbehaftet sein kann. Der wahrscheinlichste Verlauf ist der, bei dem die Summe der mittleren Fehlerquadrate am kleinsten ist. Die eingezeichnete Ausgleichsgerade erfüllt diese Bedingung. Ihre Gleichung  $y = 30,656x$  besagt, dass der Messwert durch 30,656 dividiert werden muss um die Dicke in  $\mu\text{m}$  zu erhalten.

Das in der Abbildung angegebene Bestimmtheitsmaß  $R^2$  gibt an, wie gut die Messwerte die Materialdicke anzeigen. Das Bestimmtheitsmaß ist 1, wenn alle Punkte exakt auf der Geraden liegen. In unserem Fall ist das Bestimmtheitsmaß 0,993. Dies bedeutet, dass die Messgenauigkeit mit 0,7% angegeben werden kann.

Es ist zu berücksichtigen, dass die zur Kalibrierung benutzten Folien selbst eine Dicktoleranz haben. Bei der Messung wurde lediglich ihr Nominalwert angegeben. Die Genauigkeit des benutzten Datenwandlers sowie weitere elektrische Kenngrößen gehen ebenfalls in Reproduzierbarkeit ein.

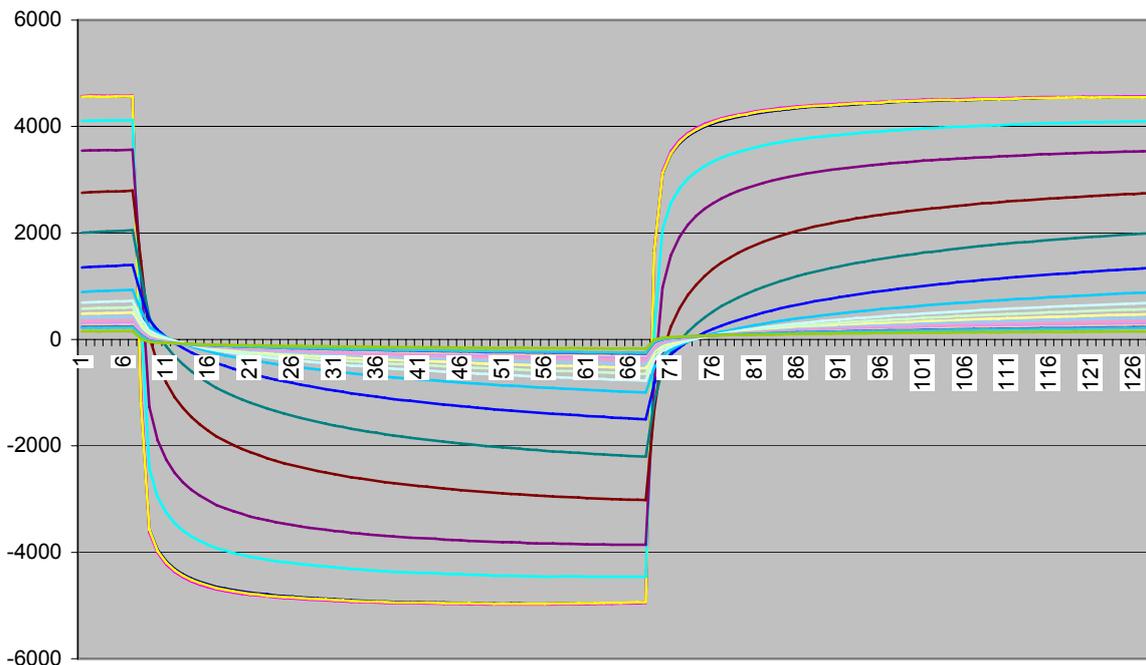
Trotz dieser Fehlerquellen bewegt sich die Genauigkeit bei dieser Messanordnung bereits im Bereich einer guten Mikrometerschraube. Und dies obwohl mit einem offenen Sensor ohne Gegenelektrode gemessen wurde. Eine weitere Erhöhung der Genauigkeit ist durchaus möglich.

Eine von vielen möglichen **Anwendungen** ist die Ermittlung der Dicke von Blasfolien, bei denen der Sensor nur an einer Seite angebracht werden kann.

## Orientierungspolarisation

Insbesondere bei Wasser lässt sich die Orientierungspolarisation gut beobachten. Im folgenden Diagramm ist das Trocknungsverhalten eines mit Wasser getränkten Gewebes gezeigt. Das Stimulus-Signal hat eine Frequenz von 2kHz, Die Dauer der steigenden und fallenden Rampe beträgt somit je 250  $\mu$ s.

Während dieser 250 $\mu$ s wird das Antwortsignal 128mal gemessen und die Messwerte zu der Antwortkurve zusammengesetzt. Die Abtastrate von 128 Abtastungen ist Standard. Alle Kurven werden an 128 Punkten abgetastet, unabhängig davon, ob mit 100 kHz oder mit 1kHz gemessen wird.



Feuchtes Baumwollgewebe wurde auf den Sensor gelegt und trocknete dort. Die Antwortkurve wurde durch Einzelmessungen im Abstand von etwa 5min also mit jeweils einem anderen Trocknungsgrad aufgenommen, so dass die oben gezeigte Kurvenschar entstand.

Wenn der Trocknungsvorgang beginnt, befindet sich noch sehr viel Wasser zwischen den Maschen des Stoffs. In dicken Wasserfilmen sind die Moleküle sehr gut beweglich. Die Zeitkonstante des Einschwingens ist sehr kurz, was sich in einer steilen Flanke äußert (gelbe Kurve).

Mit zunehmendem Trocknungsgrad verschwindet zunächst das Wasser zwischen den Maschen. Die stärker an der Oberfläche oder im Stoff gebundenen Moleküle sind weniger beweglich. Die Zeitkonstante des Einschwingvorgangs wird größer, der Anstieg verlangsamt sich.

Der Kurvenanstieg ist durch die endlichen Umorientierungszeiten bestimmt. Nach etwa 50  $\mu$ s ist der Einschwingvorgang weitgehend beendet. Dies legt nahe, die Frequenz des Stimulus-Signals bei etwa 5 kHz zu halten, falls man außer der Verschiebe- und der Orientierungspolarisation auch noch die Verluste messen möchte.

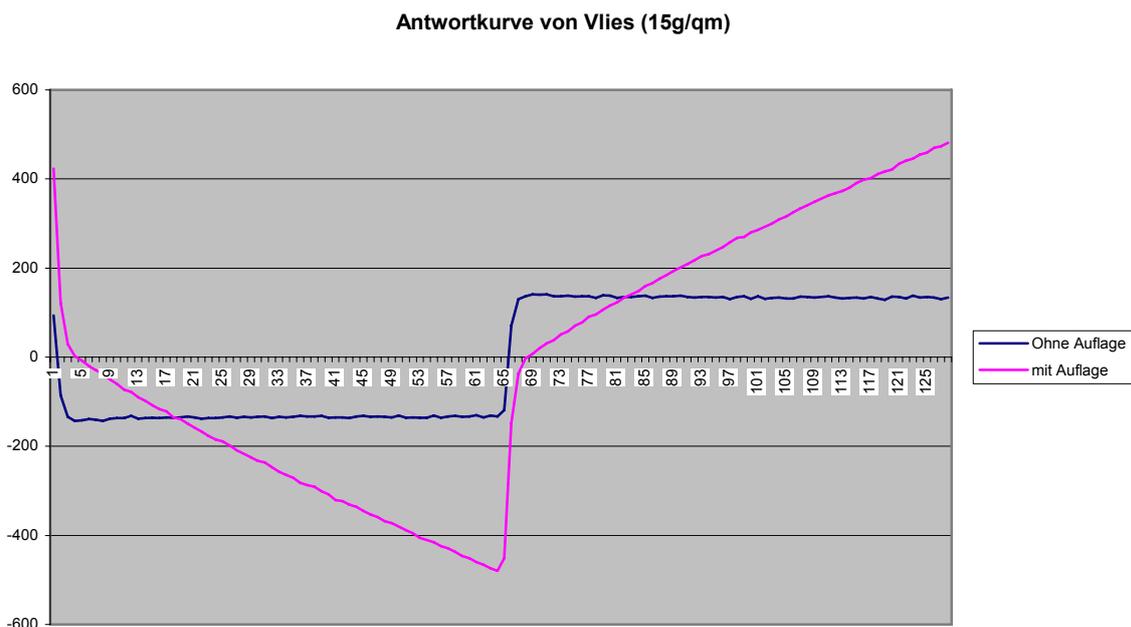
## Verluste

Wenn das Gewebe so weit ausgetrocknet ist, dass sich kein Wasser mehr zwischen den Maschen und auf der Oberfläche befindet, verschwindet die Orientierungspolarisation, denn das Wasser ist in oder an der Faser so stark gebunden, dass sich die Wassermoleküle nur noch schwer im Feld umorientieren können. Es bleibt die Verschiebepolarisation sowie die Verluste.

Um dies zu zeigen, sind im folgenden Bild die „untersten“ Kurven des vorhergehenden Diagramms vergrößert dargestellt.

Man beachte den sehr steilen Anstieg zwischen den Punkten 64 und 70. bei der untersten (grünen) Kurve, die dem trockensten Stoff zugeordnet ist. Dieser ist im Wesentlichen die Verschiebungspolarisation bedingt. Die Verluste spiegeln sich im weiteren Anstieg der Kurve. Wird der Stoff weiter getrocknet, so verschwinden die Verluste, der Anstieg wird noch steiler und das Plateau der Kurve wird horizontal.

Man beachte den charakteristischen Punkt bei Abtastpunkt 78, in dem sich alle Kurven schneiden. Der Y-Wert dieses Punktes entspricht in etwa dem Flächengewicht des trockenen Gewebes.



## Auswertung

Die Anforderungen an die Auswertung sind in der Regel sehr hoch. Dies sei am Beispiel der Online Messung an Filamenten im Spinnprozess gezeigt.

### Massenauflösung:

Titer: 100dTex = 10g/km  
Masse im Sensor = 400µg (Sensor 4cm lang)  
0,25% Auflage = 1µg  
1% Messgenauigkeit = **10ng**

### Messgeschwindigkeit:

Spinnengeschwindigkeit = 6000m/min = 100mm/ms  
Durchlauf eines Punktes durch den Sensor = 0,4ms = 2,5kHz  
günstigster Wert (Messempfindlichkeit) = **10..100kHz Stimulus**  
Zahl der Abtastungen (128/Messkurve) = 1..10 MHz

Jede Laborwaage hat ihre Schwierigkeiten, wenn eine Auflösung von 10ng gefordert wird und allemal wenn sie weit über 1000 Messungen in der Sekunde ausführen soll.

## Arten der Auswertung

Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Material-Eigenschaften kann in der Praxis relativ komplex sein, nämlich dann, wenn sich die einzelnen Effekte überlagern.

Zur Auswertung müssen dann mathematische Algorithmen genutzt werden.

- Bei konventioneller Messtechnik geht man davon aus, dass jeder Messwert auch eine bestimmte Bedeutung hat. Wenn z.B. der Widerstand einer Stoffbahn gemessen wird und diesem Widerstand einer bestimmten Restfeuchte zugeordnet werden kann, so ergibt sich der Zusammenhang:

$$\text{Restfeuchte} = a * \text{Messwert} + b$$

Jedem Messwert kann also eine bestimmte Bedeutung zugeordnet werden. Lässt sich die Funktion bestimmen, so kann die Feuchte analytisch bestimmt werden. Diese Art der Auswertung, bei der die Zusammenhänge durch eine physikalische Gleichung beschrieben werden können, wollen wir im folgenden **physikalische Auswertung** nennen.

- Bei der **multivariate Messtechnik** ergibt sich erst aus der Auswertung von mehreren Messwerten eine Bedeutung. So ermittelt unser Kapazitivsensor eine Messkurve als Antwort auf ein dreieckförmiges Stimulus-Signal. Keiner der einzelnen Messpunkte auf der Kurve hat eine bestimmte Bedeutung. Er kann weder als Kapazität noch als Widerstandswert interpretiert werden.

Erst die Auswertung vieler nicht einzeln interpretierbarer Messpunkte ergibt eine Bedeutung. Der Zusammenhang zwischen dem zu ermittelnden Parameter (z.B. die Auflage) und den Messwerten des Sensors wird durch eine Kalibrierung gewonnen. So lässt sich bei beschichtetem Material die Dicke des Trägers durch eine bestimmte Linearkombination von Messwerten an verschiedenen Abtastpunkten der Messkurve berechnen, die Dicke der Auflage durch eine andere

$$\begin{aligned} \text{Dicke(Träger)} &= K11 * MP1 + K12 * MP2 + K13 * MP3 + K14 * MP4 + K1d \\ \text{Dicke(Auflage)} &= K21 * MP1 + K22 * MP2 + K23 * MP3 + K24 * MP4 + K2d \end{aligned}$$

Dabei ist MPx der Messwert an Punkt x, K11..K24 sowie K1d, K2d sind die Kalibrierwerte, die in einem Kalibrierverfahren gewonnen werden müssen. Wie gut mit den so gewonnenen Gleichungen die Dicken zu errechnen sind, gibt das Bestimmtheitsmaß R2 an, welches die Kalibriersoftware automatisch mit berechnet. Sind die Kalibrierparameter ermittelt, so sind die Gleichungen echtzeitmäßig innerhalb weniger Rechnerzyklen lösbar.

Derzeit gibt es noch wenige Messsysteme, die sich der multivariaten Auswertverfahren bedienen. Mit zunehmender Komplexität der Messaufgaben wird sich dies jedoch ändern.

Die oben beschriebene multivariate Datenanalyse lässt sich vor allem bei linearen Abhängigkeiten einsetzen. Bei Nichtlinearitäten müssen die physikalischen Ursachen ermittelt werden und damit das Problem auf ein lineares reduziert werden, was z.B. durch logarithmieren oder andere mathematische Algorithmen geschehen kann. So ist z. B. der Anstieg der Messkurven von feuchten Materialien nicht linear sondern exponentiell.

$$y = a(1 - e^{-bt^v})$$

Der Exponent b ist nicht bekannt. Er hängt vom Trocknungsgrad ab. Der weitere Exponent v liegt für Wasser, das an Polymere gebunden ist zwischen 0,5 u. 1. Man kann den Grenzwert a der Exponentialfunktion in einer Vorauswertung ermitteln. Dieser hängt von der Wassermenge ab und kann dann bei der statistischen Auswertung benutzt werden.

Man bildet somit lineare Hilfsvariable, die dann in die Regressionsanalyse einfließen.

Zusammenfassend wird man folgende Auswertestrategien verfolgen:

Sind physikalische Zusammenhänge bekannt, so wird man die **physikalische Auswertung** bevorzugen. Die Kalibrierung wird dann besonders einfach.

Sind physikalische Zusammenhänge zwar vorhanden, lassen sich aber nicht in einer mathematischen Formel darstellen, oder ist die Formel so komplex dass sie mit der gegebenen Rechenleistung des Sensors unter Echtzeitbedingungen nicht lösbar ist, wird man eine **multivariate Auswertung** anwenden. Dabei ist aber zu beachten, dass die Kalibrierung aufwendig sein kann.

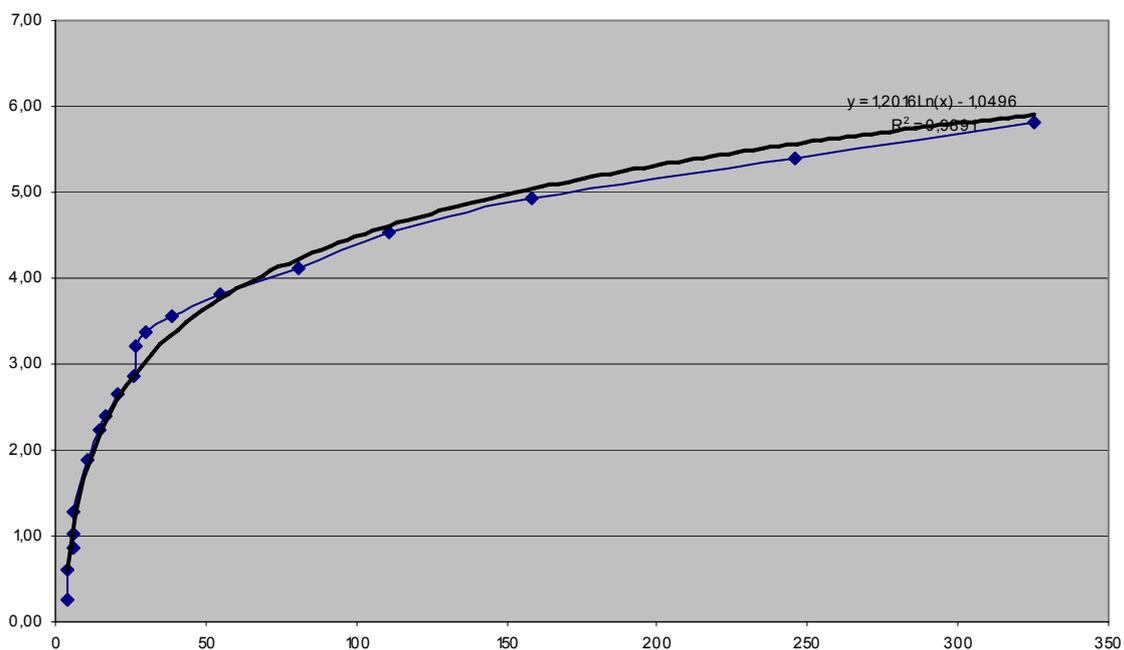
Dies alles klingt kompliziert. Mit der umfangreichen Software die in dem Sensorsystem integriert ist, lassen sich die Kalibrierungen aber einfach handhaben.

## Physikalische Auswertung

### Beispiel: Trocknung

Am Ausgang eines Spannrahmens (Trocknungsstrecke) soll die Feuchte von Gewebe gemessen werden. Um die Kalibrierwerte zu ermitteln wurden Laborexperimente durchgeführt.

1. Proben des zu messenden Gewebes wurden in getrocknetem Zustand verwogen.
2. Das Gewebe wurde befeuchtet, der Wasseranteil gravimetrisch bestimmt.
3. Danach wurde das Gewebe auf den Sensor gelegt. Die Kurvensteigung wurde ermittelt und gegen den gravimetrischen Wert in einer Messkurve abgetragen.
4. Einiger Zeit später, nachdem das Gewebe etwas trockener war, wurde die Messung wiederholt.
5. Nachdem das Gewebe in offener Umgebung nicht weiter trocknete, wurde es in einem Trockenschrank getrocknet
6. Danach wurde es vom trockenen Zustand ausgehend vermessen bis es bei ca 3% durch die Luftfeuchte nicht mehr feuchter wurde.



Die Messkurve ist in folgendem Bild gezeigt.

Die Restfeuchte in % ist auf der Y-Achse abgetragen, der Messwert auf der X-Achse. Der Fehler bei etwa 3% Restfeuchte rührt daher, dass im rechten Bereich von hoher zu niederer Feuchte gemessen wurde, im linken Bereich von niederer zu hoher.

Die Verteilung der Punkte legt nahe, dass zwischen Feuchte und Messwert ein logarithmischer Zusammenhang besteht. Daher wurde in das Diagramm eine logarithmische Ausgleichsgerade eingezeichnet. Das hohe Bestimmtheitsmaß von über 99% bestätigte die Vermutung.

Der Zusammenhang ist:

$$\text{Restfeuchte[\%]} = 1,2 * \ln(\text{Messwert}) - 1$$

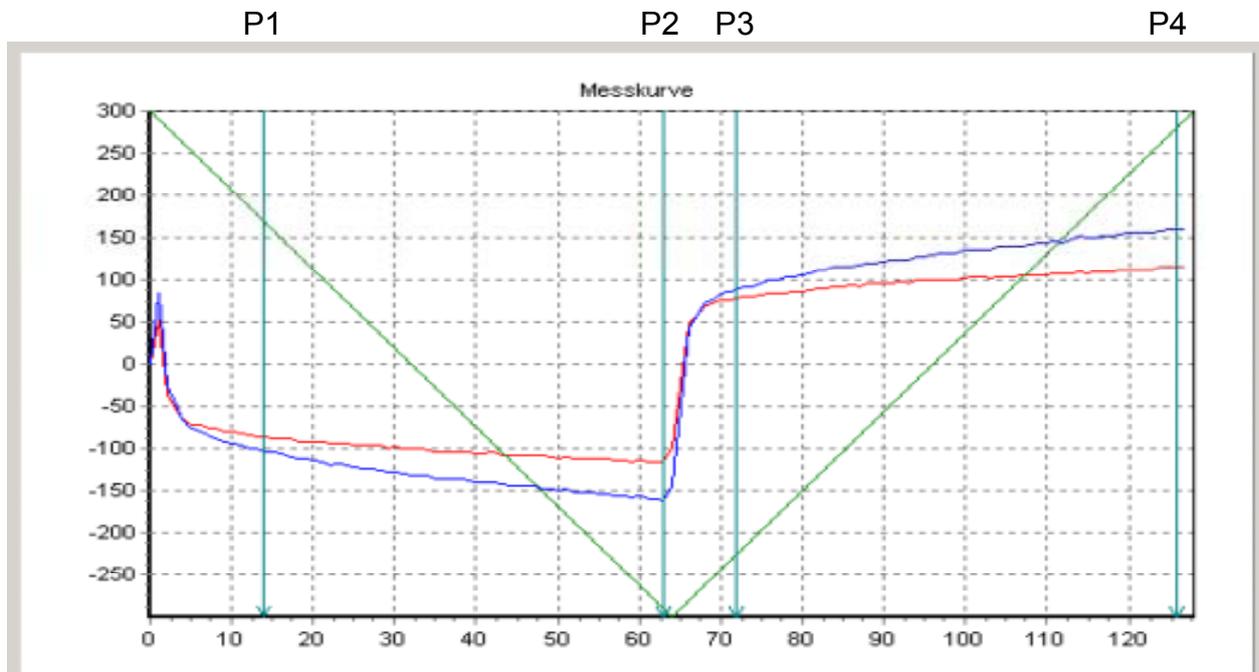
Bei dieser Messung sind somit beide Bedingungen erfüllt, die für eine physikalische Auswertung sprechen.

- Jedem Messwert kann eine Messgröße zugeordnet werden
- Der Zusammenhang zwischen Messgröße und Messwert kann durch eine mathematische Gleichung hergestellt werden.
- Die Gleichung ist mit der Rechenleistung die im Sensor installiert ist, unter Echtzeitbedingungen lösbar.

Bei obigem Beispiel ist der Zusammenhang logarithmisch. Der Zusammenhang kann aber auch erheblich komplexer sein. In diesem Fall nutzt man eine Lookup Tabelle zur Auswertung.

## Multivariate Auswertung

Die von uns eingesetzte statistische Auswertung beruht auf multivariaten Analysemethoden. Der Kapazitätssensor ermittelt eine Messkurve als Antwort auf ein dreieckförmiges Stimulussignal:



In obigem Bild ist das Dreieckssignal angedeutet, sowie die Messkurven zweier unterschiedlicher Proben. Die Messsignale werden an den vier eingezeichneten Punkten P1 - P4 abgetastet.

Keiner der Messwerte auf der Kurve hat einzeln eine bestimmte Bedeutung. Erst mehrere Messwerte, die in obigem Fall bei den vier Abtastpunkten gewonnen wurden, können zusammen interpretiert werden. Dazu ist eine Kalibrierung erforderlich.

Die Kalibrierung liefert einen Variablen- Satz, der eine bestimmte Linearkombination der einzelnen Messwerte ist. Eine bestimmte Linearkombination steht für die Dicke des Trägers, eine andere für die Dicke der Auflage, entsprechend folgendem Zusammenhang:

$$\begin{aligned} \text{Dicke(Träger)} &= K11 * MP1 + K12 * MP2 + K13 * MP3 + K14 * MP4 + K1d \\ \text{Dicke(Auflage)} &= K21 * MP1 + K22 * MP2 + K23 * MP3 + K24 * MP4 + K2d \end{aligned}$$

Dabei ist MPx der Messwert an Punkt x, K11..K24 sowie K1d, K2d sind die Kalibrierwerte, die in dem Kalibrierverfahren gewonnen werden müssen. Wie gut mit den so gewonnenen Gleichungen die Dicken zu errechnen sind, gibt das Bestimmtheitsmaß R2 an, welches die Kalibriersoftware automatisch mit berechnet.

Stehen die Kalibrierparameter zur Verfügung, so sind die Gleichungen echtzeitmäßig innerhalb weniger Rechnerzyklen lösbar.

Bei der Kalibrierung muss man wissen, ob der Zusammenhang zwischen den gemessenen Werten (Messwerten, Regressoren) und den zu ermittelnden Werten (Messgrößen, Regressanden) linear ist. Ist der Zusammenhang nicht linear, so wird man zunächst versuchen, lineare Hilfsvariable zu bilden. Ist dies nicht möglich, so können die Rechnungen sehr umfangreich werden oder gar nicht durchführbar sein. Für unterschiedliche Anwendungen ist es nötig, unterschiedliche Auswertungen zu installieren.

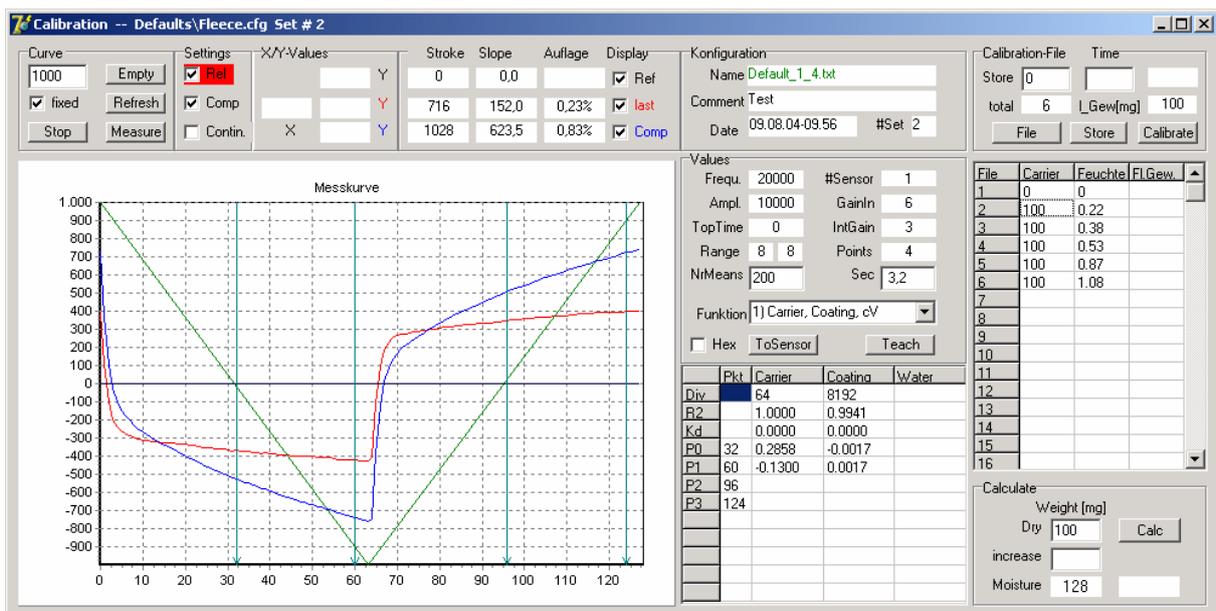
In der mitgelieferten Software stehen mehrere Auswerteprogramme zur Verfügung, zwischen denen mit Hilfe einer Funktionsnummer gewählt werden kann. Diese Programme ermöglichen eine weitestgehend automatische Kalibrierung.

Das folgende Bild zeigt das Fenster der Bedieneroberfläche, in dem die Messungen zur Ermittlung der Kalibrierwerte durchgeführt werden. Links ist die zuletzt gemessene Kurve gezeigt. Diese kann unter Angabe der bekannten Parameter (im Bild Auflage und Titer) mit <Save> in den Kalibrierfile eingetragen werden (rechtes Grid). Es sollten wenigstens 3mal so viele Messungen mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt werden als Abtastpunkte gewünscht werden. Sind alle Messungen durchgeführt, so kann mit <Calibrate> ein Excel Programm angewählt werden, in dem die Berechnung der Kalibrierwerte stattfindet.

In dem Excel-Programm werden „auf Knopfdruck“ sowohl geeignete Abtastpunkte als auch die zugehörigen Koeffizienten ermittelt und die Kalibrierkurve gezeigt.

Ist diese zufriedenstellend, so können die berechneten Kalibrierwerte abgespeichert und Excel verlassen werden. Die Kalibrierwerte werden an die Bediener-Oberfläche übergeben (mittleres Grid) und können archiviert werden.

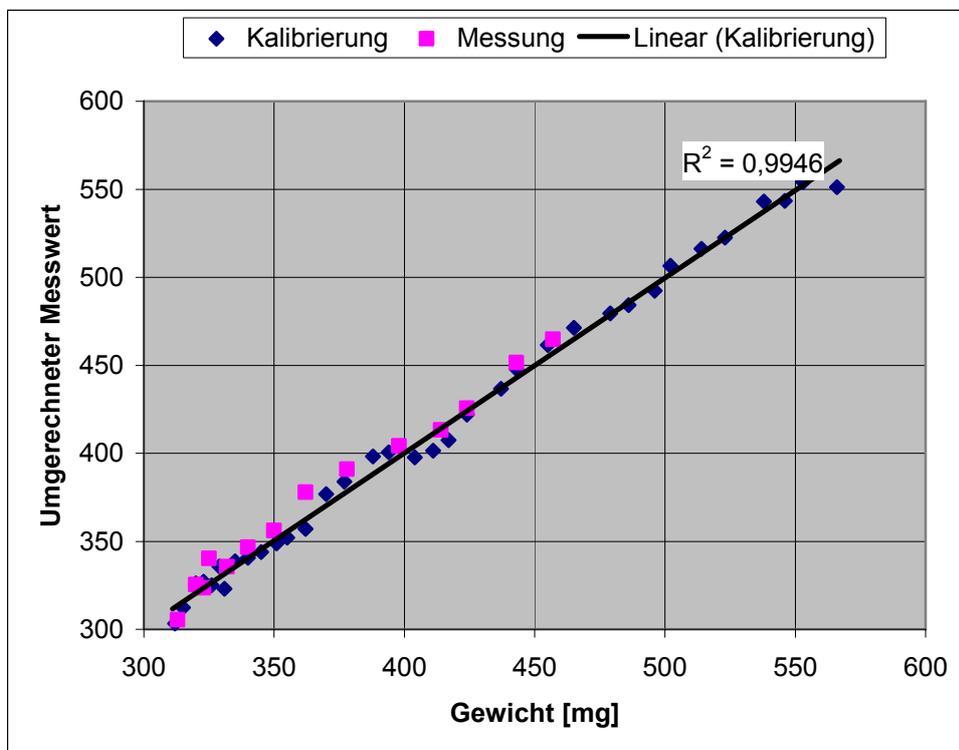
**Achtung!** Die Zahl der Messungen mit unterschiedlichen Parametern sollte wenigstens dreimal so groß sein, wie die Zahl der Abtastpunkte. Im Beispiel sollten also wenigstens 12 Auflagen gemessen werden



Das folgende Diagramm zeigt den Zusammenhang von gravimetrisch ermittelter Feuchte zu dem Messergebnis der Kapazitätsmessung. Zur Berechnung wurde eine Kurvenschar ähnlich der oben gezeigten benutzt.

In dem Diagramm ist eine Ausgleichsgerade eingezeichnet, sowie das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  angegeben. Ist es 1, Wenn alle Punkte exakt auf der Geraden liegen ist es 1. Man sieht, dass mit  $R^2 = 0,9946$  eine recht exakte Kalibrierung möglich ist.

Zusätzlich wurden noch einige Punkte aufgenommen (violett), die nach der Kalibrierung mit den ermittelten Parametern gemessen wurden. Man sieht, dass diese Punkte einen recht kleinen Fehler aufweisen. Noch vorhandene Abweichungen dürften durch ungleichmäßige Trocknung hervorgerufen sein. Derartige Schwankungen kann man auch in einem hier nicht gezeigten Zeitdiagramm erkennen (R/S-Karte). Zu beachten ist auch, dass die benutzte Waage nur auf einige mg genau misst.



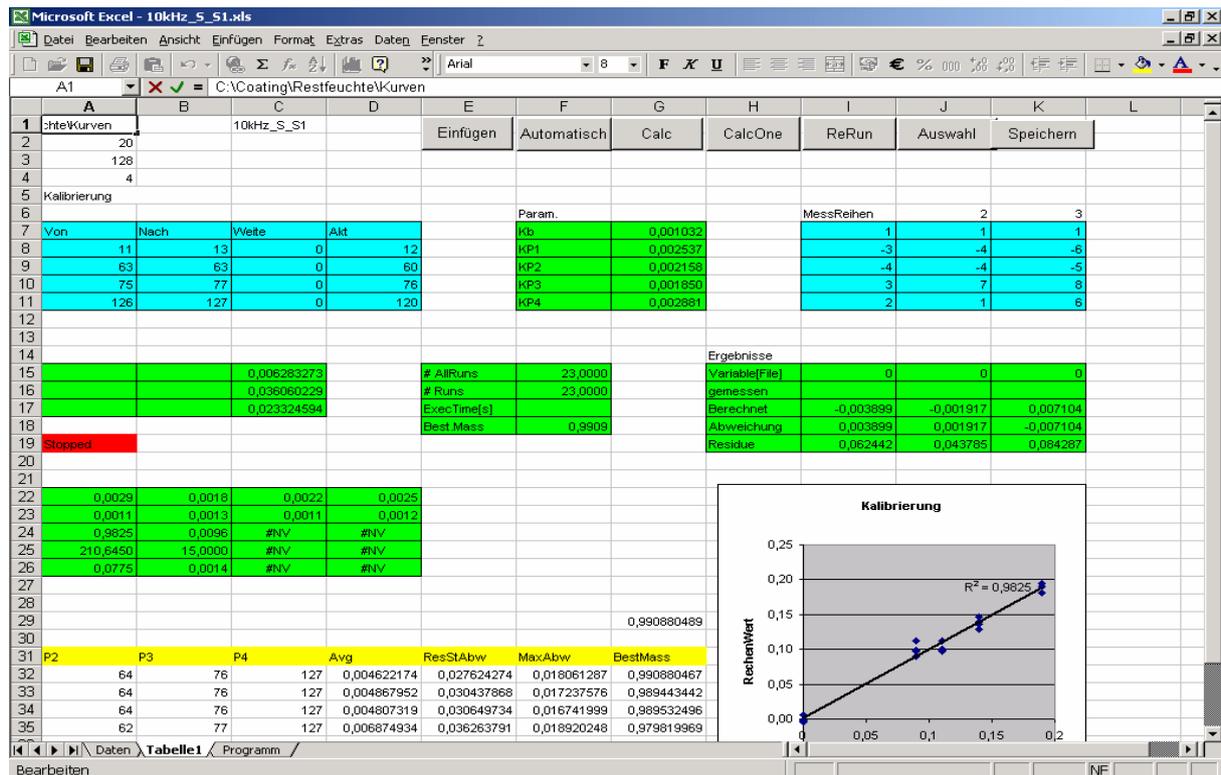
Mit Hilfe obiger Darstellung kann die Qualität der Aussagen überprüft werden. Sind die Kalibrierparameter erst einmal an den Sensor übermittelt, wird weder die Antwort- noch die Kalibrierkurve weiter benötigt. Der Sensor berechnet dann mit Hilfe der Kalibrierparameter die gewünschten Parameter (Titer, Auflage, Restfeuchte etc.) und sendet sie zum PC an die Bedienoberfläche, wo sie numerisch sowie als Zeitkurve angezeigt und auf Platte archiviert werden.

## Kalibrierprogramm

Das Programmierprogramm wurde in Excel erstellt um dem Anwender Eingriffsmöglichkeiten zu geben. In der Regel werden diese jedoch nicht benötigt. Das Programm kann automatisch ablaufen.

Es stehen mehrere Kalibrierprogramme zur Verfügung. Welches dieser Programme aufgerufen wird, bestimmt die Funktionsnummer, die in der Bedienoberfläche angegeben wird.

Das nächste Bild zeigt eines der Kalibrierfenster.



1. Ein Druck auf den Knopf Calibrate der Bedienoberfläche ruft Excel auf
2. Mit dem Knopf <Einfügen> werden die Messdaten (Kalibrier-File) übernommen.
3. Mit dem Knopf <Automatisch> trägt das Programm in das blaue Feld links oben sinnvolle Abtastkombinationen ein.
4. Das Programm berechnet die zugehörigen Kalibrierwerte sowie das Bestimmtheitsmaß
5. Die Abtastkombinationen werden permutiert. Danach erfolgt eine Neuberechnung.
6. Aus allen möglichen Permutationen wird die mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß ausgewählt und
7. in einer Tabelle abgelegt. Zusätzlich wird das Ergebnis in dem gezeigten Diagramm dargestellt.
8. Falls das Ergebnis zufriedenstellend ist, lassen sich die berechneten Koeffizienten mit dem Knopf <Speichern> an die Bedienoberfläche übergeben.
9. Danach wird Excel automatisch verlassen

## Möglichkeiten und Grenzen

Das Meßsystem ist äußerst vielseitig einsetzbar. Einer der Einsatzbereiche ist die Überwachung von Trocknungsvorgängen. Bei den heutigen Energiepreisen wird es immer wichtiger diese zu überwachen und zu regeln.

Das Meßsystem liefert sehr scharfe Kriterien im Übergang von Feuchte zu Restfeuchte. Wenn man durch deren Auswertung nur wenige % an Energiekosten sparen kann, dann amortisiert sich die relativ geringe Investition in kürzester Zeit.

Die Möglichkeit der Überwachung von *Zweikomponentensystemen* ist ein weiterer Einsatz des Meßsystems. Man denke hier z. B. an das Aufbringen von Apretur auf Gewebe, an das Aufbringen von Avivage auf Vlies-Stoffe oder die Präparation von Spinnfasern. Bei diesen Anwendungen lässt sich in den meisten Fällen nicht nur das Flächengewicht des Trägers sondern auch die Dicke der Auflage überwachen. Allerdings gibt es einige Erfordernisse und Einschränkungen:

- **Mechanik:** Bei offenen Sensoren „lebt“ das System von einem konstanten Abstand zwischen Sensor und Material. Der Sensor sollte daher leicht an die Warenbahn angelegt (nicht angedrückt) werden. Prinzipiell ist auch eine berührungsfreie Messung möglich, der Aufwand den Abstand zwischen Warenbahn und Sensor konstant zu halten, ist aber erheblich höher. Wir sprechen daher von einer quasi-berührungsfreien Messung.  
Bei konventionellen Messkondensatoren kann berührungsfrei gemessen werden, denn das Feld in diesen Kondensatoren ist in bestimmten Volumina recht homogen, so dass Abstandsänderungen keine so große Rolle spielen.  
Insbesondere bei offenen Sensoren ist das elektrische Feld nicht auf die Warenbahn beschränkt ist, sondern reicht weiter in den Raum. Änderungen der Umgebungsluftfeuchte beeinflussen die Messergebnisse. Daher sollte der Sensor zwecks Nullung von der Warenbahn abgehoben oder das Material aus dem Sensor ausgebracht werden können.  
Bei der Messung von Hochfeuchte ist darauf zu achten, dass geerdete Maschinenteile in ausreichendem Abstand sind, damit diese den Messstrom nicht ableiten können
- **Chemie:** Zwischen Auflage und Träger wird durch die dielektrischen Verluste der Auflage unterschieden. In ganz seltenen Fällen hat die Auflage keine Verluste. In diesen Fällen kann auch nicht zwischen Träger und Auflage getrennt werden.
- **Empfindlichkeit:** Jedes Meßsystem kommt dann an die Grenzen der Auflösung, wenn das Messsignal im Rauschen verschwindet. Derzeit liegt das Rauschen von Operationsverstärkern bei etwa:  $10nV / \sqrt{Hz} \dots 1fA / \sqrt{Hz}$   
Diese Grenzen werden laufend weiter reduziert, so dass sich die Auflösung bereits heute schon verbessern lässt  
Bei trockenen Filamenten mit einem Titer von 100 liegt derzeit die Grenze bei 0,2% für einen konventionellen Sensor. (siehe Chemie)  
Bei einem offenen Sensor liegt die Grenze noch ziemlich unter diesem Wert. Bei Messungen im Produktionsprozess gibt es bei den üblicherweise benutzten Präparationen keine Einschränkungen, da das Filament noch Restfeuchte aufweist.
- **Kalibrierung:** Die Kalibrierung ist recht einfach, wenn eine physikalische Auswertung eingesetzt wird. Sie wird im Fall einer statistischen Auswertung aufwendiger. Mit Hilfe der mitgelieferten Kalibriersoftware dauert die Kalibrierung von Zwei-

komponentensystemen (Träger u. Auflage) aber nicht viel länger als eine konventionelle Extraktion. Die gewonnenen Kalibrierparameter können in einer Datenbank abgelegt und bei Produktwechsel aus dieser Datenbank abgerufen werden. Bei Dreikomponentensystemen (Träger, Auflage, Restfeuchte) kann es schwierig werden, bekannte Proben zur Verfügung zu stellen.

- **Gleichmäßigkeit:** Der Sensor ist in der Lage, sehr kleine Probe- Flächen zu messen. Damit sind Gleichmäßigkeitsschwankungen gut erfassbar. Falls man z.B. an der „Wolkigkeit“ von Vlies interessiert ist, lassen sich mit Hilfe des cV-Wertes Aussagen machen.

Andererseits müssen die Messwerte des Sensors in Bezug zu den Ergebnissen einer klassischen Auflagebestimmung gesetzt werden. Da eine klassische Analyse nur mit großflächigen, oder langen Proben im Fall von Filamenten möglich ist, wird eine Mittelung mehrerer Messwerte bei der Kalibrierung erforderlich.

- **Anwendungsbereiche:** Das System lässt sich in den unterschiedlichsten Bereichen einsetzen. Die Software, die dabei benötigt wird, kann unterschiedlich sein. Um die Wartung und Systempflege zu erleichtern wird eine Standard-Software ausgeliefert. Angepasst an den jeweiligen Bedarf wird die Software, indem die passende Funktionsnummer in der Bedienoberfläche eingestellt wird. Auch die erforderliche Hardware kann mit dem Einsatz variieren. Als Elektronik werden zwei Basistypen angeboten, die sich durch die mögliche Messgeschwindigkeit unterscheiden (200kHz, 20kHz). Diese Basistypen werden durch Einstellung der Verstärkung an die jeweilige Messaufgabe angepasst. Die Elektroden sind so konstruiert, dass sie an die Messaufgabe angepasst werden können. Es werden standardmäßig einige unterschiedliche Typen angeboten (geschlossene sowie offene Formen). Sonderentwicklungen sind aber auch möglich und unter Umständen auch notwendig.

# Physikalische Grundlagen

## Aufbau von Messkondensatoren

### Konventioneller Kondensator

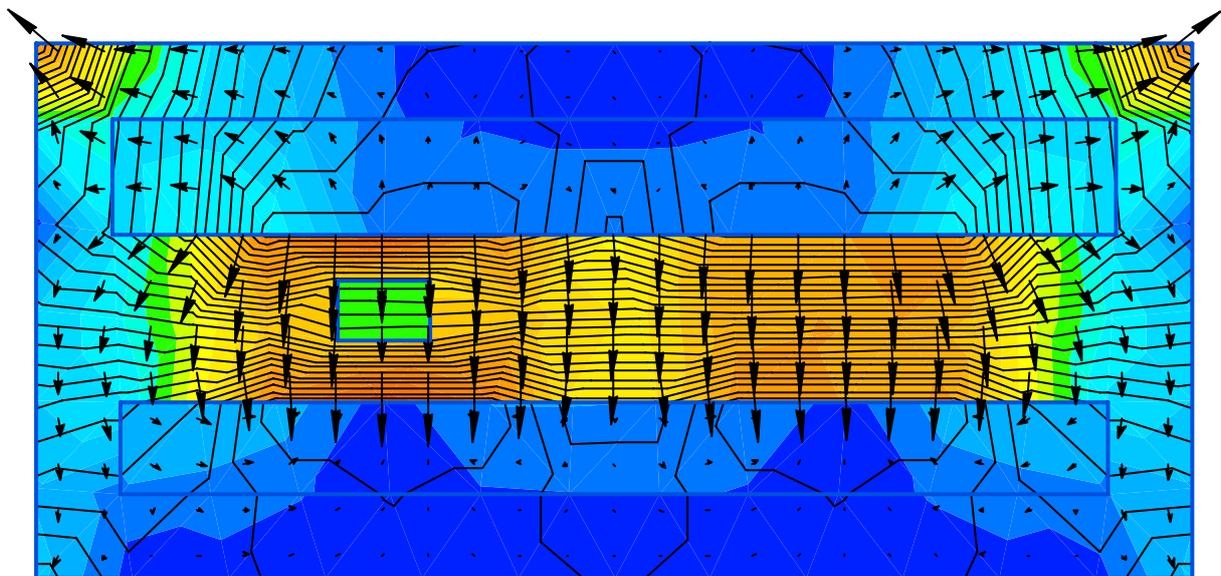
Bei diesen wird das elektrische Feld zwischen zwei parallelen Platten aufgebaut. Die Kapazität dieses Kondensators ist proportional zu seiner Fläche (F) und umgekehrt proportional zum Abstand der Platten (d). Der Proportionalitätsfaktor ist  $\epsilon_0=9 \cdot 10^{-11}$ .

$$C[F,d] = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot F / (4 \cdot \pi \cdot d)$$

Diese Ausführung des Messkondensators wird u. A. zur Messung der Präparationsauflage im Spinn-Prozess benutzt.

Bei diesen Ausführungen wird immer ein Referenzkondensator benutzt, der die gleichen Abmessungen hat, wie der eigentliche Messkondensator. Er ist zum Messkondensator benachbart, so dass in ihm auch in etwa das gleiche Klima herrscht. Wenn in einigen der Messungen mit Hochfeuchte gezeigt wird, dass der Messwert negativ wird, so bedeutet dies nur dass die Kapazität kleiner ist als die des Referenzkondensators.

Im folgenden Bild ist die Modellrechnung für einen Sensorkopf gezeigt, wie er zum Messen von Filamenten benutzt wird. Links ist der Messkondensator. Das grüne Rechteck im Messkondensator symbolisiert das Filament. Die Potentiallinien sind gezeigt, die Feldstärke als Pfeile und Farbe. Man sieht, dass die Feldlinien (abgesehen von Randeffekten) auf den Platten senkrecht stehen. Im Außenraum ist das Feld schwach.



## Offene Ausführung:

Bei der offenen Ausführung liegen die beiden Kondensatorplatten in einer Ebene. Diese Anordnung wird dann benutzt, wenn das zu messende Material nicht zwischen die Platten eines konventionellen Kondensators gebracht werden kann. Dies ist z.B. bei der Produktion von Vlies-Bahnen oder bei der Messung der Restfeuchte von Gewebbahnen in Spannrahmen der Fall.

Bei dieser Anordnung ist das Feld stark inhomogen. Der Abstand des Materials zu den Platten muss sehr genau eingehalten werden. Dies ist der Nachteil dieser Konfiguration. Der Vorteil ist der, dass die Longitudinal- Komponenten des Feldes im Material stark ausgeprägt sind und daher das Messsignal für die Verluste erheblich größer ist als bei Kondensatoren mit gegenüber liegenden Platten. Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn Verluste von trockenen Materialien gemessen werden sollen.

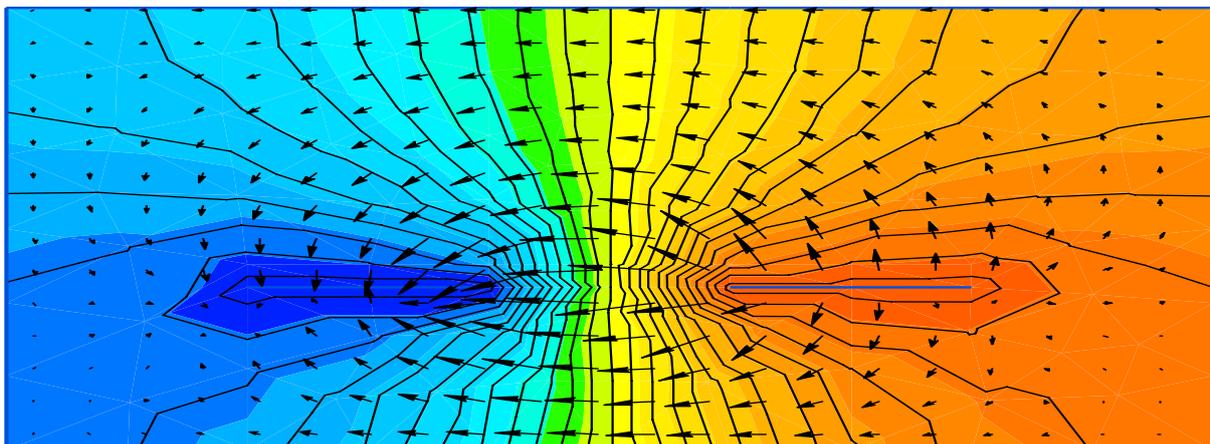
Weiter ist zu beachten, dass bei der offenen Ausführung kein Kondensator im konventionellen Sinn vorliegt. Während im konventionellen Fall die Feldlinien immer senkrecht zu den Platten stehen, unabhängig davon ob der Kondensator mit Material gefüllt ist oder ob nicht, beeinflusst das Material, das auf die Platten der offenen Ausführung aufgelegt wird zusätzlich die Richtung der Feldlinien. Dies kann eine wesentlich höhere Kapazitätzahl vortäuschen.

Außerdem sind die Randeffekte bei der offenen Ausführung wesentlich größer als im klassischen Fall. Insbesondere wenn das Material leitfähig ist, kann sich viel leichter eine parasitäre Kapazität im Außenbereich bilden, die wie eine Parallelschaltung (kapazitiver Spannungsteiler) den Messstrom reduziert.

Dieser komplexere Sachverhalt bedeutet nicht unbedingt, dass die offene Ausführung ungünstiger ist. Im Gegenteil – die vorgetäuschte hohe Dielektrizitätszahl und die parasitären Kapazitäten können für die Messung hilfreich sein.

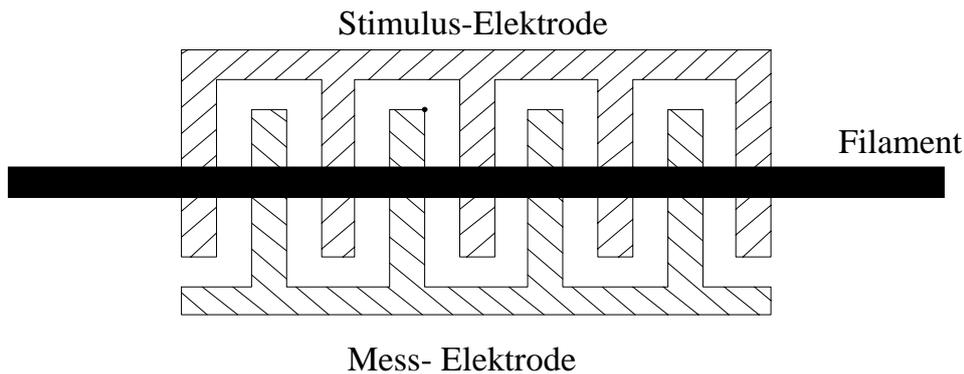
Im folgenden Bild ist die Simulation der Feldlinien eines offenen Sensors mit aufgelegtem Material gezeigt. Dargestellt sind die Äqui- Potentiallinien sowie die E-Linien. Das Material liegt oben auf den waagrecht angebrachten Elektroden. Man beachte die „Verbiegung“ der Feldlinien auf der Material- Seite.

Im Gegensatz zu dem konventionellen Messkondensator nimmt die Feldstärke im Außenraum wenig ab. Daher kann je nach Einbau eine externe elektrische Abschirmung notwendig sein, um die Abstrahlung nach außen zu minimieren.

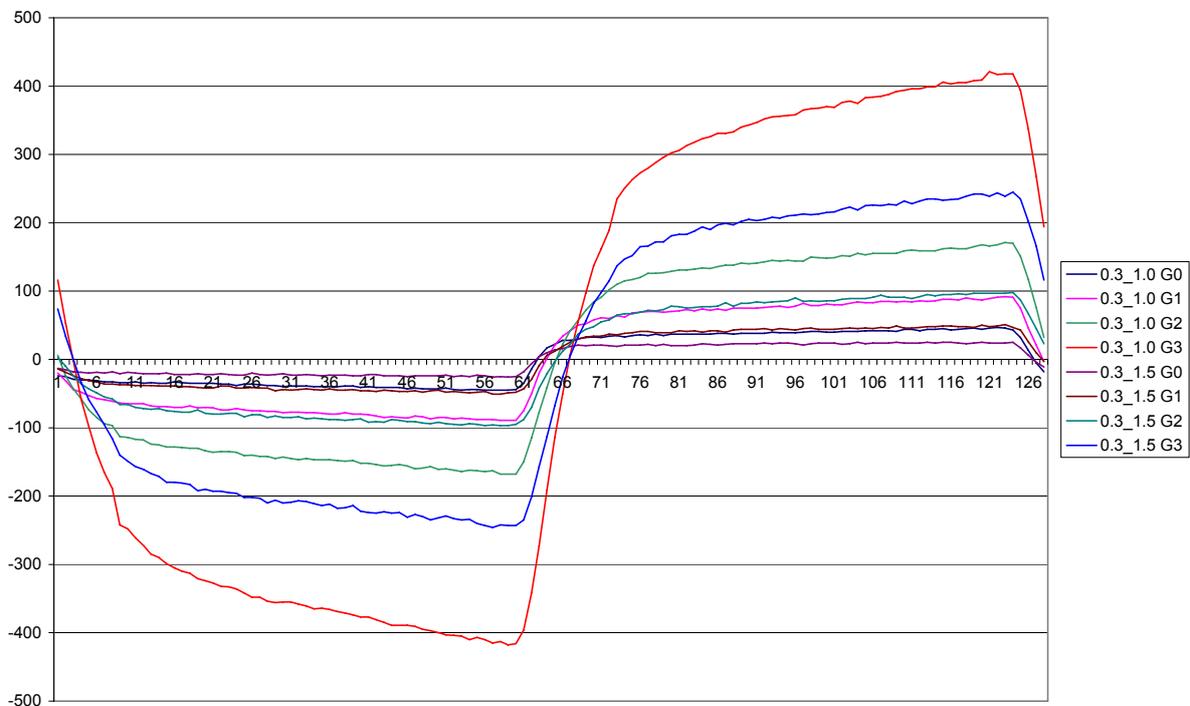


## Beispiele von Messungen mit offenen Sensoren

Die folgenden Messungen wurden mit offenen Sensoren durchgeführt. Dabei wurden kammartige Strukturen eingesetzt. Die Abstände sowie die Breite der Strukturen konnten geändert werden. Zusätzlich waren die Verstärkungsfaktoren der Elektronik einstellbar.



Das folgende Diagramm wurde mit zwei unterschiedlichen Elektroden Geometrien aufgenommen. Der Abstand der Elektroden beträgt bei einem Sensor 1mm, bei dem anderen 1,5mm. Die Breite der Elektroden beträgt bei beiden Sensoren 3mm.



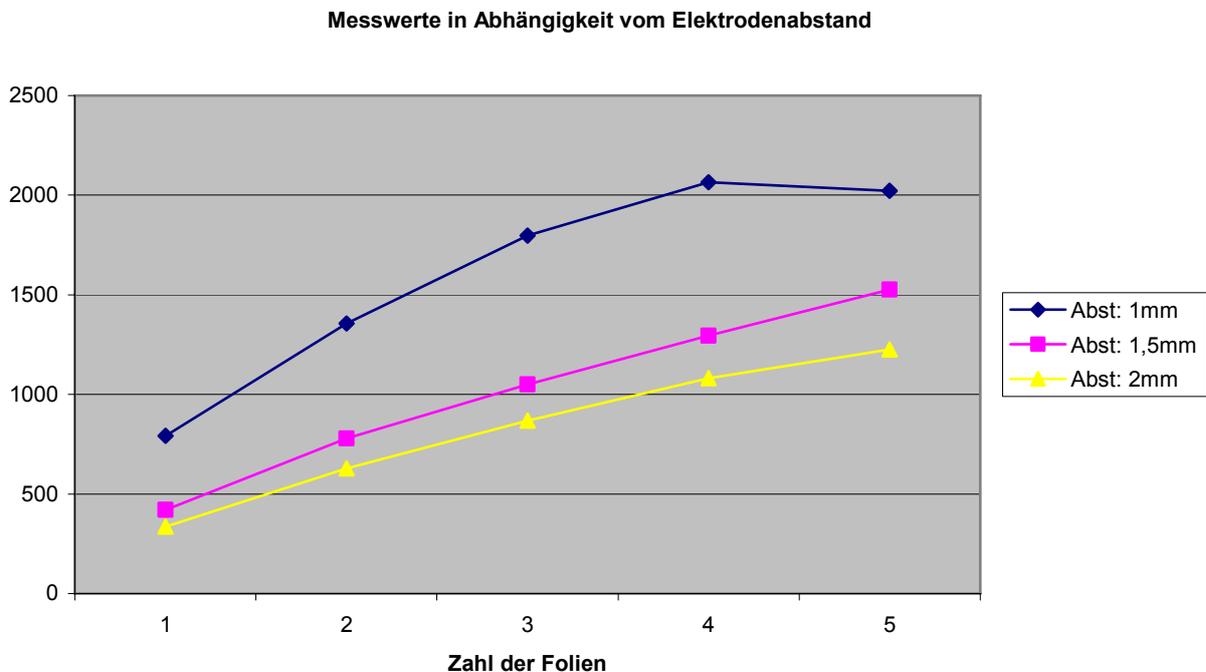
Im Beispiel wurden Filamente mit  $G_0=0,09\%$ ,  $G_1=0,11\%$ ,  $G_2=0,14\%$  und  $G_3=0,19\%$  Auflage gemessen. Die Höhe bei Punkt 66 entspricht in etwa dem Titer (ca. 150dTex), die Steigung der Auflage. Die genauen Verhältnisse müssen mit Hilfe ei-

nes Kalibrier- Verfahrens ermittelt werden. Die große Steigung des Messsignals ist mit einem konventionellen Sensor nicht zu erreichen.

Man sieht, dass bei dünnen Fäden die Höhe des Messsignals etwa umgekehrt proportional zum Abstand der Leiterbahnen ist. Bei Filamenten mit 150 dTex empfiehlt sich ein Leiterbahn-Abstand von etwa 1mm.

Die Elektrodengeometrie muss somit an die Messaufgabe angepasst werden. Sind sehr dünne Bahnen zu messen, so sollte der Abstand zwischen den Elektroden gering sein, bei dicken Materialien sollte er höher sein, denn der Abstand bestimmt die Eindringtiefe des Feldes in das Material.

Das folgende Bild zeigt die Abhängigkeit des Messsignals vom Abstand der Elektroden. Um die Abhängigkeit darstellen zu können, wurden im folgenden Bild bis 5 0,1mm starke Folien auf einen Sensor gelegt. Man sieht, dass ein Sensor mit 2mm Elektrodenabstand die größte Eindringtiefe aber auch die kleinste Empfindlichkeit hat. Außerdem erkennt man, dass bei einem Abstand der Elektroden von 1mm der Messwert nach der 4. Folie in Sättigung geht



Bei der Messung von Restfeuchte sollte der Abstand der Elektroden eher höher als niedriger sein, denn Verluste treten nur in Richtung des Feldes auf, also dann, wenn der Weg der Feldlinien durch das Material lang ist. Der Abstand selbst geht logarithmisch in den Messwert ein.

Ist das zu messende Material sehr dünn und muss sehr genau gemessen werden, dann kann die Feuchte der Umgebungsluft stören. In diesem Fall empfiehlt es sich einen separaten Sensor zur Messung der Luftfeuchte zu benutzen und mit dessen Messwert den Fehler zu kompensieren.

## Feuchte- Messungen an Geweben

Die Bestimmung der Restfeuchte von Materialien hat große wirtschaftliche Bedeutung, insbesondere in einer Zeit, die von der Suche nach Energie- Einsparpotenzialen geprägt ist.

In vielen Produktionsprozessen wie Vliesherstellung, Papierherstellung, Färbereien usw. werden Produkte übertrocknet, weil die Restfeuchte nur unzureichend gemessen werden kann. Bei besserer Kenntnis der Restfeuchte lässt sich diese Übertrocknung vermeiden. Energieeinsparungen, Erhöhung der Prozess- Geschwindigkeit sowie Qualitätsverbesserungen sind dann möglich.

Die Messung der Restfeuchte ist eine spezielle Flächengewichtsmessung. Während bei der Flächengewichtsmessung nur der Parameter  $\text{g/m}^2$  interessiert, benötigt man bei der Messung der Restfeuchte zwei Parameter, nämlich das Flächengewicht der trockenen Ware sowie das des Wassers. Beide Parameter werden in ein Verhältnis gesetzt, so dass man als Resultat einen Wert erhält, der die Dimension % hat. Also z.B. Restfeuchte = 8%.

Konventionell müssen zwei Messungen gemacht werden um dieses Verhältnis ermitteln zu können, nämlich eine Messung des Rohmaterials sowie eine Messung des getrockneten Materials an möglichst der gleichen Stelle. Dies ist aufwendig und auch Fehler behaftet, besonders dann, wenn die Transportgeschwindigkeit schwankt.

Einfacher und damit auch wesentlich preiswerter ist der Einsatz des Kapazitiv- Messverfahrens, bei dem mehrere Parameter gleichzeitig ermittelt werden. Voraussetzung ist, dass die Feldlinien das Material durchdringen können (einige mm), oder das zu messende Material gleichmäßig feucht ist, so dass eine Oberflächenmessung ausreicht.

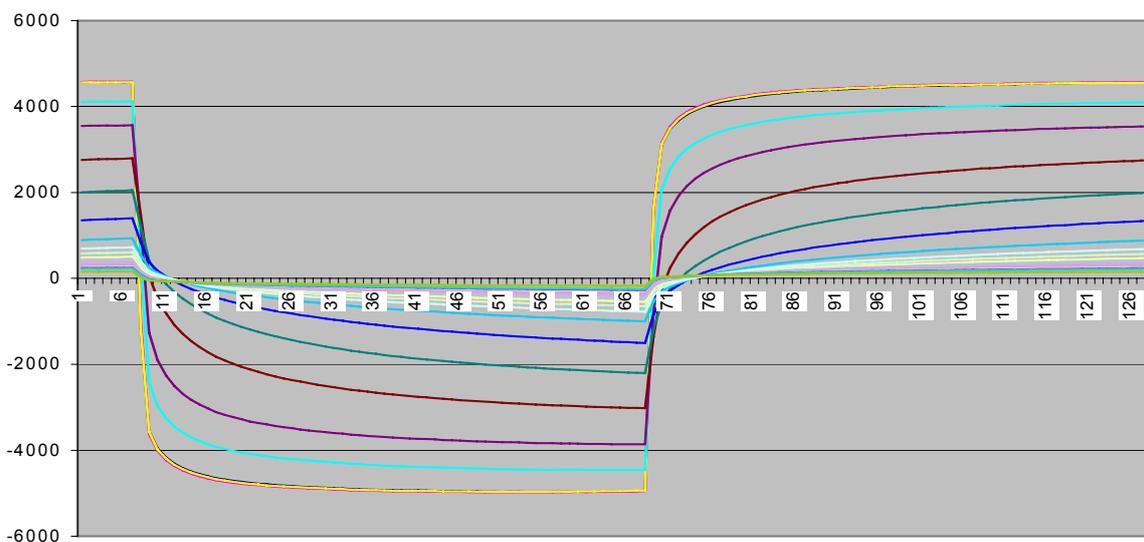
## Trocknungsverlauf

Interessant ist der Trocknungsverlauf von Geweben. Stellt man die Kapazitätsmesswerte den gravimetrisch ermittelten Werten gegenüber, so zeigt sich, dass der Trocknungsverlauf in unterschiedlichen Schritten abläuft:

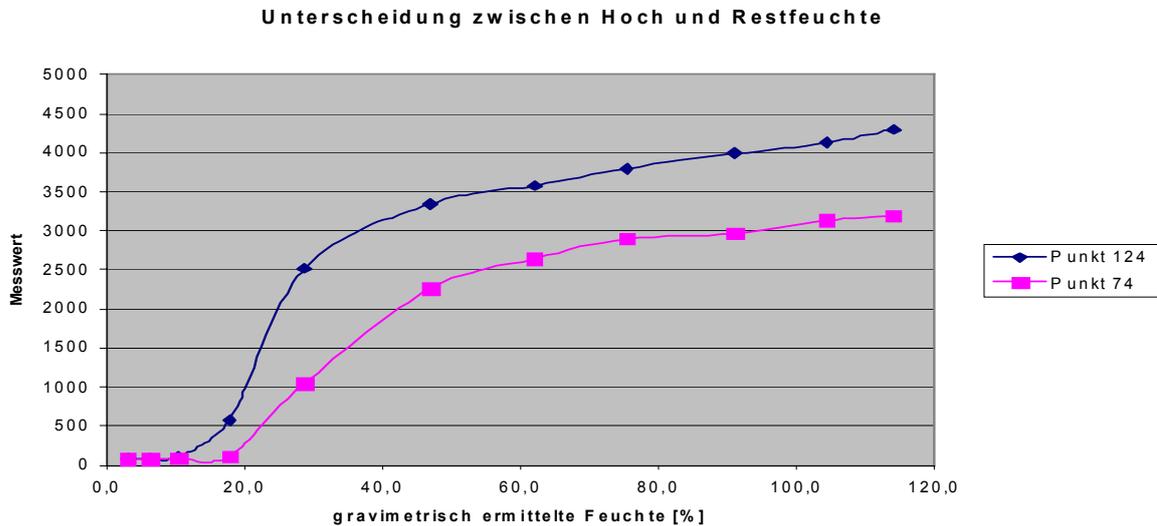
- Im Hochfeuchte- Bereich ab etwa 50% Feuchte befindet sich das Wasser weitgehend zwischen den Maschen des Gewebes. Die gemessenen Kapazitätswerte sind sehr hoch. Erst wenn das Wasser zwischen den Maschen verdunstet ist, gibt es einen starken Abfall der Kapazitätswerte. Die Webart des Gewebes ist in diesem Bereich entscheidend. Maschenware kann mehr Wasser tragen als glattes dichtes Gewebe. Auch die Beschaffenheit des Wassers ist von Bedeutung. Sind Salze gelöst, so ändert sich die Leitfähigkeit des Wassers.
- Die im oder an den Gewebe gebundene Restfeuchte zeigt ein wesentlich anderes Verhalten. Dieser Bereich der Restfeuchte ist materialabhängig und liegt bei Feuchten deutlich unter 20 %. Wassermoleküle, die in Material gebunden sind, haben eine weit geringere Beweglichkeit als in flüssigem Aggregatzustand. Entsprechend gering ist bei gebundenem Wasser die Orientierungspolarisation. Dies ist auch der Grund, weshalb Eis eine relativ kleine Dielektrizitätszahl (3..4) hat, Wasser eine hohe (ca. 80)

Das folgende Diagramm zeigt Antwortkurven die bei verschiedenen Feuchten gemessen wurden. Bei hoher Feuchte befindet sich Wasser in flüssiger Form zwischen den Maschen des Gewebes. Die Moleküle sind leicht beweglich. Entsprechend steil ist der Anstieg dieser Kurve.

Mit abnehmender Feuchte wird das Wasser immer mehr an das Gewebe gebunden. Die Wassermoleküle werden unbeweglicher. Entsprechend flacher wird der Kurvenanstieg.



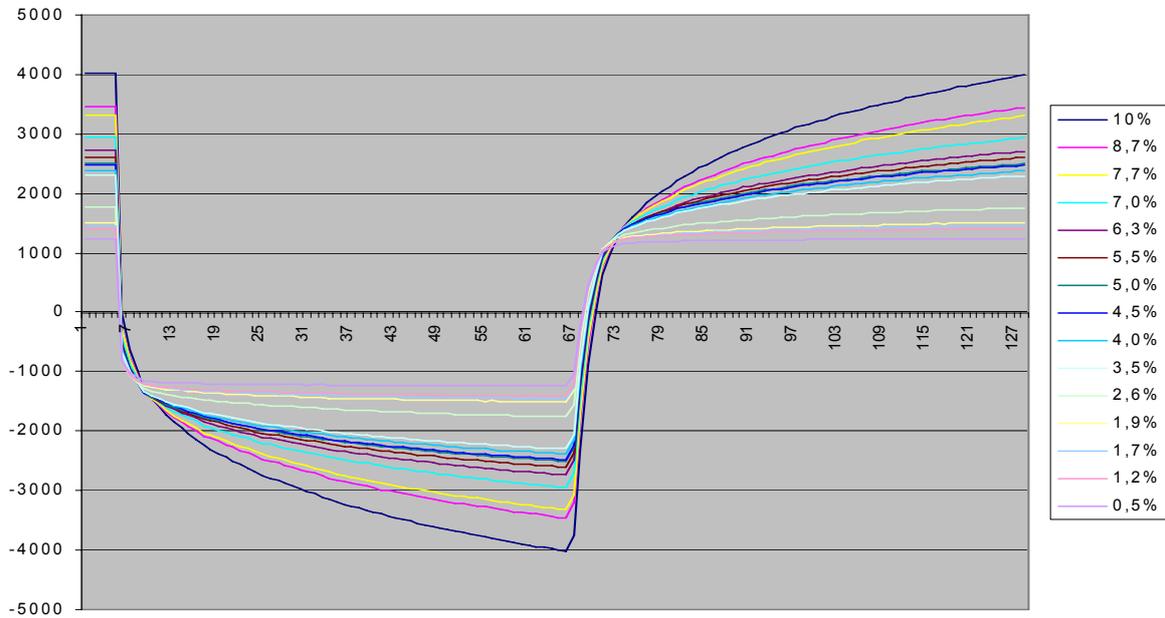
Betrachtet man den Anstieg der Messwerte am Anfang des Dreiecksignals (Punkt 74), so sieht man dass es keinen gemeinsamen Schnittpunkt (X-Punkt) der Kurven gibt. Messkurven von hoher Feuchte steigen am Kurvenanfang schneller an als die von niedriger Feuchte. Im folgenden Diagramm werden diese Messwerte gezeigt, die bei der Trocknung einer Stoffbahn gemessen wurden. Im folgenden Diagramm sind die Messwerte für Punkt 74 sowie den letzten Punkt der Antwortkurve eingetragen.



Man kann diese Kurven in drei Bereiche unterteilen und damit zwischen Rest- und Hochfeuchte unterscheiden.

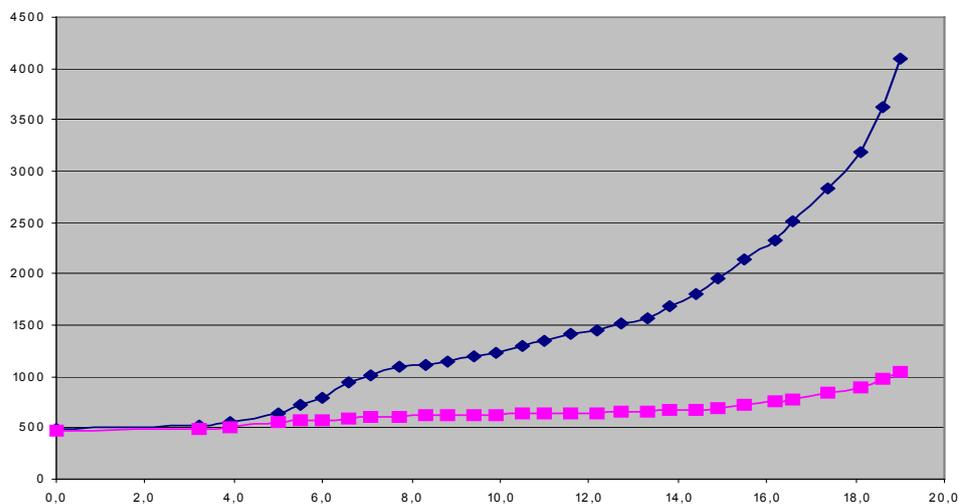
- Den Bereich der Restfeuchte bis etwa 20%
- Den Bereich der Hochfeuchte ab etwa 60%
- Einen Zwischenbereich

Schaut man sich dagegen nur die Kurven im Bereich der Restfeuchte an, so erkennt man einen gemeinsamen Schnittpunkt der im oberen Ast der Kurve bei dem Abtastpunkt 74 liegt. Dieser Schnittpunkt zeigt das Flächengewicht des trockenen Gewebes.



Ein solcher Schnittpunkt (X-Punkt) tritt dann auf, wenn Steigung und Kapazität in einem konstanten nicht unbedingt linearem Verhältnis stehen. Dies ist im Restfeuchte Bereich der Fall. Bei Hochfeuchte mit Wasser zwischen den Maschen des Gewebes überwiegt die Kapazität.

Das folgende Diagramm zeigt die Messwerte am Ende der Kurve sowie dem X-Punkt im Restfeuchte- Bereich.

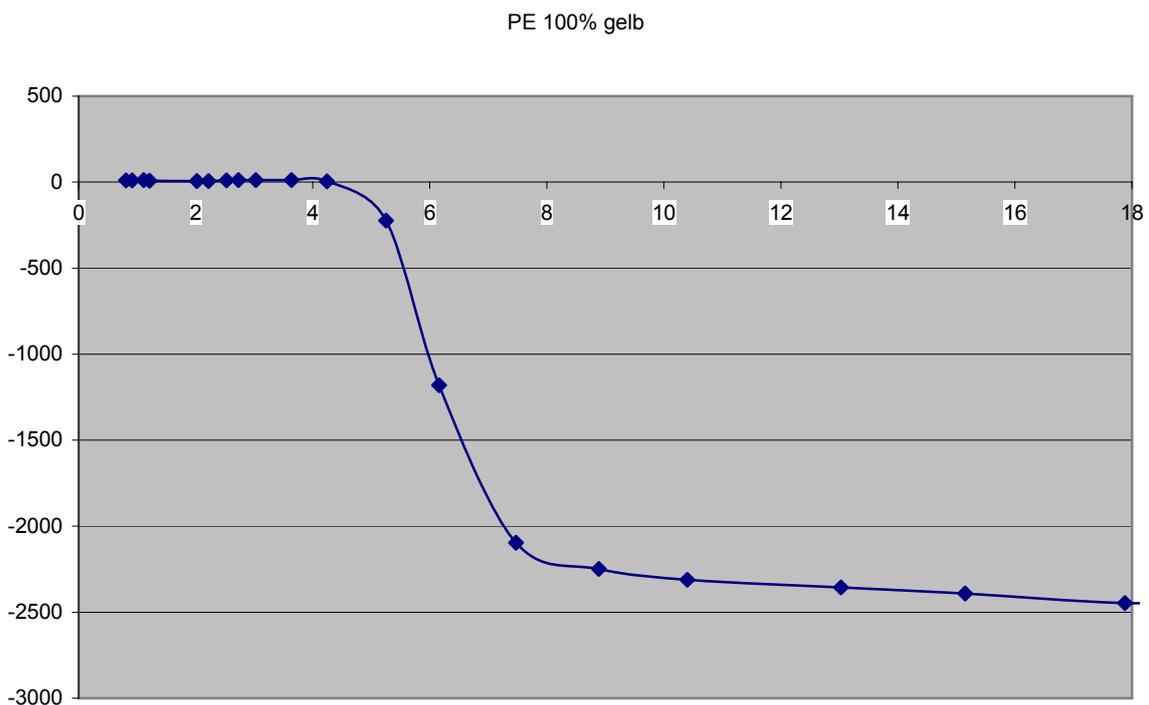


## Restfeuchte

Material kann als getrocknet gelten, wenn der Wasser- Partialdampfdruck über dem Material gleich dem Partialdampfdruck der Umgebung ist.

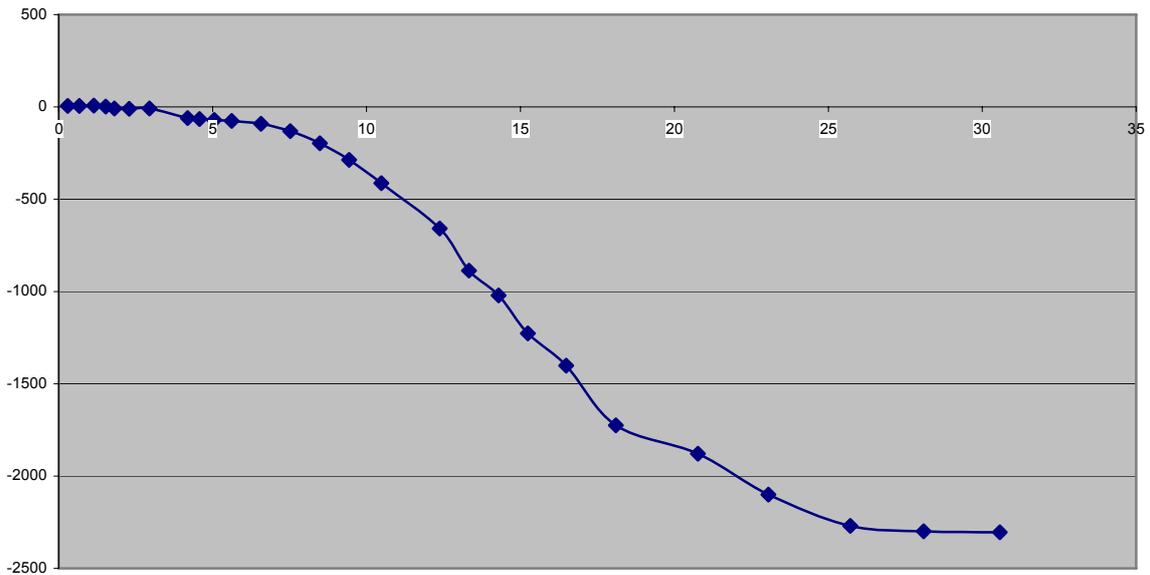
Es zeigt sich, dass Wasser, das im Material gebunden ist, einen anderen Messwert erzeugt, als Wasser, das an die Oberfläche des Materials gebunden ist. Die folgenden Abbildungen zeigen dies. Es wurde Polyester Gewebe (PE) vermessen. Das Gewebe ist auf einer Seite flauschig. Abgetragen ist die Signal- Amplitude am Ende der ersten Halbschwingung des Dreiecks gegen die gravimetrisch ermittelte Feuchte. Da es mit unserer Laboreinrichtung relativ schwierig ist, absolut trockenen Stoff zu vermessen, ist die x-Achse mit einem Fehler von etwa 1% behaftet.

Man kann anhand der Diagramme erkennen, dass sich der Messwert bei PE erst dann signifikant verändert, wenn das Material Feuchte an die Umgebung abgibt. Ist es trocken, was bei der Laborumgebung etwa bei 2..4 % Restfeuchte der Fall ist, dann ändert sich nur die Kapazität, nicht aber die Verluste. Der Übergang zur Restfeuchte bei etwa 6% ist sehr scharf und damit gut zur Regelung des Trocknungsvorgangs geeignet.



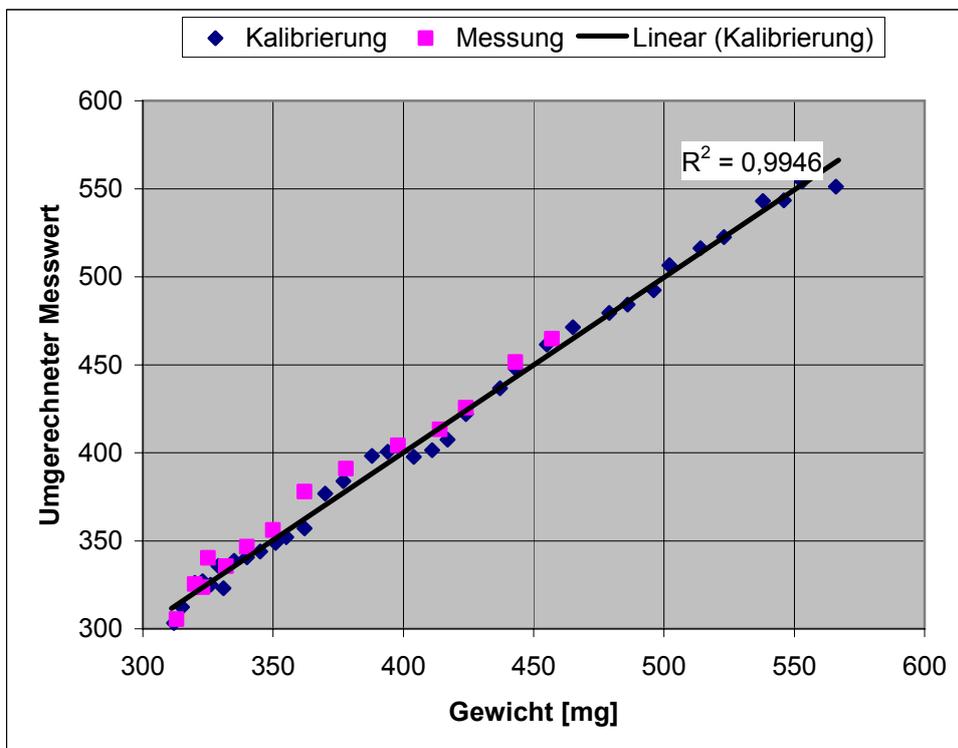
PE zeichnet sich durch eine sehr geringe Wasseraufnahme aus Baumwolle hingegen nimmt mehr als sechsmal so viel Wasser auf. Die folgende Kurve zeigt die Trocknung von Baumwoll-Gewebe. Man erhält einen sehr viel flacheren Übergang.

Baumwolle 100%



Das folgende Bild zeigt den Zusammenhang von gravimetrisch ermittelter Feuchte, zu dem Messergebnis der Kapazitätsmessung. Zur Berechnung wurde eine Kurvenschar ähnlich der oben gezeigten benutzt.

In dem Diagramm ist eine Ausgleichsgerade eingezeichnet, sowie das Bestimmtheitsmaß. Ist es 1, so liegen alle Punkte exakt auf der Kurve. Man sieht, dass eine recht exakte Kalibrierung möglich ist.



Zusätzlich wurden noch einige Punkte aufgenommen (violett), die nach der Kalibrierung mit den ermittelten Parametern gemessen wurden. Man sieht, dass diese Punkte einen recht kleinen Fehler aufweisen. Noch vorhandene Abweichungen dürften durch ungleichmäßige Trocknung hervorgerufen sein. Derartige Schwankungen kann man auch in einem hier nicht gezeigten Zeitdiagramm erkennen (R/S-Karte). Zu beachten ist auch, dass die benutzte Waage nur auf einige mg genau misst.

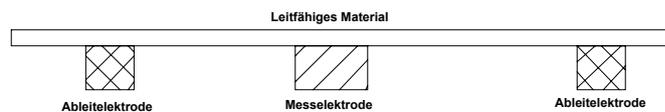
#### Anmerkung!

Bei der Ermittlung der Restfeuchte ist darauf zu achten, dass die zu messende Feuchte im Stoff gebunden ist. Besprüht man z.B. einen Stoff mit Wasser, so dass sich Wasserperlen bilden, die nicht vom Stoff aufgenommen werden, so erhält man Fehlmessungen. Die so ermittelten Werte sind viel zu hoch.

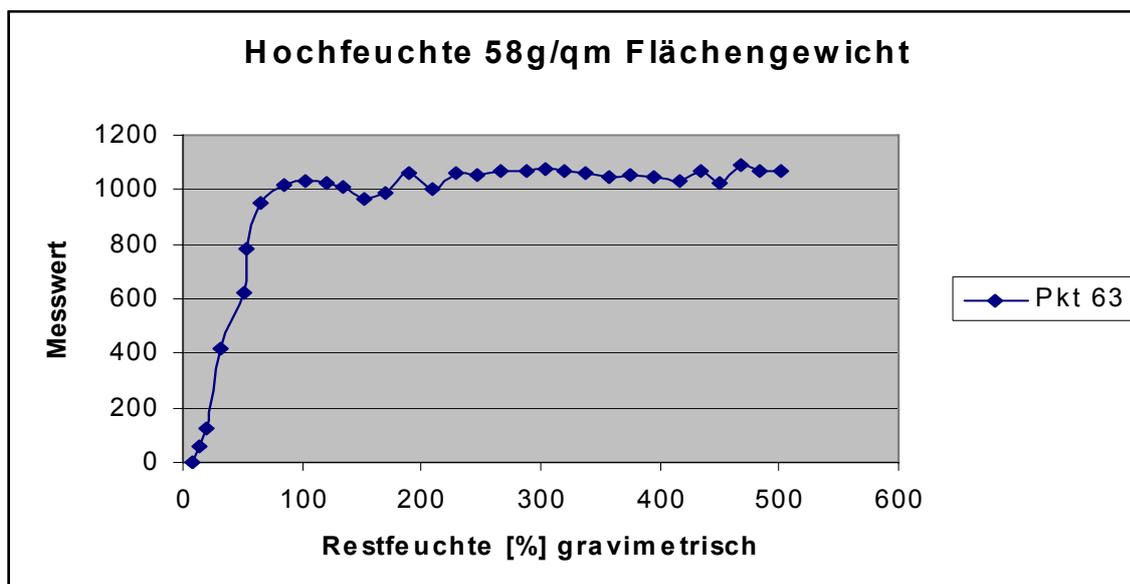
Es ist darauf zu achten, dass aufgrund von Ionen- Leitfähigkeit bei hoch- feuchtem Gewebe keine Streukapazitäten zu geerdetem Maschinenteilen ausbilden.

## Hochfeuchte

Misst man im Bereich Hochfeuchte, so ist zu beachten, dass Wasser auch leitfähig sein kann. Durch das leitfähige Wasser bildet das zu messende Material über den beiden offenen Elektroden eine weitere Elektrode, die verhindert, dass das Feld tief in das Material eindringt. Bei Hochfeuchte erhält man dann einen Maximalwert für die Feuchte. Wird die Feuchte weiter erhöht, bleibt der Messwert konstant. Das folgende Diagramm zeigt dies anhand von Vlies mit 58g/qm Flächengewicht.



Bei dünnerem Vlies (17g/qm) kann das Feld dagegen eindringen und man hat auch bei höheren Feuchten einen Messwert, der von der Feuchte abhängt. Das folgende Diagramm wurde mit einem Sensor aufgenommen, bei dem die Messelektrode gleichzeitig Stimuluselektrode war.



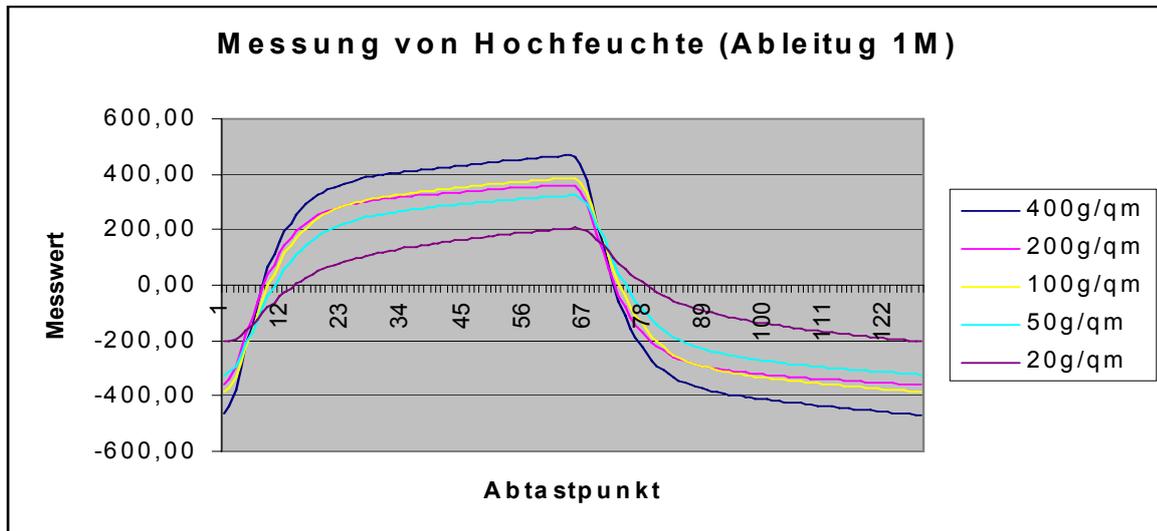
Mit dem Kapazitiv-Verfahren kann man dennoch den Wassergehalt des zu messenden Materials ermitteln, wenn man anstelle der Kapazität die Leitfähigkeit misst. Dazu geht man folgendermaßen vor.

Die Elektronik wird so aufgebaut, dass die Messelektrode gleichzeitig das anregende Feld (Dreieck) emittiert. Dieses Feld wird kapazitiv in das Material eingekoppelt. Links und rechts von dieser Elektrode befinden sich weitere Elektroden, mit denen man das Feld hochohmig gegen Masse ableitet. Man schafft dadurch Verluste, die zur Messung der Leitfähigkeit und damit zur Messung der Feuchte dienen.

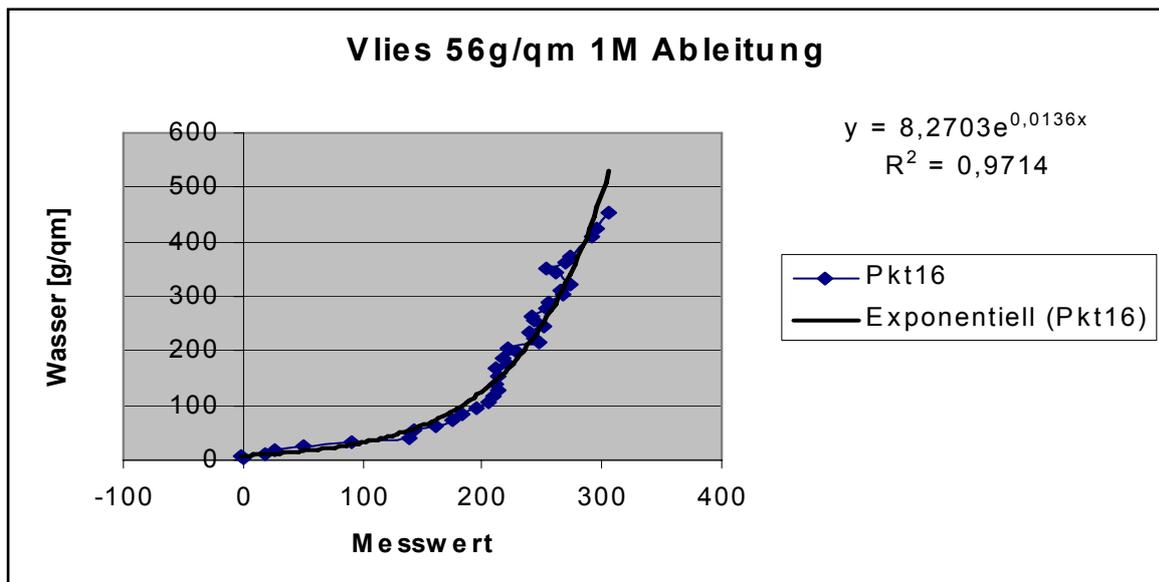
Die Auskopplung des Feldes an diesen Erdungs- Elektroden kann kapazitiv oder direkt erfolgen.

Möchte man dieses Verfahren einsetzen, so muss man darauf achten, dass sich keine Maschinenteile (Walzen) in der Nähe des Sensors befinden, die ihrerseits das Feld ableiten.

Das folgende Diagramm zeigt Messkurven, die mit Hilfe von Leitfähigkeitsmessungen gewonnen wurden.



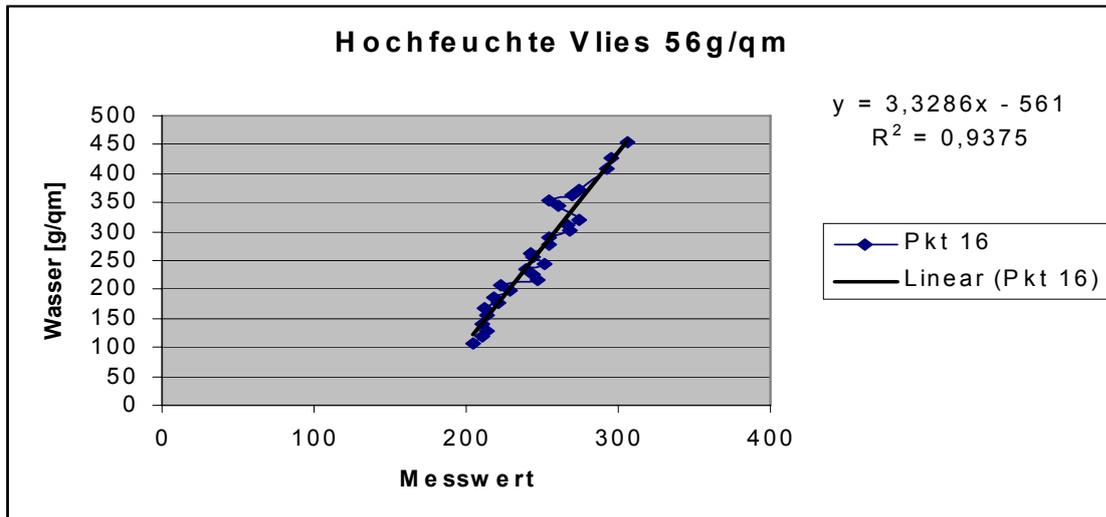
Trägt man die am Abtastpunkt 16 gravimetrisch ermittelte Feuchte gegen den Messwert ab, so erhält man folgendes Bild:



Man sieht einen exponentiellen Zusammenhang zwischen Messwert und Feuchte. Bei dieser Darstellung wurde versucht, Restfeuchte und Hochfeuchte unter einen Hut zu bringen. Das Ergebnis kann natürlich nicht sehr genau sein, da die Messwerte von beiden Feuchte- Arten auf physikalisch unterschiedlichen Prinzipien beruhen. Im-

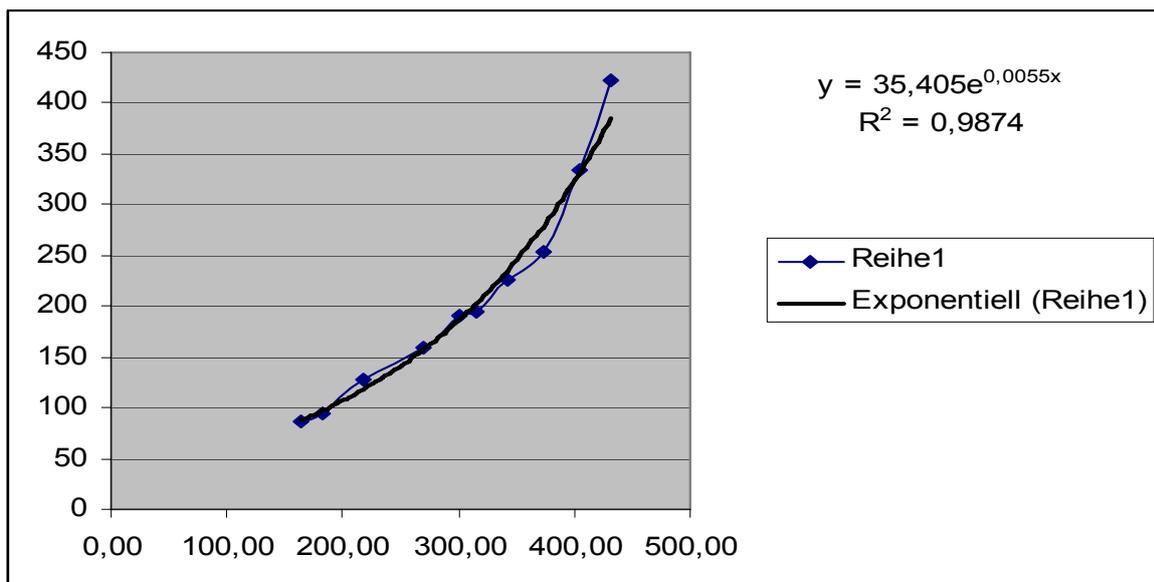
merhin zeigt die gewonnene Gleichung bereits ein Bestimmtheitsmaß von 97%, obwohl bei der vorliegenden Messung große Streuungen vorliegen.

Nimmt man nur den Anteil der Hochfeuchte in die Berechnung auf, so ergibt sich der in folgendem Bild gezeigte lineare Zusammenhang.



Man erhält nun einen linearen Zusammenhang. Der konstante Offset von 561 kann als Beginn des Hochfeuchte- Bereichs interpretiert werden, der Faktor 3,33 als Zusammenhang zwischen dem Messwert des Sensors und der tatsächlichen Feuchte.

Wird die Stimulus- von der Messelektrode getrennt, so ist eine Ableitelektrode nicht erforderlich. Das folgende Diagramm zeigt die Ergebnisse einer solchen Anordnung.



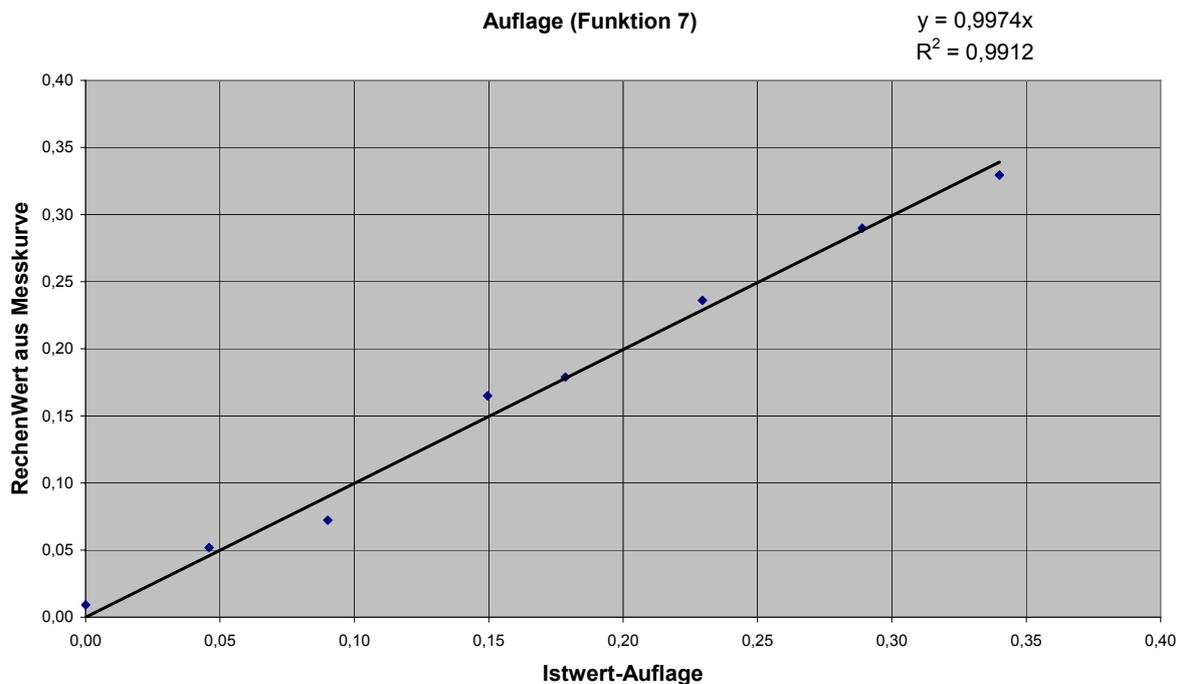
# Vlies

## Flächengewicht

Ein weiterer Anwendungsfall ist der Avivage- Auftrag auf Vlies. Hierbei kann nur mit offenen Sensoren gearbeitet werden. Das folgende Diagramm zeigt aus dem Ergebnis von Kapazitätsmessungen berechneten Auflagen. Das Material hatte ein Flächengewicht von ca 20g/m<sup>2</sup>. Es zeigt sich ein recht linearer Zusammenhang.

Auch bei diesen Messungen sollte beachtet werden, dass die Kalibrierwerte nur gemittelt über große Flächen gewonnen werden können. Das Kapazitäts- Messverfahren ist jedoch in der Lage, kleine Flächen auszumessen. Die gezeigte Kurve bezieht sich auf eine Fläche von 2,5\*60mm.

Ist das Vlies „wolkig“ so wird dies mit dem Sensor nachgewiesen.

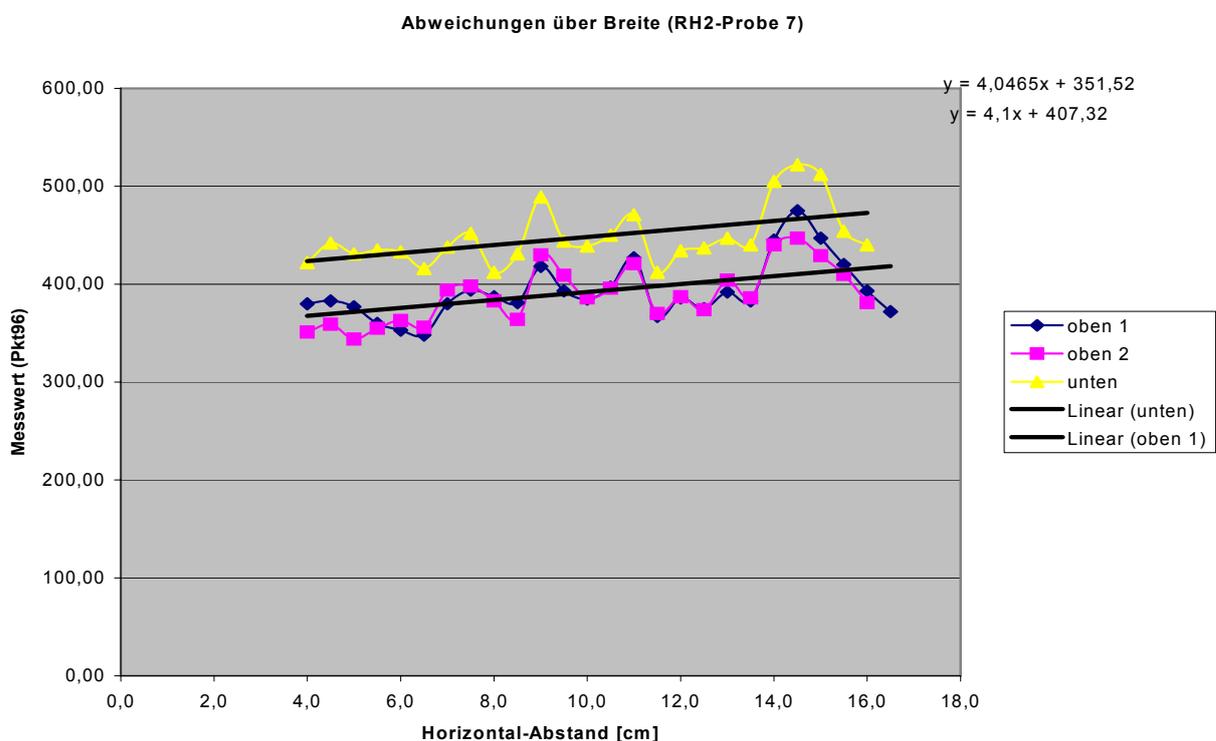


## Wolkigkeit

Das folgende Diagramm zeigt die Messung der Wolkigkeit. Das Material wurde auf einer Strecke von etwa 12 cm quer zur Laufrichtung vermessen. Die gelbe Kurve zeigt die Messung von oben, die beiden anderen die von unten. Von unten wurde sowohl nach links als auch nach rechts gemessen.

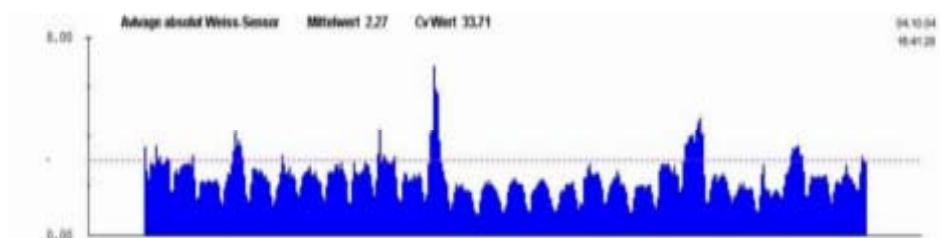
In die Kurven wurde eine Ausgleichsgerade eingezeichnet. Man erkennt, dass sich bereits auf die kurze Entfernung erhebliche Differenzen zum Sollwert des Flächengewichts ergeben. Eine Online Auswertung kann Einsparungen von Material sowie eine Erhöhung der Qualität bringen.

Die Wolkigkeit kann mit Hilfe des cV-Wertes erfasst werden,



## Avivage-Auftrag

Insbesondere im Bereich Hygiene Vlies muss das Material segmentiert beschichtet werden. Mit Hilfe des Kapazitiv- Sensors lässt sich die Auflage kontrollieren.



# Messung an Filamenten

## *Messung von trockenen Fäden*

### Übersicht

Kunstfaser Filamente bestehen aus mehreren Einzelfasern. Bei üblichen Filamenten sind dies 30 bis 50, bei Mikrofasern können es über 200 Stück sein.

Werden diese Fasern auf eine Spule aufgewickelt, so entwickelt die Faser keinen runden Querschnitt, sondern eher einen rechteckigen (Bändchen). Dadurch haben übereinander liegende Lagen sehr engen Kontakt. Es kann zu einer unerwünschten Migration der Präparation kommen, welche zu einer ungleichmäßigen Verteilung führt.

Konventionelle Bestimmungsverfahren ermitteln die Auflage gemittelt über lange Fadenlängen. Bei dünnen Fasern mit einem Titer von etwa 100 dTex kann die dazu benötigte Länge durchaus bis zu 1km betragen. Dadurch ist obiger Effekt nicht nachzuweisen. Das Kapazitiv- Verfahren ist dagegen in der Lage, die Präparation auch auf kurzen Fadenstücken zu bestimmen.

Mit dem kapazitiven Messverfahren wird Titer und Auflage gemeinsam bestimmt. Der Titer durch die Kapazität des Materials im Sensor, die Auflage durch dielektrische Verluste. Dies bedeutet:

- Hat die Präparation keine Verluste, so kann in trockenem Zustand auch keine Auflage ermittelt werden. In der Regel haben aber die im Textilbereich verwendeten Präparationen Verluste. Eine Ausnahme ist die Präparation von Glasfasern, die zur Herstellung von gedruckten Schaltungen verwendet werden. Hier würden Verluste zu einer Verschlechterung der Hochfrequenz-Eigenschaften der gedruckten Schaltung führen. Aber selbst hier kann die Auflage bestimmt werden, so lange die Präparation noch eine bestimmte Restfeuchte enthält.
- Die Bändchenbildung der Faser ist bei kapazitiv- Messungen eine Störquelle. Je nachdem ob das Bändchen beim Durchlaufen des Kondensators in Richtung der Feldlinien oder quer dazu ausgerichtet ist, sind etwas andere Messergebnisse zu erwarten.  
Solche Messwertverfälschungen können reduziert werden, indem zum Einen für eine konstante Ausrichtung des Bändchens im elektrischen Feld gesorgt wird, zum Anderen dadurch, dass das Feld im Kondensator möglichst homogen ausgebildet wird. Des Weiteren sind Schwingungen der Faser beim Durchlaufen des elektrischen Feldes zu vermeiden.
- Bei dem Kapazitiv Messverfahren werden keine absoluten Werte gemessen [mg], sondern relative, die mit Hilfe einer Kalibrierung in Absolutwerte überführt werden.

Das Kapazitiv Messverfahren ist somit kein Ersatz für konventionelle Messverfahren sondern eine Ergänzung. Es bietet folgende Vorteile:

- Es ist sehr einfach und kostengünstig in der Handhabung
- Es ermöglicht die Bestimmung der Auflage auch bei kurzen Fadenlängen
- Qualitätsanalysen werden stark vereinfacht.

## Kalibrierung

Um das Messverfahren einsetzen zu können, muss zunächst eine Kalibrierung erstellt werden. Wie dies in der Praxis verläuft wird im Abschnitt „Bedienoberfläche“ gezeigt.

An dieser Stelle sollen die Ergebnisse von Kalibrierungen mit unterschiedlichen Präparationen gezeigt werden.

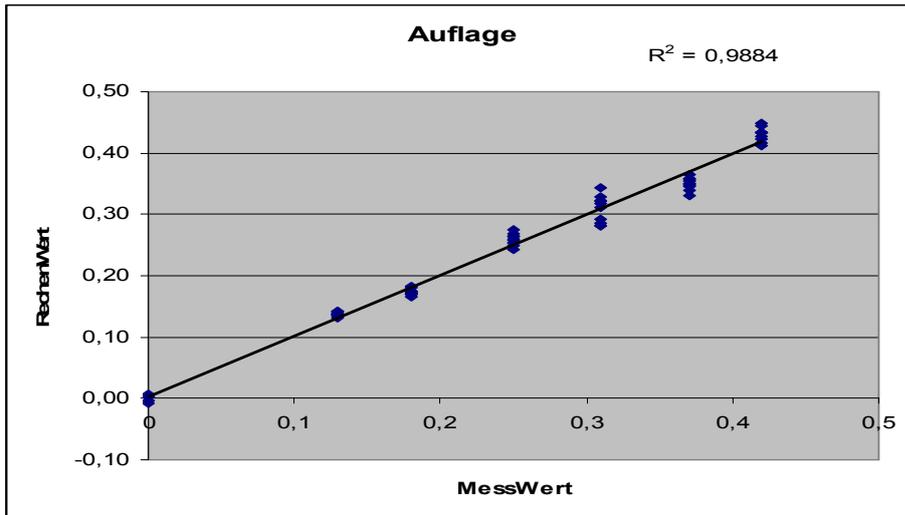
## Beispiel

Bei TWD wurden zu Versuchszwecken in Zusammenarbeit mit Cognis Spulen mit unterschiedlichen Auflagen erstellt.

Im Prozess wurde die Präparation mit Kapazitäts-Sensoren kontinuierlich überwacht. Nach dem Spinnvorgang wurde die Auflage mit Hilfe des NMR- Verfahrens ermittelt. Nach etwa einem Monat Lagerung wurden die Filamente erneut vermessen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind im Folgenden gezeigt.

Drehzahl Pumpe (U/min)	Auflage % (NMR)	Auflage % (kapazitiv)
9	0,13	0,130
12	0,18	0,183
15	0,25	0,270
19	0,31	0,31
21	0,37	0,352
24	0,42	0,416

Die Ergebnisse sind in folgendem Diagramm dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß beträgt ca 0,98. Dies bedeutet, dass sich die Kapazitiv- Messwerte im Mittel mit einer Abweichung von nur 2% von den NMR-Werten unterscheiden.



Auf der X-Achse sind die NMR-Messwerte abgetragen, auf der Y-Achse die umgerechneten Kapazitiv-Werte.

Bei der Kalibrierung wurden im Excel-Programm die folgenden Parameter ermittelt.

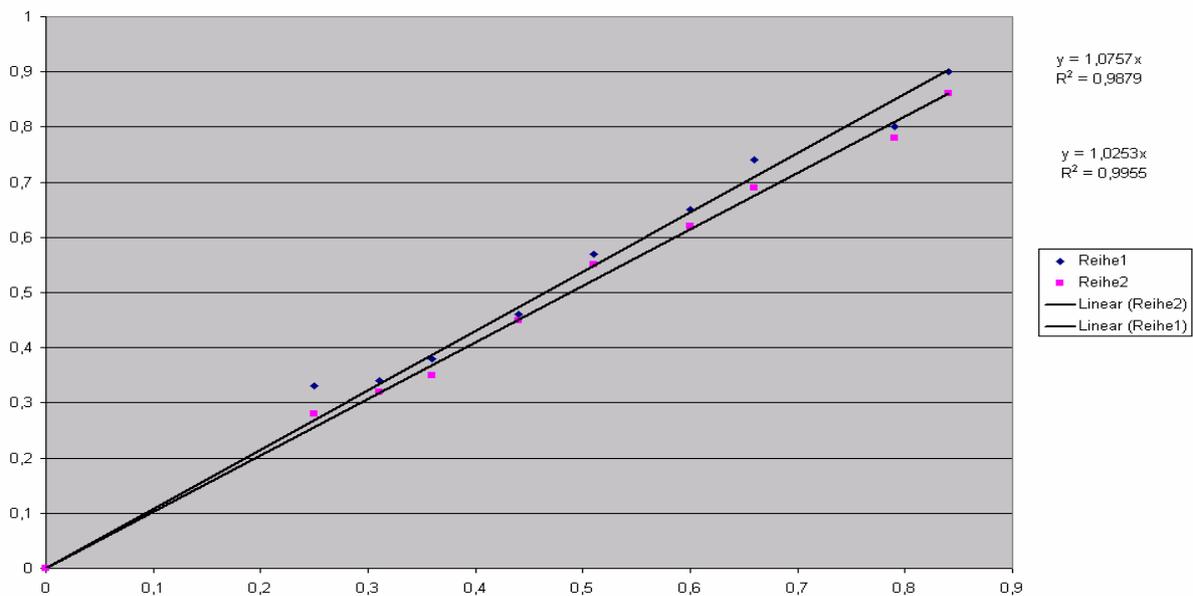
Art	Abtastpunkt	Wert
Kb		0
KP1	22	-0,0030
KP2	64	0,0026
KP3	68	-0,0049
KP4	112	0,0038
Best-Mass		0,9884

Diese Parameter werden über das Netz an den Sensor gesendet. Dort werden die Ergebnisse Online berechnet und an den PC gesendet. Im Gegensatz zur Ermittlung der Parameter, die einige Zeit benötigt, ist die Online- Berechnung sehr schnell und dauert je nach eingesetztem Rechner nur einige Taktzyklen.

## Online Messungen

Das folgende Diagramm zeigt die Ergebnisse der Online Messungen aus dem in Abschnitt „Messung von trockenen Fäden Beispiel“ beschriebenen Proben.

Die beiden Messreihen wurden Online mit Sensoren unterschiedlicher Geometrie gemessen. Nach dem Spinnprozess wurden die Auflagen mit dem NMR-Verfahren nachgemessen. Der Sensor mit der optimaleren Geometrie zeigt mit einer mittleren Abweichung von 0,3% zu den NMR-Werten sehr gute Ergebnisse.



Die folgende Tabelle zeigt die Abweichungen zwischen Online-Messung und der NMR Messung .

Soll Auflage/%	Auflage an Sensor 5/%	Auflage an Sensor 6/%
0,25	0,28	0,33
0,31	0,32	0,34
0,36	0,35	0,38
0,44	0,45	0,46
0,51	0,55	0,57
0,6	0,62	0,65
0,66	0,69	0,74
0,79	0,78	0,8
0,84	0,86	0,9