

# **BETAUUNGSSENSOREN**

## **THEORIE UND PRAKTISCHE ERFAHRUNGEN**

Prof. Dr.-Ing. Josef Elsbrock

Hochschule Niederrhein, Fb Elektrotechnik und Informatik, 47805 Krefeld

Joachim Cäsar

Fraunhofer ICT, Prüflabor Umweltsimulation, 76327 Pfinztal

### **Zusammenfassung**

Das physikalische Modell des Betauungssensors beruht auf der Wechselwirkung der polaren, elektrischen Dipolmomente der Wassermoleküle mit dem elektrischen Feld eines Streufeldkondensators und der damit verbundenen Änderung der Dielektrizitätskonstanten. Die daraus resultierende Kapazitätsänderung liefert zusammen mit der Oberflächentemperatur des Streufeldkondensators ein quantitatives Maß für den Betauungsgrad in Einheiten Wassermasse pro Volumen. Die Bestimmung der Kapazitätsänderung erfolgt dabei mit einer hochempfindlichen Messschaltung, bei der mehrfache Lade-/Entladezyklen der resultierenden Kondensatorladungen ausgewertet werden. Erste Messergebnisse zeigen die Leistungsfähigkeit des Verfahrens. An verschiedenen Beispielen wird das Anwendungspotential des Betauungssensors angegeben.

### **Einleitung**

Bei der Qualität von Produkten spielt die Betauungsbeständigkeit eine wichtige Rolle. Daher stellen Klima- und Betauungsprüfungen wichtige Testverfahren dar, um die Feuchte- und Betauungsfestigkeit von Produkten zu untersuchen. Weiter spielt Kondensatbildung an Autoscheiben, -spiegeln usw. für die Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit eine besondere Rolle. Bisher sind keine physikalischen Modelle bekannt, welche quantitative Informationen über den Betauungsgrad liefern. Es wird ein physikalisches Modell vorgestellt, das auf der Kapazitätsänderung eines Streufeldkondensators basiert. Diese Änderung wird durch an der Oberfläche kondensierende Wassermoleküle hervorgerufen. Das Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen der Kapazitätsänderung und der dielektrischen Wassermasse. Hierbei wird zunächst die Orientierungspolarisation des Wassermoleküls betrachtet und die Ausrichtung der permanenten Dipole im elektrischen Feld untersucht. Als Ergebnis erhält man eine Änderung der Elektrodenladungen am Streufeldkondensator bzw. eine Änderung der Dielektrizitätskonstanten in Abhängigkeit von der mittleren Anzahl der ausgerichteten Wassermoleküle. Abschließend wird ein störungsempfindliches Messverfahren vorgeschlagen, das mit Hilfe von Ladungsmessungen die Bestimmung der Kapazitätsänderung mit hoher Auflösung erlaubt. Einige praktische Anwendungsgebiete werden beispielhaft aufgezeigt.

## Das physikalische Modell

**Kapazität einer (Zwei-)Elektrodenanordnung:** Ist abhängig von den geometrischen Verhältnissen und dem zwischen den Elektroden befindlichen dielektrischen Stoffeigenschaften. Hierfür gilt bei homogener Ladungsverteilung

$$C = \epsilon_r \cdot C_o(\epsilon_o, \text{Geometrie}) \quad (\text{Gl. 1})$$

mit

$\epsilon_o = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{As/(Vm)}$  : Dielektrizitätskonstante (Dk) des Vakuums

$\epsilon_r$  : relative Dk des Dielektrikums

$C_o$  : Kapazität der Anordnung im Vakuum.

Eine Änderung von  $\epsilon_r$  um  $\Delta\epsilon_r$  hat eine Kapazitätsänderung  $\Delta C = \Delta\epsilon_r C_o$  zur Folge.

**Elektrisches Dipolmoment des Wassermoleküls:** Betrachtet man das Wassermolekül  $\text{H}_2\text{O}$  (s. Abb.1), so sind auf der äußeren Elektronenhülle des Sauerstoffatoms vier Elektronenpaare tetraedrisch angeordnet. Zwei dieser Elektronenpaare binden die beiden Wasserstoffatome unter einem Winkel von ca.  $105^\circ$ . Dies hat eine Polarisierung der O-H Bindung zur Folge, da die beiden Ladungsschwerpunkte  $+q$  bzw.  $-q$  auf Grund ihrer räumlichen Lage nicht mehr zusammenfallen. Das sich daraus ergebende permanente elektrische Dipolmoment  $p_o = 6,2 \cdot 10^{-30} \text{Asm}$  bestimmt makroskopisch die dielektrischen Eigenschaften von Wasser.

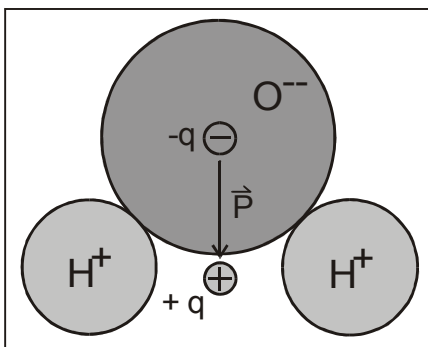


Abb. 1:

Lage der Ladungsschwerpunkte  
beim  $\text{H}_2\text{O}$  - Molekül

**Wasser als dielektrische Flüssigkeit:** Unter der Einwirkung eines äußeren elektrischen Feldes  $\vec{E}$  (s. Abb. 2) werden die permanenten Dipolmomente der Wassermoleküle in Richtung des äußeren elektrischen Feldes gedreht. Dies geschieht ohne wesentliche Änderung des Betrages des Dipolmomentes und trotz der thermischen Molekularbewegung (was dem Ordnungsvorgang entgegenwirkt). Ohne den Einfluss der Wärmebewegung würden sich alle Dipole in Richtung des äußeren Feldes  $\vec{E}$  einstellen, da dieser Zustand einem Energieminimum der Dipole entspricht. Das nach außen wirksame elektrische Dipolmoment  $\vec{P}$  ergibt sich durch Ordnen und Ausrichten der vorhandenen kleinen

Dipole. Der Betrag des resultierenden Dipolmoments  $P$  kann mit Hilfe der Langevin Funktion  $L(a)$  berechnet [1] werden

$$P = \epsilon_o \cdot (\epsilon_r - 1) \cdot E = N \cdot p_o \cdot L(a) \quad (\text{Gl. 2})$$

mit

$$L(a) = \coth(a) - \frac{1}{a} ; \quad a = \frac{p_o E}{kT} \quad \text{und}$$

$N$ : Dipolmomentdichte (entspricht der mittleren Anzahl der  $\text{H}_2\text{O}$ -Moleküle pro Volumen)

Für einen technisch relevanten Arbeitsbereich ( $p_o E \ll kT$ ;  $k$ : Boltzmann-Konstante,  $T$ : absolute Temperatur;  $kT$ : thermische Energie ) kann die Langevin Funktion in guter Näherung durch die Potenzreihe  $L(a) \approx a/3$  ersetzt werden. Damit wird

$$P = \epsilon_o \cdot (\epsilon_r - 1) \cdot E = N \cdot p_o \cdot \frac{p_o E}{3 \cdot kT} \quad (\text{Gl. 3})$$

bzw.

$$\epsilon_r - 1 = \frac{N p_o^2}{3 \epsilon_o kT} \quad (\text{Gl. 4})$$

Dieser physikalische Mechanismus des Ausrichtens und Ordnen der vorhandenen Dipole wird als Orientierungspolarisation bezeichnet.

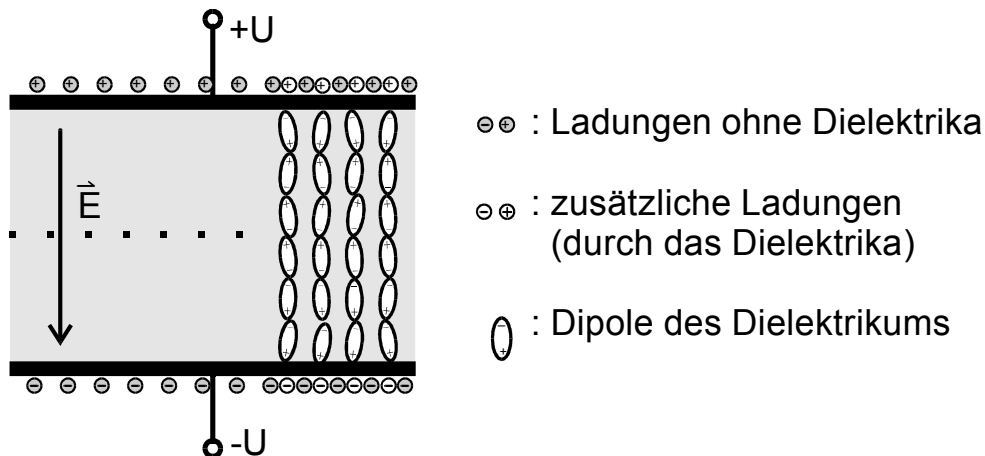


Abb.2:

$\text{H}_2\text{O}$ -Moleküle im elektrischen Feld  $\vec{E}$

Wird nun die Wassermasse  $m_W$  als dielektrische Flüssigkeit in das elektrische Feld  $\vec{E}$  eines Streufeldkondensators gebracht, so vergrößert sich die Dipolmomentdichte um  $\Delta N$ . Für die damit verbundene Änderung der Dielektrizitätskonstanten  $\Delta \epsilon_r$  gelten die Gleichungen

$$\Delta\varepsilon_r = \frac{\Delta N p_o^2}{3\varepsilon_o kT} \quad (\text{Gl. 5})$$

bzw. mit der Masse des H<sub>2</sub>O-Moleküls  $m_{\text{H}_2\text{O}} = 2,992 \cdot 10^{-23}$  g, dem mittleren Volumen  $\bar{V}$  der Wassermasse  $m_W$  und der mittleren Wassermassendichte

$$\rho_W = \frac{m_W}{\bar{V}} \quad (\text{Gl. 6})$$

wird

$$\Delta\varepsilon_r = \frac{m_W / m_{\text{H}_2\text{O}} p_o^2}{3\varepsilon_o kT \bar{V}} = \frac{\rho_W p_o^2}{3\varepsilon_o kT m_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (\text{Gl. 7})$$

Hieraus ergibt sich eine Vergrößerung der Kondensatorkapazität um  $\Delta C = \Delta\varepsilon_r C_o$  bzw. bei konstanter Spannung U an den Elektroden eine Ladungsänderung  $\Delta q = \Delta C \cdot U$ . Dabei fließen von der Spannungsquelle zusätzliche Ladungen auf die Elektroden, um die Schwächung des elektrischen Feldes durch die Polarisation des Wassers zu kompensieren. Die mittlere Wassermassendichte  $\rho_W$  kann dann aus der Kapazitätsänderung  $\Delta C$  und der absoluten Temperatur T nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\rho_W = \frac{3\varepsilon_o kT m_{\text{H}_2\text{O}}}{C_o p_o^2} \Delta C \sim \Delta C \quad (\text{Gl. 8})$$

**Betauungsvorgang:** Wird die Oberfläche eines Streufeldkondensators beispielsweise unterhalb der Taupunkttemperatur der umgebenden Luft gleichmäßig abgekühlt, so wird die kinetische Energie der Wassermoleküle der Gasphase soweit abgesenkt, dass diese auf die Sensoroberfläche treffen, in die Flüssigphase übergehen und somit als Tröpfchen an der Oberfläche kondensieren. Die Kondensationsrate hängt dabei von der Anzahl der H<sub>2</sub>O-Moleküle in der Gasphase ab. Der homogene Niederschlag der Wassermoleküle an der Sensoroberfläche bewirkt in Abhängigkeit von der Zeit eine lineare Vergrößerung von N und damit der Wassermasse (s. Gln. 5,7). Die damit einhergehende Kapazitätsänderung ist proportional zur Zunahme der Wassermassendichte, solange eine ausreichende Wechselwirkung der Dipolmomente der Wassermoleküle mit der elektrischen Feldstärke  $\vec{E}$  vorhanden ist, um eine Ausrichtung der Dipole im äußeren Feld zu erreichen.

### Technische Beschreibung des Messverfahrens

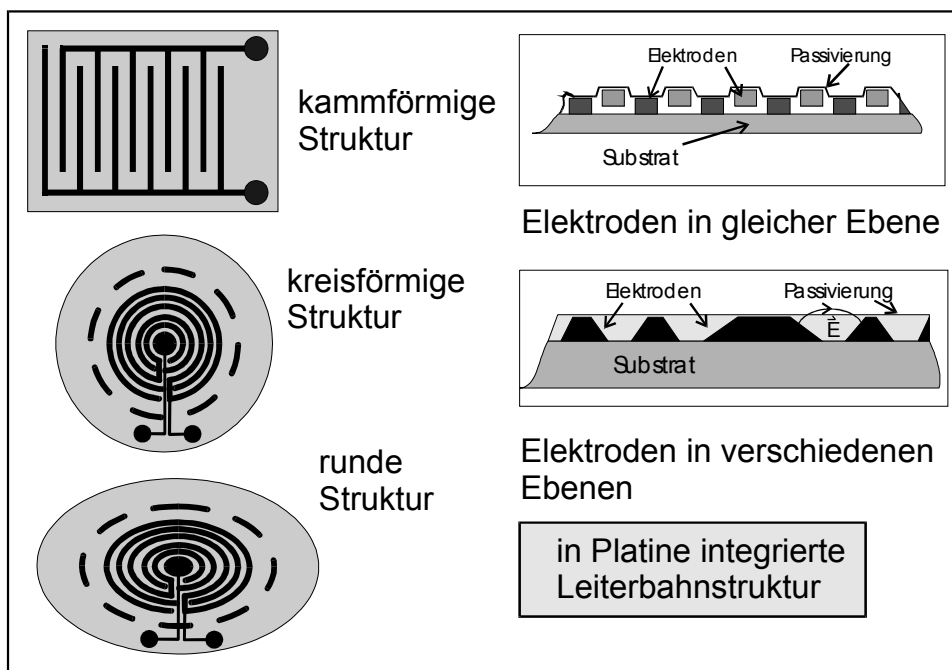
Besonders hohe Anforderungen ergeben sich unter Praxisbedingungen an den Streufeldkondensator als Sensorelement und dessen Auswerteschaltung wegen der kleinen Kapazitätsänderungen, die im Bereich fF bis pF liegen:

- schnelle Bestimmung der Kapazitätsänderung mit hoher Auflösung

- kleine Sensorgeometrie
- gekrümmte, aktive Sensoroberfläche
- kein Einfluss von parasitären Kapazitäten (Anschluss- und Kabelkapazität)
- keine sensornahe Signalaufbereitung
- Unempfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen an der Sensoroberfläche
- hohe Störsicherheit
- Standardisierung (ähnlich DMS-Technik).

Aus der Literatur [2] ist eine Vielzahl von Schaltungen zur Bestimmung kleiner Kapazitäten hinreichend bekannt. Ausgewählt wurde hier eine Schaltung zur Bestimmung der Sensorkapazität mittels einer Ladungsmessung.

**Kapazitives Sensorelement:** Verschiedene technische Ausführungsformen des Streufeldkondensators sind in Abb. 3 dargestellt. Danach können die Elektroden des Streufeldkondensators sowohl kammförmig und rund als auch spiralförmig angeordnet sein. Als Substrate eignen sich sowohl plane, feste Materialien (Keramiken) als auch flexible (feuchteresistente Trägerfolien). Um den Einfluss von Verunreinigen bzw. Kapillareffekte zu verringern, ist eine bündige Passivierungsschicht sinnvoll. Zur Optimierung des elektrischen Feldes (und damit des Messbereiches) sollten die Elektroden einen trapezförmigen Querschnitt haben bzw. die beiden Elektroden des Streufeldkondensators können in verschiedenen Ebenen angeordnet sein. Die Flexibilität des Sensors erlaubt damit auch eine einfache Befestigung auf gekrümmten Oberflächen (z. B. Fahrzeugscheiben).



**Abb. 3:** Verschiedene technische Ausführungsformen des Streufeldkondensators

**Auswerteschaltung:** Abb. 4 zeigt das Blockschaltbild einer geeigneten Auswerteschaltung.  $C(x)$  ist hierbei die Kapazität mit der Messgröße - Wassermasse - als Dielektrikum. Die Grundkapazität  $C_0$  des Sensorelementes entspricht der Kapazität des Streufeldkondensators im kondensationsfreien Zustand und ist parallel zu den weiteren parasitären Anteilen  $C_p$  geschaltet. Die Kompensation dieser Offsetkapazität  $C_{\text{Off}}=C_0 + C_p$  der Anordnung erfolgt mit dem Kompensationsnetzwerk  $K$ , das eine zu  $C_{\text{Off}}$  proportionale Spannung  $U_K$  an den Summierverstärker abgibt.

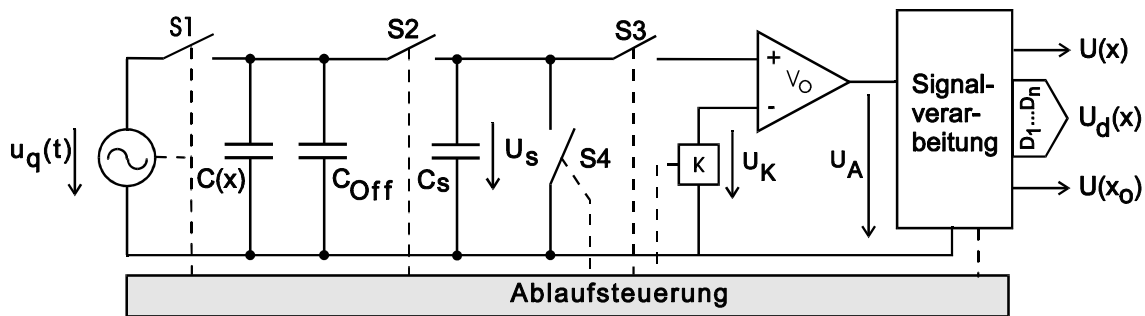


Abb. 4: Blockschaltbild einer Auswerteschaltung zur Bestimmung von  $C(x)$

Die gesamte Kapazität  $C_g(x)=C(x)+ C_{\text{Off}}$  wird von den Scheitelwerten  $\hat{u}_q$  der Wechselspannungsquelle  $u_q(t)$  durch Schließen des Schalters S1 aufgeladen. Durch die Verwendung einer Wechselspannung werden Polarisierungseffekte an den Kondensatorelektroden vermieden. Danach wird die Ladung an den Speicherkondensator  $C_s$  ( $\gg C_g(x)$ ) durch gleichzeitige Öffnung des Schalters S1 und Schließung des Schalters S2 übertragen. Dabei muss das Umspeichern der Ladung innerhalb der Zeit  $< 1/5 \cdot R(x) \cdot C_g(x)$  abgeschlossen sein, damit nicht durch den endlichen Widerstand  $R(x)$  zwischen den Kondensatorelektroden (verursacht durch Verunreinigungen und die endliche Leitfähigkeit des Wasser) ein Teil der Ladung schon vor dem Umspeichern abfließt. Dieser Entlade-/Ladezyklus wird  $n$ -mal durchlaufen. Nach  $n$  Zyklen wird die gesamte in  $C_s$  gespeicherte Ladung als proportionale Spannung  $U_s$  an den + Eingang des Summierverstärkers angelegt und die  $n$  fache Kompensationsspannung  $U_K$  abgezogen. Auf diese Weise wird eine vollständige Kompensation der Offsetkapazität  $C_{\text{Off}}$  erreicht. Die resultierende Spannung  $U_A$  am Ausgang des Summierverstärkers ist proportional zur  $n$  fachen Kapazitätsänderung  $\Delta C$  und wird zur weiteren Auswertung einer nachgeschalteten Signalverarbeitung zugeführt. Hier kann für eine digitale Weiterverarbeitung eine Analog-/Digital-Wandlung erfolgen oder  $U_A$  mit einem Komparatorsignal verglichen werden. Damit generiert die Signalverarbeitungseinheit aus der Differenzspannung neben der analogen Spannung  $U(x)$  ein digitalisiertes Ausgangssignal  $U_d(x)$  sowie ein Komparatorsignal  $U(x_0)$ , welches als Indikatorsignal z.B. für eine beginnende Kondensation genutzt werden kann. Damit ist der erste Messzyklus beendet, und ein erneute Messwertaufnahme beginnt. Dazu wird die Messkette durch kurzzeitiges Schließen der Schalter S3, S4 wieder in den Grundzustand gesetzt.

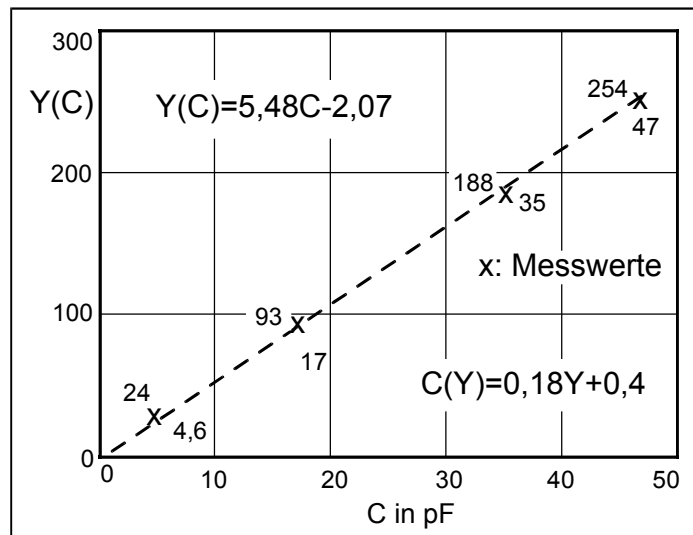
Der Steuerung der einzelnen zeitlichen Zyklen sowie des Kompensationsnetzwerkes erfolgt durch eine übergeordnete Ablaufsteuerung.

Durch die zyklische Aufintegration der auf dem Streufeldkondensator befindlichen Ladungsmenge lässt sich eine hohe Empfindlichkeit von weniger als 0,1pF erreichen. Außerdem wird durch die Mittelwertbildung der Ladungsmenge der Störungseinfluss minimiert. Auch der Einfluss von Verschmutzungen des kapazitiven Streufeldkondensators auf das Messergebnis wird durch die Erfassung der Offsetkapazität vor dem eigentlichen Messzyklus reduziert und hat keinen störenden Einfluss auf das Messergebnis. Da während der Schaltphase des Schalters S3 nur der Sensor mit der Auswerteschaltung verbunden ist, ergibt sich eine geringere Störempfindlichkeit für die gesamte Schaltung.

### Erste Messergebnisse

**Kalibrierung:** Für eine quantitative Messung ist eine Kalibrierung der gesamten Messkette notwendig. Dazu wird das kapazitive Sensorelement durch definierte Festkondensatoren ersetzt und die 8 Bit lange digitale Ausgangsgröße  $Y(C)$  bestimmt. Als Messparameter wurde ein Abtastintervall von 400ns und eine Pulsperiode von 1ms festgelegt um damit das Messergebnis aus 8 Messungen/Puls zu bestimmen. In Abb. 5 ist das Ergebnis des Kalibriervorganges mit 4 verschiedene Kapazitäten dargestellt. Die Kennlinie zeigt eine gute Linearität zwischen der Kapazität  $C$  als Eingangsgröße und dem digitalen Ausgang  $Y$ . Die kleinste noch detektierbare Kapazitätsänderung (Schrittweite) beträgt 0,18pF. Abweichungen vom linearen Verlauf werden im wesentlichen durch Ungenauigkeiten bei der Signalwandlung bzw. Rundungsfehler verursacht.

Abb. 5:  
Übertragungskennlinie der verwendeten Messkette (die Gleichungen beschreiben den funktionalen Zusammenhang)



**Messungen:** Für die ersten Messungen wird ein planer Streufeldkondensator verwendet. Dieser besteht aus einem keramischen Grundträger (Dicke: 0,63mm) mit 10µm dicken Au-Leiterbahnen; die Leiterbahnbreite und der Leiterbahnabstand betragen 100µm. Die aktive Sensorfläche ist 10·13mm<sup>2</sup> groß und nicht

durch eine Passivierungsschicht abgedeckt. Die Grundkapazität im kondensationsfreien Zustand beträgt 32,5pF. Für die Beobachtung eines Betauungsvorganges wird die Oberflächentemperatur des Streufeldkondensators unterhalb der Taupunkttemperatur mit Hilfe eines Peltierelementes langsam abgesenkt, so dass Wassermoleküle aus der Umgebungsluft an der Oberfläche kondensieren. Gemäß Gl. 5 nimmt durch die konstante Kondensationsrate die Wassermasse linear mit der Zeit zu. Abb. 6a illustriert diese lineare Vergrößerung der Wassermassendichte und die damit verbundene Kapazitätsänderung. Bei  $t \approx 45$ s zeigt sich eine abrupte Änderung der Verhältnisse, die durch das Gefrieren der Kondensatschicht an der Sensoroberfläche verursacht wird. Damit zusammenhängend ergibt sich eine Änderung der Dichte der Wassermoleküle sowie das Einfrieren der permanenten elektrischen Dipolmomente. Für diesen Bereich gilt der durch Gl. 8 beschriebene physikalische Zusammenhang zwischen der Wassermassendichte und der Kapazitätsänderung nicht mehr.

Dieser Kapazitätssprung kann aber zur Detektion des Phasenüberganges flüchtig/fest beim Wasser technisch ausgenutzt werden.

Abb. 6b zeigt den physikalisch umgekehrten Vorgang, das Verdampfen einer kondensierten Wasserschicht an der Sensoroberfläche bei Raumtemperatur.

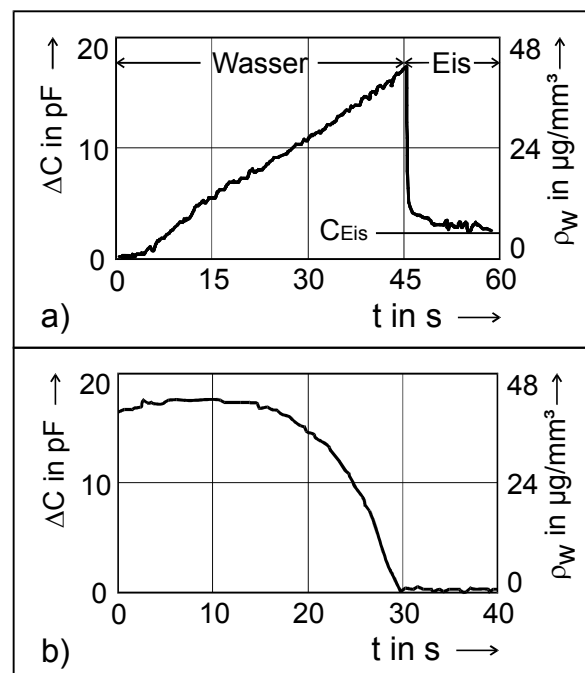


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf

- eines Kondensationsvorganges bei einer Oberflächentemperatur unterhalb der Taupunkttemperatur ( $\vartheta_{\text{Min}} = -2^\circ\text{C}$ )
- einer verdampfenden kondensierten Wasserschicht an der Sensoroberfläche bei Raumtemperatur

Kapazitive Feuchtesensoren liefern in vielen Fällen ein Sensorsignal, das proportional zur relativen Feuchte ist (Überblick siehe z.B. [3]). Die mit der Zunahme der rel. Feuchte verbundene lineare Erhöhung der Dichte der  $\text{H}_2\text{O}$ -Moleküle ist identisch mit der Vergrößerung der Dipolmomentdichte im elektrischen Feld des Streufeldkondensators. Damit gilt auch hier der durch Gl. 8 beschriebene physikalische Zusammenhang.



## **Einsatzbereiche**

Das Messprinzip beruht auf der Wechselwirkung von dielektrischem Wasser mit dem elektrischen Streufeld einer allgemeinen, kapazitiven Zweielektrodenanordnung. Der Einsatz dieser Messtechnik ist überall dort sinnvoll, wo Kondensationseinflüsse untersucht bzw. eine beginnende Kondensation möglichst frühzeitig detektiert werden soll, um geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten. So kann beispielsweise eine beginnende Kondensation an Windschutzscheiben oder Spiegeln bei Kraftfahrzeugen durch die Integration eines Streufeldkondensators in einer Verbundglasscheibe oder in den Randbereichen einer Fensterscheibe noch vor der visuellen Wahrnehmung erkannt und so durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. das Einschalten einer Klimaanlage oder einer Scheibenheizung verhindert werden. Weiter kann mit der Messanordnung das Absorptionsverhalten von Platinen, Lacken etc. sowie die elektrische Wirksamkeit von Abdecklacken untersucht werden. Auch lassen sich die Phasenübergänge fest/flüssig/gasförmig beim Wasser detektieren. Die hohe einstellbare Empfindlichkeit der Messanordnung und die Kompensation von Offsetkapazitäten lassen miniaturisierte und mechanisch flexible Sensoren mit kleiner thermischer Masse in der Anwendung zu. Als praktische Einsatzfelder sind hier die Detektion von Feuchtigkeit in gekapselten Systemen (z.B. Steckergehäuse, Lampengehäuse usw.) zu nennen. Die hohe Störsicherheit gekoppelt mit der Unempfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen und anderen physikalischen Größen wie z.B. Druck, Temperatur etc. erlauben den Einsatz des Sensorsystems auch in rauer industrieller Umgebung. Durch Festlegen der Messkette und Definition der Messparameter ist eine Standardisierung (z. B. eigenständige Norm) des Verfahrens möglich. Das Messprinzip erlaubt es auch, Messungen an anderen polaren Molekülen durchzuführen.

## **Ausblick**

Für eine Optimierung der Messanordnung sind zukünftig noch weitere Untersuchungen notwendig. Diese sind: die Bestimmung der Abhängigkeit der Feldstruktur von der Elektrodengeometrie; zur Dicke und den dielektrischen Eigenschaften einer möglichen Passivierungsschicht; zu den Fehlern auf Grund der Näherung in Gl. 2 und der inhomogenen Feldstruktur; weitere Empfindlichkeitsuntersuchungen; Vergleichsmessungen bzgl. der Wassermassendichte.

## **Literatur:**

- [1] Simonyi, K.: Physikalische Elektronik; Teubner Verlag, Stuttgart, 1972
- [2] Franz, J.: Verfahren zur Messung kleiner Kapazitäten mit hoher Auflösung; tm – Technisches Messen, 67, 4, 2000, Oldenbourg Verlag
- [3] Yamazone, N.; Shimizu, Y : Humidity Sensors : Principles and applications; Sensors and Actuators No. 10, 1986