Christoph Kandlbinder-Paret*, Johannes Häring, Alice Fischerauer und Gerhard Fischerauer

De-Embedding-Ansatz zur Messung nichtidealer Kapazitäten mit kommerziellen Kapazitätssensoren

De-embedding-approach to measure non-ideal capacitances with commercially available capacitance-sensors

DOI 10.1515/teme-2020-0016

Zusammenfassung: Verlustbehaftete Kapazitäten sind für kommerzielle Kapazitätssensoren, die nur einen Kapazitätswert ausgeben, problematisch: der parasitäre ohmsche Widerstand parallel zur Kapazität verfälscht das Messergebnis. Bei Messungen an Flüssigkeiten im Rahmen der elektrischen Kapazitätstomographie (ECT) kann der Einfluss gravierend werden. Mit erhöhtem Messaufwand könnte man die ECT zur elektrischen Impedanztomographie (EIT) erweitern und damit sowohl die Kapazität als auch den Widerstand der verlustbehafteten Kapazität messen. Als aufwandsarme Alternative stellen wir hier einen modellbasierten De-Embedding-Ansatz vor. Er ertüchtigt kommerzielle Kapazitätssensoren, die die Kapazität über die Messung einer Entladezeitkonstante bestimmen, auch mit stärker verlustbehafteten Kapazitäten zurechtzukommen. Der Ansatz beruht auf dem Ersatzschaltbild der realen Messsituation, dessen zugehörige Differentialgleichung im Zeitbereich gelöst wird. Durch Variation der gesuchten Kapazität und des gesuchten Widerstands wird die vom Sensor ermittelte Zeitkonstante über die Anzahl der nacheinander durchgeführten Lade-/Entladevorgänge (Perioden) ermittelt. Das Verfahren wird an einem diskreten Aufbau aus konzentrierten Elementen und an einer typischen ECT-Messsituation getestet. Die ermittelten Zeitkonstanten bei einer realen ECT-Messsituation mit Leitungswasser als zu vermessendem Medium zeigen einen Unterschied zum diskreten Aufbau mit den konzentrierten Elementen.

Schlüsselwörter: Kapazitätssensoren, ECT, De-Embedding.

Abstract: Lossy capacitances are problematic for commercial capacitance sensors which only output a capacitance value: a parasitic resistance parallel to the capacitance influences the measurement result. The influence can be serious when measuring liquids using electrical capacitance tomography (ECT). With increased measurement effort, ECT could be expanded to electrical impedance tomography (EIT) and thus both the capacitance and the resistance of the lossy capacitance could be measured. As a low-cost alternative, we present a model-based de-embedding approach. It enhances commercial capacitance sensors, which determine the capacitance by measuring the discharge time, to cope with lossy capacitances. The approach is based on the equivalent circuit of the real measurement situation, the associated differential equation of which is solved in the time domain. The discharge time determined by the sensor is determined by varying the capacitance and the resistance sought by the number of charging/discharging processes (periods) carried out in succession. The method is tested on a discrete structure consisting of concentrated elements and on a typical ECT measurement situation. The discharge time determined for the real ECT measurement situation with air and water as the media to be measured were all within the uncertainty range of the respective measurement series. Therefore, there was no discernible difference between the different media in the discharge time, which is justified by the small change in capacitance.

Keywords: Capacitance sensors, ECT, de-embedding.

*Korrespondenzautor: Christoph Kandlbinder-Paret, Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik, Universität Bayreuth, Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth, E-Mail: mrt@uni-bayreuth.de

Johannes Häring, Alice Fischerauer, Gerhard Fischerauer, Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik, Universität Bayreuth, Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth

1 Einleitung

Kommerziell erhältliche Sensoren zur Messung der elektrischen Kapazität geben lediglich eine Kapazität als Mess-

wert aus. In Anwesenheit von Verlusten wirkt aber eine reale Kapazität wie die Parallelschaltung einer idealen Kapazität mit einem ohmschen Widerstand. Der Verlustwiderstand verursacht damit eine Messabweichung bei der Kapazitätsmessung. Diese Abweichung wird beispielsweise im Datenblatt des kommerziellen ICs AD7746 in Abhängigkeit von der Größe des Widerstands angegeben. Für ein Multielektrodensystem wurde bereits gezeigt, dass dadurch Rückschlüsse auf die Leitfähigkeit des Mediums zwischen den Elektroden gezogen werden können [3]. Eine solche Signalverarbeitung ist von hohem Interesse in der elektrischen Kapazitätstomografie (ECT) [6].

2 Methodik

Zur Herleitung eines De-Embedding-Verfahrens, das den Einfluss des Verlustwiderstands einer realen Kapazität beseitigt, gehen wir von dem Kapazitätssensor PCap02 von ams aus. Wenn man den Messaufwand nicht erhöhen (und beispielsweise Impedanzen statt Kapazitäten messen) will, bleibt einem nur der Rückgriff auf eine modellbasierte Signalverarbeitung. Man stelle sich vor, dass die Permittivitätsverteilung im Inneren eines Behälters oder eines Rohres mit der ECT ermittelt werden soll [1, 2]. Ist das zu untersuchende Medium kein ideales Dielektrikum, sondern besitzt auch eine elektrische Leitfähigkeit, „sieht“ der Kapazitätssensor eine verlustbehaftete (effektive) Kapazität. Abb. 1a) stellt das elektrische Ersatzschaltbild (ESB) einer solchen Situation dar. Darin beschreiben die Spannung U_0 und die Widerstände R_0 und R_D die Klemmeneigenschaften des PCap02 (Helmholtz-Ersatzspannungsquelle). Der rechte Netzwerkteil wird über R_0 aufgeladen und über R_D entladen. Die Kapazität C_X ist die eigentlich interessierende Messgröße, aus der man Informationen über die Permittivität eines beobachteten Mediums (*medium under test*, MUT) gewinnt. Der Parallelwiderstand R_X entsteht wegen der endlichen MUT-Leitfähigkeit. C_S modelliert die auftretenden Streukapazitäten gegen Masse, und C_W repräsentiert die Wandkapazität infolge der Isolationsschicht zwischen den Messelektroden und dem MUT. Bei idealem Dielektrikum ($R_X = 0$) würden C_S , C_W und C_X eine ideale Kapazität bilden (noch besser wäre natürlich zusätzlich $C_S = C_W = 0$, dann würde C_X ungestört gemessen).

Der PCap02 arbeitet nach dem Lade-/Entladeverfahren. Dabei wird der in Abb. 1a) gezeigte Schalter periodisch mit der Frequenz $f = 143$ kHz umgelegt, was bei $R_X = 0$ zu dem in Abb. 1b) dargestellten Spannungsverlauf $U_S(t)$ über der Kapazität C_S führt

Abb. 1: Messsituation bei der ECT: a) Ersatzschaltbild mit dem PCap02 bei nichtidealem Dielektrikum. Siehe Text zur Erläuterung. b) Spannungsverlauf im PCap02 bei idealem Dielektrikum ($R_X = 0$, $R_D = 10R_0$).

(für eine ideale Kapazität wird $R_0 \ll R_D$ gewählt). Es wird die Zeitkonstante τ_{mess} gemessen, also die Zeit, nach der $U_S(t)$ in der Entladephase von $U_0 = 3,3$ V bis auf einen festgelegten Schwellwert gefallen ist, und mit der Zeitkonstante τ_{ref} einer bekannten Referenzkapazität C_{ref} verglichen[4]. Da die Messkapazität und die Referenzkapazität über den gleichen Widerstand R_D entladen werden, gilt $\tau_{\text{mess}}/\tau_{\text{ref}} = C_{\text{mess}}/C_{\text{ref}}$. Damit ist die Kapazitätsmessung auf zwei Zeitmessungen zurückgeführt.

Bei $R_X \neq 0$, also bei Gültigkeit des vollständigen ESB von Abb. 1a), folgt der Lade-/Entladevorgang nicht mehr einer Differentialgleichung (DGL) erster Ordnung, wie sie Abb. 1b) zugrunde liegt, sondern einer DGL zweiter Ordnung. Die Lösung dieser DGL für eine Sprunganregung der zuvor ungeladenen Kapazität C_S bei $t = 0$ lautet:

$$u_S(t) = (K_1 - K_2 T_1) e^{-t/T_1} - (K_1 - K_2 T_2) e^{-t/T_2} + K_2 (T_1 - T_2) \quad (1)$$

mit

$$K_1 = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \dot{u}_X(0^+) \left(1 + \frac{C_X}{C_W}\right),$$

$$K_2 = \frac{K_1}{(C_W + C_X) R_X}.$$

Darin ist $\dot{u}_X(0^+)$ die zeitliche Ableitung der Spannung an der gesuchten Kapazität C_X unmittelbar nach der Sprunganregung:

$$\dot{u}_X(0^+) = \frac{U_0 C_W}{R_0 (C_S (C_X + C_W) + C_X C_W)}, \quad (2)$$

Abb. 2: Ablauf des verwendeten De-Embedding-Ansatzes.

und die Zeitkonstanten T_1, T_2 sind festgelegt durch:

$$\frac{1}{T_{1,2}} = \frac{R_X(C_X + C_W) + R_0(C_W + C_S)}{2R_X R_0(C_X(C_W + C_S) + C_W C_S)} \mp \frac{\sqrt{T_3^2 + T_4^2}}{2R_X R_0(C_X(C_W + C_S) + C_W C_S)} \quad (3)$$

mit

$$T_3 = (R_X C_X - R_0(C_W + C_S)) \quad \text{und} \\ T_4 = \sqrt{R_X C_W (R_X (2C_X + C_W) + 2R_0(C_W - C_S))}.$$

Es ist offensichtlich, dass die aus dem Spannungsverlauf vom PCap02 gemessene Entladezeit τ_{eff} mehr Details enthält als die Lade-/Entladekurve eines einfachen RC-Glieds. Der Ansatz des De-Embeddings ist in Abb. 2 beschrieben. Der IC gibt nicht die Entladezeitkonstante τ_{eff} aus, sondern die daraus berechnete Kapazität C_{eff} . Durch die mehrmals aufeinanderfolgende Messung der effektiven Kapazität $C_{\text{eff}}(i)$ durch das IC mit $i = 1, 2, \dots$ entsprechend der Nummer der Messung kann wieder auf die effektive Zeitkonstante $\tau_{\text{eff}}(i) = C_{\text{eff}}(i) \cdot \tau_{\text{ref}}/C_{\text{ref}}$ zurückgerechnet werden. Mittels einer Kurvenapproximation der Modellfunktion $\tau = \tau(T_1, T_2, K_1, K_2)$ an jedes der τ_{eff} können daraufhin die Elemente C_X und R_X näherungsweise bestimmt werden.

Abb. 3a) zeigt den Verlauf der Spannung $U_S(t)$ für die zehn ersten Perioden nach Start einer Messung an dem in Abb. 1a) dargestellten Messobjekt (nichtidealer Kondensator). Der PCap02 geht weiterhin vom Zeitverhalten eines einfachen RC-Gliedes aus und interpretiert daher die Lade-/Entladekurven falsch. Die von dem IC bestimmte effektive Zeitkonstante $\tau_{\text{eff}}(i)$ hängt dadurch von der Schaltperiode und natürlich von C_X und R_X ab (Abb. 2b). Aus diesem Verhalten der scheinbaren Zeitkonstanten lassen sich Aussagen über C_X und R_X ableiten, sodass beide Größen bestimmbar werden. Daher ist der Verlauf der Zeitkonstante bei den folgenden Betrachtungen entscheidend.

Abb. 3: Modellerte Kapazitätsmessung mit dem PCap02 bei nichtidealer Kapazität. a) Spannungsverlauf $U_S(t)$ über zehn Schaltperioden für das ESB von Abb. 1a) für $U_0 = 3,3$ V und $f = 143$ kHz. b) Vom PCap02 ausgegebene scheinbare Zeitkonstante in Abhängigkeit von der Schaltperiode seit Beginn der Messung bei Variation von C_X (oben; dabei war $R_X = 100$ kΩ) bzw. R_X (unten; dabei war $C_X = 0,1$ pF). Werte der weiteren ESB-Elemente: $R_D = R_0 = 30$ kΩ; $C_D = 100$ pF; $C_W = 160$ pF.

3 Messung

Zur Verifizierung der Methode wurde sie auf ein diskret mit konzentrierten Elementen realisiertes Messobjekt wie in Abb. 1a) angewandt. Der PCap02 wurde mit $R_D = R_0 = 30$ kΩ und einem Funktionsgenerator (HAMEG HM 80306) nachgebildet, um vollständige Kontrolle über diesen Teil des Messaufbaus zu behalten. Die über dem Kondensator C_S bei Vorgabe einer Rechteckschwingung abfallende Spannung wurde mit einem Oszilloskop (LeCroy WaveAce 202) gemessen. Die Zeitkonstante wurde so wie in Abb. 3b) ermittelt. Zur Feststellung der Wiederholgenauigkeit der Messung wurden zehn Wiederholungsmessungen aufgenommen und der Mittelwert zusammen mit der Unsicherheit auf einem Konfidenzniveau von 95 % bestimmt [5, S. 31–47]. Zusätzlich wurde der theoretisch erwartete Zeitverlauf berechnet.

Die Messergebnisse stimmen sehr gut mit den theoretischen Erwartungen überein (Abb. 4). Dazu musste allerdings ein Offset von 0,2 V für die gemessene Kurve eingeführt werden, um einen Spannungs-Offset des Funktionsgenerators auszugleichen. Die Kapazität C_S war im Aufbau diskret mit 100 pF realisiert, der optimale Wert für die Anpassung von Messung und Rechnung betrug allerdings 150 pF; der Unterschied rührt von parasitären Leitungskapazitäten her.

Die aus den Lade-/Entladekurven mit der PCap02-Fiktion einer idealen Kapazität abgeleitete Zeitkonstante stimmt zwischen Messung und Rechnung erwartungsgemäß recht gut überein (Abb. 3b)). Bei längerer Messung (höherer Periodenindex) macht sich der Einfluss des Messrauschens zunehmend bemerkbar. Man erkennt ihn auch an der mit der Zeit anwachsenden Breite des Konfidenzintervalls in Abb. 3a).

Insgesamt bestätigt der überzeugende Rechnungs-Messungs-Vergleich, dass die experimentell beobachteten Eigenschaften der nichtidealen Kapazität bei einer ECT-Messung mit nur geringen Abweichungen durch das Netzwerkmodell von Abb. 1a) nachgebildet werden können.

Für die Verifizierung bei einer typischen ECT-Messsituation mit verteilten Kapazitäten wird ein Elektrodensystem mit 16 Elektroden ausgewählt, von denen zwei gegenüberliegende Elektroden kontaktiert werden. Der Innendurchmesser des konkret realisierten Rings betrug 80 mm. Die Elektroden des Aufbaus waren gegen das Medium mit einer 1 mm dicken Schicht aus Polycarbonat isoliert (dies wird in Abb. 1a) durch die Kapazität C_W beschrieben). Der Aufbau war von einer äußeren, auf Masse befindlichen Schirmung umgeben. Alle anderen Elektroden außer den zwei Elektroden, die die Anschlüsse der zu messenden Kapazität bildeten, waren potentialfrei. Ein Bild des Aufbaus ist in Abb. 5a) zu sehen. Als MUT im Inneren diente Leitungswasser.

Der resultierende Verlauf der scheinbaren Zeitkonstanten analog zu Abb. 4b) ist in Abb. 5b) dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich die Zeitkonstante mit der Periodennummer ändert und zu einem Endwert hin konvergiert. Im Vergleich zu Abb. 4b) lässt sich auch ein Unterschied im erreichten Endwert und in der Steigung über die jeweiligen Perioden erkennen.

4 Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt lässt sich durch das beschriebene Verfahren mit einem kostengünstigen Kapazitätssensor, bei dem lediglich die Firmware und keine Hardware geändert werden

Abb. 4: Berechnete und mit dem Oszilloskop aufgenommene Spannungscurve $U_S(t)$ sowie ihre Auswertung bei der Messung einer verlustbehafteten Kapazität (ESB von Abb. 1a) nach dem Verfahren des PCap02. a) Berechneter Verlauf (rote Kurve) und Mittelwert des gemessenen Verlaufs (blaue Kurve, mit 95 %-Konfidenzintervall) der Spannung $U_S(t)$ über zehn Schaltperioden. b) Aus a) ermittelte scheinbare Zeitkonstante in Abhängigkeit von der Schaltperiode seit Beginn der Messung für den berechneten und den gemessenen Zeitverlauf (rote bzw. blaue Kreise). Die durchgezogenen Linien dienen lediglich der Führung des Auges. Zahlenwerte aller Parameter: $R_X = 100 \text{ k}\Omega$; $C_X = 10 \text{ pF}$; $R_D = R_0 = 30 \text{ k}\Omega$; $C_D = 150 \text{ pF}$; $C_W = 100 \text{ pF}$; $U_0 = 3,3 \text{ V}$ und $f = 500 \text{ kHz}$.

müssen, auf eine Änderung der eigentlich interessierenden Größe C_X schließen, obwohl sie durch die Einbettung in ein umgebendes Netzwerk (aus R_X , C_W und C_S) nicht direkt beobachtbar ist. Das De-Embedding erlaubt es zudem, auch auf die Höhe der Änderung des Verlustterms R_X zu schließen. Auf dieser Grundlage werden ECT-Systeme, die zur Messung vieler Kapazitäten mehrere Kapazitätssensoren umfassen, kostengünstiger. Sie werden außerdem in begrenztem Maße befähigt, neben Permittivitäts- auch Leitfähigkeitsverteilungen in einem Raumgebiet zu bestimmen. Aus Zeit- und Platzgründen werden hier die Ermittlung der Kapazität und des Widerstands und weitere Messungen nicht weiter aufgeführt.

Abb. 5: Typische ECT-Messsituation. a) Aufbau des verwendeten Elektrodenrings (Details siehe Text). b) Aus dem Zeitverlauf ermittelte scheinbare Zeitkonstante in Abhängigkeit von der Schaltperiode seit Beginn der Messung für den verwendeten Aufbau bei $f = 500 \text{ kHz}$ und $R_D = R_0 = 30 \text{ k}\Omega$. Als MUT wurde Leitungswasser verwendet. Die durchgezogene Linie dient lediglich der Führung des Auges.

Literatur

- [1] C. Gunes, Q. Marashdesh und F. Teixeira. A comparison between electrical capacitance tomography and displacement-current phase tomography. *IEEE Sens. J.*, 17(24):8037–8046, 2017.
- [2] Y. D. Jiang und M. Soleimani. Capacitively coupled impedance imaging based on wideband phase measurement. In *Proc. of 9th World Congr. Industr. Proc. Tomography (WCIPT)*, S. 3–9, 2018.
- [3] C. Kandlbinder-Paret, A. Fischerauer, A. Horn und G. Fischerauer. Berührungslose Permittivitäts- und Leitfähigkeitsmessung mit einem Mehrelektrodensystem. In *Tagungsband 19. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2018*, S. 165–169, 2018.
- [4] N. N. PCap02A – Single-chip Solution for Capacitance Measurement Volume 1: General Data and Front-end Description (Vers. 1.6). ams Group, Mai 2014.
- [5] E. Schrüfer, L. Reindl und B. Zagar. *Elektrische Messtechnik*. Carl Hanser Verlag München, 11. Auflage, 2014.
- [6] M. Zhang und M. Soleimani. Simultaneous reconstruction of permittivity and conductivity using multi-frequency admittance measurement in electrical capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.*, 27(2), 2016. 10.1088/0957-0233/27/2/025405.