

# Nichtinvasiver kapazitiver Füllstandsensoren für den Einsatz an transportablen Behältern

*Stefan Klehr, Stefan von Dosky,  
Siemens AG, Östliche Rheinbrückenstr. 50, 76187 Karlsruhe, Germany*

## Zusammenfassung

Vorgestellt wird ein neuartiger kapazitiver Füllstandsensoren basierend auf einem kapazitiven Multielektroden-Array, welches einfach von außen vertikal auf die Behälterwand aufgeklebt wird. Durch die Elektrodenanordnung wird ein bestimmtes Muster an Kapazitätsmesswerten erzielt, welches als eine digitale Codierung interpretiert werden kann. Diese Codierung ist robust gegenüber Störeinflüssen wie beispielsweise Betauung an der Behälterinnenwand. Zudem ist es möglich eine Trennschicht von Zwei-Phasen-Gemischen oder die Schaumdicke auf einer Flüssigkeit zu bestimmen. Die zugehörige Elektronik zur kapazitiven Messwerterfassung ist sehr stromsparend. Ausgestattet mit einer Batterie und einem energiesparenden Modul zur drahtlosen Kommunikation eignet sich dieser Füllstandsensoren für den Einsatz an transportablen Behältern. Gezeigt werden das Schaltungskonzept sowie erste Messergebnisse mit verschiedenen Flüssigkeiten und Behältern.

**Keywords:** Kapazitive Füllstandsmessung, Clamp-on, Batteriespeisung, Internet of Things

## Einleitung

Die Füllstandsmessung von Fluiden in Behältern ist in der Industrie im Allgemeinen eine zur Zufriedenheit gelöste Messaufgabe. Wenige Messprinzipien basierend auf Radar, Ultraschall und Hydrostatik haben sich dabei etabliert. Auch kapazitive Messprinzipien werden eingesetzt [1], [2]. Im Zuge der Digitalisierung treten zunehmend neue Anwendungen in den Fokus des technisch und wirtschaftlich Machbaren und werden somit z.B. für den Bereich der Logistik interessant.

Zu wissen, wie der Füllstand und der aktuelle Standort eines oft eingesetzten und preiswerten Intermediate Bulk Container (IBC) ist, erfordert einen Sensor, der energieautark funktioniert und kostengünstig ist. Dieser Beitrag stellt einen technischen Baustein vor, um neue Anwendungsfelder für die Füllstandsmessung zu eröffnen.

## Kapazitives Multielektroden-Array

Befestigt man zwei parallele Elektrodenstreifen vertikal an der Außenseite der Behälterwand, so misst man einen Anstieg der Kapazität proportional zum Anstieg des Füllstands. Diese Methode ist bekannt und findet ihre Anwendung [3].

Kürzt man nun die Speiseelektrode EXC, unterteilt diese in z.B. drei gleiche Teile, die elektrisch miteinander verbunden sind, und verteilt sie gleichmäßig über die zu erfassende Messstrecke (vgl. Abb.1 b, c), so erhält man in Abhängigkeit des Füllstands einen

treppenstufenförmigen Kapazitätsverlauf (Abb. 2 c).

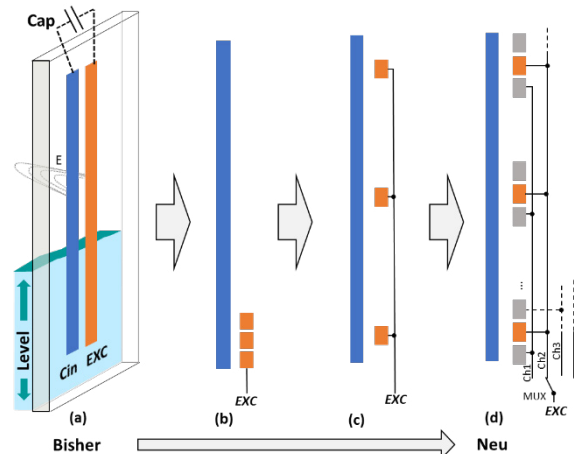


Abb. 1: kapazitive Elektrodenanordnung bisher und neu, (a) parallele Elektroden in perspektivischer Darstellung

Des Weiteren kann man diese Elektrodenanordnung vervielfachen und über einen Multiplexer (MUX) selektierbar machen (Abb. 1 d). Die Elektroden werden in einem definierten Raster vertikal aneinandergereiht (Abb. 3, links). Die Kanäle (Ch1...Ch8) wiederholen sich dabei periodisch nach oben hin, so dass sie eine definierte Nummernfolge bilden (1, 2, ... 7, 8, 1, 2...). Zunächst wurden prototypisch drei Wiederholungen realisiert, so dass das Multielektroden-Array aus 24 Elektroden besteht.

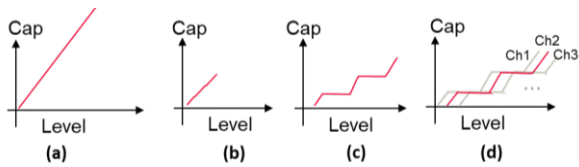


Abb. 2: Kapazitätsverlauf

Erfasst man nun die entsprechenden kapazitiven Messwerte der über einen Multiplexer sequenziell selektierten Kanäle (Ch1, Ch2, Ch3, ...), so erhält man ein entsprechend treppenstufenförmiges Muster, das sich jeweils versetzt um eine Rasterbreite wiederholt (Abb. 2 d).

Mit dem beschriebenen Multielektroden-Array ergeben sich mehrere Vorteile:

- Geringe Kapazitätshübe über den gesamten Füllstands-Messbereich, günstig für Auslegung der Elektronik.
- Geringer Schaltungsaufwand durch MUX und periodische Wiederholung der Elektrodenmuster.
- Keine Messfehler durch Anhaftung, bzw. Kondensation und Verschmutzung.
- Keine Kalibrierung notwendig.
- Messung von Zwei-Phasen-Gemischen bzw. Schaumdicke.

Das Multielektroden-Array kann als flexibles Board (Flex-PCB) oder gedruckt auf einem PET-Streifen gefertigt werden und als selbstklebender Flex-Streifen leicht montiert werden.

Zunächst wurde für erste Messungen das Multielektroden-Array aus selbstklebender Kupferfolie mittels Schneidplotter strukturiert und an einem zylindrischen Glasbehälter mit 7 mm Wandstärke getestet (Abb. 3, rechts).

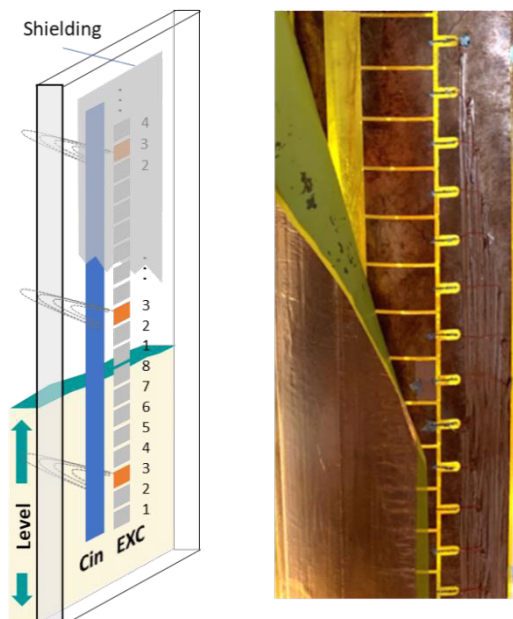


Abb. 3: Multielektrodenarray, aus Kupferfolie an einem Glasbehälter (rechts)

Der Flex-Streifen kann vom Anwender auf die gewünschte Länge angepasst werden, indem er diesen an bestimmten Stellen abschneidet (s. Abb. 4).

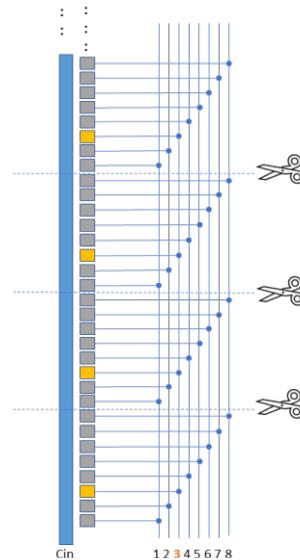


Abb. 4: Kürzen an bestimmten Stellen auf gewünschte Länge durch Anwender

### Kapazitive Messwerterfassung

Hauptbestandteile der Messelektronik sind ein Kapazitiv-Digital-Wandler (CDC) sowie ein MUX, wie im folgenden Bild dargestellt.

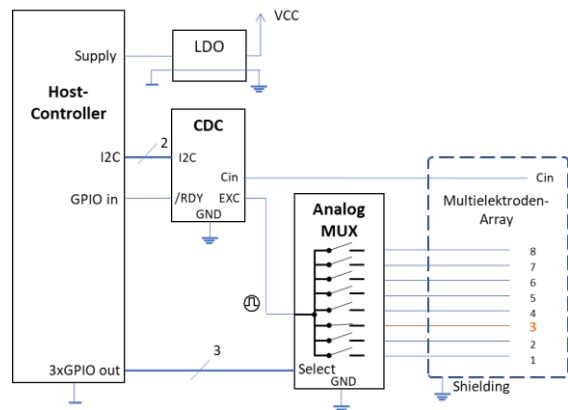


Abb. 5: Kapazitive Ausleseelektronik mit CDC und Multiplexer

Der CDC ist dazu ausgebildet, die Kapazität zwischen den Anschlüssen Excitation (EXC) und  $C_{in}$  zu messen und als digitalen Wert auszugeben. Hierzu wird an EXC ein Rechteck-Signal ausgegeben und so die zu messende Kapazität abwechselnd vollständig aufgeladen und wieder entladen. Die dabei transportierte Ladung ist ein Maß für die Kapazität. Das elektrische Potential von EXC

liegt also immer auf einem definierten Spannungspegel und wird von einer niederohmigen Quelle gespeist. Dies erlaubt den Einsatz nachgeschalteter elektronischer Bausteine (MUX) ohne den Messpfad für diese Anwendung nachteilig zu beeinflussen. Der MUX selektiert einen der acht Kanäle und bestimmt somit die aktiven Messelektroden (vgl. Ch3 in Abb. 3 links), während die restlichen Kanäle an der Messung nicht beteiligt sind (grau im Bild). Der Messbereich des CDC liegt bei etwa 8 pF und erfordert eine entsprechende geometrische Auslegung des Multielektroden-Arrays. Ein derartiges Array ermöglicht einen hohen Füllstandsmessbereich bei gleichzeitig geringer Kapazitätsauslenkung. Durch die Schirmung entsteht aufgrund der ausgedehnten Masseflächen eine erhebliche parasitäre Kapazität. Diese wird jedoch aufgrund des Messprinzips des CDC weitgehend toleriert. Im ersten Schritt wurde ein 8-fach Multiplexer verwendet.

### Messergebnisse

Bislang wurden Messungen an einem zylindrischen Glasbehälter sowie an einem Kunststoffbehälter aus HDPE (High Density Polyethylen) durchgeführt. Die Elektroden wurden in einem Elektroden-Raster von 11 mm angeordnet.

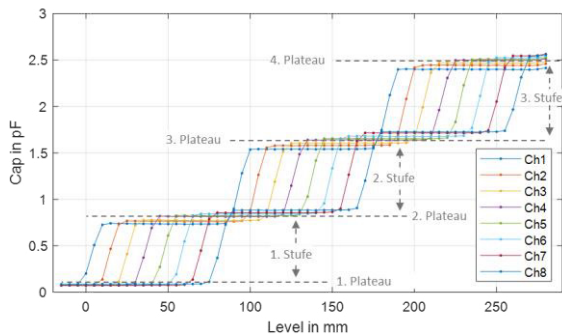


Abb. 6: Füllstandsmessung am Glasbehälter mit (7mm Wandstärke) mit Wasser.

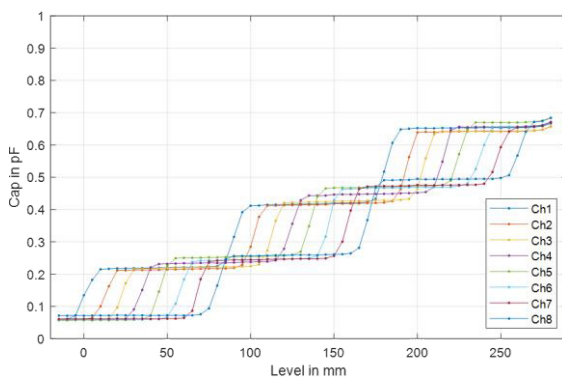


Abb. 7: Füllstandsmessung am HDPE-Behälter mit (3mm Wandstärke) mit Wasser.

### Füllstandsberechnung

Die Codierung der gemessenen Kanäle erlaubt eine direkte digitale Interpretation des Füllstands. Ändert sich der Füllstand um ein Raster, so ändert sich der Kapazitätswert bei genau einem Channel um eine Treppenstufe, während die anderen Channels in ihrem Wert verharren. Anhand der Reihenfolge der Kanäle ist festgelegt, welcher Kanal als nächster seine Treppenstufe ändert. Dies ermöglicht eine robuste Plausibilitätsprüfung bei der Berechnung des Füllstands. Die Anzahl plausibler Codes  $V$  beträgt allgemein bei  $n$  Channels und  $m$  Elektroden je Channel: Gl. (1)

$$V = n \cdot m + 1$$

Während alle möglichen Codekombinationen  $N$  sich wie folgt berechnen lassen Gl. (2):

$$N = (m + 1)^n$$

Mit 8 Kanälen und 3 Elektroden je Kanal gibt es  $V=25$  gültige Codes aus  $N=65536$  möglichen Codes. D.h. alle restlichen Codes außer den erlaubten 25 können als Fehler erkannt werden. Verwendet man statt eines 8-fach einen 16-fach Multiplexer, so erhält man bei 3 Elektroden je Kanal  $V=49$  plausible Codes. Dies entspricht einer Raster-Auflösung des Füllstands von knapp 2%.

Die absoluten Kapazitätswerte sind bei dieser Methode nicht maßgebend. Die Kanäle werden relativ zueinander ausgewertet, so dass eine Kalibrierung nicht notwendig ist.

Ändert sich der Füllstand nur geringfügig, so dass sich der betroffene Kanal zwischen zwei Stufen befindet, kann dieser eine Kanal weder der unteren noch der oberen Stufe zugeordnet werden. Berücksichtigt man diesen Zwischenbereich mit in der Kalkulation, so kann man den Füllstand feiner auflösen als das Elektrodenraster vorgibt.

Ein entsprechender Algorithmus wurde im Rahmen der Evaluierung mit Matlab erstellt und mit dem 8x3 Elektroden-Array getestet. Bei einem Elektrodenraster von 11 mm konnte der Füllstand im Bereich von 1 mm aufgelöst werden. Der Messbereich beträgt 0,3 m.

### Füllstand von Zwei-Phasen-Gemischen

Zwei-Phasen-Gemische, wie beispielsweise Wasser und Öl, können mit dem Multielektroden-Array aufgrund der unterschiedlichen Permittivitäten erfasst werden. Die jeweilige Höhe der beiden Flüssigkeitssäulen kann dabei einzeln ermittelt werden, sofern sich beide Säulen jeweils über mindestens zwei Rasterbreiten des Multielektroden-Arrays erstrecken. Messungen mit Öl und weiteren Stoffen stehen jedoch zurzeit noch aus. Elektrostatische FEM-Simulationen [4] zeigen aber, dass der Einfluss der stoffspezifischen Permittivität nichtlinear in den gemessenen Kapazitätshub eingehen, so dass Stoffe mit sehr geringer Permittivität (z.B. Öl) die gemessene Kapazität deutlich stärker beeinflussen als angenommen und vom Messsystem gut erfasst werden können.

### Zusammenfassung und Ausblick

Das in diesem Beitrag vorgestellte kapazitive Multielektroden-Array eröffnet eine neuartige, nichtinvasive Möglichkeit, den Füllstand in Behältern kapazitiv von außen zu messen. Durch den Einsatz eines Multiplexers sowie einer gezielten Elektrodenanordnung können die Kapazitätswerte entlang der Füllhöhe abschnittsweise separat über Kanäle erfasst werden. Dies ermöglicht den Einsatz eines einzelnen CDC. Durch die Gegenüberstellung der Kanäle entsteht ein füllstandabhängiges Treppenstufenmuster welches als digitaler Code interpretiert werden kann. Dabei sind nur wenige bestimmte Codemuster plausibel bzw. erlaubt. Alle anderen Codemuster sind nicht plausibel und werden als Fehler identifiziert. Dies macht die Füllstandsmessung robust gegenüber Störeinflüssen wie Kondensation oder Anhaftungen. Erste Messungen liefern vielversprechende Ergebnisse.

Weitere Messungen mit unterschiedlichen Behältern und Flüssigkeiten sind geplant. Zudem sollen größere Füllhöhen getestet werden.

### Literaturnachweis

- [1] Sitrans LC300, Kapazitive Füllstandsmessung, Fa. Siemens  
<https://www.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/prozessinstrumentierung/fuellstandsmessung/kontinuierliche-verfahren/sitrans-lc300.html>

- [2] Hoffmann, J.; Handbuch der Messtechnik; Hanser-Verlag, 2012
- [3] Klebesensor BCW004, Fa. Balluff GmbH
- [4] J. Wild, „Nichtinvasive, kapazitive Multielektroden Füllstandsmessung,“ Institut für Industrielle Informationstechnik, KIT, 2023.