

# **WHITEPAPER**

## KAPAZITIVE SENSOREN

Autor: Dipl.-Ing. Christian Fiebach  
Geschäftsführer ipf electronic gmbh

Dipl.-Ing. Volker Grefe  
Strategisches Produktmanagement  
ipf electronic gmbh

**IPF** ELECTRONIC

# INHALTSVERZEICHNIS

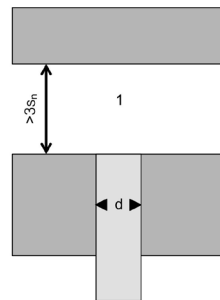
1. Einleitung .....	3
2. Einteilung von kapazitiven Sensoren .....	3
2.1 Ausgangsschaltung .....	4
2.2 Ausgangsfunktion .....	4
3. Funktionsweise von kapazitiven Sensoren .....	4
3.1 Schaltabstände, Dielektrizitätskonstante und Schalthysterese.....	5
3.2 Serienschaltung und Parallelschaltung .....	6
3.3 Anzugsmomente .....	7
3.4 Aktive Schaltzone/Aktive Fläche .....	7
3.5 Verpolungsschutz und Kurzschlusschutz (DC-Geräte).....	7
4. Leitungsführung.....	7
5. Welche kapazitiven Sensoren gibt es? .....	7
5.1 Typische Anwendungen von kapazitiven Sensoren .....	8
5.2 Kapazitive Sensoren mit Normschaltabstand.....	8
5.3 Kapazitive Sensoren für besonders anspruchsvolle Umgebungen .....	8
6. Glossar .....	9

**1. EINLEITUNG**

Eine der Hauptintentionen für die Entwicklung von kapazitiven Sensoren war es im Grunde, Gerätelösungen zu erhalten, die sich in Anwendungen ähnlich wie induktive Sensoren handhaben lassen, darüber hinaus aber in der Lage sind, berührungslos auch nicht-metallische Werkstoffe wie bspw. Holz, Kunststoff und auch Flüssigkeiten zu erfassen. Kapazitive Sensoren werden vornehmlich für die Anwesenheitskontrolle bzw. Positionserfassung von Objekten verwendet. Darüber hinaus lassen sich solche Sensoren für die Füllstandskontrolle einsetzen, wobei dies auch durch Behälterwandungen hindurch möglich ist (mehr zu diesem Thema auf Seite 6). Kapazitive Sensoren sind verschleißfrei, müssen nicht gewartet werden und weisen eine von der Schalzhäufigkeit unabhängige Lebensdauer auf. Sie erfordern keine Betätigungskraft bzw. arbeiten berührungslos und weisen durch ihren elektronischen Aufbau kein Kontaktprellen auf. Mit solchen Geräten können sowohl Elektronik-Schaltungen, als auch SPS sowie Relais und Schütze direkt angesteuert werden.

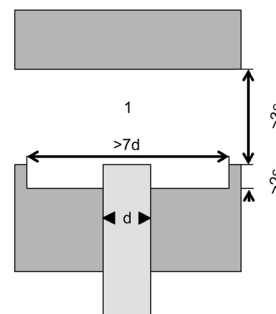
**2. EINTEILUNG VON KAPAZITIVEN SENSOREN**

Die Einteilung von kapazitiven Sensoren erfolgt nach ihrer Einbauart. Hierbei ist zwischen einem bündigen Einbau und einem nichtbündigen Einbau zu unterscheiden. Bei einem bündigen Einbau kann der Sensor bis zur aktiven Fläche in ein Metall oder ein anderes potenziell beeinflussendes Material integriert werden, ohne dass sich seine Eigenschaften verändern. Die für die Geräte angegebenen Abstände sind hierbei einzuhalten. Sensoren für den bündigen Einbau eignen sich insbesondere zur Erfassung von festen Körpern oder von Flüssigkeits-Füllständen bspw. durch Behälterwände, die nicht aus Metall sind.



Beim bündigen Einbau kann der Sensor bis zur aktiven Fläche in das Trägermaterial integriert werden (1 = Freizone).  
(Alle Bilder: ipf electronic gmbh)

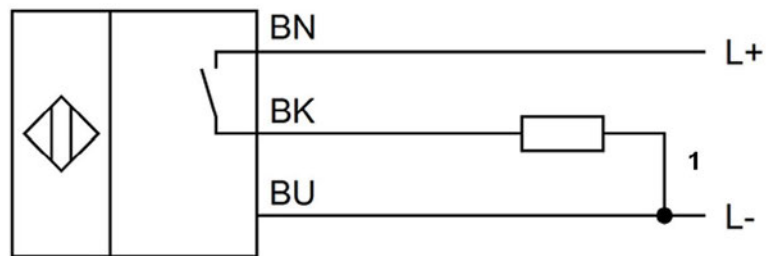
Bei nichtbündig einbaubaren kapazitiven Sensoren muss eine Freizone um den Sensor vorgesehen werden, die bei allen Geräten auch zum gegenüberliegenden Material einzuhalten ist. Auch bei diesen Sensoren sind die angegebenen Abstände einzuhalten. Nichtbündig einbaubare Geräte empfehlen sich besonders für Anwendungen, in denen ein Medium mit der aktiven Fläche des Sensors in Berührung kommt, z. B. bei der Füllstandserfassung von Schüttgütern, Pasten oder Flüssigkeiten.



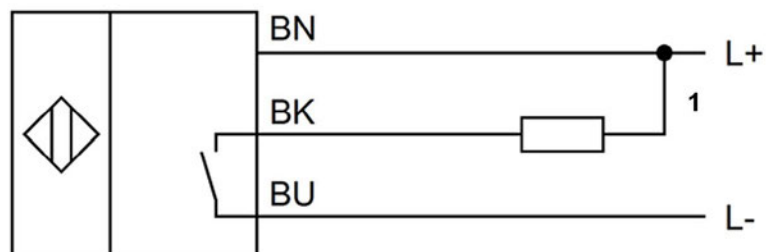
Bei nichtbündig einbaubaren Sensoren ist eine Freizone (1) um das Gerät einzuhalten.

### 2.1 AUSGANGSSCHALTUNG

Bei den Gleichspannungsgeräten von kapazitiven Sensoren unterscheidet man zwischen PNP- und NPN-Ausgangsschaltungen, wobei die PNP-Ausgangsschaltung als Standard gilt. Die Ausgangsstufe des Sensors enthält hierbei einen PNP-Transistor, der die Last gegen die positive Betriebsspannung (+UB) schaltet. Die Last wird zwischen dem Ausgang und der negativen Betriebsspannung (0V) angeschlossen. Entsprechend enthält die Ausgangsstufe eines Sensors bei einer NPN-Ausgangsschaltung einen NPN-Transistor, der die Last gegen die negative Betriebsspannung (0V) schaltet. Die Last wird zwischen dem Ausgang und der positiven Betriebsspannung (+UB) angeschlossen.



Bei der PNP-Ausgangsschaltung schaltet der Transistor die Last (1) gegen die positive Betriebsspannung (+UB).



Entsprechend enthält die Ausgangsstufe eines Sensors bei einer NPN-Ausgangsschaltung einen Transistor, der die Last (1) gegen die negative Betriebsspannung (0V) schaltet.

### 2.2 AUSGANGSFUNKTION

Die Schaltfunktion am Ausgang ist mit mechanischen Kontakten vergleichbar.

Schließer (NO): Objekt oder Medium im Bereich der aktiven Schaltzone – Ausgang durchgeschaltet.

Öffner (NC): Objekt oder Medium im Bereich der aktiven Schaltzone – Ausgang gesperrt.

### 3. FUNKTIONSWEISE VON KAPAZITIVEN SENSOREN

Die aktive Fläche eines kapazitiven Sensors besteht aus zwei konzentrisch angeordneten metallischen Elektroden (aufgeklappter Plattenkondensator). Nähert sich ein metallisches oder nichtmetallisches Objekt der aktiven Fläche, so verändert es das elektrische Feld vor den Elektrodenflächen. Über eine Auswerteschaltung wird diese Veränderung in ein Schaltsignal umgesetzt.

**3.1 SCHALTABSTÄNDE, DIELEKTRIZITÄTSKONSTANTE UND SCHALTHYSTERESE**

Der Abstand zur Sensorfläche, bei dem ein Werkstoff oder Medium eine Änderung des Schaltzustandes bewirkt, wird Schaltabstand genannt. Die größten Schaltabstände erreichen kapazitive Sensoren bei ferromagnetischen Materialien (Stahl, Eisen) und Wasser. Bei anderen Werkstoffen ist der erzielbare Schaltabstand geringer. Dieser Materialeinfluss auf den Schaltabstand wird durch materialspezifische Reduktionsfaktoren beschrieben.

Hierbei gilt: Materialabhängiger Schaltabstand = Nennschaltabstand x Reduktionsfaktor für den jeweiligen Werkstoff. Der Nennschaltabstand ist eine Kenngröße zur Eingruppierung der Sensoren. Er berücksichtigt keine Exemplarstreuungen und äußere Einflüsse wie Temperatur- oder Spannungsschwankungen. Angegeben wird der Abstand, bei dem die Normmessplatte, die sich der aktiven Fläche des Sensors nähert, eine Zustandsänderung des Schaltausgangs bewirkt. Die Normmessplatte besteht aus Stahl FE360, ist 1mm dick, quadratisch, geerdet und verfügt über eine geglättete Oberfläche. Die Kantenlänge der Normmessplatte entspricht dem Durchmesser der aktiven Fläche eines kapazitiven Näherungsschalters.

Der materialspezifische Reduktionsfaktor eines kapazitiven Sensors ist abhängig von der relativen Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  für ein bestimmtes Material. Die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  beschreibt die Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder. In der Regel erfassen kapazitive Sensoren Produkte mit einer relativen Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_r > 1,5$ . Die Konstante ist von mehreren Faktoren abhängig wie z. B. der Temperatur. Daher sind Angaben zu bestimmten Produkten als lediglich exemplarisch zu verstehen. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind Füllstandsabfragen mit kapazitiven Näherungsschaltern durch Behälterwandungen möglich, allerdings dürfen diese nur aus nichtmetallischen Materialien bestehen. Hinzu kommt, dass hierbei die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  des zu erfassenden Mediums um zirka den Faktor 5 größer sein muss. Auf Seite 7 zeigt eine Übersicht über verschiedenste Materialien und deren Einfluss auf den Schaltabstand von kapazitiven Sensoren.

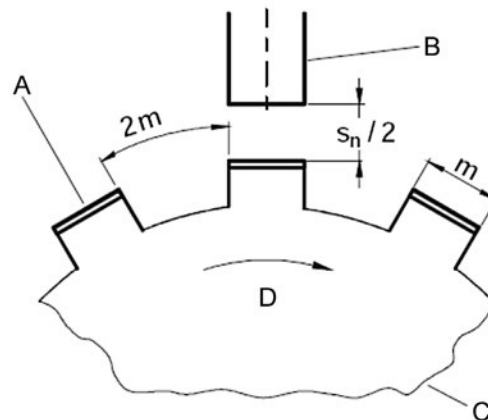
In der Regel kann bei kapazitiven Sensoren mit einem Potentiometer der Schaltabstand eingestellt werden. Sofern die Umgebungseinflüsse konstant sind, ist eine Einstellung der Reichweite bzw. Empfindlichkeit bis zum angegebenen Maximalwert möglich. Bei schwankenden Umgebungseinflüssen darf der Maximalwert nicht ausgeschöpft werden, da die Umgebungseinflüsse (z. B. Temperatur) sich auf das Ansprechverhalten auswirken und ggf. bei Maximaleinstellung zu Fehlfunktionen führen könnten.

Material	$\epsilon_r$	Schaltabstand in %	Reduktionsfaktor
Stahl FE360	leitet	100	1
Salzwasser	80	100	1
Marmor	8	65	0,65
Porzellan	4-5	50	0,5
PE	2,3	10	0,1
Öl	2,2	10	0,1
Holz	2-7	10-60	0,1-0,6

Der spezifizierte Schaltabstand kapazitiver Näherungsschalter bezieht sich auf genau definierte Messbedingungen. Bei andren Messanordnungen oder Materialien ergeben sich in der Regel reduzierte Schaltabstände. Die in der Tabelle aufgeführten Angaben sind als Richtwerte zu betrachten und daher unverbindlich.

Im Zusammenhang mit den bisherigen Ausführungen beschreibt die Schalthysterese die Wegdifferenz zwischen dem Einschaltpunkt bei einem Werkstoff, der sich dem Sensorkopf nähert, und dem Ausschaltpunkt, wenn sich der Werkstoff wieder vom Sensor entfernt, wobei der Einschaltpunkt näher am Sensor liegt als der Ausschaltpunkt. Diese integrierte Hysterese verhindert ein Hin- und Herkippen des Schaltausgangs, wenn sich ein Objekt an der Grenze des Erfassungsbereichs befindet und mechanischen Vibrationen unterliegt.

Die maximale Schaltfrequenz kapazitiver Sensoren wiederum gibt die höchstzulässige Anzahl von Impulsen pro Sekunde bei einem konstanten Impuls-Pausen-Verhältnis von 1 : 2 und halbem Nennschaltabstand an. Diese Schaltfrequenz wird ebenfalls mit einer Standardnormmessplatte bestimmt. Die maximal möglichen Schaltvorgänge pro Sekunde setzen der Schaltfrequenz somit Grenzen. Daher muss bei der Wahl des richtigen kapazitiven Näherungsschalters ein Kompromiss zwischen der Größe des Näherungsschalters und der Schaltfrequenz gemacht werden.



A: Messplatte, B: Näherungsschalter, C: Scheibe, D: nichtleitendes Material

### **3.2 SERIENSCHALTUNG UND PARALLELSCHALTUNG**

Die Serienschaltung von 3-Leiter-PNP-Sensoren ist betriebssicher nur über ein logisches UND-Glied möglich, z. B. dem **VL250100**. Bei der Parallelschaltung von 3-Leiter-PNP-Sensoren wirkt sich der Innenwiderstand des durchgeschalteten Sensors auf die restlichen Initiatoren aus. Daher müssen Entkoppeldioden in die Ausgänge eingesetzt werden. Als Hilfe zur Parallelschaltung kann ein logisches ODER-Glied verwendet werden, z. B. das **VL250120**.

**3.3 ANZUGSMOMENTE**

Um Beschädigungen beim Einbau der Näherungsschalter zu vermeiden, dürfen die im folgenden angegebenen Anzugsdrehmomente nicht überschritten werden.

Gehäusewerkstoff					
	Edelstahl	Messing vernickelt/ verchromt	PTFE	PPO	PA 6.6
M5	1,5 Nm	-	-	-	-
M8	4,5 Nm	-	-	-	-
M12	15 Nm	10 Nm	0,2 Nm	1 Nm	1 Nm
M18	40 Nm	28 Nm	0,5 Nm	3 Nm	1,7 Nm
M22	50 Nm	32 Nm	1,4 Nm	10 Nm	6 Nm
M30	150 Nm	82 Nm	2,5 Nm	8 Nm	8 Nm
M32	180 Nm	110 Nm	3 Nm	13 Nm	13 Nm

**3.4 AKTIVE SCHALTZONE/AKTIVE FLÄCHE**

Die aktive Schaltzone ist der Raum vor der aktiven Fläche, in dem der Näherungsschalter auf Annäherung von Objekten reagiert, d. h. den Schaltzustand des Ausganges ändert.

**3.5 VERPOLUNGSSCHUTZ UND KURZSCHLUSSSCHUTZ (DC-GERÄTE)**

Als interner Schutz verhindert der Verpolungsschutz eine Zerstörung des Näherungsschalters, falls die Anschlussleitungen unbeabsichtigt vertauscht werden. Durch den Kurzschlusschutz (DC-Geräte) werden Näherungsschalter bei Überstrom nicht zerstört.

**4. LEITUNGSFÜHRUNG**

Bei der Installation von kapazitiven Sensoren sind hinsichtlich der Leitungsführung der Anschlüsse einige wichtige Dinge zu beachten. So sollten die Anschlussleitungen von kapazitiven Näherungsschaltern keinesfalls in einem Kabelkanal parallel mit solchen Leitungen verlegt werden, über die man induktive Lasten schaltet (z. B. Schutzspulen, Magnetventile, Motoren, etc.) oder die Ströme von elektronischen Motorantrieben führen. Die Leitungslängen sind außerdem möglichst kurz zu halten. Insbesondere bei längeren Leitungsstrecken > 5m sind abgeschirmte oder verdrehte Leitungen zu empfehlen. Zur Verminderung von Störeinflüssen ist es zudem ratsam, einen Abstand von > 100mm zur störenden Leitung einzuhalten.

**5. WELCHE KAPAZITIVEN SENSOREN GIBT ES?**

Die Auswahl an kapazitiven Sensoren ist sehr groß. Generell lässt sich hierbei zwischen Geräten in Zylinderform, mit und ohne Gewinde, im Metall- oder Kunststoffgehäuse sowie Geräten für Füllstands-Anwendungen (in ihrer Bauform zumeist der jeweiligen Applikation angepasst) unterscheiden. Darüber hinaus existieren spezielle Ausführungen, bspw. für Umgebungstemperaturen über +80 °C bzw. -25 °C, Lösungen mit Teflongehäuse sowie Geräte, die eigens für die Schlauch- und Rohrmontage entwickelt wurden.



Spezielle Ausführungen von kapazitiven Sensoren mit Teflongehäuse sowie Entwicklungen für die Schlauch- und Rohrmontage.

### **5.1 TYPISCHE ANWENDUNGEN VON KAPAZITIVEN SENSOREN**

Ein typischer Einsatzbereich von kapazitiven Näherungsschaltern ist das Positionieren oder Zählen von Gegenständen, Behältern oder Verpackungen, um einige wenige Beispiele zu nennen. Darüber hinaus werden solche Geräte zur Füllstandsabfrage von pastösen, festen und flüssigen Medien verwendet. Kapazitive Sensoren haben außerdem den großen Vorteil, dass sie auf alle erdenklichen Metalle sehr gut reagieren. In der Vergangenheit wurden die Geräte daher insbesondere im Bereich der Erfassung von Buntmetallen, z. B. zur Detektion dünner Kupferdrähte in der Elektronikindustrie, eingesetzt. Allerdings ist in solchen Anwendungen auf Ablagerungen von Werkstoffresten, etwa Metallabrieb, auf der aktiven Sensorfläche zu achten, da dann die Sensoren ebenfalls ein Schaltsignal erzeugen. Das Einsatzspektrum von kapazitiven Sensoren ist somit sehr vielseitig. Entsprechend breit gefächert ist daher auch das Angebot von ipf electronic in diesem Produktbereich. Nachfolgend werden einige kapazitive Sensoren mit Normschaltabstand und Gerätelösungen für spezielle Umgebungsbedingungen vorgestellt.

### **5.2 KAPAZITIVE SENSOREN MIT NORMSCHALTABSTAND**

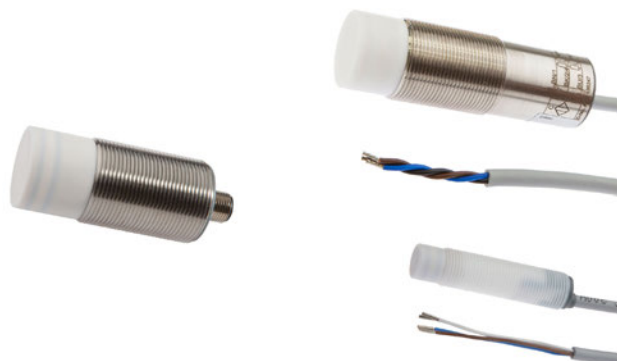
Das Portfolio an kapazitiven Sensoren mit Normschaltabstand (Schaltabstände von 0,8mm bis 120mm) von ipf electronic erstreckt sich über Baugrößen (Durchmesser) von 6,5mm (rund) bis 100mm (rund). Die Sensoren sind mit und ohne Gewinde sowie als quaderförmige Lösungen ausgeführt. Die für den bündigen sowie nichtbündigen Einbau geeigneten Näherungsschalter haben eine aktive Fläche aus Kunststoff und können in einem Temperaturbereich von -25° C bis +70° C eingesetzt werden.



Auswahl an kapazitiven Sensoren mit Normschaltabstand mit einem Durchmesser von 6,5mm bis 100mm.

### **5.3 KAPAZITIVE SENSOREN FÜR BESONDERS ANSPRUCHSVOLLE UMGEBUNGEN**

Die Gerätelösungen für spezielle Umgebungsbedingungen verfügen neben einem erweiterten Einsatztemperaturbereich von -25° C bis über +80° C bspw. über eine hohe Dichtigkeit und sind laugen- oder säurebeständig. Diese Näherungsschalter stehen in Baugrößen von 4mm (rund) bis 35mm (rund) sowie mit und ohne Gewinde zur Verfügung. Die Schaltabstände der bündig als auch nichtbündig einbaubaren Gerätevarianten reichen von 2mm bis 40mm. Die aktive Fläche besteht aus Kunststoff oder Teflon.



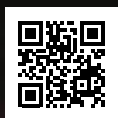
Kapazitive Sensoren für raue Umgebungsbedingungen.



## 6. GLOSSAR

Nachfolgend werden in alphabetischer Reihenfolge einige in diesem White Paper verwendete Fachbegriffe und Variablen näher erläutert.

<b>Dielektrizitätskonstante <math>\epsilon_r</math>:</b>	Beschreibt die Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder.
<b>Exemplarstreuung:</b>	Abweichungen von einem Referenzwert im Hinblick auf eine charakteristische Eigenschaft eines Bauelements oder technischen Gerätes bei der Serienfertigung.
<b>Kontaktprellen:</b>	Das Prellen ist ein mechanisch ausgelöster Störeffekt bei elektromechanischen Schaltern, der ein ungewolltes, kurzzeitiges, mehrfaches Öffnen und Schließen eines Kontaktes hervorruft.
<b>Nennschaltabstand (Sn):</b>	Der Abstand, bei dem die Normmessplatte, die sich der aktiven Fläche eines Sensors nähert, eine Zustandsänderung des Schaltausganges bewirkt.
<b>Normmessplatte:</b>	Eine 1mm dicke, quadratische und geerdete Platte aus Stahl FE360, dessen Oberfläche geglättet ist. Die Kantenlänge der Normmessplatte entspricht dem Durchmesser der aktiven Fläche eines kapazitiven Sensors.
<b>Plattenkondensator (Kondensator):</b>	Besteht im Prinzip aus zwei elektrisch leitfähigen Flächen (Elektroden), die von einem isolierenden Material (Dielektrikum) voneinander getrennt sind. Als passives elektrisches Bauelement kann ein Kondensator in einem Gleichstromkreis elektrische Ladung und die hiermit korrelierende Energie in einem elektrischen Feld speichern. Die gespeicherte Ladung pro Spannung wird als elektrische Kapazität bezeichnet.
<b>PNP-/NPN-Ausgangsschaltung:</b>	Ausführliche Erläuterungen siehe Kapitel 2.1
<b>Reduktionsfaktor:</b>	Im Zusammenhang mit kapazitiven Sensoren der Faktor eines Materials, der mit dem Nennschaltabstand eines Gerätes multipliziert wird, um den Schaltabstand zu erhalten (siehe Tabelle auf Seite 7).
<b>Schaltabstand:</b>	Abstand der Sensorfläche, bei dem ein Werkstoff oder Medium eine Änderung des Schaltzustandes bewirkt.
<b>Schaltfrequenz (maximale):</b>	Gibt bei kapazitiven Sensoren die höchstzulässige Anzahl von Impulsen pro Sekunde bei einem konstanten Impuls-Pausen-Verhältnis von 1 : 2 bei halbem Nennschaltabstand an. Die Ermittlung dieser Schaltfrequenz erfolgt ebenfalls mit der Normmessplatte.
<b>Schalthyterese:</b>	Beschreibt die Wegdifferenz zwischen dem Einschaltpunkt bei einem Werkstoff, der sich dem Sensorkopf nähert, und dem Ausschaltpunkt, wenn sich der Werkstoff wieder vom Sensorkopf entfernt, wobei der Einschaltpunkt näher am Sensor liegt, als der Ausschaltpunkt. Die Schalthyterese verhindert ein Hin- und Herkippen des Schaltausganges, wenn sich ein Objekt an der Grenze des Erfassungsbereichs befindet und mechanischen Vibrationen unterliegt.



**ipf electronic gmbh • [info@ipf.de](mailto:info@ipf.de) • [www.ipf.de](http://www.ipf.de)**

Änderungen vorbehalten! Stand: Dezember 2019