

**SONDERDRUCK** 

# **Vor- und Nachteile elektronischer Messverfahren**

Advantages and disadvantages of electronic measuring methods

Kai Klaas, Arnold automation Feuchtemesssysteme Werne & Thiel GdbR

Bestimmung des Wassergehalts von Schüttgütern

## Vor- und Nachteile elektronischer Messverfahren

Die rasch fortschreitende Entwicklung der industriellen Prozesstechnik verlangt nach immer genaueren und zuverlässiger arbeitenden Feuchtesonden, mit denen der Wassergehalt der verschiedensten Stoffe instantan und zerstörungsfrei gemessen werden kann. Neben Genauigkeitsforderungen die im Prozentbereich liegen, ist auch eine möglichst einfache Montage wünschenswert, insbesondere bei einem nachträglichen Einbau in eine bereits bestehende Anlage. Obgleich es eine ganze Reihe verschiedener Messprinzipien gibt, die theoretisch einwandfrei funktionieren sollten, zeigen sich in der Praxis oftmals Mängel.

Probleme bereiten hauptsächlich Verunreinigungen durch Elektrolyte und Schwankungen in der Partikelbeschaffenheit von Schüttgütern. Dieser Artikel versucht die entsprechenden theoretischen Zusammenhänge aufzuzeigen:

#### 1. Messprinzipien

Grundsätzlich lässt sich jeder physikalische Parameter für eine Feuchtemessung nutzen, vorausgesetzt, dass sich die zu messende Substanz und Wasser hinsichtlich dieses Parameters sehr unterschiedlich verhalten, d. h. deren Werte sich möglichst um mehr als eine Größenordnung unterscheiden.

Die größte Verbreitung haben Feuchtesonden gefunden, die die unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten von Wasser ( $\varepsilon_{\rm W}=80$ ) und Schüttgut (z. B. Quarz:  $\varepsilon_{\rm S}=4,5$ ) ausnutzen. Bei diesen "kapazitiven Feuchtesonden" wird das zu messende Medium direkt als Dielektrikum eines Messkondensators verwendet.

Seit einigen Jahren drängen vermehrt so genannte "Mikrowellensonden" auf den Markt, die sich in den meisten Fällen die starke Mikrowellenabsorption von Wasser zu Nutze machen. Bei gleicher Genauigkeit muss bei diesen jedoch ein deutlich höherer (kostenverursachender) Aufwand angesetzt werden.

Determination of the water content of bulk materials

### Advantages and disadvantages of electronic measuring methods

The rapidly progressing development of industrial process engineering calls for ever more precise and reliable moisture probes with which the water content of a great variety of materials can be measured in a non-destructive manner. Apart from the demands made on the measuring accuracy, which is in the percentage range, ease of installation is another desirable feature, in particular in retrofitting existing systems. Despite the availability of a wide range of different measuring principles in use, which, in theory, should all function perfectly, faultless operation in practice is not always the case.

Problems are caused primarily by contaminated electrolytes and fluctuations in the particle properties of the bulk materials. This paper attempts to draw attention to relevant theoretical correlations.

#### 1. Measuring principles

Every physical parameter for moisture measuring can basically be made use of, provided there is a marked difference between the behaviour of the substances and the water to be measured, i.e. their values differ from each other by, if possible, more than one order or magnitude.

Most widely used are moisture sensors that make use of the different dielectric constants of water ( $\varepsilon_{\rm W}$  = 80) and bulk mate-



Abb. 1. Kapazitive Messsonde, Fabrikat Arnold Fig. 1. Capacitive measuring sensor, make Arnold

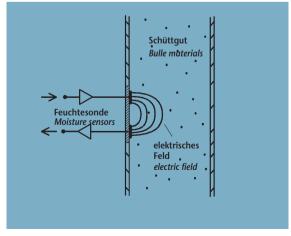


Abb. 2. Kapazitive Feuchtesonde (schematisch) Fig. 2. Capacitive measuring sensor (schematic)



In (Abb. 1) ist ein typischer Vertreter dieses Sondentyps zu sehen. (Abb. 2) zeigt eine typische Anwendung der kapazitiven Feuchtesonde, die hier bündig in eine Rohrwandung eingelassen ist. Um Stoffabscheidung und Korrosion an den Elektroden zu vermeiden, sind diese meistens mit einem Kunststoffüberzug isoliert, außerdem wird mit Wechselstrom gemessen.

Bei gleichmäßig durchmischtem Schüttgut berechnet sich die mittlere Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon_{\rm M}$  des Mediums näherungsweise als Mittelwert der Dielektrizitätskonstanten der Bestandteile ( $\varepsilon_{\rm W}$  und  $\varepsilon_{\rm S}$ ), gewichtet mit dem jeweiligen Volumenanteil. Es gilt in guter Näherung:

$$\varepsilon_{M}(F) = \frac{F \cdot \frac{\delta_{S}}{\delta_{W}} \cdot \varepsilon_{W} + \varepsilon_{S}}{F \cdot \frac{\delta_{S}}{\delta_{W}} + 1}$$
 (Gleichung 1)

 $\delta_W$  bzw.  $\delta_S$  ist die Dichte von Wasser bzw. Schüttgutpartikel ( $\delta_W=1g/cm^3,~z.\,B.~Quarz:~\delta_S=2,6~g/cm^3)$  und "F" ist die Feuchte.

Diese Formel weist bereits (für F < 20%) eine recht gute Linearität auf, die mittels raffinierter Elektrodenanordnung weiter verbessert werden kann.

Es ist zu berücksichtigen, dass  $\varepsilon_W$  einen Temperaturgang aufweist, der elektronisch kompensiert werden muss.  $\varepsilon_S$  sowie  $\delta_S$  und  $\delta_W$  hingegen können in den meisten Fällen als konstant angesehen werden.

#### Verunreinigung mit Elektrolyten

Immer dann, wenn sich der Potenzialunterschied U(t) zwischen den Elektroden ändert, fließt in den Zuleitungen ein Strom I(t) gemäß:

$$I(t) = \varepsilon_M \cdot C_V \cdot \dot{U}(t)$$
 (Gleichung 2)

 $\mathsf{C}_\mathsf{V}$  ist die "Vakuumkapazität" der Elektrodenanordnung, wenn sich also vor den Elektroden kein Medium befindet.

(**Gleichung 2**) erlaubt demnach durch Messung des in den Elektrodenzuleitungen fließenden Stroms eine Bestimmung von  $\varepsilon_{\rm M}$  und mit (**Gleichung 1**) eine Ermittlung der Feuchte F. Ist das Medium mit gelösten Salzen verunreinigt, so existieren zusätzlich Ionen, die natürlich ebenfalls das elektrische Feld "spüren" und sich am Stromtransport beteiligen. Dieser Ionenstrom ist aber höchst unerwünscht, da er sich mit dem dielektrischen Verschiebungsstrom überlagert und die Messung verfälscht.

Für schwache Elektrolytlösungen gilt recht genau das Ohm'sche Gesetz:

$$I_{Salz}(t) = \frac{U(t)}{R_M}$$
 (Gleichung 3)

 ${
m R}_{
m M}$  ist hierbei der ohmsche Widerstand des Mediums zwischen den Elektroden.

Vergleicht man (**Gleichung 2**) und (**Gleichung 3**), erkennt man einen einfachen Ausweg aus dem Konflikt. Da der dielektrische Polarisierungsstrom von U(t) abhängt, der Ionenstrom jedoch von U(t), kann man den Einfluss des Letzteren durch eine genügend hoch gewählte Messfrequenz unterdrücken: Die Mindestfrequenz "f<sub>g</sub>", bei der die Ströme gerade gleich groß sind, ist:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_M \cdot \rho_M}$$
 (Gleichung 4)

 $\varepsilon_0$  ist hierbei die Influenzkonstante,  $\rho_{\rm M}$  der spezifische Widerstand des Mediums. Wenn wir annehmen, dass die Schüttgutpartikel nichtleitend sind, gilt näherungsweise:

$$\rho_{M} = \rho_{W} \cdot \frac{F \cdot \frac{\delta_{S}}{\delta_{W}} + 1}{F \cdot \frac{\delta_{S}}{\delta_{W}}}$$
 (Gleichung 5)

rials (e.g. quartz:  $\varepsilon_S$  = 4.5). With these "capacitive moisture sensors," the medium to be measured is directly used as the dielectric of a measuring condenser.

For some years now, so-called "microwave probes" are increasingly offered on the market, most of which utilize the strong microwave absorption of water. Although these probes work with equal precision, their use is much more complex (and costly).

#### 1.1. Capacitive moisture sensors:

(Fig. 1) shows a typical representative of this type of sensor. (Fig. 2) illustrates a typical application of the capacitive moisture sensor, which in this case is installed flush in a pipe wall. Most sensors are insulated with a plastics coating to prevent materials separation and corrosion on the electrodes; measuring moreover takes place with alternating current.

In a uniformly mixed bulk material, the average dielectric constant  $\varepsilon_{\rm M}$  of the medium is calculated approximately as mean value of the dielectric constants of the constituents ( $\varepsilon_{\rm W}$  and  $\varepsilon_{\rm S}$ ), weighted with the respective volume content. In good approximation applies:

$$\varepsilon_{M}(F) = \frac{F \cdot \frac{\delta_{S}}{\delta_{W}} \cdot \varepsilon_{W} + \varepsilon_{S}}{F \cdot \frac{\delta_{S}}{\delta_{W}} + 1}$$
 (Equation 1)

 $\delta_W$  and/or  $\delta_S$  is the density of the water and/or bulk particle  $(\delta_W=1~g/cm^3,~e.g.~quartz:~\delta_S=2.6~g/cm^3)$  and "F" is the moisture

This formula shows already (for F < 20%) a quite good linearity, which can be further improved with an intricate electrode configuration.

Here, the fact that  $\varepsilon_W$  shows a temperature course that must be electronically compensated has to be taken into account.  $\varepsilon_S$  as well as  $\delta_S$  and  $\delta_W$  can, however, be regarded as constant in most cases.

#### Pollution with electrolytes

Whenever the potential difference U(t) between the electrodes changes, a current I(t) will flow in the leads in accordance with:

$$I(t) = \varepsilon_M \cdot C_V \cdot \dot{U}(t)$$
 (Equation 2)

 $C_{\rm V}$  is the "vacuum capacity" of the electrode configuration, i.e. when there is no medium in front of the electrodes.

Accordingly,  $\varepsilon_{\rm M}$  can be determined with (**Equation 2**) and moisture F with (**Equation 1**) by measuring the current that flows in the electrode leads.

When the medium is polluted with dissolved salt, then there exist additional ions which, of course, also "sense" the electric field and participate in the current transport. This flow of ions, however, is most undesirable as it superimposes with the dielectric displacement current and falsifies the measurement. For weak electrolyte solutions, Ohm's law applies almost exactly:

$$I_{Salz}(t) = \frac{U(t)}{R_M}$$
 (Equation 3)

 ${\rm R}_{\rm M}$  is here the ohmic resistance of the medium between the electrodes.

When comparing (**Equation 2**) and (**Equation 3**), one can see that there is a simple way out of the conflict. As the dielectric polarization current depends on U(t), while the ion flow depends on U(t), the influence of the latter can be suppressed when selecting a sufficiently high measuring frequency:

Minimum frequency "f<sub>g</sub>", for which the currents are just about equally high, is:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_M \cdot \rho_M}$$
 (Equation 4)

 $\rho_{\rm W}$  ist hierbei der spezifische Widerstand von Wasser und damit ein Maß für die dort herrschende Ionenkonzentration und dieser ist zu diesem Zeitpunkt der Herleitung noch nicht näher definiert. Woher kommen die Ionen im Wasser? Auch vermeintlich reines Regenwasser kann heute eine relativ hohe Ionenkonzentration auf Grund von Luftverunreinigungen enthalten (saurer Regen). Aber auch wenn Leitungswasser verwendet wird, enthält es in der Regel Ionen.

Kombiniert man die (Gleichungen 1, 4 und 5) erhält man schließlich:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \rho_W \cdot \left(\epsilon_W + \epsilon_S \cdot \frac{1}{F} \cdot \frac{\delta_W}{\delta_S}\right)}$$
 (Gleichung 6)

Bei der Mindestfrequenz " $f_g$ " beträgt der Messfehler ca. 41%. Bei höheren Frequenzen wird der Fehler sofort geringer und beträgt beispielsweise nur noch ca. 5% bei einer gewählten Messfrequenz von (3 ·  $f_g$ ), sprich der dreifachen Mindestfrequenz.

Ein Zahlenbeispiel: Für mit hartem Leitungswasser ( $\rho_W=16~\Omega m$ ) befeuchteten Quarzsand ( $\delta_S=2,6~g/cm^3$ ,  $\epsilon_S=4,5~und~T=18~^{\circ}C$ ), das eine Feuchte von F=10% aufweist, ergibt sich eine Mindestfrequenz von f $_g=12~MHz$ . Wählen wir eine Messfrequenz von ca. 30 MHz, können wir den Messfehler auf ca. 5% senken.

Bei der kapazitiven Feuchtesonde ist es somit möglich, allein durch geschickte Wahl der Messfrequenz, den Einfluss der Ionenleitfähigkeit in den meisten Anwendungsfällen zu unterdrücken und hohe Messgenauigkeiten zu erzielen.

#### Einfluss der Korngröße

Inwieweit sich die Körnigkeit des Mediums negativ auswirkt, hängt von dem Verhältnis von Korngröße und Sonden- bzw. Elektrodenfläche ab. Bei Elektrodenanordnungen mit inhomogenen Feldern findet zwar auch eine Mittelung über den gesamten felderfüllten Raum statt, aber sie vollzieht sich mit einer unterschiedlichen, ortsabhängigen Gewichtung. Das Medium wird dort am stärksten polarisiert, wo das größte elektrische Feld herrscht, üblicherweise unmittelbar bei den Elektroden. Inhomogenitäten des Mediums machen sich hier am stärksten bemerkbar.

Solange die maximale Korngröße kleiner ist als die kleinste Elektrodenabmessung, ist der Einfluss der Korngröße bei der kapazitiven Feuchtemessung vernachlässigbar.

#### 1.2 Mikrowellenfeuchtesonde

Während das Verhalten der kapazitiven Feuchtesonde praktisch den Gesetzen der Elektrostatik folgt, d.h. der Einfluss elektromagnetischer Wellen vernachlässigt werden kann, ist es bei der Mikrowellenfeuchtesonde gerade umgekehrt. Genau genom-

 $\epsilon_0$  is here the influence constant;  $\rho_M$  the specific resistance of the medium.

Assuming that the bulk particles are non-conductive, the following applies by approximation:

$$\rho_{M} = \rho_{W} \cdot \frac{F \cdot \frac{\delta_{S}}{\delta_{W}} + 1}{F \cdot \frac{\delta_{S}}{\delta_{W}}}$$
 (Equation 5)

 $\rho_W$  is here the specific resistance of water and, accordingly, a measure of the ion concentration. This particular factor has not been defined in more detail at this point of the derivation. Where do the ions in the water come from? Even seemingly pure rainwater can nowadays contain a relatively high ion concentration, due to air pollution (acid rain). But tap water, too, will as a rule contain ions.

When combining (Equation 1, 4 and 5) one will, in the end, obtain:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho_W \cdot \left(\varepsilon_W + \varepsilon_S \cdot \frac{1}{F} \cdot \frac{\delta_W}{\delta_S}\right)}$$
 (Equation 6)

At minimum frequency " $f_g$ " the measurement error will lie at approx. 41%. At higher frequencies, the error will immediately decrease, for example, to approx. 5%, at a measuring frequency of  $(3 \cdot f_g)$ , i.e. three times the minimum frequency.

A numerical example: For quartz sand ( $\delta_s = 2.6 \text{ g/cm}^3$ ,  $\varepsilon_s = 4.5 \text{ und T} = 18 \,^{\circ}\text{C}$ ) with a moisture of F = 10%, wetted with hard tap water ( $\rho_W = 16 \, \Omega \text{m}$ ), a minimum frequency of f $_g = 12 \, \text{MHz}$  results. When selecting a measuring frequency of approx. 30 MHz, the measurement error can be reduced by approx. 5%.

With the capacitive moisture sensor it is therefore possible to suppress, in most application cases, the influence of the ion conductivity, alone by skillfully choosing the measuring frequency, and to achieve in this way high measuring accuracy.

#### Influence of the particle size

The extent to which the graininess of the medium has a negative impact, depends on the ratio of the particle size and the surface of the probe and/or electrode. Although with electrode configurations with inhomogeneous fields averaging also takes place across the entire field-filled space, this happens with different weighting, depending on the location. The medium is most strongly polarized in the largest electric field, typically directly on the electrodes. Inhomogeneities of the medium are here most conspicuous. As long as the maximum particle size is smaller than the smallest electrode, the influence of the particle size is negligibly small with capacitive moisture measurements.

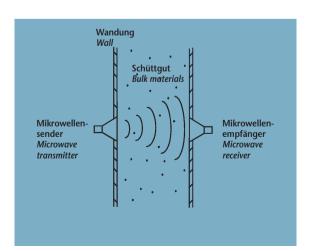


Abb. 3. Mikrowellenfeuchtesonde (schematisch) Fig. 3. Microwave moisture sensor (schematically)



Abb. 4. Eine Sonde in einer typischen Anwendung Fig. 4. Typical use of a sensor

men müssten für die Messanordnung die Maxwell-Gleichungen gelöst werden, was aber bei körnigen Schüttgütern sehr kompliziert wird.

Stattdessen soll versucht werden, das Verhalten durch vereinfachende Annahmen möglichst genau abzuschätzen. (Abb. 3) zeigt eine typische Anwendung der Mikrowellensonde.

Ein Mikrowellensender mit Hornantenne strahlt eine linear polarisierte elektromagnetische Welle (f > 1 GHz) ab, die das zu messende Medium durchdringt und dabei je nach Wassergehalt unterschiedlich viel Energie verliert. Der Mikrowellenempfänger misst schließlich die Intensität der abgeschwächten Mikrowellenstrahlung und bestimmt daraus die Feuchte F.

Die Dämpfung der Mikrowelle ist die unmittelbare Folge der hohen dielektrischen Verluste von Wasser, die bei  $f=18\,$ GHz ein Maximum erreichen. Da es sich letztlich um das gleiche Prinzip handelt wie bei einem Mikrowellenherd, ist bei hoher Sendeleistung Vorsicht geboten.

Wenn I bzw. I' die Intensitäten der Welle vor bzw. nach Durchdringung des zu messenden Mediums ist, und dieses eine Schichtdicke "d" aufweist, gilt gemäß dem bekannten Absorptionsgesetz [1]:

$$I'(F) = I \cdot exp\left(-\alpha_W \cdot \frac{d \cdot F}{F + \frac{\delta_W}{\delta_S}}\right)$$
 (Gleichung 7)

Für F < 20% ist das Argument in erster Näherung linear in "F". Diese Formel setzt voraus, dass die dielektrischen Verluste der Schüttgutpartikel gegenüber denen des Wassers vernachlässigbar sind.

Der Absorptionskoeffizient  $\alpha_W$  von Wasser ist stark frequenzabhängig [2], sein Verlauf ist in (**Abb. 5**) skizziert:

Ein prinzipieller Nachteil des Mikrowellenverfahrens ist, dass (Gleichung 7) auf Grund der Exponentialfunktion offensichtlich unlinear ist und für große Feuchten F in die Sättigung geht. Der Begriff der "Sättigung" meint einen sehr spezifischen Sachverhalt, der in der Feuchtemessung sehr oft verwendet wird. (Er meint, dass das Ausgangssignal der Sonde bei hohen Feuchten ab einem bestimmten Punkt nicht mehr linear der Feuchte des Mediums folgt.) Erhält man beispielsweise für eine Materialfeuchte von 0% eine Ausgangsspannung von 0 V, für eine Materialfeuchte von 10% eine Ausgangsspannung von 5 V, und man würde für eine Materialfeuchte von 20% ein Ausgangssignal von 10 V erwarten, stellt man abweichend davon fest, dass das Ausgangssignal nur bis ca. 8 V dem korrekten Verlauf folgt. Bei weiterer Erhöhung der Materialfeuchte steigt das Ausgangsignal nun nicht weiter an, sondern verharrt auf dem Wert von ca. 8 V. Hierzu sagt man in der Feuchtemesstechnik, die Sonde geht in die "Sättigung". Sättigung meint also, dass sich das Ausgangssignal nicht mehr ändert, obwohl die Feuchte immer weiter zunimmt. Diese Situation kann bei der kapazitiven Feuchtesonde vorzugsweise dann eintreten, wenn die Messfrequenz viel zu gering gewählt wird. Die Gleichung lässt sich selbstverständlich mit geringem Aufwand linearisieren, aber an der deutlichen Zunahme der relativen Messfehler bei hohen Feuchten ändert dies nichts

Es ist klar, dass Sie aus einem verschwindenden Signal praktisch keine wertvolle Information mehr herausziehen können. Gleichung 7 erlaubt daher die Messung nur in einem sehr kleinen "Fenster", das es mit der Messanordnung genau zu "treffen" gilt.

#### Verunreinigung mit Elektrolyten

Durchdringt eine elektromagnetische Welle ein feuchtes und leitfähiges Medium, so erzwingt das elektrische Wechselfeld dieser Welle nicht nur die verlustbehaftete Orientierungspolarisation der H<sub>2</sub>O-Dipol-Moleküle, sondern zusätzlich einen elektrischen Strom, der der Welle natürlich ebenfalls Energie entzieht und durch die zusätzlichen Verluste einen höheren Wassergehalt vortäuscht.

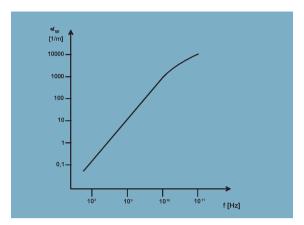


Abb. 5. Absorptionskoeffizient  $\alpha_W$  von Wasser Fig. 5. Absorption coefficient  $\alpha_W$  of water

#### 1.2 Microwave moisture sensor

While the behaviour of the capacitive moisture sensor virtually follows the laws of electrostatics, in that the influence of electromagnetic waves can be neglected, the exact opposite is the case with the microwave moisture sensor. Strictly speaking, Maxwell's equations would have to be solved for the measurement set-up. This, however, would be a highly complex undertaking for grainy bulk materials.

Instead, is to be tried to estimate the behaviour by simplified procedure as precisely as possible. (Fig. 3) shows a typical application of the microwave sensor.

A microwave transmitter with horn aerial radiates a linearly polarized electromagnetic wave (f > 1 GHz), which penetrates the medium to be measured, losing in the process different amounts of energy, depending on the water content. The microwave receiver then measures the intensity of the diminished microwave radiation and determines from this moisture F. The damping of the microwave is the direct consequence of the high dielectric losses of water, which reach a maximum at f = 18 GHz. As we are dealing with the same principle as with a the microwave, due care is here of course indicated.

Where I and/or I' indicate the intensities of the wave before and after penetration of the medium to be measured, and if this has a layer thickness of "d," the following applies in accordance with the well-known absorption law [1]:

$$I'(F) = I \cdot exp\left(-\alpha_W \cdot \frac{d \cdot F}{F + \frac{\delta_W}{\delta_S}}\right)$$
 (Equation 7)

For F < 20%, the argument, in a first approximation, is linear in "F". This formula is based on the assumption that the dielectric losses of the bulk particles can be neglected vis-à-vis those incurred by the water.

The absorption coefficient  $\alpha_W$  of water is strongly frequency-dependent [2], its process is sketched in (Fig. 5):

A principle disadvantage of the microwave process is that (**Equation 7**), due to its exponential function, is obviously unlinear and, in the presence of high moistures F, goes into saturation. The term "saturation" signifies a highly specific state that is often used in moisture measurement. It signifies that the output signal of the sensor, in the presence of high moistures, no longer follows the moisture of the medium from a specific point. When obtaining, for example, an output voltage of 0 V for a materials moisture of 10% an output voltage of 5 V, and if one would expect an output signal of 10 V for a materials moisture of 20%, one will find, in deviation from this value, that the output signal follows the correct procedure only to approx. 8 V. When the materials moisture continues to increase, the output signal will not only no longer increase, but remain at a value of approx. 8

Um die beiden konkurrierenden Verlustmechanismen miteinander vergleichen zu können, muss man den Absorptionskoeffizienten  $\alpha_{io}$  bestimmen, der durch die ohmsche Leitfähigkeit des Mediums verursacht wird. Für ein homogenes Medium lässt sich  $\alpha_{io}$  recht einfach abschätzen. Nach Lösung der so genannten "Telegraphengleichung" [1] erhält man für Frequenzen f >  $f_o$ :

$$\alpha_{io} = \frac{1}{\rho_w} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \frac{F \cdot \frac{\delta_s}{\delta_w}}{\sqrt{F \cdot \frac{\delta_s}{\delta_w + 1}} \cdot \sqrt{F \cdot \frac{\delta_s}{\delta_w}} \cdot \varepsilon_w + \varepsilon_s}}$$
 (Gleichung 8)

 $\mu_0$  ist hierbei die Induktionskonstante. (Für das Medium wird  $\mu_\text{M}=1$  angenommen.)

 $\alpha_{io}^{'}$  wird mit wachsender Feuchte F größer. Für eine gute Messung müssen wir fordern:

sung mussen wir fordern: 
$$\alpha_{io} << \alpha_W \cdot \frac{d \cdot F}{F + \frac{\delta_W}{\delta_S}}$$
 (Gleichung 9)

Ein Zahlenbeispiel: Für mit hartem Leitungswasser ( $\rho_W=16~\Omega m$ ) befeuchteten Quarzsand ( $\delta_S=2,6~g/cm^3,~\epsilon_S=4,5~und~T=18~^{\circ}C$ ), der eine Feuchte von F=10% aufweist, wollen wir diejenige Messfrequenz bestimmen, bei der sich ebenfalls ein Messfehler von 5% ergibt. Mithilfe des Absorptionsgesetzes erhalten wir zunächst:

$$\alpha_W = \frac{\alpha_{io}}{\frac{F}{F + \frac{\delta_W}{\delta_S}} - \frac{0.95 \cdot F}{0.95 \cdot F + \frac{\delta_W}{\delta_S}}} = 131$$
 (Gleichung 10)

und aus (Abb. 4) lesen wir dafür eine Messfrequenz von ca. 3 GHz ab.

Das Resultat dieser Abschätzung ist überraschend. Wer glaubt, mit dem Einsatz der Mikrowellensonde die Störeinflüsse der Ionenleitfähigkeit ad acta legen zu können, wird desillusioniert. Während bei der kapazitiven Feuchtesonde bei "Verunreinigung" mit hartem Leitungswasser die Messfrequenz für einen Messfehler von 5 % ca. 30 MHz betragen sollte, muss beim Mikrowellenverfahren eine Messfrequenz von 3 GHz gewählt werden.

Es darf nicht unerwähnt bleiben, dass die verschiedenen Messparameter erhebliche Temperaturgänge aufweisen, die von Parameter zu Parameter extrem unterschiedlich und zudem in hohem Maße frequenzabhängig sind. Die elektronische Temperaturkompensation ist sehr kompliziert und erfordert einen erheblichen Aufwand.

Bei der kapazitiven Feuchtesonde hingegen existiert praktisch keine Frequenzabhängigkeit des Temperaturganges von  $\varepsilon_{W^*}$ Zur Kompensation genügt meist ein simpler NTC-Widerstand, der sich in der Feuchtesonde befindet.

#### Einfluss der Korngröße

Bei der Herleitung der Telegrafengleichung wird gewöhnlich angenommen, dass sich in dem Medium nirgendwo Ladungen ansammeln. In einem körnigen Medium ist aber genau dies der Fall. Es existieren Inhomogenitäten, die voneinander abweichende Dielektrizitätskonstanten besitzen. Trifft nun die Mikrowelle auf eine solche Inhomogenität, so erzwingt sie dort eine periodische Polarisierung des Mediums. Die Inhomogentität verhält sich dabei wie ein schwingender Dipol bzw. wie ein Hertz'scher Oszillator. Dieser schwingende Dipol strahlt nun seinerseits eine elektromagnetische Welle ab, die klassische Streuwelle. Da die Ausbreitung der Streuwelle in alle Richtungen erfolgt, und die Energie der Streuwelle natürlich der Ursprungswelle entzogen wird, haben wir es mit einem weiteren Absorptionsmechanismus zu tun, der sich wie die Ionenleitfähigkeit den dielektrischen Verlusten überlagert und ebenfalls höchst unerwünscht ist. Da die genaue Berechnung des Sachverhalts sehr kompliziert ist (es kommt auch auf die Form der Partikel an!), wird wieder eine Abschätzung versucht:

V. In the field of moisture measuring technique, this state is referred to as "saturation." Accordingly, saturation signifies that the output signal no longer changes, even though the moisture continues to increase. With the capacitive moisture sensor, this state can preferably occur when the measuring frequency that has been selected is much too low. The equation can, of course, be easily linearized. But this will not change the marked increase of the relative measurement error in the presence of high moistures.

The fact that virtually no valuable information can be extracted from a diminishing signal is obvious. Therefore, equation 7 permits measuring only in a very small "window," which the measuring setup must precisely "hit."

#### Pollution with electrolytes

When an electromagnetic wave penetrates a moist and conductive medium, the alternating electric field of this wave will not only enforce the orientation polarization of the  $\rm H_2O$  dipole molecule that has incurred the loss, but also an electric current. This, of course, will also withdraw energy from this wave, simulating in this way, due to the additional losses, a higher water content.

In order to be able to compare the two competing mechanisms with each other, absorption coefficient  $\alpha_{\rm jo'}$  which has been caused by the ohmic conductivity of the medium, must first be determined. For a homogeneous medium,  $\alpha_{\rm jo}$  can be rather easily estimated. Having solved the so-called "telegraphy equation" [1] one will obtain for frequencies f > f\_a:

$$\alpha_{io} = \frac{1}{\rho_{w}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{0}}{\varepsilon_{0}}} \cdot \frac{F \cdot \frac{\delta_{S}}{\delta_{W}}}{\sqrt{F \cdot \frac{\delta_{S}}{\delta_{W} + 1}} \cdot \sqrt{F \cdot \frac{\delta_{S}}{\delta_{W}}} \cdot \varepsilon_{W} + \varepsilon_{S}}}$$
 (Equation 8)

 $\mu_0$  is here the induction constant. (For the medium,  $\mu_M=1$  is assumed.)

 $\alpha_{\text{io}}$  increases with the increase in moisture F. For a good measurement, we require:

$$\alpha_{io} \ll \alpha_W \cdot \frac{d \cdot F}{F + \frac{\delta_W}{\delta_S}}$$
 (Equation 9)

A numerical example: For quartz sand ( $\delta_S = 2.6 \text{ g/cm}^3$ ,  $\epsilon_S = 4.5 \text{ and T} = 18 \,^{\circ}\text{C}$ ) wetted with hard tap water ( $\rho_W = 16 \,^{\circ}\text{C}$ m), which has a moisture F = 10%, we want to determine the measuring frequency that will likewise yield a measurement error of 5%. With the aid of the absorption law we will first obtain:

$$\alpha_W = \frac{\alpha_{io}}{\frac{F}{F + \frac{\delta_W}{\delta_S}} - \frac{0.95 \cdot F}{0.95 \cdot F + \frac{\delta_W}{\delta_S}}} = 131$$
 (Equation 10)

and from (Fig. 5) we read a measuring frequency of approx. 3 GHz.

The result of this estimation is surprising. Anyone who believes that the disturbance effects of the ion conductivity can be disregarded when using the microwave sensor will be disillusioned. While with the capacitive measuring sensor, the measuring frequency for "pollution" with had tap water for a measurement error of 5% should be approx. 30 MHz, a measuring frequency of 3 GHz must be selected for the microwave method.

In this connection, mention should be made of the fact that the various measuring parameters show considerable temperature courses, which differ extremely from one measuring parameter to the next and are, moreover, highly frequency-dependent. The electronic temperature compensation is very complicated and is difficult and complex.

With the capacitive moisture sensor, on the other hand, there exists practically no frequency dependency of temperature

Der Wirkungsgrad (Verhältnis von Abstrahlungs- zu Anregungsleistung), mit dem ein schwingender Dipol mit der Antennenlänge "h" eine elektromagnetische Welle mit der Wellenlänge  $\lambda$  abstrahlt, ist [1]:

$$\eta = \frac{8 \cdot h^3}{\lambda^3} \qquad \left(h \le \frac{\lambda}{2}\right)$$
 (Gleichung 11)

Man erwartet demzufolge umso ausgeprägtere Streuverluste, je größer  $\eta$  ist.

Bei einem Schüttgut aus Quarzsand mit einer Feuchte von F=0.2 beträgt die Wellenlänge einer 10 GHz Mikrowelle ca.  $\lambda=5.5$  mm. Bei einer mittleren Länge der Inhomogenitäten von h=1 mm ergibt sich gemäß (**Gleichung 11**) ein Wert von  $\eta=4.8$ %. Bei f=3 GHz gilt dagegen:  $\eta=0.1$ %.

Bei größeren Inhomogenitäten wächst  $\eta$  extrem. So ergibt sich bei h = 2 mm für f = 10 GHz:  $\eta$  = 38% und für f = 3 GHz:  $\eta$  = 1,0%.

Diese Abschätzung zeigt deutlich, dass die Streueffekte bei 10 GHz mehrere Größenordnungen stärker sein können als bei 3 GHz.

Bei der kapazitiven Feuchtesonde und einer Messfrequenz von 30 MHz sind die Streuungseffekte dagegen wegen  $\eta < 10^{-6}\,\%$  völlig vernachlässigbar.

Die Resultate dieser einfachen Abschätzung decken sich erstaunlich gut mit den Erfahrungen des Messalltags, wonach für den Einsatz bei grobkörnigen Schüttgütern und gleichzeitig hohen Feuchten die Messfrequenz nicht im X-Band (ca. 10 GHz), sondern bevorzugt im S-Band (ca. 3 GHz) liegen sollte. Da gemäß (Gleichung 11) die Wellenlänge mit der 3. Potenz eingeht, kann eine bereits geringfügig zu hoch gewählte Messfrequenz fatale Auswirkungen haben.

Die Problematik der Mikrowellensonde ist aber nicht nur die Höhe der Streuungsverluste, sondern vielmehr die zusätzliche, ausgeprägte Abhängigkeit von der Partikelform und von der Feuchte selbst. Bei Messungen an Rapssamen und Hafer [4] wurde festgestellt, dass das unterschiedliche Absorptions- bzw. Streuungsverhalten derart gravierend ist, dass es sich bei bekannter Feuchte sogar zu einer Messung der Gemischzusammensetzung nutzen lässt.

Als Fazit kann man festhalten: Es ist unmöglich die Feuchte von Schüttgütern, deren Gemischzusammensetzung derart schwankt, mit Mikrowellensonden, die mit einer Messfrequenz von ca. 10 GHz arbeiten, genau zu messen. Hier eignet sich die kapazitive Feuchtesonde wesentlich besser, denn sie arbeitet unabhängig von der genauen Kornform. Der Einfluss der Korngrößen und -verteilung auf das Messergebnis ist vernachlässigbar gering.

#### 2. Zusammenfassung

Wenn es darum geht, bei einem sehr homogenen Medium mit sehr kleiner Korngröße und gleichzeitig hoher Ionenleitfähigkeit den Wassergehalt zu bestimmen, ist die Mikrowellensonde der kapazitiven Feuchtesonde in einigen Fällen vorzuziehen. Man legt dann die Messfrequenz möglichst ins X-Band, um die Messgenauigkeit zu erhöhen. Aber auch bei der Mikrowellensonde gibt es Grenzen.

Sobald es sich jedoch um Schüttgüter handelt, bei denen es auf Grund der Partikelbeschaffenheit zu nicht vernachlässigbaren Streuungseffekten kommt, wird es problematisch. Es muss hierbei wiederum versucht werden, möglichst im S-Band zu arbeiten, ohne dass es dadurch zu Problemen mit der lonenleitfähigkeit kommt. Gleichzeitig muss auch die Sendeleistung sowie der Abstand zwischen Sender und Empfänger optimiert werden, was angesichts der Besonderheiten des exponentiellen Absorptionsgesetzes und der verfügbaren Einbaumöglichkeiten nicht einfach ist.

Man muss sich im Klaren darüber sein, dass das Mikrowellenverfahren eine technisch und physikalisch sehr komplizierte Messmethode ist, bei der zahlreiche Parameter und deren Temperaturgänge das Messergebnis beeinflussen. Die genaue

course  $\varepsilon_{\rm W}$ . All that is required for compensation is in most cases a simple NTC resistance located in the moisture sensors.

Influence of the particle size

For deducing the telegraphy equation it is commonly assumed that no charges will accumulate anywhere in the medium. In a granular medium, however, this is exactly the case. There exist inhomogeneities with deviating dielectricity constants. When the microwave encounters such an inhomogeneity, it will enforce in that area a periodic polarization of the medium. When this happens, the inhomogeneity will behave like an oscillating dipole and/or a Hertzian oscillator. This oscillating dipole now radiates on its part an electromagnetic wave: the classical scattered wave. As the scattered wave propagates in all directions, and the energy of the scattered wave naturally robbed of its source wave, we are confronted with another absorption mechanism that superimposes the dielectric losses in the same way as the ion conductivity, which is equally highly undesirable. As a precise calculation of this state is very complicated (and also depends on the shape of the particles!), we will attempt another estimation:

The degree of efficiency (ratio of radiation to excitation output) with an oscillating dipole with an antenna length "h" of an electromagnetic wave with wavelength  $\lambda$  is [1]:

$$\eta = \frac{8 \cdot h^3}{\lambda^3} \qquad \left( h \le \frac{\lambda}{2} \right)$$
(Equation 11)

Based on the above, one would expect scattering losses whose magnitude increases as h increases.

For a bulk material consisting of quartz sand with a moisture of F = 0.2, the wavelength of a microwave of 10 GHz is approx.  $\lambda$  = 5.5 mm. At an average length of the inhomogeneities of h = 1 mm results, in accordance with (**Equation 11**) a value of  $\eta$  = 4.8%. At f = 3 GHz, on the other hand, there applies:  $\eta$  = 0.1%.

At larger inhomogeneities  $\eta$  will grow extremely. So for h = 2 mm there will result for f = 10 GHz:  $\eta$  = 38% and for f = 3 GHz:  $\eta$  = 1.0%.

This estimation shows clearly that the scattering effects at 10 GHz can be stronger by several magnitudes than at 3 GHz. With the capacitive moisture sensor and a measuring frequency of 30 MHz, on the other hand, the scattering effects, on account of  $\eta$  < 10<sup>-6</sup>%, are completely negligible.

The results of this simple estimation agree surprisingly well with the experiences gained in everyday measuring practice, according to which the frequency should preferably lie in the S-band range (approx. 3 GHz) and not at X band (approx. 10 GHZ), when working with coarse-grained bulk materials and, at the same time, high moistures. Since the wavelength occurs with a power of 3 in (**Equation 11**), a measuring frequency selected even just slightly too high can have fatal results.

But the problems that occur with the microwave sensor are not restricted to the amount of scattering losses. In addition, there is the marked dependency on the particle shape and on the moisture itself. In performing measurements on rape seed and oat [4] it has been found that the different absorption and scattering behavior is so marked that this sensor can even be used for measuring a mixed material, provided the moisture is known.

In conclusion, the following can be asserted: Precise measuring of the moisture in bulk materials whose mixed composition fluctuates so markedly is impossible with a microwave sensor that operates with a measuring frequency of approx 10 GHz. For these tasks, the capacitive moisture sensor is much better suited, because it works independent of the precise particle shape. The influence of the particle size and distribution on the reading is negligibly low.

Abstimmung für ein bestimmtes Schüttgut erfordert immer das Wissen eines erfahrenen Mikrowellenspezialisten.

Bei der kapazitiven Feuchtesonde stellt sich die Situation für den Anwender erheblich einfacher und unkomplizierter dar. Zunächst wird geprüft, ob die gewählte Feuchtesonde hinsichtlich Korngröße und Ionenleitfähigkeit überhaupt für den Einsatz bei diesem Schüttgut geeignet ist. Danach wird die Sonde mit zwei Eichproben kalibriert und anschließend an einem Ort montiert, an dem repräsentatives Schüttgut erwartet werden kann. Daran anschließend kann sofort mit dem Einsatz und den Messungen begonnen werden. Die besonders einfache Handhabbarkeit der kapazitiven Feuchtesonde bietet hierbei einen erheblichen Zeit- und Kostenvorteil.

Auf Grund der Einfachheit (Durchschaubarkeit) des Messprinzips, der hohen Messgenauigkeit und der besonders einfachen Handhabbarkeit, die von den meisten Kunden hoch geschätzt wird, haben sich die kapazitiven Feuchtesonden auf dem Markt behaupten können. Von einer weiteren Akzeptanz seitens der Anwender wird trotz der fortschreitenden Mikrowellennutzung derzeit ausgegangen.

Kai Klaas, Arnold automation Feuchtemesssysteme Werne & Thiel GdbR

#### **LITERATUR**

#### REFERENCES

- [1] Gerthsen; Kneser; Vogel: Physik, Springer-Verlag, 1982
- [2] Honerkamp; Römer: Grundlagen der klassischen theoretischen Physik, Springer-Verlag, 1986
- [3] Jander; Blasius: Einführung in das anorganisch-chemische Praktikum, S. Hirzel Verlag, 1984
- [4] Menke; Vogt; Knöchel: Mikrowellen-Streumessung, HF-Report, September 3/96

#### 2. Summary

When a task calls for determining the water content of a very homogeneous medium with a very fine particle size and high ion conductivity, the microwave sensor is in some cases preferable to the capacitive moisture sensor. In order to increase the measuring precision, the measuring frequency is here best selected in the X band, if possible. But there are limitations even for the microwave sensor.

When bulk materials have to be measured where the nature of the particles results in scattering effects that cannot be neglected, problems arise. In these cases, an effort should be made to work again in the S band, without however causing problems with the conductivity of the ions. At the same time, the transmitting power, as well as the distance between transmitter and receiver, must be optimized. This will not always be easy, given the particularities of the exponential absorption law and the setup options available.

It is important to understand that the microwave method is an approach that is highly complicated in technical and physical terms; and in which the measurements results are influenced by numerous different parameters and temperature courses. A precise adjustment for a specific bulk material will always require an experienced microwave specialist.

For users of the capacitive moisture sensor, the situation is much easier and uncomplicated. In the first step one has to determine whether the moisture sensor chosen is basically suitable for use in the bulk material at hand with regard to the particle size and ion conductivity. In the next step, the sensor is calibrated on two verification samples and installed in a place where the representative bulk material can be expected. Immediately afterwards, measurements can begun. The particular ease of handling of the capacitive moisture sensor is here a considerable time- and cost advantage.

Capacitive measurement sensors have been successful on the market due to their simple (and easily understood) measuring principle, and their special ease of handling, which is greatly appreciated by most customers. It is currently assumed that this method will continue to be accepted by the users, despite the increasing use of microwave sensors.