



Temperatur- und Feuchtemessung

Im vierten Teil der Folge über Temperatur- und Feuchtemesstechnik beschäftigen wir uns mit den Vorteilen des polymeren Feuchtesensors und der Feuchtemessung in der industriellen Praxis.

$$C = \epsilon_0 \cdot \underset{f(\text{Feuchte})}{\epsilon_r} \cdot \frac{F}{d} \quad \text{Kapazität eines Kondensators}$$

$$= C_0 \underset{\text{trockenes Diel.}}{(rF = 0\%)} + C_{rF} \underset{\text{feuchtes Diel.}}{(rF > 0)}$$

mit

F : Elektrodenfläche

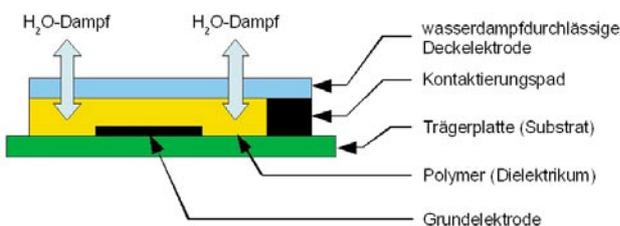
d : Elektrodenabstand

ϵ_0 : absolute Dielektrizitätskonstante

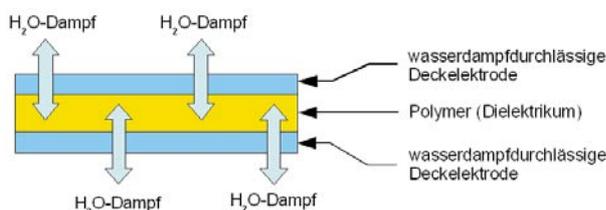
ϵ_r : relative Dielektrizitätskonstante

(10)

Kapazitiver polymerer Sensor mit Trägerplatte



Kapazitiver polymerer Sensor ohne Trägerplatte



Kapazitiver Feuchtesensor. Ein kapazitiver Feuchtesensor ist im Prinzip ein Kondensator, dessen Dielektrikum aus einer hygroskopischen Polymerschicht besteht, die entsprechend der Feuchtigkeit der Umgebungsluft Feuchtigkeit aufnimmt (absorbiert) oder abgibt (desorbiert), bis ein Gleichgewichtszustand (Diffusionsgefälle = null) erreicht ist. Dabei verändert sich die Dielektrizitätskonstante des Polymermaterials als Funktion seines Feuchtegehalts. Gemäß Gleichung (10) ist damit auch der Kondensatorwert eine Funktion der Feuchtigkeit. Genauer gesagt, kann man sich den resultierenden Kondensator vorstellen als die Parallelschaltung eines fiktiven Kondensators mit vollständig trockenem Dielektrikum (C_0) zu einem, der die Kapazitätsänderung infolge des Feuchtegehalts im Dielektrikum (C_{rF}) repräsentiert.

In Abbildung 25 oben ist der prinzipielle klassische Aufbau eines Polymersensors dargestellt. Durch die wasserdampfdurchlässige Substratplatte kann keine Diffusion in das polymere Dielektrikum stattfinden, sondern nur über die Deckelektrode. Anders ist dies bei einem Aufbau ohne Substrat. Hier wird das Polymer beidseitig von Deckelektroden eingehüllt (Abbildung 25 unten), wodurch die Feuchtigkeitsanpassung an die Umgebungsluft schneller erfolgen kann. Die Reaktionsgeschwindigkeit des Sensors nimmt also zu. Verschiedene Ausführungen solcher Sensoren zeigt Abbildung 26.

Vorteile des polymeren Feuchtesensors

Ein polymerer kapazitiver Feuchtesensor hat eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen (z. B. offenen oberflächenaktiven Kondensatoren).

- **Verschmutzung.** Weil die Deckelektroden nur Wasserdampf in das Polymerdielektrikum eindiffundieren lassen, bleiben auf der Sensoroberfläche angelagerte Stoffe wie

Bild 25: Der Polymersensor ist ein Kondensator, dessen Dielektrikum Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufnimmt und seine Eigenschaften dabei verändert.



Bild 26: Verschiedene Luftfeuchtesensoren mit beidseitigem Feuchteeintrag in das Polymerdielektrikum. (Quelle: Rotronic)

Staub, Schmutz und Öl ohne Auswirkungen auf das Messergebnis.

- **Hochfeuchteinsatz.** Der Sensor ist auch für den Hochfeuchteinsatz geeignet, weil er den ganzen Messbereich von 0 bis 100 % relativer Feuchte abdeckt.

- **Langzeitstabilität.** Geeignete Polymere sind extrem formstabil und chemikalienresistent. Dadurch unterliegt die Messgenauigkeit nur einer geringen Alterung.

- **Ansprechzeit.** Das Ein- und Ausdringen von Wasserdampf hängt stark von der Geschwindigkeit der auf den Kollektor anströmenden Luft ab. In ruhender Luft kann die Zeit zur vollständigen Angleichung im Stundenbereich liegen. Bei einer Anströmung von >3 l/min sind ca. 90 % des Endwerts bereits nach ca. 15 min (t_{90}) erreicht. Eine Veränderung der Feuchtigkeitsbedingungen lässt sich dagegen bereits im Minutenbereich feststellen.

- **Reinigung.** Auf der Sensoroberfläche angelagerte Substanzen lassen sich gut mit Alkohol im Ultraschallbad entfernen.

Auswerteelektronik. Die Aufgabe der Auswerteelektronik besteht darin, aus der gemessenen Temperatur und dem feuchtigkeitsabhängigen Kapazitätswert des Sensors die relative Feuchte möglichst genau zu ermitteln. Für extrem kompakte Bauformen kann man die analogen Fühler für Temperatur und relative Luftfeuchte einschließlich Messwertverstärkern zusammen mit dem Analog-Digital-Wandler, Kalibrierspeicher und einer seriellen Bus-Schnittstelle auf einem Chip integrieren.

Dem Schweizer Sensorhersteller Sensirion (www.sensirion.com) ist dies mit seinem CMOSens®-Prozess auf wenigen Quadratmillimetern Substratfläche gelungen (Abbildung 27). Die räumliche Nähe von Temperatur- und Feuchtefühler vermeidet einen Temperaturgradienten zwischen ihnen und sichert so eine hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bei der Taupunktbestimmung.

Linearisierung und Kalibrierung des Feuchtesensors.

Die Kapazität eines Polymer-Feuchtesensors ist keine lineare Funktion der relativen Feuchte. Vielmehr muss der Zusammenhang zwischen Temperatur, absoluter und relativer Feuchte, wie er in Abbildung 21 (siehe Teil 3, „ELVjournal“ 1/10) dargestellt ist, berücksichtigt werden. Für höchste Genauigkeit der Messung sind aber noch andere Effekte zu kom-

pensieren. So geht z. B. die Abhängigkeit des Verlustwinkels des Kondensators von der Feuchte des Polymerdielektrikums in das Kapazitätsmessverfahren ein. Alle Korrekturmaßnahmen lassen sich wegen unvermeidlicher Fertigungs- und Materialtoleranzen nicht in einer allgemein gültigen Gleichung zusammenfassen. Deshalb greift die Auswerteelektronik des Polymer-Feuchtesensors meist auf eine Korrekturtabelle zurück, die im Verlauf eines Kalibriervorgangs mit den erforderlichen Kompensationswerten (z. B. 101 Werte für das Intervall 0...100 % rF) gefüllt wird. Damit ist es auch möglich, Alterungseffekte durch eine Neu-Kalibrierung abzufangen.

Feuchtemessung in der industriellen Praxis

Feuchtesensoren sind im Bereich der industriellen Prozessüberwachung und -steuerung im Allgemeinen zu einem Messsystem vernetzt, in dem ein Computer die Messwerte protokolliert und in grafische Darstellungen umwandelt, Alarmmeldungen bei Ausfall eines Sensors oder Verlassen vorgegebener Toleranzen generiert, redundante Ersatzsensoren aktiviert und manches mehr. Um die Netzlast nicht unnötig in die Höhe zu treiben, haben moderne Sensoren „Intelligence on board“ zur Vorverarbeitung (Linearisierung, Temperaturkompensation) regelmäßig ermittelter Messwerte, zum Erzeugen von Fehlermeldungen beim Erreichen von Alarmkriterien und Detektordefekten und vielem mehr.

AirChip 3000. Als Beispiel soll der programmierbare, anwenderspezifische AirChip 3000 des Schweizer Spezialisten für Feuchte- und Temperaturmessung Rotronic AG (www.rotronic.ch, www.rotronic.de) dienen. Er ist das Schlüsselbauteil für zahlreiche Rotronic-Feuchtigkeits-Temperatur-Messsysteme und zeichnet sich durch eine enorme Funktionsvielfalt aus. Als komplexer, anwendungsspezifischer Chip (ASIC: Application Specific Integrated Circuit) dient er in erster Linie dazu, die Rohsignale zweier externer Sensoren für Temperatur und Feuchtigkeit zu konditionieren und zu einem Ausgangssignal (analog und digital) zu verarbeiten. Darüber hinaus bietet der AirChip 3000 viele weitere Funktionen wie die Ermittlung des Tau- und Frostpunkts, Kalibrieren (Eichen) und Justieren des Sensors, Sensordiagnose, automatische Driftkompensation,

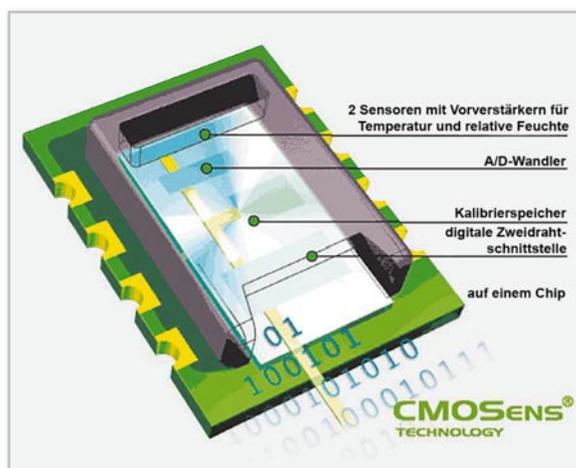


Bild 27: Auf wenigen Quadratmillimetern Chipfläche ist ein vollständiges, hochgenaues Messsystem für Temperatur und Feuchte realisierbar. (Quelle: Sensirion)



Bild 28: HygroClip – ein industrieller Feuchtemesskopf mit Datenvorverarbeitung (Quelle: Rotronic)

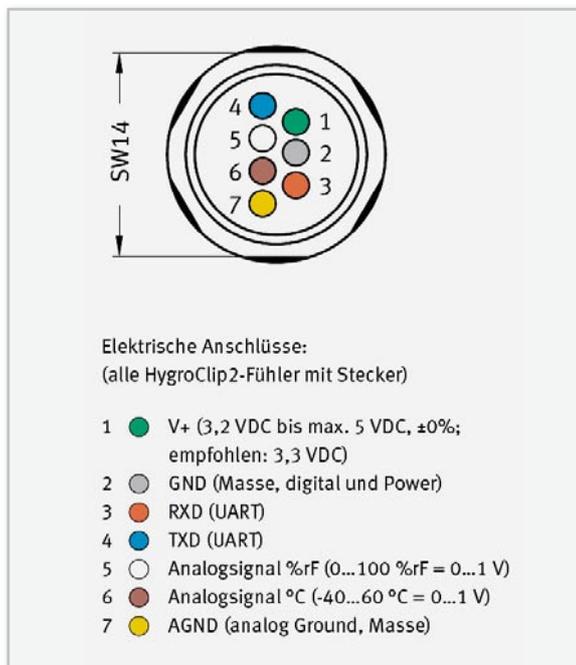


Bild 29: Als serielles digitales Signal und in analoger Form stehen die Messdaten an der Schnittstelle des HygroClips zur Verfügung. (Quelle: Rotronic)



Bild 30: Mit einem solchen Datenlogger lassen sich Temperatur- und Feuchtedaten über längere Zeiten bis zum Auslesen zwischenspeichern. (Quelle: Rotronic)

Erzeugen von Alarmmeldungen, z. B. bei Sensordefekt oder Überschreitungen des Messbereichs, und sogar das Speichern von Daten. Besonders nützlich ist die Möglichkeit zum Update der Firmware (interne Betriebssoftware des Chips), um die Funktionen des Chips zu aktualisieren oder zu erweitern. In der Simulationsbetriebsart erzeugt der AirChip 3000 vorkonfigurierte digitale oder analoge Temperatur- und Feuchtesignale, anhand derer nach erfolgter Installation die korrekte Signalübertragung getestet werden kann (loop validation). In der Betriebsart Datenaufzeichnung zeichnet der Chip intern in einem nichtflüchtigen Speicher 2000 Fühlerwertepaare für relative Feuchtigkeit und Temperatur jeweils mit einer Auflösung von 0,1 % rF bzw. 0,05 K auf. Das Aufzeichnungsintervall ist zwischen 5 Sekunden und 24 Stunden frei wählbar. Der Datenspeicher kann als Ringpuffer (FIFO: First In First Out) betrieben oder die Aufzeichnung bei gefülltem Speicher beendet werden, wenn keine Altdaten verloren gehen sollen. Der Datenaufzeichnungsmodus lässt sich jederzeit aktivieren oder beenden. In Abbildung 28 sind AirChip 3000 und ein Polymer-Feuchtefühler in einer Messkapsel vereint. Die elektrische Schnittstelle der Messkapsel beschreibt Abbildung 29.

Datenlogger. Für autarke und flexible Langzeitaufzeichnungen der Daten zweier Feuchtefühler – z. B. in Lagerhäusern, Museen, Bibliotheken, Galerien, Reinräumen, Serverräumen, Produktionsumgebungen, in Containerüberwachungen und Wohnliegenschaften – steht der Datenlogger HygroLog NT3 zur Verfügung (Abbildung 30). Dank austauschbarer 32-MB-Flashkarte speichert er über 1,5 Millionen zeitreferenzierter Datensätze. Das reicht aus, um ein Jahr lang im 21-Sekunden-Abstand rund um die Uhr Messungen vorzunehmen und aufzuzeichnen. Eine Vielzahl von Varianten bezüglich Messingängen und Ausgabeschnittstellen ermöglichen spezifische Dockingstationen. So lässt sich der Datenlogger für nahezu jede Messaufgabe einsetzen. Die Integration in ein TCP/IP-Netz kann drahtgebunden (Ethernet) oder drahtlos (WLAN) (Abbildung 31) erfolgen. Für die Kommunikation über einen Standard-Webbrowser sind Ausführungen mit integriertem Webclient verfügbar.

Software. Alle in ein TCP/IP-Netz (Ethernet) integrierten Komponenten lassen sich (entsprechend ihren Möglichkeiten) mit der Rotronic-HW4-Software konfigurieren, programmieren, zeitsynchronisieren, justieren, kalibrieren, auslesen usw. Für ein validiertes Gesamt-Feuchte-und-Temperaturmesssystem ist eine derartige, natürlich ebenfalls validierte Software unverzichtbar.

Bei der Messwertabfrage wird auf Einfachheit und Benutzerfreundlichkeit größter Wert gelegt. Dateien können via Explorer direkt von einem im Gerätebaum visualisierten Gerät kopiert und geöffnet werden.

Die Darstellung erfolgt wahlweise in tabellarischer Form oder als Grafik. Für Log-Dateien stehen das Excel-Tabellenkalkulationsformat (XLS) oder ein HW4-spezifisches Binärformat (LOG) zur Verfügung.

Die Daten können automatisch in verschiedene Dateien geschrieben werden, zur leichteren Übersicht beispielsweise jeden Monat oder nach 200.000 Messwerten in eine neue



Bild 31: Eine Dockingstation bindet Messfühler drahtlos in ein Datennetzwerk ein. (Quelle: Rotronic)

Datei. Zur Erhöhung der Datensicherheit kann die Datenspeicherung parallel in räumlich getrennten Medien erfolgen. Umfangreiche von der WMO (World Meteorological Organization) verifizierte psychrometrische Berechnungen (Psychrometrie: Thermodynamik der feuchten Luft) und ein umfangreiches Analyse- und Kalkulationstool mit der Möglichkeit der Eingabe von durch den Anwender definierten Parametern erlauben die Ableitung einer Vielzahl von Größen aus Temperatur und Feuchte (Abbildung 32).

Für Anwender ohne Interesse an detaillierten Daten sind Statistikfunktionen (Anzahl der Messwerte, Minimum, Maximum, Mittelwert, Standardabweichung ...) verfügbar (Abbildung 33). Im Monitoringbetrieb kann die HW4-Software beim Eintreten bestimmter Ereignisse einen Alarm auslösen. Die Alarmmeldungen werden auf dem Bildschirm, akustisch oder per E-Mail an einen oder mehrere Empfänger ausgegeben. Mit der OPC-Server-Version (OPC: Object Linking and Embedding for Process Control) von HW4 lassen sich Messwerte auch in übergeordnete Software einbinden.

Kalibrierung. Feuchte- und Temperaturmessgeräte müssen für den Erhalt ihrer Genauigkeit und Zuverlässigkeit regelmäßig kalibriert und gewartet werden. In vielen Branchen wird dies von firmeninternen oder internationalen Standards und Regulierungsbehörden verlangt. Rotronic bietet alle mit der Kalibrierung verbundenen Dienstleistungen im eigenen Labor im Schweizer Stammhaus oder per Kalibriermobil (Abbildung 34) jeweils METAS-zertifiziert (Metrologie und Akkreditierung Schweiz) beim Kunden vor Ort an. Alternativ kann der Kunde durch entsprechende zertifizierte Temperatur- und Feuchtenormale von Rotronic seine Sensoren selber prüfen und kalibrieren.

Zusammenfassung. Exakt linearisierte Polymer-Feuchte-sensoren und Platin-Temperaturmessfühler dienen als Grundlage für umfangreiche industrielle Messsysteme, sind aber auch in kostengünstigen Handheld-Messgeräten anzutreffen. In Letzteren kommen speziell für die Temperaturerfassung auch zahlreiche andere Messfühler wie CrNi oder Halb-leiter zum Einsatz. **ELV**

Parameter	Symbol	Value	Unit
Humidity	H	35.00	%rh
Temperature	T	23.00	°C
Pressure	P	1013.25	hPa
Elevation (ref. sea level)		0.00	m
Wet-bulb temperature	T _w	13.98	°C
Psychr. difference	T-T _w	9.02	°C
Dew point	D _p	6.73	°C
Frost point	F _p	N/A	°C
Vapor concentration (moist)	D _v	7.19	g/m ³
Specific humidity (moist)	Q	6.06	g/kg
Mixing ratio by Wt. (dry)	R	6.09	g/kg
Vapor partial pressure	E	9.83	hPa
Vapor saturation pressure	E _w	28.08	hPa
Saturation vapor concentration	D _{vs}	20.54	g/m ³
Enthalpy	H	38.60	kJ/kg
Volume Mixing Ratio (dry)		9795.44	ppm

Bild 32: Über die hygrometrischen Formeln leitet eine geeignete Software vielfältige Zusammenhänge aus den Messgrößen ab. (Quelle: Rotronic)

```

ExampleOnline (Peter Mueller v1).XLS
Process description: Version = VB.2d
Device name: Rotronic HygroLogNTx
Firmware version:
Device serial number:
Type: |
Total: 127 Data Points

Feuchte %rh
Minimum: 14.32 (04.02.2004 13:21:15)
Maximum: 44.2 (04.02.2004 13:08:15)
Average: 22.805
Standard deviation: 4.551

Temperatur °C
Minimum: 23.8 (04.02.2004 13:06:00)
Maximum: 25.72 (04.02.2004 13:22:45)
Average: 24.576
Standard deviation: 0.656
Mean Kinetic Temperature: 24.599

Taupunkt °C
Minimum: -3.578 (04.02.2004 13:21:00)
Maximum: 10.96 (04.02.2004 13:08:15)
Average: 1.735
Standard deviation: 2.290
Mean Kinetic Temperature: 2.075

```

Bild 33: Die statistische Auswertung gespeicherter Messwertketten ist ein Domäne des Computers. (Quelle: Rotronic)



Bild 34: Wo es auf zuverlässige und genaue Messwerte ankommt, muss regelmäßig kalibriert werden. Geschieht dies vor Ort, wird viel Zeit gespart. (Quelle: Rotronic)