

Sensor zur Messung der relativen Luftfeuchte

1. Allgemeines	1
2. Begriffe und Definitionen	2
3. Der Valvo-Feuchtesensor	2
4. Meßprinzipien	4
5. Praktische Schaltungsvorschläge	6
6. Abgleich der Meßschaltungen	8
7. Meßgenauigkeit	8
8. Eichung der Feuchtesensor-Schaltung mit Hilfe gesättigter Salzlösungen	9
9. Verschiedene Hinweise	10

1. Allgemeines

Für die Messung der Luftfeuchte besteht ein vielfältiges Interesse. Neben der rein informatorischen Feuchtemessung, wie sie beispielsweise in vielen privaten Haushalten, in Büros und Geschäftsräumen vorgenommen wird, steht die Messung zur Gewinnung eines Istwertes, den man bei allen Anlagen benötigt, die selbsttätig eine bestimmte Luftfeuchte herstellen und aufrechterhalten.

Im ersten Fall benutzt man häufig das bekannte Haarhygrometer, welches auf rein mechanische Weise eine Anzeige herbeiführt; im zweiten Fall muß ein Feuchtemesser verwendet werden, der ein der jeweiligen Feuchte möglichst proportionales Signal abgibt.

Es sind eine ganze Anzahl verschiedener Prinzipien bekannt, nach denen die Messung der Luftfeuchte erfolgen kann; entsprechend unterschiedlich sind auch die Meßverfahren und der zu deren Durchführung benötigte Aufwand.

Auf die unterschiedlichen Eigenschaften, Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren kann hier nicht näher eingegangen werden, obgleich sie bei der Auswahl eines Feuchtemessers für einen bestimmten Anwendungsfall von großer Bedeutung sind.

Zu den wichtigsten Auswahlkriterien gehören:

- Meßbereich,
- Meßgenauigkeit,
- Langzeitstabilität,
- Ansprechzeit,
- Bedienungsaufwand,
- Wartungsaufwand,
- „Robustheit bezüglich Erschütterungen, Verschmutzungen sowie Einwirkung von Gasen und Dämpfen,
- Stromversorgung,
- Abmessungen, Gewicht,
- Preis.

2. Begriffe und Definitionen

In der Feuchtetechnik unterscheidet man u. a. zwischen

- absolute Feuchte,
- Sättigungsfeuchte,
- relative Feuchte.

Die Definitionen dieser Begriffe sind:

Absolute Feuchte (F_{abs})

Die absolute Feuchte F_{abs} gibt diejenige Wassermenge an, die in einem bestimmten Luftvolumen enthalten ist.

Es gilt

$$F_{abs} = \frac{\text{Masse des Wassers}}{\text{Luftvolumen}} \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right).$$

Sättigungsfeuchte (F_{sat})

Die Sättigungsfeuchte F_{sat} gibt die maximal mögliche Wassermenge an, die in einem bestimmten Luftvolumen enthalten sein kann. F_{sat} ist von der Temperatur abhängig und steigt mit dieser stark an.

$$F_{sat}(\vartheta) = \frac{\text{*maximale Masse des Wassers}}{\text{Luftvolumen}} \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right).$$

Bild 1 zeigt die Abhängigkeit der Sättigungsfeuchte F_{sat} von der Temperatur ϑ .

Relative Feuchte F_{rel}

Die relative Feuchte F_{rel} ist eine Angabe, die sich aus dem Verhältnis von absoluter Feuchte zur Sättigungsfeuchte ergibt.

$$F_{rel}(\vartheta) = \frac{F_{abs}}{F_{sat}(\vartheta)} \cdot 100 \quad (\%).$$

Die Angabe der relativen Feuchte ist sehr verbreitet. Dies ist **gerechtfertigt, weil** viele durch die Luftfeuchtigkeit ausgelöste Reaktionen in erster Linie mit der relativen Feuchte verknüpft sind (Rostbefall, Schimmelbildung, körperliches Befinden u. a. m.).

Bild 2 stellt den Zusammenhang her zwischen der absoluten und relativen Feuchte und der Temperatur.

3. Der Valvo-Feuchtesensor

Der neue Valvo-Feuchtesensor (Best. Nr. 232269190001) wird zur Messung der relativen Luftfeuchte eingesetzt. Er besteht aus einem perforierten Kunststoffgehäuse, in dem eine beidseitig mit einem Goldfilm bedampfte Spezialfolie eingespannt ist. Das Gehäuse, dessen Abmessungen Bild 3 wiedergibt, ist für die Montage auf einer Printplatte geeignet.

Die Folie stellt das Dielektrikum eines Plattenkondensators dar; die beiden Goldfilme bilden dessen Elektroden. Unter dem Einfluß der Luftfeuchte ändert sich die Dielektrizitätskonstante der Folie und damit die Kapazität des Kondensators. Mit Hilfe einer relativ

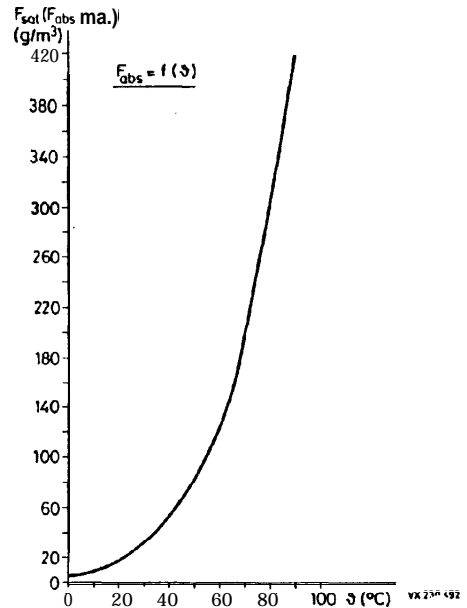


Bild 1 Sättigungsfeuchte F_{sat} in Abhängigkeit von der Temperatur ϑ

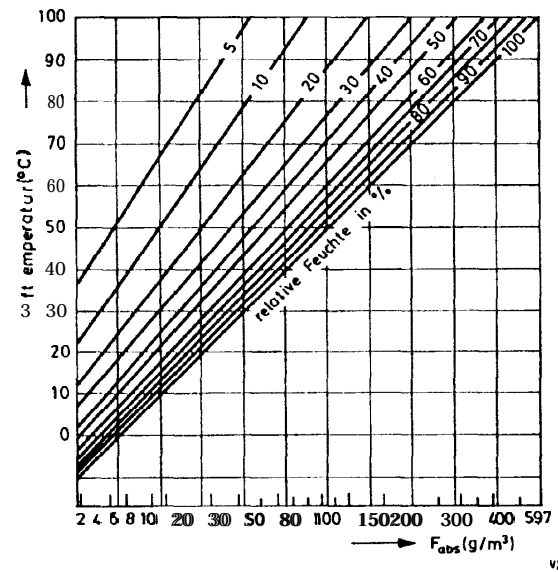


Bild 2. Zusammenhang zwischen der absoluten und relativen Feuchte und der Temperatur

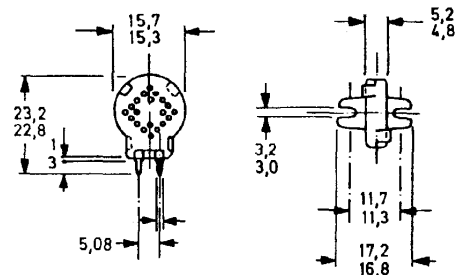


Bild 3. Abmessungen des Valvo-Feuchtesensors

VALVO

einfachen **Meßschaltung** wird die Kapazität bzw. deren Änderung **erfaßt** und in eine Gleichspannung umgewandelt. Diese kann dann zur direkten Anzeige der relativen Feuchte oder als **Istwert** für eine Anlage zur selbsttätigen Luftfeuchterege­lung verwendet werden.

Bild 4 zeigt die Abhängigkeit der „Kapazität Cs des Sensors von der relativen Feuchte. Man erkennt, daß die durch Feuchteschwankungen verursachten Kapazitätsänderungen relativ **groß** sind. Die Kurve zeigt ferner, daß die Abhängigkeit der Kapazität von der Feuchte nicht linear ist. Eine direkte Meßwertanzeige erfordert daher entweder ein Meßgerät mit entsprechend geeichter Skala oder eine Linearisierung der Anzeige durch schaltungstechnische **Maßnahmen**.

Der Kurve in Bild 4 liegen die typischen Kapazitätswerte des Sensors zugrunde. In Bild 5 ist der Zusammenhang zwischen der relativen Feuchte und der auf $F_{rel} = 12\%$ normierten Kapazität des Sensors wiedergegeben. Diese Kurve gilt auch dann, wenn die Kapazitätswerte eines Sensors (im Rahmen der zugelassenen Toleranzen) von den typischen Werten abweichen.

Die Kapazität $C_s = C_0 + \Delta C$ des Sensors ist in geringem **Maße** von der Meßfrequenz abhängig. In Tabelle 1 sind für vier Frequenzen die Kapazitätswerte von C_s bei $F_{rel} = 0\%$ (im folgenden als C_0 bezeichnet) und für C_s bei $F_{rel} = 12\%$ sowie der Kapazitätsunterschied ΔC zwischen $F_{rel} = 0\%$ und $F_{rel} = 100\%$ angegeben.

Tabelle 1. Kapazitätswerte des Feuchtesensors für verschiedene Frequenzen

Frequenz	C_0 ($F_{rel} = 0\%$) ¹⁾	C_s ($F_{rel} = 12\%$)	ΔC $F_{rel} = (0...100\%)$
1 kHz	116,1 pF	119,7 pF	45,5 pF
10 kHz	112,7 pF	116,2 pF	44,2 pF
100 kHz	109,0 pF	112,3 pF	42,7 pF
1000 kHz	104,6 pF	107,9 pF	41,0 pF

Es handelt sich bei den Zahlen in der Tabelle um typische Werte. Aufgrund der Fertigungsstreuungen können diese im Rahmen der zugelassenen Toleranzen abweichen. Die **relativen** Änderungen dieser Werte durch die Frequenz sind jedoch praktisch gleich den **relativen** Änderungen der typischen Werte. Der Zusammenhang zwischen F_{rel} und C_s läßt sich in guter Näherung durch die Gleichung

$$\frac{C_s}{C_s(12\%)} = 0,985 + 0,34 \left(\frac{F_{rel}}{100} \right)^{1,4}$$

beschreiben (gestrichelte Kurve in Bild 5).

¹⁾ Werte extrapoliert

Bild 6 zeigt die Änderung der Kapazität (C_s oder C_0 oder ΔC) mit der Frequenz, bezogen auf die Kapazität bei $f = 100$ kHz.

Die Ansprechzeit des Sensors liegt in der Größenordnung von Minuten. Bild 7 zeigt den Verlauf der

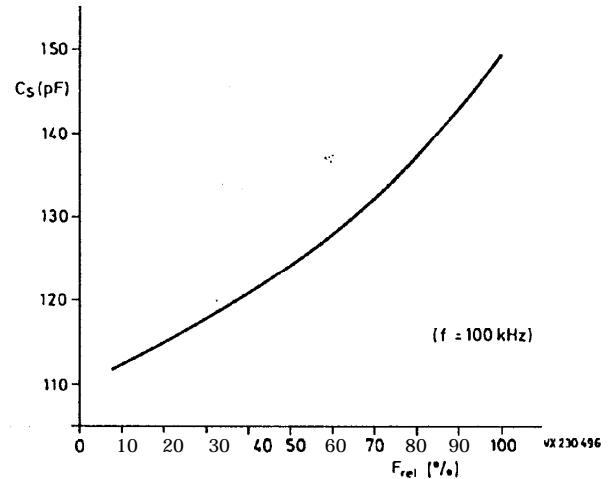


Bild 4. Kapazität des Sensors als Funktion der relativen Feuchte

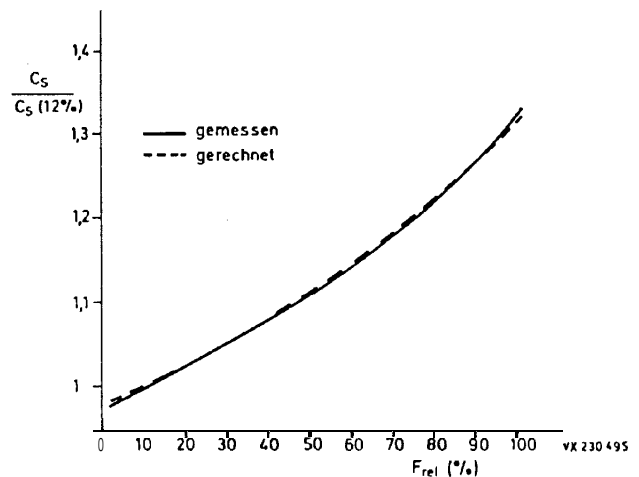


Bild 5. Zusammenhang zwischen der relativen Feuchte und der auf $F_{rel} = 12\%$ normierten Kapazität des Sensors

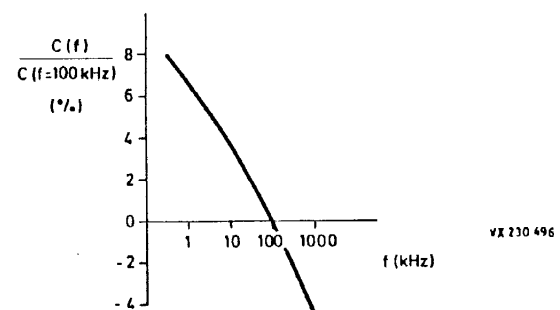


Bild 6. Änderung der Kapazität des Sensors mit der Frequenz, bezogen auf die Kapazität bei der Frequenz $f = 100$ kHz

angezeigten relativen Feuchte in Abhängigkeit von der Zeit. Die Kurven machen deutlich, daß 90 % des jeweils neuen stationären Endwertes nach etwa zwei Minuten erreicht wird,

Der Sensor ist gegenüber Schadstoffen, die in der Luft enthalten sind, relativ unempfindlich. Eine Ausnahme bilden die Dämpfe einiger Lösungsmittel.

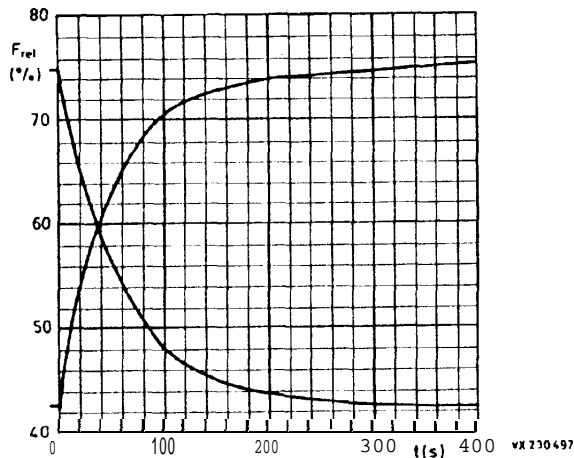


Bild 7. Ansprech- und Abklingzeit des Sensors bei sprungförmiger Änderung der relativen Feuchte von 43% auf 75% und von 75% auf 43 %

Tabelle 2. Kenndaten des Valvo-Feuchtesensors

Kapazität ($\vartheta = 25^\circ\text{C}, F_{\text{rel}} = 43\%, f = 100\text{ kHz}$)	$122\text{ pF} \pm 15\%$
Empfindlichkeit ($F_{\text{rel}} = 43\%$)	$(0,4 \pm 0,05)\text{ pF}/\%$ ¹⁾
Temperaturabhängigkeit ($f = 1\text{ kHz}, \dots 1\text{ MHz}$)	$\approx 0,1\%/K^2$
Meßfrequenzbereich	1 kHz... 1 MHz
Feuchtigkeitsmeßbereich	10%... 90% ³⁾
Lagerungstemperaturbereich	$-25^\circ\text{C} \dots 80^\circ\text{C}$
Lagerungsfeuchtebereich	0%... 100% ³⁾
Betriebstemperaturbereich	$0^\circ\text{C} \dots 85^\circ\text{C}$
maximale Betriebsspannung (Gleich- u. Wechselsp.)	15 V
Verlustfaktor ($\tan \delta$) bei $\vartheta_U = 25^\circ\text{C}, f = 100\text{ kHz}$	$< 35 \cdot 10^{-3}$
Ansprechzeit (90%-Wert) bei $\vartheta_U = 25^\circ\text{C}$ in bewegter Luft	
a) im Bereich $F_{\text{rel}} = 10 \dots 43\%$	$< 3\text{ min}$
b) im Bereich $F_{\text{rel}} = 43 \dots 90\%$	$< 5\text{ min}$
Hysteresis bei einem Zyklus $F_{\text{rel}} = 10\% \rightarrow 90\% \rightarrow 10\%$	ca. 3% ³⁾
Lötbarkeit	max. 240°C , max. 2 s

1) d. h., pro Prozent der relativen Feuchte

2) die hieraus berechnete Prozentzahl wird von $F_{\text{rel}}(\%)$ subtrahiert

3) relative Feuchte

VALVO

Relative Feuchten über 90 % führen leicht zu Meßfehlern, da es dabei, hervorgerufen durch räumliche Temperaturunterschiede sowie Temperaturschwankungen, zu einer Betauung des Sensors kommen kann. – Relative Feuchten unter 10 % können zwar gemessen werden; für diesen Bereich ist die Empfindlichkeit des Sensors jedoch nicht spezifiziert.

In Tabelle 2 sind die wichtigsten Kenndaten des Sensors wiedergegeben.

4. Meßprinzipien

Die im Feuchtesensor auftretenden Kapazitätsänderungen müssen in ein entsprechendes elektrisches Signal umgewandelt werden. Eine solche Umwandlung ist nach verschiedenen Prinzipien möglich. Es werden zwei Beispiele gegeben.

4.1. Brückenschaltung

Bild 8 zeigt den Aufbau einer solchen Anordnung.

Ein Oszillator, der beispielsweise auf einer Frequenz von 100 kHz schwingt, liefert die Betriebsspannung für die Meßbrücke. In einem Brückenweig liegt der Sensor mit der Kapazität $C_s = C_0 + \Delta C$. C_0 ist dabei der feste, ΔC der zu messende, durch die Luftfeuchte beeinflussbare Kapazitätsanteil. Der Abgleichtrimmer C_A muß so eingestellt sein, daß für $\Delta C = 0$ die Brückendifferenzspannung ΔU ebenfalls gleich Null ist. Der sich für eine bestimmte Feuchte einstellende Wert für ΔU ist dann nur von ΔC abhängig. ΔU wird gleichgerichtet, verstärkt und angezeigt oder als Istwert verwendet.

Die besprochene Schaltung führt in ihrer praktischen Ausführung zu guten Ergebnissen; sie ist jedoch relativ aufwendig.

4.2. Schaltung mit Differenzimpuls-Messung

Bild 9 zeigt die Prinzipschaltung. Der Multivibrator M_1 erzeugt Rechteckimpulse mit der Dauer $t_1 \sim C_A$ (Bild 10). C_A ist ein Trimmkondensator, der auf den Wert $C_A = C_0$ eingestellt wird (C_0 ist der konstante Kapazitätsanteil des Sensors, Der Multivibrator M_1 synchronisiert den Multivibrator M_2 , bei dem die Dauer t_2 der Impulse proportional der Sensorkapazität $C_s = C_0 +$

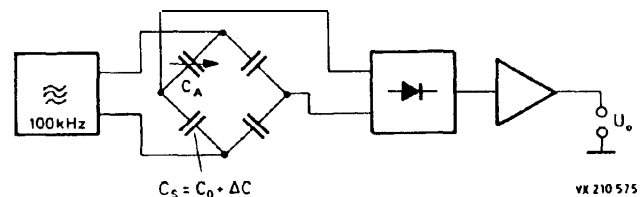


Bild 8. Prinzipschaltung mit Meßbrücke zur Erfassung der Sensorkapazitätsänderung

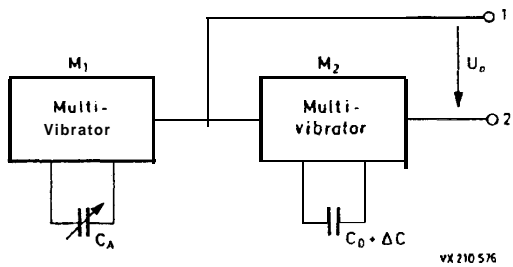


Bild 9. Prinzipschaltung mit Multivibratoren zur Erfassung der Sensorkapazitätsänderung

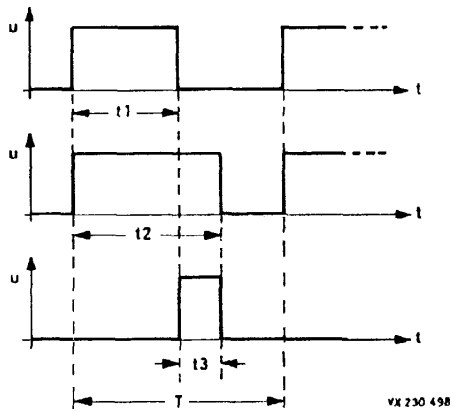


Bild 10. Differenzimpulsbildung bei der Schaltung Bild 9

+ AC ist. Zwischen den Ausgängen 1 und 2 treten Differenzimpulse mit der Dauer $t_3 = t_2 - t_1 \sim \Delta C$ auf, wenn für beide Multivibratoren der gleiche Proportionalitätsfaktor gilt. Wählt man die Periodendauer J der Rechteckspannungen beispielsweise zu $J = 2 f_1$ und hoben alle Impulse die Amplitude U_B , dann gilt für den arithmetischen Mittelwert der Ausgangsspannung U_O

$$U_O (AV) = \frac{t_3}{T} U_B = \frac{\Delta C}{2 C_0} U_B.$$

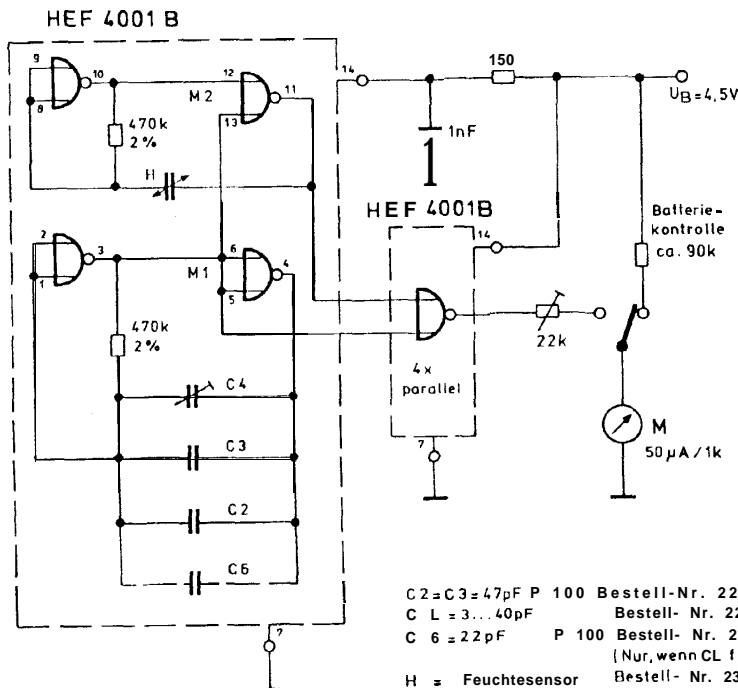
Bild 10 veranschaulicht die Differenzimpulsbildung.

Die Temperatur- und Spannungsabhängigkeit des Verhältnisses t_3/T ist sehr gering, wenn

- die Eigenschaften beider Multivibratoren weitgehend gleich sind (z. B. Aufbau mit einer LOCMOS-Schaltung HEF 4001 B),
- die Sensorkapazität ($C_0 + \Delta C$) und der Trimmkondensator (C_A) den gleichen Temperaturkoeffizienten haben.

In den Meßwert $U_O (AV)$ geht die Speisespannung direkt ein; sie muß daher gegebenenfalls stabilisiert werden.

Die relativ einfache Schaltung läßt sich sehr preisgünstig aufbauen; sie arbeitet zuverlässig und mit einer für viele Anwendungsfälle ausreichenden Genauigkeit. Bestückt mit zwei oder drei Mignonzellen ist ein Dauerbetrieb von etwa einem Jahr möglich.



C2 = C3 = 47pF P 100 Bestell-Nr. 2227 63204479
 C L = 3...40pF Bestell-Nr. 2222 80811409
 C 6 = 22 pF P 100 Bestell-Nr. 2222 63202229
 (Nur, wenn CL für Abgleich zu klein)
 H = Feuchtesensor Bestell-Nr. 2322 69190001

Bild 11. Einfache Meßschaltung

5. Praktische Schaltungsvorschläge

5.1. Einfache Meßschaltung

Bild 11 zeigt eine Schaltung, die mit zwei integrierten LOCMOS-Schaltungen HEF 4001 B aufgebaut ist und nach dem Prinzip der Differenzimpulsmessung arbeitet. Die Speisespannung beträgt 4,5 V (3 Mignon-Zellen); bei einer mittleren Feuchte liegt der Stromverbrauch bei etwa 100 μA .

Die beiden (in Bild 11) oberen NOR-Gatter bilden den Multivibrator M_2 , die beiden unteren den Multivibrator M_1 . M_1 schwingt frei mit einer Frequenz, die durch den 470 k Ω -Widerstand und die Gesamtkapazität der Kondensatoren C_2, C_3 und C_4 bestimmt wird und die in diesem Fall bei etwa 10 kHz liegt.

M_2 wird durch M_1 synchronisiert, arbeitet also mit der gleichen Frequenz wie M_1 . Die Impulsdauer (siehe Abschnitt 4.2) ist von der Kapazität $C_0 + AC$ des Sensors H und damit von der Feuchte abhängig.

Die in den beiden Multivibratoren erzeugten Impulse gelangen an die Eingänge einer weiteren LOCMOS-Schaltung, die in Abhängigkeit von der Differenz der Impulse gesteuert wird. Die vier NOR-Gatter dieser Schaltung sind parallelgeschaltet, so daß man einen relativ niederohmigen Ausgang erhält, an den über ein Potentiometer von 22 k Ω das Anzeigeinstrument (50 μA , 1 k Ω) angeschlossen ist.

Wegen des nichtlinearen Zusammenhangs von Sensorkapazität und relativer Feuchte ist ein Anzeigeinstrument mit spezieller Skaleneinteilung erforderlich. Für den Frequenzbereich von 10 kHz bis 1000 kHz gilt folgende Skalierungstabelle.

Tabelle 3.

$F_{\text{rel}} (\%)$	0	10	20	30	40	50	50	70	80	90	100
Anzeige (%)	0	6,6	13,2	20,5	29,0	36,8	46,0	56,6	67,6	81,6	100

Durch zusätzliche schaltungstechnische Maßnahmen ist es möglich, eine weitgehende Linearisierung der Anzeige zu erreichen und ein Instrument mit linearer Skaleneinteilung zu verwenden. Hiervon wird bei der aufwendigeren Schaltung im nächsten Abschnitt Gebrauch gemacht.

Der Trimmkondensator C_4 wurde wegen der besseren Abgleichbarkeit relativ klein gewählt. Sollte die Kapazität nicht ausreichen, muß ein zusätzlicher Kondensator (C_6) eingebaut werden.

Das RC-Glied (150 Ω , 1 nF) hat die Aufgabe, parasitäre Schwingungen zu verhindern, die während der Schaltvorgänge auftreten können.

Die beschriebene Schaltung läßt sich auch mit einer Speisespannung von 3 V betreiben, wobei lediglich der Wert des Kondensators im RC-Glied von 1 nF auf 0,1 μF geändert werden muß. Gegenüber der 4,5V-Version kann jedoch die mögliche Meßgenauigkeit um ein Mehrfaches größer sein.

Wegen des Abgleichs der Sensor-Schaltung siehe Abschnitt 6. Eine ausführliche Fehlerbetrachtung befindet sich in Abschnitt 7.

5.2. Aufwendigere Meßschaltung

Die Schaltung zeigt Bild 12. Sie unterscheidet sich von der Schaltung Bild 11 u. a. dadurch, daß die Speisespannung stabilisiert wird.

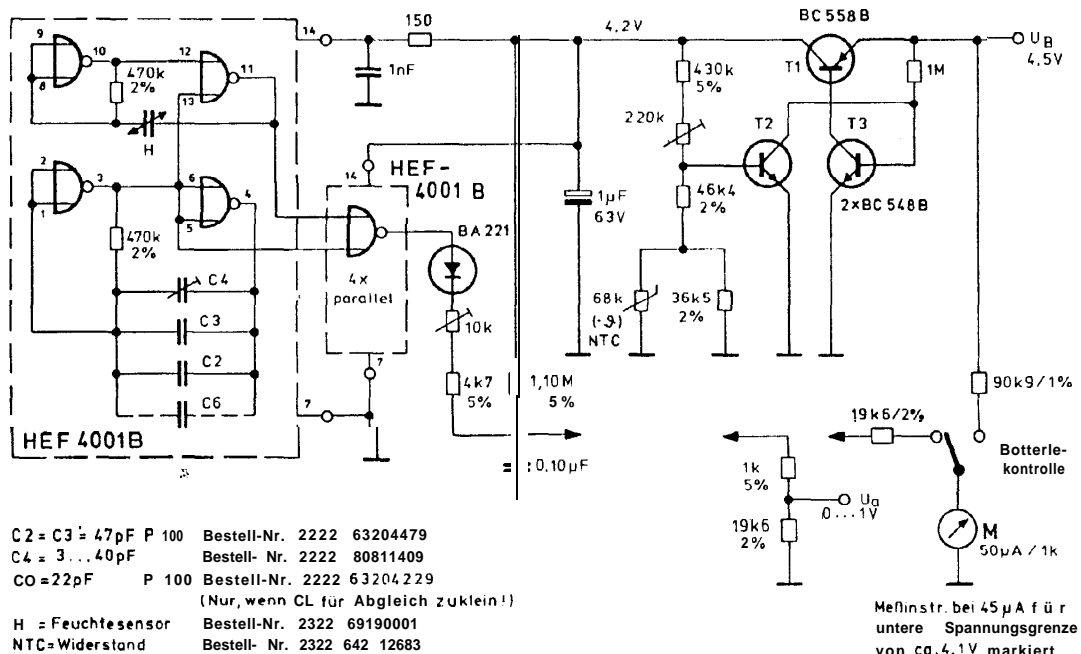


Bild 12. Aufwendigere Meßschaltung

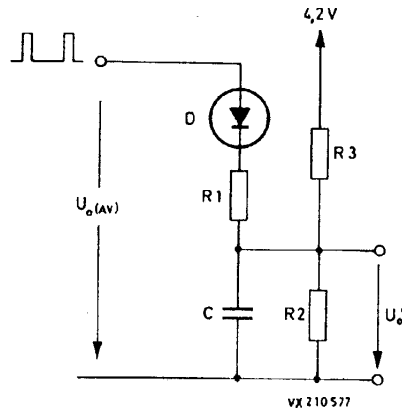


Bild 13. Linearisierungsschaltung

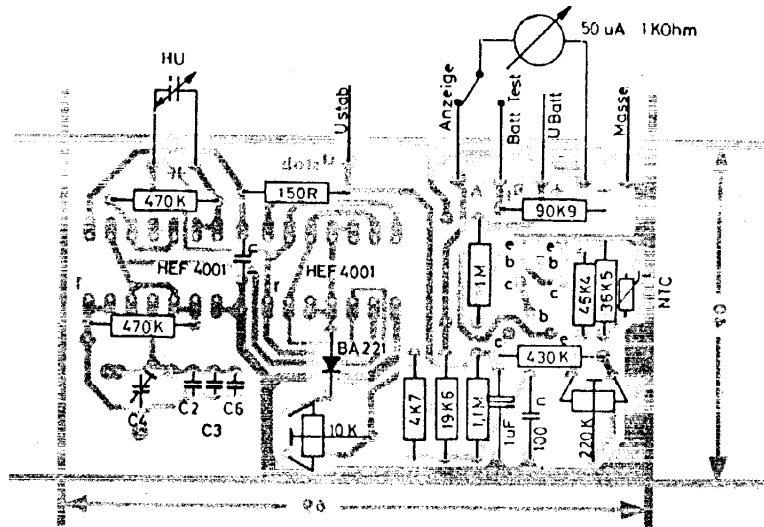


Bild 14. Bestückte Leiterplatte für Version a)

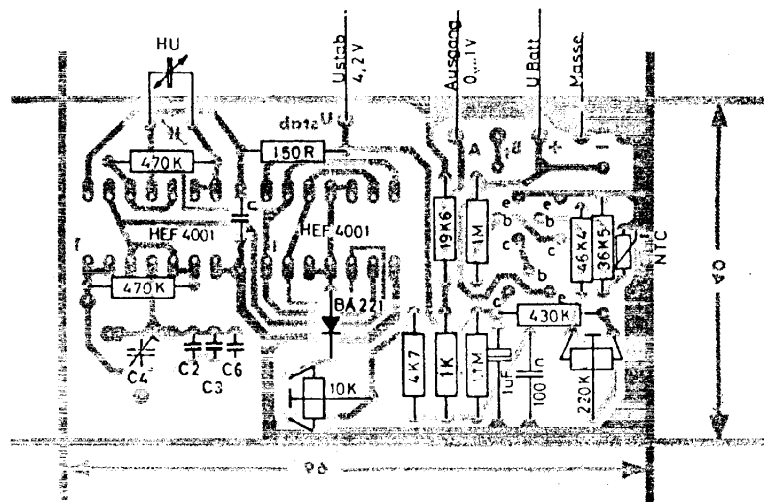


Bild 15. Bestückte Leiterplatte für Version b)

Der Stabilisierungsteil arbeitet mit drei Transistoren: Der Längstransistor T_1 stellt das Stellglied dar; als Referenzspannung wird die Basis-Emitterspannung von T_2 benutzt, gleichzeitig verstärkt T_2 ; T_3 hat eine reine Verstärkungsfunktion. Der NTC-Widerstand dient in erster Linie der Kompensation des Temperatureinflusses auf die U_{BE} -Spannung von T_2 . Mit dem Potentiometer wird die Betriebsspannung auf 4,2 V eingestellt.

An den Differenzimpuls Ausgang der eigentlichen Meß-Schaltung ist eine Linearisierungsschaltung angeschlossen. Sie liegt in zwei Versionen vor, und zwar

- für den Betrieb eines Anzeigeinstruments (50 μ A, 1 k Ω) und
- mit Spannungsausgang (0 bis 1 V).

Im Prinzip arbeitet die Linearisierungsschaltung in folgender Weise (siehe Bild 13):


Die in der Meßschaltung gebildeten Ausgangsimpulse laden über D und R_1 den Kondensator C auf, während gleichzeitig ein der Kondensatorspannung proportionaler Entladestrom über R_2 fließt. Die am Kondensator auftretende Ausgangsspannung $U_{O'}$ ist dem arithmetischen Mittelwert der Impulsausgangsspannung $U_{O(AV)}$ nicht proportional.

Durch geeignete Dimensionierung von C, R_1 und R_2 in Verbindung mit einem zusätzlichen Strom über R_3 läßt sich die Funktion $U_{O'} = f(U_{O(AV)})$ so gestalten, daß die Abhängigkeit der Ausgangsspannung $U_{O'}$ von der Meßgröße F_{rel} in Richtung auf eine Linearisierung wesentlich verbessert wird.

Wegen des Abgleichs der Schaltung siehe Abschnitt 6. Eine ausführliche Fehlerbetrachtung befindet sich in Abschnitt 7. Bild 14 zeigt eine bestückte Leiterplatte für Version a, Bild 15 für Version b. Die Leiterplatte läßt sich auch für die einfache Schaltung Bild 11 verwenden.

6. Abgleich der Meßschaltungen

- Einstellung der Betriebsspannung von 4,2 V bei der stabilisierten Schaltung mit 220 k Ω -Potentiometer. Vorgabe einer Betriebsspannung von 4,5 V bei der unstabilisierten Schaltung.
- Anschluß eines 118 pF-Kondensators anstelle des Feuchtesensors. Abgleich von C_4 auf „minimale Anzeige bzw. Ausgangsspannung.“
- Anschluß eines 159 pF-Kondensators anstelle von H. Abgleich des 10 k Ω - bzw. 22 k Ω -Potentiometers auf Vollausschlag des Zeigerinstrumentes bzw. auf 1 V Ausgangsspannung.
- Einbau des Feuchtesensors H. Abgleich von C_4 , bis der Sollwert der vorliegenden Feuchte (zweckmäßigerweise bei $F_{rel} \approx 50\%$) angezeigt bzw. die entsprechende Ausgangsspannung erhalten wird.

Für den unter 1. und 2. beschriebenen Abgleich sind auf der Leiterplatte 2 Bohrungen, in die 2 Anschluß-Stifte eingelötet werden, vorgesehen und mit  gekennzeichnet.

Nach dem Abgleich kann auf diese Stifte der Feuchte-Sensor aufgelötet werden, so daß er sich dann ca. 4 mm über der Leiterplatte befindet.

Ist diese Montage mechanisch nicht ausreichend stabil oder wird die Bauhöhe dadurch unzulässig hoch, dann sollten die Abmessungen der Leiterplatte vergrößert werden, z. B. 69 mm x 50 mm. Die beiden Leiterbahnen zum Feuchte-Sensor werden dann über die Anschlußstifte hinaus um 10 mm verlängert und der Feuchte-Sensor 10 mm versetzt montiert. Sinngemäß ist die Zuleitung der Versorgungsspannung zum Anschlußstift 14 der LOC MOS-Schaltung HEF 4001 zu verlegen.

Es ist auch eine auf der vergrößerten Leiterplatte um 90° gedrehte Anordnung des Feuchte-Sensors bei sinngemäßer Leiterbahnführung möglich.

7. Meßgenauigkeit

7.1. Systematische Fehler

7.1.1. Temperaturkoeffizient des Sensors

Mit dem Temperaturkoeffizienten des Sensors von +0,1%/K wird der mögliche Anzeigefehler $\pm 2,5\%$ bei einer Temperaturschwankung von ± 25 K.

7.1.2. Temperaturkoeffizient der Multivibrator-kondensatoren

Die Kondensatoren C_2 , C_3 und C_6 in den Bildern 11 und 12 haben den maximal möglichen positiven Temperaturkoeffizienten P100. Die Auswirkung der Temperaturabhängigkeit des Sensors wird damit teilweise kompensiert. Man erhält bezüglich des Tastverhältnisses $\alpha = t_3/T$ (siehe Bild 10) einen resultierenden Temperaturkoeffizienten von $-30 \cdot 10^{-6}/K$; d. h., bei ± 25 K wird $\Delta\alpha = \mp 0,75 \cdot 10^{-3}$. Hieraus ergibt sich folgender Einfluß auf das Meßergebnis:

$F_{rel}(\%)$	10	30	50	70	90	100
$\Delta F_{rel}(\%)^4$	$\mp 1,3$	$\mp 0,8$	$\mp 0,65$	$\mp 0,55$	$\mp 0,50$	

7.1.3. Temperaturkoeffizient der Diode

Die Impulsspannung an der Katodenseite der Diode weist einen Temperaturkoeffizienten von $+0,5 \cdot 10^{-3}/K$ auf. Bei ± 25 K wird der Meßwert daher mit $\pm 1,25\%$ beeinflußt. Dieser Fehler tritt nur bei der Schaltung Bild 12 mit Linearisierung auf.

7.1.4. Gesamttemperaturfehler

Die Zusammenfassung der drei Einflüsse ergibt die folgenden systematischen Temperaturfehler für den Temperaturbereich ± 25 K:

$F_{rel} (\%)$	10	30	50	70	100
ohne Linearisierung	$\pm 1,2$	$\pm 1,7$	$\pm 1,8$	$\pm 1,9$	$\pm 2,0$
mit Linearisierung	$\pm 1,3$	$\pm 2,1$	$\pm 2,5$	$\pm 2,9$	$\pm 3,2$

7.1.5. Spannungsabhängigkeit

Spannungsänderungen ergeben bei Schaltungen ohne Stabilisierung, auch wenn das Tastverhältnis konstant bleibt, entsprechende Anzeigeänderungen.

Eine Batteriespannungstoleranz von $\pm 10\%$ ($U_B = 4,5 \pm 0,45$ V) führt daher zu einem relativen Anzeigefehler von $\pm 10\%$.

Die Stabilisierungsschaltung reduziert diese Spannungstoleranz von $\pm 10\%$ auf etwa $\pm 1\%$, so daß auch der relative Anzeigefehler auf diesen Wert zurückgeht.

7.1.6. Unvollkommenheit der Linearisierung

Weil eine Linearisierung nur näherungsweise gelingt, ergeben sich Restfehler, die im Diagramm Bild 16 dargestellt sind. Im Meßbereich $F_{rel} = 20 \dots 90\%$ ist der Fehler kleiner als 1% .

7.2. Fehler durch Streuung

7.2.1. Streuung der Fühlerempfindlichkeit

Messungen an 14 Exemplaren ergaben, einen Abgleich der Schaltung bei $F_{rel} = 43\%$ vorausgesetzt, im Grenzfall eine Abweichung von $\pm 3\%$ bei $F_{rel} = 10\%$ und 90% (Bild 17).

7.2.2. Streuung der Gatterparameter

Exemplarstreuungen der Gatter führen bei Temperatur- und Spannungsänderungen ebenfalls zu Fehlern im Tastverhältnis α . Mit einem Kondensator anstelle des Sensors wurde die Schaltung (ohne Stabilisierung) überprüft. Hierbei ergaben sich folgende Ergebnisse:

- a) Tastverhältnis-Meßfehler $A_a = \Delta(t_3/T)$
 Bezug auf $U_{FJ} = 4,5$ V und $t = 22^\circ\text{C}$.
 Spannungseinfluß:
 mit $\Delta U_B = \pm 0,45$ V ($\pm 10\%$) wurde $h_a \leq \pm 0,002$ gemessen.

- 4) absoluter Fehler der angezeigten relativen Feuchte

Temperatureinfluß:

bei 0°C wurde $A_a < \pm 0,002$,
 bei 60°C wurde $A_a \leq \pm 0,001$ gemessen.
 Die entsprechende Schaltung mit $U_B = 3$ V weist etwa 5...10fach größere Meßfehler auf.

b) Anzeigefehler durch Streuungen

Der Feuchtemessung liegt ein Tastverhältnis α von $a = \alpha_{max} \left(\frac{F_{rel}}{100}\right)^{1,4}$ mit $\alpha_{max} = 1,55$ zugrunde.

Mit den Toleranzen aus a) ist die entsprechende Toleranz der Feuchtemessung für die folgenden Voraussetzungen ermittelt:

- 4,5 V-Schaltung ohne Stabilisierung,
 $\vartheta = 0 \dots 60^\circ\text{C}$ und $\Delta U = 0,45$ V:
 $A_a = 0,004$.
- 4,5 V-Schaltung mit Stabilisierung,
 ϑ und ΔU wie oben:
 $A_a = 0,002$.

$F_{rel} (\%)$	10	30	50	70	100
$\Delta F_{rel} (\%)^4$ ohne Stab.	6,4	4,2	3,4	3,0	2,6
$\Delta F_{rel} (\%)^4$ mit Stab.	3,2	2,1	1,7	1,5	1,3

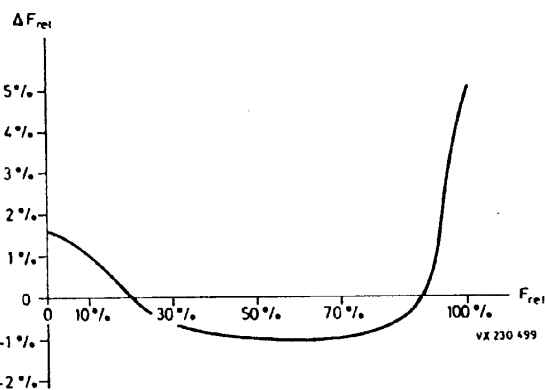


Bild 16. Verlauf des Restfehlers (absolute Werte) über der relativen Feuchte

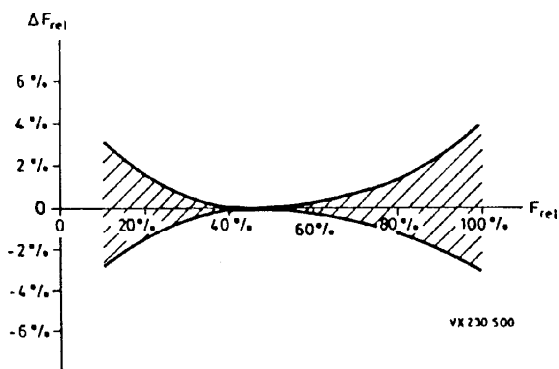


Bild 17. Streubereiche der Sensorempfindlichkeit, gemessen an 14 Exemplaren (ΔF_{rel} ist der absolute Fehler)

7.3. Zusammenfassung

Wird der Abgleich der Schaltung bei mittlerer Feuchte vorgenommen, ergibt sich in diesem wichtigen Bereich die höchste Meßgenauigkeit. An den Bereichsenden wird der mögliche Fehler größer. Anhand der oben angegebenen Meßergebnisse dürfte der Meßfehler unter ungünstigsten Bedingungen bei der stabilisierten Schaltung in Bereichsmitte etwa 5 %⁴⁾ und bei 10 bzw. 90 % Feuchte etwa 8 %⁴⁾ betragen. Bei der unstabilierten Schaltung kann von den doppelten Werten ausgegangen werden.

Im Normalfall, d. h. bei Zimmertemperatur und der Nennbetriebsspannung, die bei der außerordentlich geringen Stromaufnahme für den größten Abschnitt der Betriebszeit vorliegt, dürften die Anzeigefehler deutlich unter diesen Grenzwerten liegen.

8. Eichung der Feuchtesensor-Schaltung mit Hilfe gesättigter Salzlösungen

Die Eichung der Feuchtesensor-Schaltung kann mit Hilfe gesättigter Salzlösungen erfolgen. Hierbei benutzt man die Tatsache (siehe DIN-Entwurf 40046), daß die relative Feuchte der Luft, die sich in einem geschlossenen Behälter über einer darin enthaltenen gesättigten Salzlösung einstellt, einen bestimmten, nur von der Temperatur abhängigen Wert hat.

Tabelle 4 gibt für eine Reihe von Salzen die sich einstellende relative Luftfeuchte bei verschiedenen Temperaturen an.

Der Eichvorgang läßt sich mit Hilfe eines luftdicht verschlossenen Behälters durchführen: Hierbei ordnet man den Sensor in dem Behälter so an, daß dessen Anschlußstifte durch die Behälterwandung geführt und von außen mit der Schaltung kontaktiert werden können. Dann bringt man einen mit der gesättigten Lösung getränkten Wattebausch in den Behälter ein und verschließt ihn luftdicht. Nach einer Wartezeit von mindestens 30 Min. (bei konstanter Temperatur) kann die Eichung erfolgen.

9. Verschiedene Hinweise

Eine weitere Verringerung des Temperaturfehlers (siehe Abschnitt 7.1.4) ist noch auf folgende Weisen möglich:

- Der Widerstand im freischwingenden Multivi bra-tor wird mit einem NTC-Widerstand kombiniert.
- Man speist einen zusätzlichen, von einem NTC-Widerstand abhängenden Strom in das Meß-instrument ein.

Bei kleinen Feuchten führt diese Möglichkeit jedoch zu einem etwas schlechteren Ergebnis als bei der unter a) beschriebenen.

Eine Betauung der Meßschaltung, hervorgerufen durch plötzlichen Temperaturwechsel oder durch Anhauchen, kann zu Kriechströmen und damit zu einer erheblichen Verfälschung der Meßwerte führen. Durch eine Oberflächenbehandlung (z. B. „Plastik Spray 70“ der Fa.

Tabelle 4.

Salz		Temperatur (°C)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
		relative Feuchte (%)									
Kaliumsulfat	K ₂ SO ₄	98	98	97	97	97	96	96	96	96	96
Kaliumnitrat	KNO ₃	96	95	94	93	92	91	89	88	85	82
Kaliumchlorid	KCl	88	88	87	86	85	85	84	82	81	80
Ammoniumsulfat	(NH ₄) ₂ SO ₄	82	82	81	81	80	80	80	79	79	78
Natriumchlorid	NaCl	76	76	76	76	75	75	75	75	75	75
Natriumnitrit	NaNO ₂	--	--	--	65	65	63	62	62	59	59
Ammoniumnitrat	NH ₄ NO ₃	--	73	69	65	62	59	55	53	47	42
Natriumbichromat	Na ₂ Cr ₂ O ₇	59	58	56	55	54	52	51	50	47	--
Magnesiumnitrat	Mg(NO ₃) ₂	58	57	56	55	53	52	50	49	46	--
Kaliumkarbonat	K ₂ CO ₃	--	47	44	44	43	43	43	42	--	--
Magnesiumchlorid	MgCl ₂	34	34	34	33	33	33	32	32	31	30
Kaliumazetat	CH ₃ COOK	--	21	21	22	22	22	21	20	--	--
Lithiumchlorid	LiCl	14	14	13	12	12	12	12	11	11	11

Kontakt Chemie) läßt sich diese störende Erscheinung weitgehend verhindern. Es empfiehlt sich, die Bestückungsseite vor der Bestückung und die Lötseite nach dem Löten zu behandeln.

Eine Kabelverbindung zwischen Sensor und Meß-Schaltung erhöht die dem Sensor parallelliegenden Schaltungskapazitäten u. U. erheblich und führt zu einer Verringerung des Tastverhältnisses α und damit auch der Meßgenauigkeit. In einem solchen Fall ist es erforderlich,

a) die Referenzkapazität entsprechend zu vergrößern,

b) den in der Linearisierungsschaltung mit dem Potentiometer in Serie liegenden Widerstand zu verkleinern.

Weitere Informationen:

Valvo

**Unternehmensbereich Bauelemente der Philips GmbH
Burchardstraße 19, Postfach 10 63 23, 2000 Hamburg 1
Telefon (0 40) 32 96-556, Telex 2 15 401-62 va d**