

TECHNISCHE BESCHREIBUNG DES
KRAFT-MOMENTEN-FÜHLERS

IB 552 - 78/8

Freigabe: Die Bearbeiter:
DR. L. SCHMIEDER
F. METTIN

Unterschriften:
L. Schmieder
F. Mettin

Der Abteilungsleiter: _____

Der stellv. Institutsdirektor: _____

Der Institutsdirektor: J. Ackermann

Dieser Bericht enthält: 25 Blatt davon
4 Bilder
 Diagramme



TECHNISCHE UNTERLAGEN FÜR DEN KRAFTMOMENTENFÜHLER

DFVLR - INSTITUT FÜR DYNAMIK DER FLUGSYSTEME

Inhalt

- I. Beschreibung der Wirkungsweise
- II. Die Verformungen des Drehmomentenfühler, ihre Messung und die Umrechnung auf die Komponenten der Kräfte und Momente
- III. Wirkungsweise der Brückenmeßverstärker
- IV. Abschätzung der Herstellungskosten

EINLEITUNG

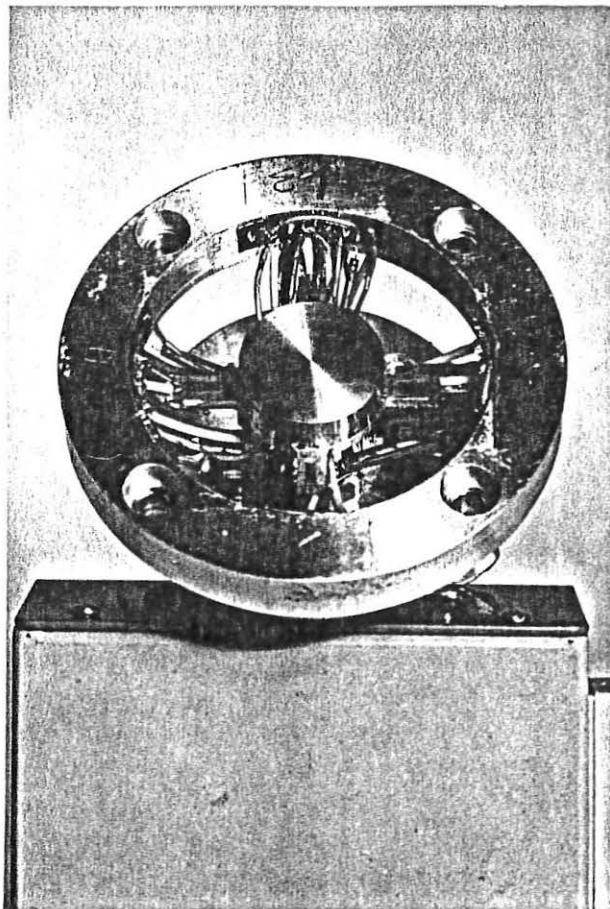
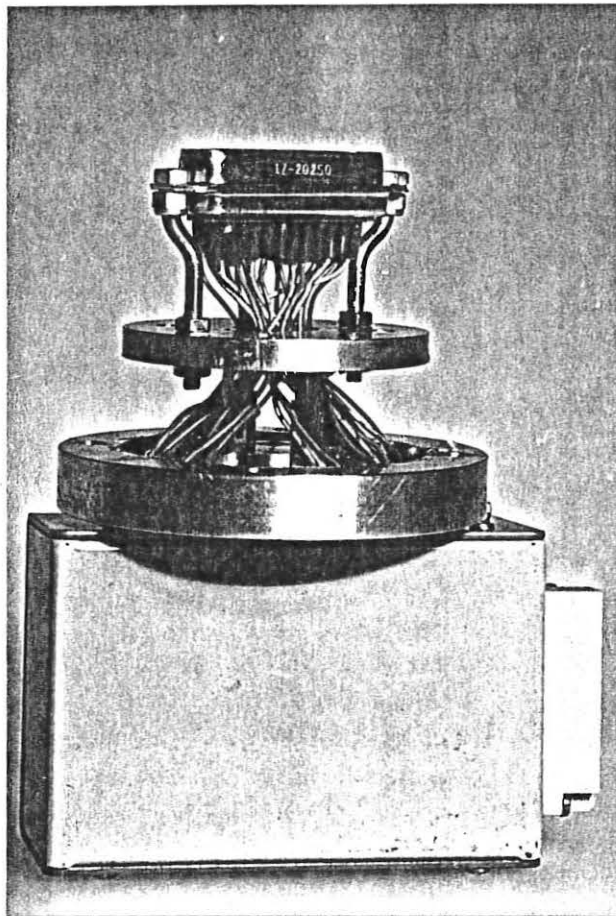
Will man rechnergesteuerten Manipulatoren schwierige Montagearbeiten übertragen, muß man die Handzange mit Sensoren ausrüsten, die die dort auftretenden Kräfte und Momente erfassen können.

Eine Lösung mit Dehnungsmeßstreifen zur Aufnahme der mechanischen Verformungen wird in diesem Bericht beschrieben.

Der geometrische und mathematische Zusammenhang zwischen den acht gemessenen elektrischen Ausgangssignalen wird in einer Verformungs- und einer Steifigkeitsmatrix festgelegt, die sich aus den Ergebnissen des Eichprogramms ergeben.

Die sehr niedrigen Ausgangsspannungen der Dehnungsmeßstreifen müssen so verstärkt werden, daß sie der Auswertung im Rechner zugänglich sind. Aufbau und Wirkungsweise des zu diesem Zweck entwickelten Verstärkers wird beschrieben.

Angefügt ist eine Abschätzung der Materialkosten und des Arbeitsaufwands.



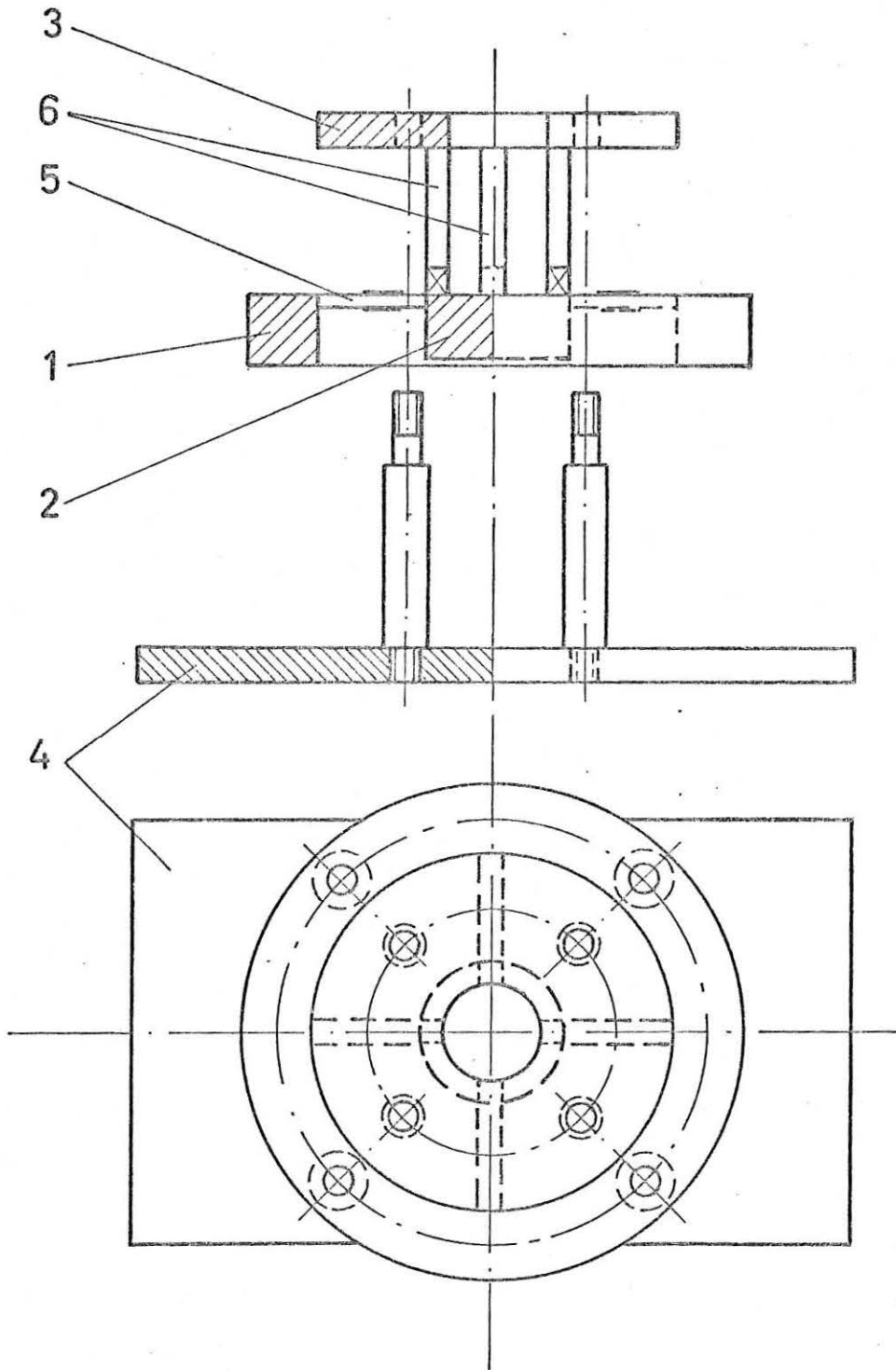
WIRKUNGSWEISE DES KRAFT-MOMENTEN-FÜHLERS

(sh. Bild Seite 2)

Die ringförmige Grundplatte 1, die z.B. am Arm eines Manipulators befestigt wird, ist über 4 Speichen 5 mit einem massiven Zwischenstück 2 verbunden, das seinerseits den an vier Stützen 6 befestigten Lastaufnehmer 3 trägt. Sämtliche äußeren Kräfte werden auf das von den Speichen 5 gebildete Achsenkreuz bezogen. Die Lastaufnehmerplatte 4 bewirkt lediglich eine Verschiebung des Lastangriffpunktes und eine mechanische Begrenzung der Verformungen, so daß eine Überlastung der Dehnungsmeßstreifen vermieden wird. Die bei Belastung auftretende Verbiegung der Stützen und Speichen wird durch Dehnungsmeßstreifen gemessen.

Eine Normalkraft (in Richtung der Stützen) wird alle vier Speichen gleichmäßig verbiegen, während die Stützen lediglich auf Druck beansprucht werden, eine in der Ebene des Speichenkreuzes angreifende Tangentialkraft wird, genau so wie ein Drehmoment um die zum Speichenkreuz senkrechte Achse, nur von den Dehnungsmeßstreifen auf den Stützen registriert. Ein Drehmoment um die von zwei gegenüberliegenden Speichen gebildete Achse wird die beiden anderen Speichen verbiegen, die Dehnungsmeßstreifen der übrigen Speichen und der Stützen spüren von dieser Beanspruchung nichts. Jede Kraft- bzw. Momentenkomponente wird einen 8-komponentigen Vektor erzeugen, der aus den Spannungen der acht Dehnungsmeßbrücken besteht. Eine einfache Überlegung zeigt, daß diese sechs Vektoren orthogonal zueinander sind, was durch die Messungen weitgehend bestätigt wird. Die Meßanordnung ist, vom theoretischen Standpunkt aus gesehen, optimal.

Kraft - Momentenfühler



II. Die Verformungen des Drehmomentenfühlers, ihre Messung und ihre Umrechnung auf die 6 Komponenten der Kräfte und Momente

(L. Schmieder)

Durch die an dem Lastaufnehmer angreifenden Kräfte und Momente treten in den Speichen und Stützen des Drehmomentenfühlers sowohl Drehungen und Stauchungen als auch Biegespannungen auf (siehe Bild 1).

Das Gerät ist derart gestaltet, daß in drei Belastungsfällen (Normalkräfte und Drehmomente um eine tangentiale Achse) Biegelinien in den Speichen auftreten, in den Stützen jedoch nur Drehungen oder Stauchungen (siehe Bild 1a, b), in den anderen drei Fällen (Tangentialkräfte und Drehmoment um die Normale) Biegelinien in den Stützen und in den Speichen nur Dehnungen und Stauchungen (siehe Bild 1c, d). Die Verformungen werden mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen erfaßt, von denen je zwei an den Ober- und Unterseiten der Speichen und an den Innenseiten (senkrecht zur Kreisperipherie) der Stützen angebracht und in einer Halbbrücke zusammengeschaltet werden. Die Meßstreifen erfassen nur Verbiegungen, nicht aber Dehnungen oder Stauchungen in den Verbindungsstäben. Diese Anordnung empfiehlt sich auf Grund der Tatsache, daß eine auf einen Stab wirkende Querkraft eine etwa zehnmal so große Verformung erzeugt wie eine gleich große Längskraft (siehe Bild 2).

Der Stab möge bei rechteckigem Querschnitt die Breite b und die Dicke h haben, seine Länge sei l . Dann ist die Dehnung ϵ bei Belastung durch eine Querkraft ($E =$ Elastizitätsmodul) gleich

$$\epsilon_{\text{längs}} = \frac{P}{E b h} \quad (1)$$

Die Biegelinie des zweiseitig eingespannten Balkens (siehe Bild 2) ist gegeben durch

$$y = \frac{P x^2 l}{12 B} \left(3 - \frac{2 x}{l} \right) \quad \text{mit} \quad (2)$$

$$B = E \frac{bh^3}{12} \quad \text{Biegesteifigkeit}$$

(2) ist eine kubische Parabel (Lösung der Differentialgleichung $y^{(4)}(x) \equiv 0$) mit Eigenschaften

$$\begin{aligned} y(0) &= y(1) = 0, \\ y'(0) &= y'(1) = 0, \\ y''(0) &= \frac{M}{B} = \frac{Pl}{2B}. \end{aligned} \quad (3)$$

Die durch Biegung erzeugte Dehnung bzw. Stauchung ist aber gegeben durch

$$\varepsilon_{\text{quer}} = y'' \cdot \frac{h}{2}. \quad (4)$$

Die größte Dehnung entsteht an der Einspannstelle ($x = 0$). Somit folgt mit Bezug auf (2), (3) und (4)

$$\varepsilon_{\text{quer}} = \frac{3Pl}{Ebh^2} \quad (5)$$

Diese Gleichung ist wichtig für die Auslegung der Stäbe bei vorgegebenem ε_{max} etwa 1 %. Aus (1) und (5) folgt

$$\varepsilon_{\text{quer}} / \varepsilon_{\text{längs}} = \frac{3l}{h}. \quad (6)$$

Dieses Verhältnis ist bei den üblichen Abmessungen größer als 10.

In der Meßbrücke werden Längenänderungen (und damit Widerstandsänderungen) der Meßstreifen in Spannungsänderungen umgesetzt.

Zwischen den insgesamt 8 elektrischen Spannungsänderungen U_i ($i = 1, 8$) und den sechs Kraft- bzw. Drehmomentkomponenten P_l ($l = 1, 6$) besteht eine lineare Beziehung der Art

$$P_l = C_{li} U_i, \quad (7)$$

(über paarweise auftretende Indices ist automatisch zu summieren). Die 48 Elemente der 6×8 Matrix C_{li} sind nun zu ermitteln. Dies geschieht durch eine größere Zahl von Eichmessungen, bei denen wohl definierte Kräfte und Momente auf das Gerät gegeben und die Ausgangsspannungen der Meßbrücken registriert werden.

Die Auswertung geschieht dann in zwei Schritten:

1.) Ausgehend von der zu (1) reziproken Beziehung

$$\begin{aligned} U_{i\gamma} &= A_{il} P_{l\gamma} \\ \gamma &= 1, N \quad (N - \text{Zahl der Meßungen}) \end{aligned} \quad (8)$$

werden mit Hilfe einer Gaußschen Ausgleichsrechnung die Elemente der 8×6 Matrix A_{il} so festgelegt, daß alle Gleichungen (8) möglichst gut befriedigt werden.

2.) Zu der so bestimmten Matrix A_{il} wird die Pseudoinverse gebildet und diese ist dann gleich der gewünschten Matrix C_{li} .

1. Die Berechnung der Verformungsmatrix A_{il}

Da $N > 6$ (bei dem unten beschriebenen Beispiel wurde $N=17$ gewählt), können nicht alle Gleichungen (8) erfüllt werden. Es werden deshalb die Fehler

$$v_{i\gamma} = U_{i\gamma} - A_{il} P_{l\gamma} \quad (9)$$

gebildet und die A_{il} so gewählt, daß die Fehlerquadratsumme ein Minimum wird:

$$v_{i\gamma} v_{i\gamma} = \text{Minimum} \quad (10)$$

Notwendige Bedingung für das Bestehen von (10) ist das Verschwinden der partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial}{\partial A_{jm}} (v_{i\gamma} v_{i\gamma}) = 0$$

oder nach Ausführen der Rechnung

$$(U_{j\gamma} - A_{jl} P_{l\gamma}) P_{m\gamma} = 0. \quad (11)$$

Nach Einführen der symmetrischen Matrix

$$C_{lm} = P_{l\gamma} P_{m\gamma} = C_{ml} \quad (12)$$

Lautet diese Gleichung

$$A_{jl} G_{lm} = U_{j\gamma} P_{m\gamma} \quad \text{oder}$$
$$A_{il} = G_{lm}^{-1} P_{m\gamma} U_{i\gamma}. \quad (13)$$

Die Probemeßungen müssen vollständig sein, dann sind die 6 Zeilen- bzw. Spaltenvektoren linear unabhängig und die Inverse G_{lm}^{-1} existiert.

2. Die Berechnung der Steifigkeitsmatrix C_{li}

$$U_i = A_{il} P_l \quad (14)$$

In der Form (7) geschieht dies durch Bilden der Pseudoinversen

$$C_{li} = A_{il} H_{lm}^{-1} \quad \text{mit} \quad (15)$$

$$H_{lm} = A_{il} A_{im}. \quad (16)$$

Gleichung (15) folgt aus der Forderung

$$(U_i - A_{il} P_l) (U_i - A_{im} P_m) = \text{Minimum}. \quad (17)$$

Verschwinden der Ableitungen nach P_l liefert

$$(U_i - A_{im}) A_{il} = 0, \quad (18)$$

und nach Einführen von (16) folgt hieraus Gleichung (7) mit der Matrix (15). Wenn Gleichung (14) auf ein Koordinatensystem in dem sechsdimensionalen Raum, der durch die sechs Spaltvektoren der Matrix A_{il} aufgespannt ist, umgeschrieben würde, dann gäbe es eine eindeutige Umkehrung dieses Gleichungssystems. Man kann zeigen, daß die Lösung, die man durch Einsetzen von (15) in (7) erhält, mit dieser eindeutigen

Lösung identisch ist.

1a.) Eine zweite Methode zur Berechnung der Verformungsmatrix A_{i1}

Der Ansatz (10) ist physikalisch insofern unbefriedigend, als die 48 Elemente der Matrix A_{i1} so behandelt werden, als wären sie voneinander unabhängig. Wenn die in den Bildern 1a, d enthaltenen Bedingungen streng erfüllt wären, so müßte die Matrix A_{i1} folgendes Aussehen haben:

$$A_{i1} = \begin{bmatrix} C_1 & & & & & & & & \\ & C_2 & & & & & & & \\ & & C_3 & & & & & & \\ & & & C_4 & & & & & \\ & & & & C_5 & & & & \\ & & & & & C_6 & & & \\ & & & & & & C_7 & & \\ & & & & & & & C_8 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & b & 0 & 0 & 0 & c \\ 0 & 0 & a & 0 & -d & 0 \\ 0 & b & 0 & c & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & -d & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 & 0 & -c \\ 0 & 0 & -a & 0 & -d & 0 \\ a & b & 0 & -c & 0 & 0 \\ -a & 0 & 0 & 0 & -d & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Die Diagonalmatrix enthält die Verstärkungsfaktoren der Meßbrückenverstärker nebst den k-Faktoren der Meßstreifen. Im Idealfall sind alle C_λ ($\lambda = 1,8$) einander gleich. In der nachfolgenden Rechnung werden sie zunächst gleich 1 gesetzt. Die zweite Matrix B enthält vier verschiedene Faktoren.

$$C_\tau \quad (\tau = 1,4) = [a, b, c, d,], \quad (20)$$

welche die Intensität der durch die Lastkomponenten verursachten Verformungen angeben. Jede Zeile der Matrix B ist einem Meßstreifenpaar, jede Spalte ist einer Lastkomponente zugeordnet. Eine Gegenüberstellung mit den Bildern 1a, d macht die Matrix B verständlich. So wird eine Normalkraft in allen vier Speichen gemessen (Spalte 2), das Drehmoment um die Normalachse in allen vier Stützen (Spalte 5), alle anderen Belastungen verursachen meßbare Verformungen in jeweils zwei Stützen oder zwei Speichen. Unter der Voraussetzung, daß alle C_λ gleich eins sind, könnten die Faktoren C_τ direkt gemessen werden, indem man die entsprechenden Halbbrücken zu Vollbrücken zusammen schaltet. (siehe S. G. Edwards, "Dynamic measurement of vehicle front

wheel loads using a special purpose transducer" General Motors Engineering Journal 11, Nr. 4, 1964).

Die Praxis hat gezeigt, daß zumindest bei dem in Zeichnung Abschn. 1 gezeigten Modell ein leichtes Überkoppeln von den Spalten 6 und 4 auf die Spalten 1 und 3 und von den Spalten 3 und 1 auf die Spalten 4 und 6 stattfindet, das heißt:

Die beiden Drehmomente um die tangentialen Achsen verbiegen auch etwas die Stützen und die beiden Tangentialkräfte verbiegen auch etwas die Speichen. Zu der Matrix B in (19) ist daher zu addieren

$$B_2 = \begin{bmatrix} -e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -f \\ e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f \end{bmatrix} \quad (21)$$

mit den beiden zusätzlichen Faktoren

$$C_\tau \quad (\tau = 5,6) = [e, f] \quad (22)$$

Es sind nun wiederum die Faktoren C_λ , C_τ durch eine Ausgleichsrechnung zu bestimmen.

Zunächst wird eine Indexschreibweise für (19) eingeführt.

Differenziert man die Matrix B nach einem der in ihr enthaltenen Faktoren, etwa nach C_1 , so ergibt sich

$$\frac{\partial B_{il}}{\partial C_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & 1 & & & \\ 0 & & 0 & & & \\ 1 & & 0 & & & \\ 0 & & 0 & & & \\ 0 & & -1 & & & \\ 0 & & 0 & & & \\ -1 & & 0 & & & \end{bmatrix} = B_{i1l} \quad (22)$$

Ähnlich sind die anderen Matrixen $B_{i1\sigma}$ ($\sigma = 1,6$) gebaut. Gleichung (1a) läßt sich nunmehr in der Form darstellen (i wird durch $\lambda = 1,8$ ersetzt):

$$A_{\lambda 1} = c_{\lambda} B_{\lambda 1\sigma} c_{\sigma} \quad (23)$$

Das durchgestrichene λ besagt, daß über λ , obwohl es zweimal vorkommt, nicht nummeriert werden darf, im Gegensatz zu σ . Die zu (10) analoge Minimumbedingung lautet mit (23):

$$(U_{\mu\gamma} - c_{\mu} B_{\mu 1\tau} c_{\tau} P_{1\gamma}) B_{\mu m\sigma} c_{\sigma} P_{m\gamma} = 0 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \gamma &= 1, N \\ \sigma, \tau &= 1, 6 \\ l, m &= 1, 6 \end{aligned}$$

Setzt man einmal die Ableitung dieser Gleichung nach c_{μ} gleich null, zum andern die nach c_{τ} , so entstehen die Gleichungssysteme:

$$(U_{\mu\gamma} - c_{\mu} B_{\mu 1\tau} c_{\tau} P_{1\gamma}) B_{\mu m\sigma} c_{\sigma} P_{m\gamma} = 0, \quad (25)$$

$$(U_{\lambda\gamma} - c_{\lambda} B_{\lambda 1\tau} c_{\tau} P_{1\gamma}) c_{\lambda} B_{\lambda m\sigma} P_{m\gamma} = 0. \quad (26)$$

Nach Einführen von (12) und den Größen

$$A1_{\sigma} = U_{\lambda\gamma} c_{\lambda} B_{\lambda m\sigma} P_{m\gamma}, \quad (27)$$

$$K_{\sigma\tau} = c_{\lambda}^2 B_{\lambda 1\tau} B_{\lambda m\sigma} G_{1m}, \quad (28)$$

$$A2_{\mu} = U_{\mu\gamma} B_{\mu m\sigma} c_{\sigma} P_{m\gamma}, \quad (29)$$

$$A3_{\mu} = B_{\mu 1\tau} c_{\tau} B_{\mu m\sigma} c_{\sigma} G_{1m} \quad (30)$$

lassen sich die Gleichungen (25) nach den c_{μ} und die Gleichungen (26) nach den c_{τ} auflösen:

$$c_{\tau} = K_{\tau\sigma}^{-1} A1_{\sigma} \quad (31)$$

$$c_{\mu} = A2_{\mu} / A3_{\mu} \quad (32)$$

Dies ist ein nichtlineares Gleichungssystem in den Unbekannten c_{τ} und c_{μ} , denn in der rechten Seite von (31) sind die c_{μ} und in der rechten Seite von (32) sind die c_{σ} enthalten. Die iterative Auflösung bereitet jedoch keinerlei Mühe. Man setzt erst alle $c_{\mu} = 1$, berechnet dann die c_{τ} nach (31), anschließend die neun c_{μ} nach (32), dann wieder neue c_{τ} nach (31) usw.

Der 2. Schritt geschieht wieder wie oben beschrieben.

3. Versuchsergebnisse

Das Versuchsmodell wurde 17 verschiedenen Belastungen unterworfen. In nachfolgender Tabelle 1 sind die Lastkomponenten, Länge und Richtung des angreifenden Hebelarmes und das hieraus folgende Moment

$$M = r \times P \quad (33)$$

zusammengestellt:

Tabelle 1: Lasten für die Eichmessungen

Nr.	P1 kp	P2 kp	P3 kp	r1 dm	r2 dm	r3 dm	M1 kp·dm	M2 kp·dm	M3 kp·dm
1		2,5							
2			2,5						
3			-2,5						
4	2,5								
5	-2,5								
6	1,25				-1,31				1,6375
7			1,25		-1,31		-1,6375		
8	-1,25				-1,31				-1,6375
9			-1,25		-1,31		1,6375		
10	1,25				-0,20	0,97		1,2125	0,25
11	1,25				-0,20	-0,97		-1,2125	0,25
12			1,25	0,97	-0,20		-0,25	-1,2125	
13			1,25	-0,97	-0,20		-0,25	1,2125	
14		1,25		0,97	-0,20				1,2125
15		1,25		-0,97	-0,20				-1,2125
16		1,25			-0,20	0,97	-1,2125		
17		1,25			-0,20	-0,97	1,2125		

Bei Durchführung der Messungen ist darauf zu achten, daß die Gleichungen (7) für die Differenzen gelten:

$$(P_1 - P_1^0) = C_{1i} (U_i - U_i^0) \quad (34)$$

Bei der Messung ist demnach erst die Last P_1 aufzubringen, anschließend sind die acht zugehörigen Spannungen U_i zu messen, dann ist die Last wegzunehmen, die acht zugehörigen Spannungen U_i^0 sind zu messen und die Differenzen $U_i - U_i^0$ zu registrieren. In diesem Fall wurde $P_1 = 0$ gesetzt. Dies ist bei einer Einzelmessung immer erlaubt. Beim Einbau z. B. in den Arm eines Industrieroboters ist jedoch zu beachten, daß die tote Last bei jeder Änderung der Orientierung in eine neue Richtung (bezüglich des handeigenen Koordinatensystems) weist. Dies muß bei jeder Änderung (Bestimmung der Spannungen U_i bei Null-Last) beachtet werden. Keinesfalls ist es erlaubt, die Eichung der Spannung wegzulassen und nur die Differenz $P_1 - P_1^0$ zu bilden. Man überlege sich dies an dem Beispiel einer eindimensionalen Waage:

$$P - P_0 = C (U - U_0). \quad (35)$$

Die Ergebnisse der nach Tabelle 1 durchgeführten Messungen wurden auf Lochkarten gestanzt (135 drei- bis vierstellige Zahlen). Das nach dem oben angegebenen Formalismus entwickelte Fortran-Programm berechnet hieraus zunächst nach Abschnitt 1 die Matrix A_{i1} , bildet die Meßfehler $v_{i\gamma}$ nach Gleichung (9), berechnet dann nach Abschnitt 2 die Matrix C_{1i} und berechnet die Fehler der aus den Messungen berechneten Kräfte

$$v_{i\gamma} = P_{1\gamma} - C_{1i} U_{i\gamma}. \quad (36)$$

Anschließend berechnet das Programm erneut die Matrix A_{i1} nach Abschnitt 1a und anschließend die Fehler der Messungen und die berechneten Kräfte. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammen gefaßt:

Tabelle 2 Fehler der Meßergebnisse

	Mittl. und max. Fehler der Messungen m V	Mittl. und max Fehler der Kräfte kp	Mittl. und max. Fehler der Momente kp x cm
Methode 1	32 (1,1 %)	0,063 (2,5 %)	0,022 (1,3 %)
	104 (3,7 %)	0,215 (8,6 %)	0,057 (3,3 %)
Methode 1a	34 (1,2 %)	0,086 (3,4 %)	0,023 (1,4 %)
	126 (4,5 %)	0,347 (13,9 %)	0,059 (3,6 %)
Methode 1a	45 (1,6 %)	0,315 (12,6 %)	0,025 (1,5 %)
nach $\tau=1,4$	221 (8,0 %)	0,689 (27,6 %)	0,063 (3,8 %)

$$\tau = 1,6 \quad c_{\lambda} = [0,96 \quad 1,02 \quad 0,96 \quad 1,00 \quad 1,00 \quad 1,02 \quad 1,07 \quad 0,96]$$

$$c_{\tau} = [78,7 \quad 125 \quad 1610 \quad 844 \quad 17,3 \quad 38,9]$$

Überkoppeln von c auf e (Tangentialmomente auf Tangentialkräfte)

$$= \frac{17,3}{1610} = 1 \%$$

Überkoppeln von a auf f (Tangentialkräfte auf Tangentialmomente)

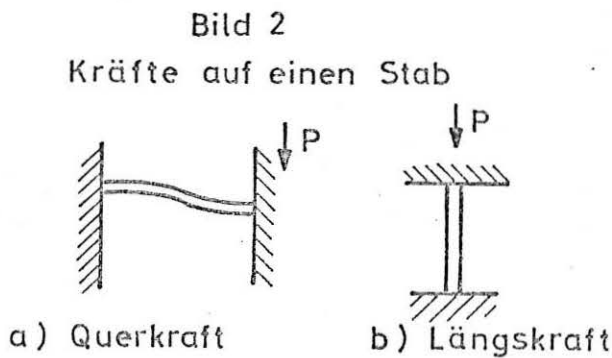
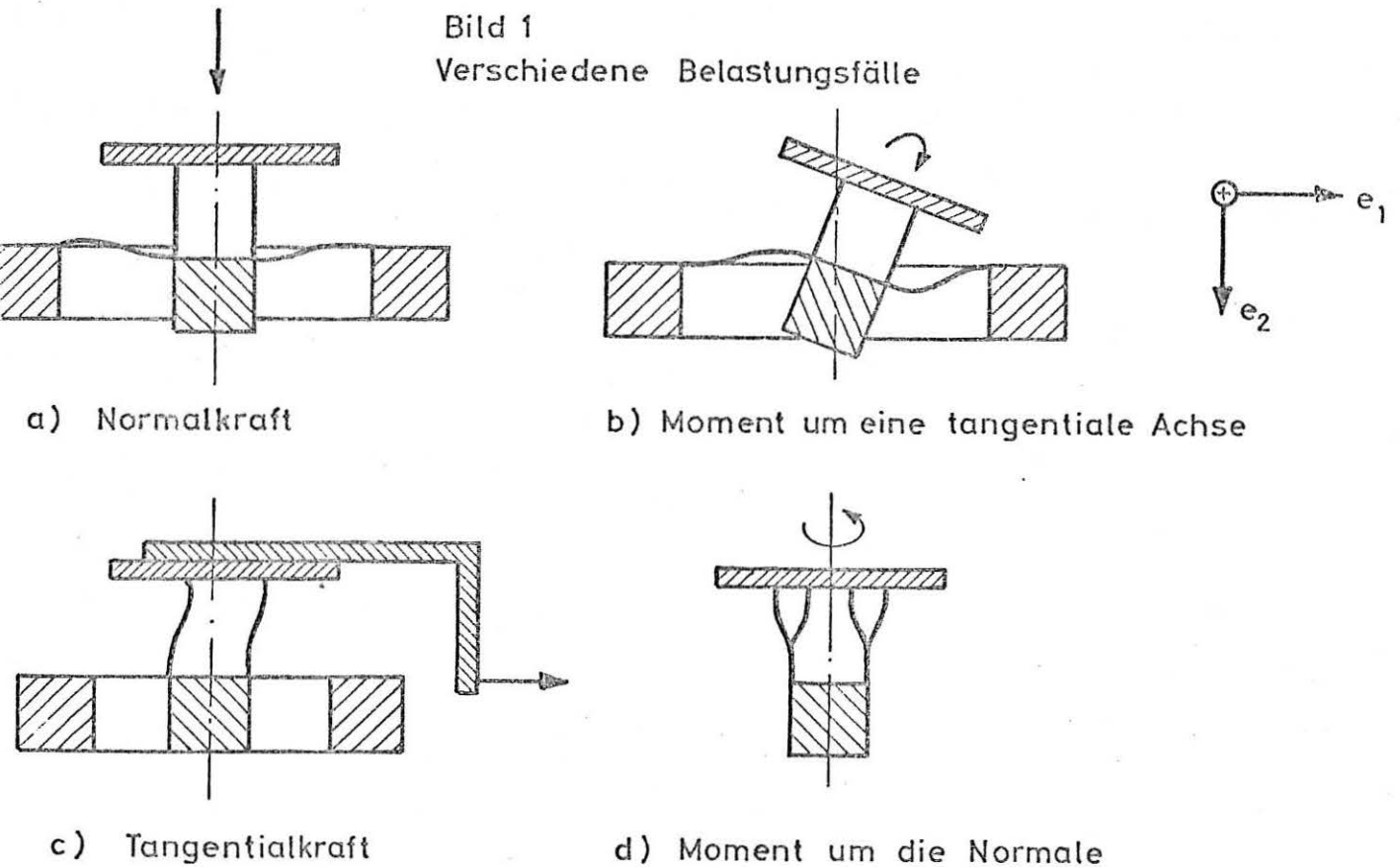
$$= \frac{38,9}{78,7} = 49 \%$$

Wie zu erwarten, liefert Methode 1 (alle A_{il} voneinander unabhängig) die besten Ergebnisse. Man muß jedoch bedenken, daß die Matrix A_{il} stark von der Auswahl der Probelasten abhängt. je mehr solche Messungen vorliegen und je besser sie über den sechsdimensionalen Raum der P_1 verteilt sind, um so zuverlässiger sind die Ergebnisse.

Die Methode 1a hingegen ist physikalisch wohl begründet und deckt die noch vorhandenen Schwächen der Konstruktion auf. So könnte das Überkoppeln von Tangentialmomenten auf Tangentialkräfte und umgekehrt dadurch vermindert werden, (siehe Bild, Abschnitt 1) daß die Stützen weiter auseinander gerückt werden. Bei der vorliegenden Konstruktion war dies aus Platz-

gründen nicht möglich. Im übrigen genügen die hier vorliegenden Genauigkeiten den Ansprüchen an Tastfühler für Roboter vollständig.

Die Auswertung der Meßergebnisse nach Methode 1a mit $\tau = 1,4$ sollte zeigen, welchen bedeutenden Vorteil die digitale rechnerische Auswertung der Messungen gegenüber der Analogverarbeitung (durch entsprechende Schaltung der Meßbrücken) bietet. Zum Schluß wird darauf hingewiesen, daß bei Gaußscher Verteilung der maximale Fehler (Ausreißer) etwa 3mal so groß sein sollte wie der mittlere Fehler, was bei den hier vorliegenden Meßergebnissen einigermaßen erfüllt ist.



III. Die Wirkungsweise des Brückenverstärkers

(F. Mettin)

1. Einleitung

Für die Kraftmessung an den Greifwerkzeugen von rechnergesteuerten Manipulatoren wurde eine Meßanordnung entwickelt, die mit DMS-Brücken arbeitet. Es werden an je 4 Stellen Druck- und Torsionskräfte gemessen, so daß man insgesamt 8 Meßsignale erhält. Jedes dieser Signale muß in einem Verstärker so aufbereitet werden, daß es der direkten Messung und der Auswertung über einen Prozeßrechner zugänglich ist.

Randbedingungen waren: hinreichende Genauigkeit, möglichst kompakter Aufbau und niedrige Kosten bei der Serienfertigung.

2. Aufbau des Verstärkers

Ohne auf die Grundlagen der Verstärkertechnik einzugehen, wird hier kurz der Aufbau des Verstärkers erläutert.

Jede Meßstelle besteht aus 2 Dehnungsmeßstreifen (DMS), die als Halbbrücke geschaltet sind (s. Fig. 1). Geht man von einer max. zulässigen Längenänderung von 1 % aus, so ergibt sich über den materialspezifischen K-Faktor von 2,1 eine Widerstandsänderung von ca. 2 % pro DMS.

Bei 2 DMS kann man also eine max. Widerstandsänderung von 4 % erhalten. Für die Spannungsänderung gelten die gleichen Bedingungen, so daß theoretisch bei einer Speisespannung von 2,5 V mit einem Signal zwischen 0,0 und 100 mV zu rechnen ist. Die zulässige Dehnung von 1 % ist allerdings bei dem gewählten Werkstoff (DURAL) zu hoch angesetzt, weil es in diesem Bereich schon zu bleibenden Materialverformungen kommt. Bei der gegebenen Meßanordnung liegt die tatsächliche Dehnung bei 0,01 %. Die maximale Spannungsdifferenz ist somit

nicht größer als 1 bis 2 mV. Diese Signalspannung zwischen 0 und 1000 μ V muß so verstärkt werden, daß sich eine Ausgangsspannung im Volt-Bereich ergibt. Deshalb wird ein Verstärkungsfaktor von 1 : 1000 gewählt; das bedingt einen mehrstufigen Aufbau des Verstärkers.

Die Differenzspannung wird zwischen DMS-Halbbrücke und Ergänzungshalbbrücke auf der Verstärkerplatine abgegriffen und auf die Eingänge des 1. differenziellen Verstärkers gegeben (s. Fig. 2). Die Spannung wird um den Faktor 10 verstärkt, Differenzen, die sich aus der jeweiligen DMS-Charakteristik ergeben, werden ausgeglichen (Balance). Der verwendete Baustein ist ein 2-fach Operationsverstärker (OP 10) der vom Hersteller speziell für diese Anwendung konzipiert wurde. Das Signal wird in der 2. Stufe auf einen dritten Operationsverstärker (OP 01) gegeben, der nach einer Übersetzung von 1 : 100 die Ausgangsspannung liefert. Auch hier besteht die Möglichkeit des Nullabgleichs über ein Potentiometer.

Neben diesem 2-stufigen Differenzverstärker ist auf derselben Platine eine stabilisierte Spannungsversorgung angeordnet. In der vorliegenden Beschaltung liefert der mit 5 VDC gespeiste Spannungsregler eine stabilisierte Brückenspeisespannung von 2,5 V.

Für lange Entfernungen zwischen DMS-Brücke und Verstärkerplatine sind Sense-Leitungen vorgesehen, die die Versorgungsspannung direkt an dem Aufnehmer abtasten und ein Nachführen der Speisespannung bewirken. Der Spannungsregler (LAS 2000T) enthält zusätzlich die Möglichkeit, für Test und Abgleich der Brücke die Speisespannung abzuschalten (Schalter S1 auf der Platine).

3. Verstärker- und Brückenabgleich

Jede DMS-Brücke hat - auch wenn die Halbbrücke aus vorausgewählten Paaren besteht - eine Widerstandsabweichung vom Sollwert, die sich wegen der niedrigen Ansprechschwelle des Verstärkers als Nullpunktabweichung der Ausgangsspannung auswirkt.

Der Abgleichvorgang besteht aus 2 Teilen. 1. dem Abgleich des Verstärkers für beide Stufen und 2. der anschließenden Anpassung an

die individuelle DMS-Brücke. Diese Anpassung muß bei jedem Wechsel der Brücke erneut erfolgen. Im folgenden ist für beide Vorgänge eine tabellarische Anleitung gegeben (s. dazu Schaltbild auf Fig.2).

3.1. Abgleich des Verstärkers ohne DMS-Brücke

3.1.1. Potentiometer R_{V1} , R_{V2} , R_{V3} , R_{V4} auf Mittelstellung drehen (1/2 von 15 Umdrehungen).

3.2.1. ± 15 V- an Klemmen 1, 2 und 12 anlegen.

Bem.: 5 V-Brückenspannung werden zunächst nicht benötigt.

3.1.3. Schalter S 1 in Stellung "1"; Brückeneingang ist kurzgeschlossen, d.h. an ICA/ICB liegt keine Spannungsdifferenz.

3.1.4. Voltmeter an TP1 und Kl. 12 anschließen. (R5/R8)

3.1.5. R_{V1} verstellen, bis U an TP1 = 0,0 V. ($\pm 0,1$ mV)

3.1.6. Voltmeter an TP2 und Kl. 12 anschließen. (R7/R9)

3.1.7. R_{V2} verstellen, bis U an TP2 = 0,0 V. ($\pm 0,1$ mV)

3.1.8. Voltmeter an TP3 und Kl. 12 anschließen. (ICC6/R10)

3.1.9. R_{V3} verstellen, bis U an TP3 = 0,0 V. ($\pm 1,0$ mV)

3.1.10. Schalter S1 zurück in Stellung "2"; Brücke ist frei.

3.1.11. $+ 5$ V- an Klemme 11 anlegen.

3.1.12. Voltmeter an TP4 (oder Kl. 3) und Kl. 12 anschließen, Spannung sollte bei ca. 2,5 V liegen.

3.2. Anpassung des Verstärkers mit DMS-Brücke

Bem.: Verstärker muß zunächst nach Teil I abgeglichen sein!

3.2.1. Brücke an den Klemmen 3, 4, 5 anschließen (2 x 350 Ω - Halbbrücke).

3.2.2. Versorgungsspannungen ± 15 V- und $+ 5$ V- anlegen.

3.2.3. Voltmeter an Klemmen 8 und 9 anschließen.

3.2.4. Nullabgleich:

- Bei starker Brückenverstimmung an TP1 oder TP2 messen, welcher Zweig für Verstimmung verantwortlich ist.
Abgleich über R_{V1} oder R_{V2} .
Spannung liegt dicht über oder unter der halben Brückenspeisespannung um ca. 1,25 V.
- Bei geringer Verstimmung oder Restverstimmung aus vorigem Punkt: Nullabgleich über R_{V3} (messen an Kl. 8 und 9) Restspannung ca. 10 mV ist zulässig.

3.2.5. Durch Beanspruchung der Brücke feststellen, ob Ausgangsspannung sich für beide Wirkungsrichtungen ändert. Der Verstärker ist damit speziell für die angeschlossene Brücke eingestellt.

4. Eichung der DMS-Brücke

Die Widerstandsänderung einer DMS-Brücke ist von einer Reihe von Faktoren abhängig, die hier nur zum Teil aufgezählt werden, um deutlich zu machen, daß eine sinnvolle Messung erst nach einer Eichung von Brücke und Verstärker möglich ist.

- Material des Werkstücks (DMS werden für spezielle Materialeigenschaften hergestellt).
- Anbringungsort und Materialstärke
- Sorgfalt bei der Aufbringung (Kleben) der DMS
- Material des DMS

- Temperaturbereich (DMS sind für bestimmte Temperaturbereiche kompensiert).

Die Eichung erfolgt mit definierten Gewichten oder Kräften, mit denen das Werkstück in verschiedenen Richtungen belastet wird. Das Ergebnis ist eine Eichkurve, die den Zusammenhang zwischen Belastung und elektrischem Ausgangssignal darstellt.

5. Zusammenfassung

Beim Aufbau des Verstärkers wurde u.a. auf geringe Abmessungen, universelle Verwendbarkeit (wechselnde Beschaltung, Abstimmbarkheit, kurze/ lange Leitungen und direkt verwendbares Ausgangssignal), Verwendung von temperaturstabilen Bauteilen mit niedrigen Toleranzen und Unempfindlichkeit gegen falsche Beschaltung geachtet.

Somit ist der Verstärker auch für andere Messungen geeignet, bei denen es auf die genaue und zuverlässige Erfassung eines Meßsignals im μ -Volt- oder m-Volt-Bereich ankommt.

Fig. 3 zeigt die Verstärkerplatine und Fig. 4 als Anwendungsbeispiel eine Vorrichtung für Kraftmessungen in vertikaler und tangentialer Richtung. Diese Vorrichtung findet bei der Nachbildung des Tastsinns für Manipulatoren Anwendung.

Abmessung einer Verstärkerplatine: $50 \times 100 \text{ mm}^2$

DMS - BRÜCKE

DMS - VERSTÄRKER

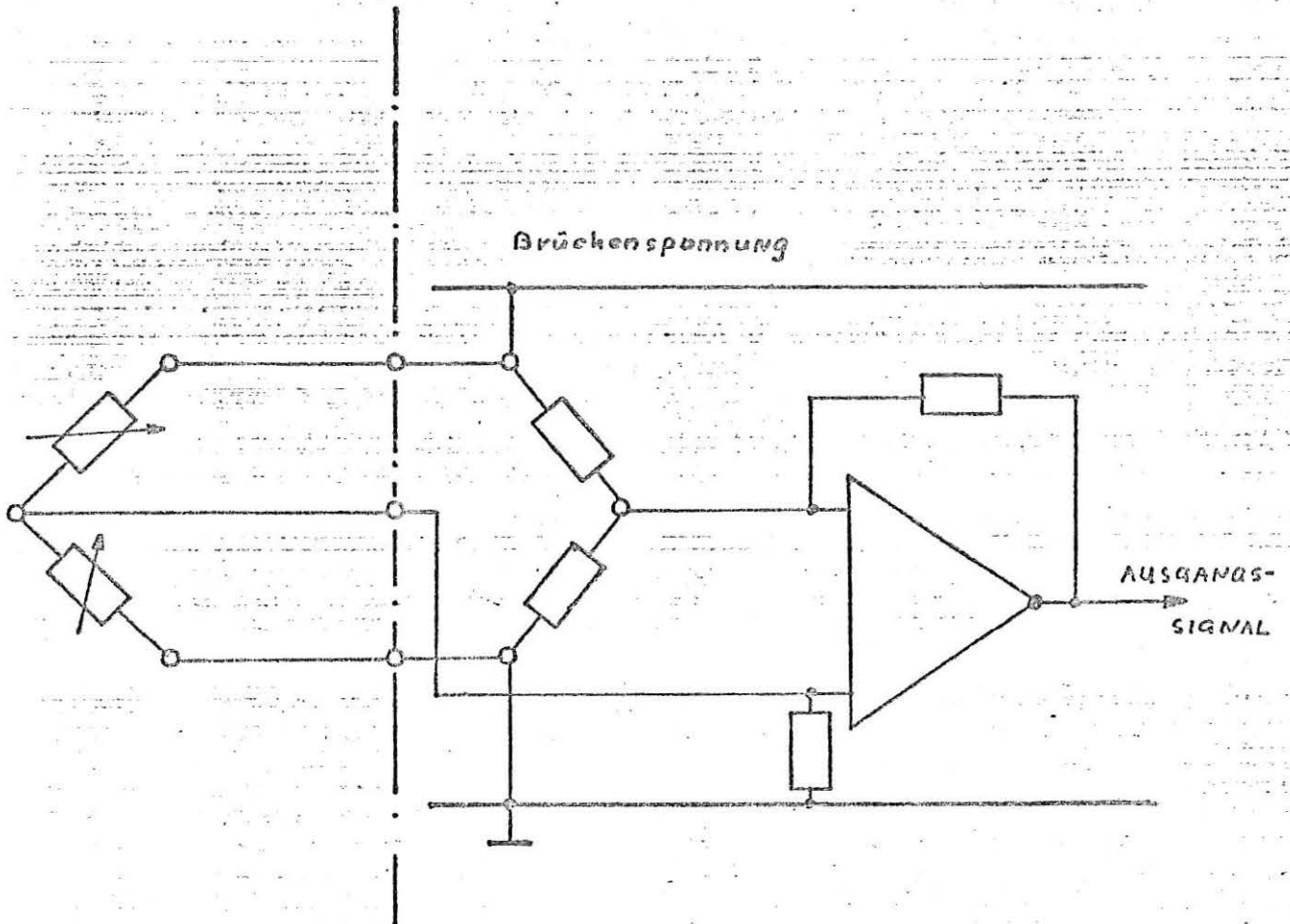


FIG. 1

Bemerkung:

Bearbeitet:

Vln

Datum:

Nov. 77.

Bericht-Nr.:

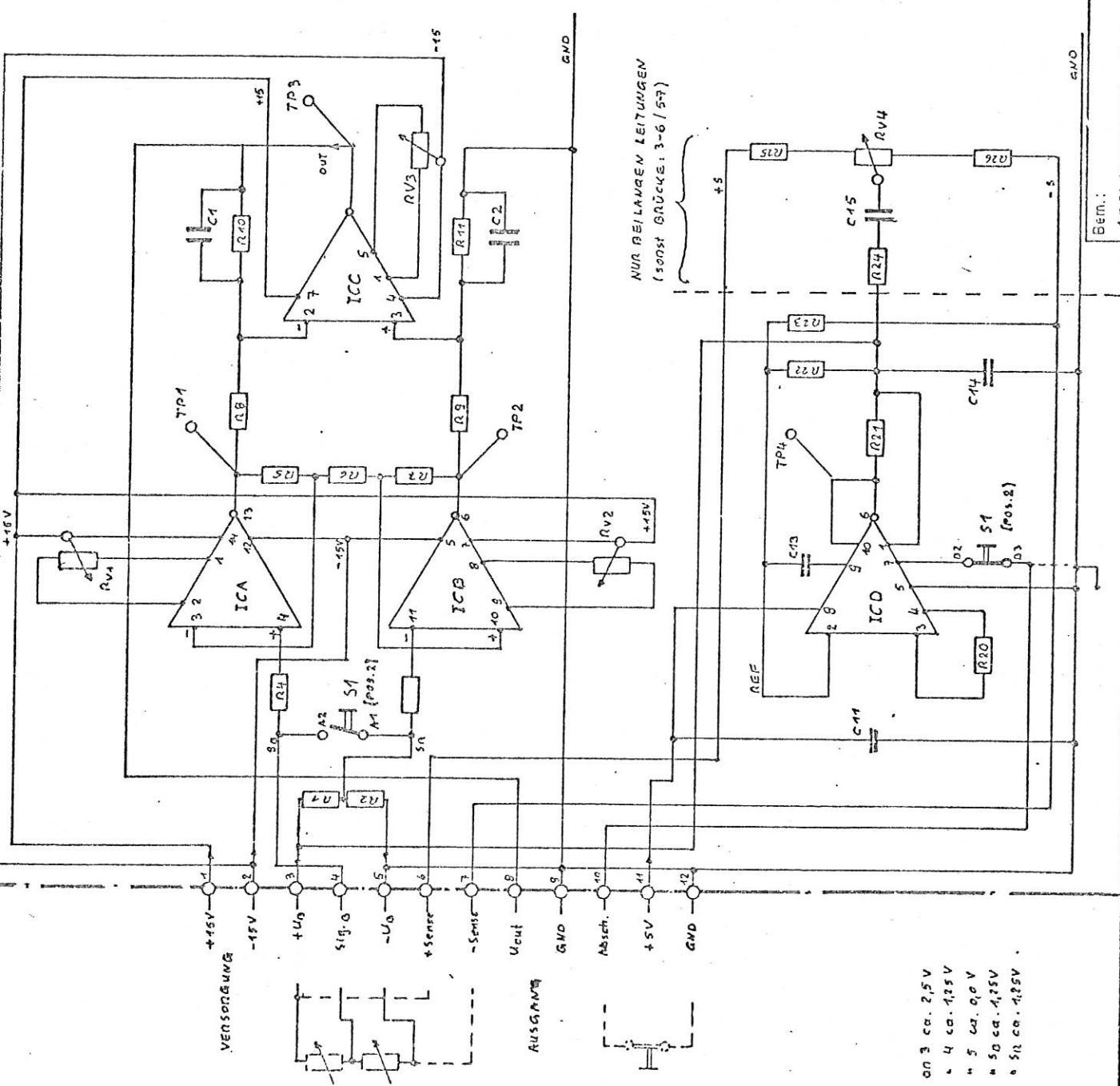
- RV1 } DRÜCKENABGLEICH
- RV2 }
- RV3 VERSTÄRKERABGLEICH
- S1 KURZSCHLUSSSCHALTER (bei Poti-Abgleich)

VERSTÄRKER

- RV4 SPANNUNGSABGLEICH

SPANNUNGSVERSORGUNG

DMS-VERSTÄRKER



NUR BEI LAUREN LEITUNGEN
(500Ω BRÜCKE: 3-6 / 5-7)

- 01 ca. 2,5V
- 04 ca. 1,25V
- 05 ca. 0,6V
- 06 ca. 1,25V
- 08 ca. 1,25V

Beim: <u>ABGLEICHANWEISUNG BEACHTEN!</u>	Bearb.: <u>W. Müller</u>	Datum: <u>18.07.77</u>	FIG. 2
M 2-73-N			

IV. Abschätzung der Kosten
Kostenaufstellung für die mechanische
Fertigung des Kraftmomentenfühlers

Lohnkosten (10 Stunden Fräsen und Drehen)	234,-- DM
Material	3,-- DM
Allgemeinkosten (Maschinenbenützung)	110,-- DM
	<hr/>
Gesamtkosten	347,-- DM =====

Preisauflstellung für den elektrischen Teil des Kraft-Momenten
Fühlers

Dehnungsmeßstreifen 16 x 7 148,-- DM
und Kleber

Stecker (25 pol) + Leitungen 50,-- DM

Verbindungskabel 25 pol. je lfd. m 30,-- DM

8 Verstärker

Platine 50 X 100 je 20,-- 160,-- DM

Stecker je 30,-- 240,-- DM

Banteile verst. + sv je 200,-- 1600,-- DM

Stromversorgung + 15 VDC, 9 5 VDC 380,-- DM

Gehäuse 200,-- DM

Anschlußstecker + Verkabelung 200,-- DM

Netzanschluß 20,-- DM

3028,-- DM

=====

Berechnungsbasis 10 Stück

100 Stück - 15 % 2600,-- DM

=====

Arbeitszeit für Kraft-Momenten-Fühler elektrischer Teil

Platine Bestücken	je 4 Stunden	Techniker	32 Stunden
DMS Kleben	8 Stunden	Techniker	8 Stunden
DMS-Anschlüsse	8 Stunden	Techniker	8 Stunden
			<hr/>
			80 Stunden
			=====

Die Kosten für die Arbeitszeit sind zu den Materialkosten hinzu zu rechnen.