

Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. (DFL)

DFL - Bericht Nr. 0156

R. Ulken

Aufbau einer Steuer- und Messeinrichtung für eine Überschall-Versuchsstrecke

Der Bericht umfasst:

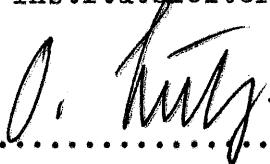
20 Seiten Text

7 Abbildungen


Braunschweig, im Juli 1962

Institut für Strahlantriebe der DFL

Der Institutsleiter:


.....
(Prof. Dr.-Ing. O. Lutz)

Der Bearbeiter:


.....
(Dipl.-Ing. R. Ulken)

I n h a l t :

1. Einführung
2. Versuchsaufgabe und Versuchsanlage
3. Anforderungen an die Steuer- und Meßeinrichtung
4. Steuereinrichtung
 - 4.1 Verständigungseinrichtung
 - 4.2 Kraftstoffanlage
 - 4.3 Elektrische Steuereinrichtung
5. Meßeinrichtung
 - 5.1 Durchflußmessung
 - 5.2 Temperaturmessung
 - 5.3 Druckmessung
 - 5.4 Schreibende und anzeigende Meßinstrumente
6. Erweiterungsmöglichkeiten der Steuer- und Meßeinrichtung
7. Literatur
8. Anhang: Bilder 1 bis 7

1. Einführung

Die Durchführung von thermogasdynamischen Untersuchungen in Gasstrahlen hoher Geschwindigkeit und hoher Temperatur erfordert einen erheblichen Aufwand an Meßeinrichtungen, die aber bei gleichartigen Versuchen stets wieder verwendet werden sollten und deshalb nicht zu sehr spezialisiert werden dürfen. Andererseits muß jedoch die Meßeinrichtung auch auf die besonderen Aufgaben eines speziellen Versuches abgestellt werden, um schnell und sicher zu Ergebnissen zu gelangen. Daneben erfordert jede Versuchsaufgabe noch die Lösung bestimmter Steuerprobleme, die die Durchführung des Versuches sicherstellen sollen und mit der eigentlichen Meßaufgabe nichts zu tun haben.

Die für diese unterschiedlichen Aufgaben erforderlichen Steuer- und Meßeinrichtungen werden zweckmäßigerweise in einem Steuer- und Meßpult zusammengefaßt, das aber trotz einer gewissen Spezialisierung auf eine bestimmte Versuchsaufgabe vielseitig einsetzbar und an verschiedene andere Aufgaben anpaßbar sein muß.

Im folgenden sollen die Entwicklung und der Aufbau eines kombinierten Steuer- und Meßpultes beschrieben werden, das für eine bestimmte Versuchsaufgabe entwickelt wurde, und bei dem versucht wurde, eine möglichst vielseitige Anwendbarkeit zu erzielen. Der nachstehende Bericht soll dem Versuchsleiter gleichzeitig eine Anweisung in die Hand geben, wie er die Steuer- und Meßeinrichtungen am zweckmäßigsten einsetzt. Aus diesem Grunde wird auch der Aufbau der verschiedenen Meßeinrichtungen für Druck, Temperatur, Menge usw. ausführlicher geschildert, als es für den bestimmten Versuchszweck erforderlich wäre.

Nach kurzer Erläuterung der Versuchsaufgabe und des Versuchsfeldes wird im einzelnen auf den Aufbau des Steuer- und Meßpultes und die benutzten Meßgeräte eingegangen.

2. Versuchsaufgabe und Versuchsanlage

In einem gemeinsamen Forschungsprogramm soll die Kraftstoffzufuhr und -aufbereitung in einer Überschallströmung mit nachfolgender Verbrennung untersucht werden. Dafür wurden zwei Versuchseinrichtungen entwickelt:

Im ersten Fall wird eine Brennkammer mit großem Luftüberschuß betrieben, deren heiße Abgase durch eine Beruhigungsstrecke in eine Lavaldüse strömen, in der sie auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigt werden. Bei der anderen Anordnung werden die heißen Abgase der Brennkammer in einen Lufterhitzer und von dort ins Freie geleitet. Im Gegenstromverfahren strömt Frischluft durch diesen Lufterhitzer, wird auf eine hohe Temperatur aufgeheizt und expandiert in einer Lavaldüse. Eine genaue Beschreibung der Anlagen ist in [1] enthalten. In die Überschallströmung hinter der Lavaldüse soll Kraftstoff eingebracht werden, dessen Aufbereitung bei verschiedenen Arten der Zuführung untersucht werden soll. Zur Erzeugung der Druckluft zum Betrieb der Brennkammer und des Lufterhitzers stehen im Endausbau der Versuchsanlage acht Verdichter zur Verfügung, die bei einer installierten Leistung von 1500 kW Liefermengen von 7,34 kg/s bis 2,12 kg/s bei Drücken zwischen 2,5 und 15 ata zur Verfügung stellen. Die Temperatur der Druckluft hängt von dem Betrieb der Kühler ab und kann zwischen 10°C und 160°C eingestellt werden. Die Verdichter stehen innerhalb eines Maschinenhauses und werden je durch einen Elektromotor angetrieben. Die Steuerung der Motoren und Verdichter erfolgt von einem Steuerpult aus, das in unmittelbarer Nähe der Maschinenanlage in einem schallschluckenden Raum vorgesehen ist.

Die Druckluftleitungen enden in zwei an einer Längsseite des Maschinenhauses gelegenen, überdachten Versuchsfeldern zwischen je 2 Meßräumen (Bild 1). Aus Gründen der Sicherheit und des Geräuschschutzes kann sich während der Versuche niemand in dem Versuchsfeld aufhalten. Die Anlage muß also vor dem Versuch so weit hergerichtet werden, daß sich bei der Durchführung der Versuche das Personal im Meßraum aufhalten und alle Steuer- und

Meßaufgaben von hier aus ausführen kann. Der Meßraum selbst hat auf der Seite des Versuchsfeldes eine starke Betonwand mit einem Beobachtungsfenster aus Panzerglas und ist innen vollständig mit einer schallschluckenden Isolierschicht ausgekleidet. In diesem Raum befindet sich das Pult mit der Steuer- und Meßeinrichtung. In dem Versuchsfeld selbst stehen die gesamte Versuchseinrichtung mit den Meßwertgebern sowie zwei Kraftstoff-Einspritzpumpen mit ihren explosionsgeschützten Antriebsmotoren, von denen die eine zum Betrieb der Brennkammer und die andere für die Kraftstoffzufuhr zur Überschallstrecke bestimmt ist. Die Meßumformer für die Meßwertgeber sind auf zwei Plattformwagen aufgebaut und können so an die günstigste Stelle des Versuchsfeldes gefahren werden. Dadurch ergeben sich kurze Wirkdruckleitungen und kleine Ansprechzeiten.

3. Anforderungen an die Steuer- und Meßeinrichtung

Da das Pult vom Versuchsfeld räumlich getrennt ist, muß die Versuchsanlage auf elektrischem Wege vom Pult aus bedient werden. Weiterhin sind physikalische Meßwerte in elektrische Größen umzuwandeln und zu den Meßinstrumenten zu leiten. Auch eine Verständigungsmöglichkeit zwischen dem Personal im Meßraum und dem Steuerpult der Verdichteranlage muß geschaffen werden.

Die zu messenden physikalischen Werte sind Durchflußmengen, Drücke und Temperaturen. Die Art der Geber und Meßinstrumente hängt von der Größe dieser Werte und von den zu messenden Medien ab. Die Meßgenauigkeit kann in einigen Fällen durch Nullpunktunterdrückung erhöht werden.

Das kombinierte Meß- und Steuerpult ist an der dem Versuchsfeld zugewandten Seite des Meßraumes angeordnet und nimmt sämtliche Meßgeräte und Regelorgane, die zum Betrieb der Anlage erforderlich sind, auf. Das Pult besitzt einen vor dem Fenster stehenden Tischteil, auf dessen eine Seite ein gasdicht ge-

schlossenes Gehäuse zur Aufnahme der Regel- und Meßorgane für die Kraftstoffe aufgesetzt ist, während sich auf der anderen Seite ein Schrank zum Einbau von Registriergeräten anschließt, der in der Höhe der Tischplatte einen Absatz besitzt. Es bleiben auf dem Absatz des Schrankes und auf dem Tisch genügend waagerechte Flächen frei, um bewegliche Instrumente und absichtlich nicht fest eingebaute Geräte ablegen zu können. Auf der Rückseite des Meßraumes hängt eine Tafel mit U-Rohren, die mit Wasser oder Quecksilber gefüllt und als Druck- oder Differenzdruckmesser angeschlossen werden.

4. Steuereinrichtung

4.1. Verständigungseinrichtung

Von jedem Meßraum aus besteht eine Telefonverbindung zum Steuerpult der Verdichteranlage. Für kurze, wiederkehrende Befehle aber und für eine Werteübermittlung wird eine Drehmelderanlage benutzt, da im allgemeinen während des Versuches wegen des erhöhten Lärmpegels eine telefonische Verständigung erschwert ist. Jedes Drehmelderpaar besteht aus einem Geber und einem Empfänger, die innen völlig identisch und dem Prinzip nach Elektromotoren sind. Jedes Gerät hat als Stator drei um 120° versetzte, im Stern geschaltete Wicklungen und als Rotor eine Wicklung, an die Netzspannung gelegt wird. Die gleichen Klemmen von Geber und Empfänger sind miteinander verbunden. Je nach Winkelstellung des Geberrotors wird in der Statorwicklung eine unsymmetrische Spannung induziert, die einen Strom und somit einen gleichen Spannungsabfall in der Statorwicklung des Empfängers zur Folge hat. Dadurch stellt sich der Rotor des Empfängers in die gleiche Winkelstellung wie der des Gebers. Durch eine geeignete Wahl der zusammengehörigen Skalen lassen sich so kurze Befehle oder Zahlenwerte übermitteln, Geber bzw. Empfänger sind zu je 2 Geräten in einem Gehäuse zusammengefaßt, lassen sich an beliebigen Orten ein-

setzen und gegeneinander austauschen.

4.2. Kraftstoffanlage

In etwa 50 m Entfernung von der Maschinenhalle liegt ein Kraftstofftank, der ungefähr 12.000 l Inhalt hat. Eine Kreiselpumpe fördert den Kraftstoff vom Tank in eine unterirdische Leitung, die an den Meßräumen und Versuchsfeldern entlangläuft und an letzteren je eine Abzweigung aufweist, in der ein Magnetventil vorgesehen ist. Die Kreiselpumpe hat eine Rücklaufleitung, die den Druck- und Saugstutzen verbindet. In diese Leitung ist ein Überdruckventil eingebaut, das zwischen 0 und 1 atü einstellbar ist. Damit läßt sich an den Magnetventilen und an der Saugseite der Einspritzpumpen im Versuchsfeld immer ein Zulaufdruck aufrechterhalten. Von den Magnetventilen führen Leitungen in den Meßraum zu einem Kraftstoffpult, das die erforderlichen Regelorgane und Meßgeräte zum Betrieb der Einspritzpumpen enthält.

Das Pult ist für zwei verschiedene Einspritzsysteme ausgelegt (Bild 2). Jedes System hat seine eigene Förder-, Meß- und Regeleinrichtung. Der Kraftstoff für die Brennkammer wird von einer Schraubenspindelpumpe über ein Magnetventil angesaugt und über einen Rotamesser und ein Einspritzventil zur Düse der Brennkammer gedrückt. Der Rotamesser ist ein Schwimmermesser in druckfester Ausführung (100 atü) mit magnetischer Fernanzeige der Schwimmerstellung. Die Pumpe liefert bei einem Einspritzdruck von 35 atü etwa 4 l/min Kraftstoff. Die Druck- und Saugleitung sind über ein Regelventil miteinander verbunden, so daß sich je nach Stellung des Einspritz- und Regelventiles der Förderstrom in den Einspritz- und Rücklaufstrom teilt. Bei geschlossenem Einspritzventil muß das Regelventil immer geöffnet sein, damit der Druck nicht zu plötzlich steigt. Der Einspritzdruck wird vor der Einspritzdüse mit Manometern gemessen, die einzeln abzusperrbar sind. Die Absperrventile lassen sich auch als Drosseln benutzen, um auftretende Druckschwankungen zu glätten und eine verhältnismäßig gute Anzeige des mittleren Druckes zu erhalten.

Die zweite Pumpe, die den Kraftstoff für die Meßstrecke liefert, ist eine hydraulisch regelbare Axialkolbenpumpe. Sie liefert 60 l/min Kraftstoff bei einem Einspritzdruck bis zu 100 atü und ist zur Feineinstellung außerdem mit einer Rücklaufregelung versehen. Die hydraulische Regelung wird dadurch betätigt, daß ein auf den Regelkolben einwirkender Flüssigkeitsdruck von außen einstellbar ist. Die Taumelscheibe, die die Pumpenkölbchen trägt, wird durch den Regelkolben mit Hilfe einer Feder auf Maximalneigung eingestellt. Die Pumpe hat jetzt maximale Förderung, und es stellt sich auf der Kolbenunterseite durch eine grobe Öffnung der Förderdruck ein. Dieser Druck wird auch auf der Oberseite des Kolbens, auf der die Federkraft wirkt, durch eine kalibrierte Öffnung aufgebaut. Der Druck auf dieser Seite läßt sich aber durch ein Feinstregulierventil oder durch das eingebaute und einstellbare Sicherheitsventil mehr oder minder stark absenken. Dadurch entsteht eine neue Gleichgewichtslage: Flüssigkeitsdruck auf der Unterseite gegenüber Flüssigkeitsdruck plus Federkraft auf der Oberseite des Kolbens. Bei entsprechend geringem Druck kommt der Kolben zur Anlage, die Neigung der Taumelscheibe und damit die Fördermenge geht gegen Null. Mit dem Feinstregulierventil läßt sich also die Fördermenge der Pumpe und mit dem Regulierventil im Rücklauf die wahre Einspritzmenge einstellen.

Die Mengenummessung in diesem Einspritzsystem muß genauer sein, als in dem ersten. Eine grobe Anzeige der eingespritzten Kraftstoffmenge liefert ein in die Saugleitung eingebauter Schwimmer, der auch erkennen läßt, ob die Fördermenge in der Meßzeit konstant bleibt. Die genaue Menge wird mit einem Stichprober gemessen. Dieser besteht aus einem oberen und einem unteren Ausgleichsbehälter, einem 1-Liter- und einem 2-Liter-Meßgefäß und einem Flüssigkeitsstandglas mit den entsprechenden Eichstrichen. Ohne die Einspritzung zu beeinflussen, läßt sich mit einem Dreiwegehahn durch die verschiedenen Stellungen des

Kükens der Meßvorgang beliebig oft wiederholen. Gemessen wird mit einer elektrisch zu betätigenden Stoppuhr die Zeit, in der der Inhalt des 1-Liter-, des 2-Liter-Gefäßes oder beider Gefäße eingespritzt wird. Über einen anderen Dreiweghahn steht das zweite Einspritzsystem nicht nur mit dem Tank des normalen Kraftstoffes, sondern auch mit einem Tank für einen Sonderkraftstoff in Verbindung. So können nacheinander die Eigenschaften mehrerer Kraftstoffe durch einfaches Umschalten dieses Hahnes untersucht werden.

Die Mengennmesser, Ventile und Manometer sind in ein gasdichtes Gehäuse eingebaut, das als Aufsatz für das Steuer- und Meßpult ausgebildet ist. Da die elektrischen Einrichtungen im Meßraum nicht explosionsgeschützt sind, muß ein Gebläse vorgesehen werden, das eventuelle Kraftstoffdämpfe aus dem Gehäuse absaugt und ins Freie leitet, so daß im Gehäuse stets ein geringer Unterdruck aufrechterhalten wird. Die Kraftstoffleitungen sind mit Schottverschraubungen durch die Wände geführt, so daß sich das Kraftstoffpult leicht von allen Zuleitungen lösen läßt.

4.3. Elektrische Steuereinrichtung

Der Tisch für die elektrische Verteilung ist aus Winkelrahmen geschweißt. Alle Seitenflächen bestehen aus Holz, ebenso die Tischplatte, die an das Kraftstoffpult anschließt.

Der Schaltplan (Bild 3) zeigt den schematischen Aufbau der Steuereinrichtung. Alle nach außen führenden Leitungen sind als Steckverbindungen ausgeführt. Die Sicherungen, Schütze, Steckdosen und der Transformator mit Gleichrichter wurden auf der Rückwand befestigt. Die verschließbare und nach hinten zu klappende Tischplatte trägt alle Betätigungselemente (Taster, Schalter usw.) und die Abdeckgläser der Anzeigeleuchten. Darunter liegen auf einer festen, zur Tischebene parallelen Platte die entsprechenden Schaltelemente und Anzeigeleuchten. Die Schalter haben je einen Öffner und einen Schließer. Durch Hochschwenken der Tischplatte ist das gesamte Schalterfeld gut zugänglich. Die Betätigungselemente sind als Taster

oder mit einem Knebelschalter als Dauerkontaktgeber ausgeführt. Der Einschalter für das Hauptschütz ist ein Schlüsselschalter. Ohne den zugehörigen Schlüssel kann außer einer Warnhupe nichts betätigt werden. Über eine Steckverbindung führen 3 Phasen, die mit 35A-Schmelzeinsätzen abgesichert sind, und der Nulleiter über das Hauptschütz ins Pult. Wenn das Schütz geschaltet hat, hält ein Haltekontakt die Magnetspule unter Spannung, bis der Öffner diesen Stromkreis unterbricht. Erst durch erneutes Betätigen des Schließers schaltet das Schütz wieder. Vor dem Hauptschütz zweigt eine Leitung zur Hupe und die Steuerleitung ab, in die eine Brücke eingebaut ist. Diese kann bei Bedarf durch einen zweiten, z.B. außerhalb des Meßraumes liegenden Öffner als Sicherheitsschalter ersetzt werden, mit dem in Notfällen die gesamte Versuchsanlage abgeschaltet werden kann. Vom Hauptschütz aus führen die 3 Phasen zu je einer Stromschiene, die in Reitersicherungssockeln die Sicherungen trägt und die Verteilung bildet.

Der Transformator liefert mit einem Gleichrichter eine Gleichspannung von 24 Volt, die über Taster zu den Primärseiten von zwei Zündgeräten führt. Diese speichern die elektrische Energie und erzeugen an der Zündkerze etwa jede Sekunde einen kräftigen Zündfunken mit einer Leistung von 2.000 Volt und 1.500 Ampere. Die Magnetventile in den Kraftstoffleitungen werden über einen Dauerkontakt betätigt. Wenn die Magnete nicht unter Spannung stehen, sind die Ventile geschlossen. Die Kraftstoffförderpumpe des Tankes wird ebenfalls über ein Schütz mit Tastern betätigt. Die Steuerleitungen führen über eine Steckverbindung zum Magneten und zum Haltekontakt des außerhalb liegenden Schützes.

Ein Ventilator zur Entlüftung des Meßraumes und das schon erwähnte Gebläse zum Absaugen der Kraftstoffdämpfe im Pult werden durch Knebelschalter mit Dauerkontaktgabe in Betrieb gesetzt. Erst wenn das Gebläse läuft, führen die Einschalter der beiden Schütze für die Einspritzpumpen Spannung. In diesen Kreis ist aber zusätzlich eine Brücke eingebaut, die wiederum durch einen Hilfsöffner bei Bedarf zu ersetzen ist.

5. Meßeinrichtung

5.1. Durchflußmessung

Für die Kraftstoffmengenmessung wurde der Rotamesser schon erwähnt. Dies ist ein Schwimmermesser, der in einem konischen Glasrohr einen Schwimmer trägt. Bei konstantem Differenzdruck steigt der Schwimmer je nach Durchfluß an und gibt einen mehr oder minder großen Querschnitt frei. Die Höhenlage des Schwimmers ist ein direktes Maß für die durchfließende Menge. Die Druckluftmengen werden mit Drosselgeräten gemessen. Durch Einschnürung des Querschnittes erhöht sich die kinetische Energie des durchfließenden Mediums und hat nach dem Bernoullischen Gesetz einen Druckabfall zur Folge. Der Wirkdruck, die Druckdifferenz zwischen beiden Seiten des Drosselgerätes, ist ein Maß für den Durchfluß. Bei der Versuchsanlage kommt ein Doppeldüsenrohr zur Anwendung, das bei vorgegebenem Druckverlust eine Erhöhung des Wirkdrucks um 50 % gegenüber einer Normventurdüse hat. Im eingezogenen Querschnitt findet nochmals eine Einschnürung der Strömung statt. Dort tritt eine Übergeschwindigkeit und damit ein zusätzlicher Druckabfall ohne wesentlichen Energieverlust auf. An dieser Stelle wird der Minus-Druck entnommen.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Durchflusses, bei der praktisch kein Druckverlust auftritt, ist die Geschwindigkeitsmessung mit einem Prandtl-Staurohr. Dieses mißt den dynamischen Druck (Staudruck) der Strömung. Damit ist durch die Bernoullische Gleichung auch die örtliche Strömungsgeschwindigkeit gegeben. Da die Strömungsgeschwindigkeit sich aber über den Rohrquerschnitt ändert, muß das Geschwindigkeitsfeld auf dem Radius abgetastet und über dem Querschnitt integriert werden. Eine andere Möglichkeit ist, das Prandtl-Staurohr in eine bestimmte Lage zu bringen und für die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit zu eichen. Dabei ist bei Gasströmungen mit hoher Geschwindigkeit die Kompressibilität zu berücksichtigen [2] .

5.2. Temperaturmessung [3]

Für geringe Temperaturen, z.B. die der Frischluft und des Kühlwassers, sind Widerstandsthermometer am geeignetsten. Als Anzeigeeinstrumente werden Kreuzspulmeßwerke verwendet. Die Ansprechzeit dieser Widerstandsthermometer ist verhältnismäßig groß und hauptsächlich abhängig von der Masse der Schutzhülle und von dem Wärmeübergang des zu messenden Mediums auf den Geber. Die Temperaturschwankungen in den genannten Fällen sind praktisch zu vernachlässigen, und ihre Registrierung ist meistens nicht erwünscht. Da diese Temperaturänderungen sehr langsam vor sich gehen, fällt die größere Ansprechzeit nicht ins Gewicht.

Um höhere Temperaturen mit möglichst kleiner Ansprechzeit messen zu können, benutzt man Thermoelemente. Die Art der Elemente richtet sich nach der Höhe der zu messenden Temperatur. Je höher aber die für ein bestimmtes Elementenpaar zugelassene Temperatur ist, um so geringer wird häufig die Thermospannung. Daraus folgt, daß Thermoelemente möglichst bis in ihren oberen Meßbereich auszunutzen sind.

Um von der Thermospannung auf die genaue Temperatur des Thermoelementes an der Meßstelle schließen zu können, muß die Temperatur der Vergleichsstelle (Übergang vom Element oder einer Ausgleichsleitung auf eine Kupferleitung oder das Meßinstrument) konstant bleiben. Diese Voraussetzung ist nur sehr schwer zu erfüllen. Schaltet man aber dem Meßelement ein Vergleichselement mit gleichen thermoelektrischen Eigenschaften entgegen und hält das Vergleichselement auf konstanter Temperatur (in Eiswasser oder in einem Thermostat), so kann man diesen Stromkreis an beliebiger Stelle unterbrechen und an den freien Enden eine Kupferleitung oder das Meßinstrument direkt anschließen. Die Vergleichsstellen, z.B. die Anschlüsse an das Instrument, brauchen nun nicht mehr auf konstanter, sondern nur noch auf gleicher Temperatur gehalten zu werden, denn an den beiden Klemmen stoßen zwei gleichartige Elementenpaare so zusammen, so daß die dort entstehenden Thermokräfte sich gerade aufheben.

Für diesen Zweck wird ein Vergleichsstellenkorrektor (Bild 4) eingesetzt. Ein beheizter Thermostat wird durch einen Bimetallregler konstant auf einer Temperatur von $+50^{\circ}\text{C}$ gehalten. Die höchstvorkommende Raumtemperatur muß immer unter diesem Wert liegen. Die Meßelemente sind auf der einen Seite über Ausgleichsleitungen und Klemmleisten, die der Elementart entsprechen, mit den Vergleichselementen in dem beheizten Metallblock des Thermostaten verbunden. Auf der anderen Seite führen Ausgleichsleitungen von den beiden entgegengeschalteten Elementen zu Klemmleisten, die die Vergleichsstelle bilden. Die entsprechend zusammengehörigen Klemmen liegen so dicht beieinander, daß die Voraussetzung gleicher, aber nicht unbedingt konstanter Temperatur gegeben ist.

Für die Eisen- und Nickelchromseite der Vergleichselemente (vgl. Bild 4) ist durch eine einzige Klemmleiste und nur einen Draht angedeutet, daß sich die Materialarten Eisen und Nickelchrom thermoelektrisch sehr ähnlich sind. Wenn dieser Draht aus Nickelchrom ist, treten bei den Eisen-Konstantan-Messungen, wenn er aus Eisen ist, bei den Nickelchrom-Nickel-Messungen Fehler auf. Die Abweichungen, bezogen auf die gemessene, thermoelektrische Spannung sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

| | Fe-Konst. gegen NiCr-Konst. (bei 50°C) | NiCr-Ni gegen Fe-Ni (bei 50°C) |
|---------------------------|--|--|
| bei 100°C | -5,720 % | +7,45 % |
| 200 $^{\circ}\text{C}$ | -1,870 % | +2,54 % |
| 300 $^{\circ}\text{C}$ | -1,115 % | +1,52 % |
| 400 $^{\circ}\text{C}$ | -0,795 % | +1,08 % |

Durch ein geeignetes Ersatzmaterial "Fe,NiCr", das thermoelektrisch einen Mittelwert der Eigenschaften von Eisen und Nickelchrom darstellt, läßt sich dieser Fehler auf ein Minimum verkleinern. Eine kurze Rechnung ergibt dann folgende

Werte für die Thermospannung von "Fe,NiCr" gegen Platin im Vergleich zu Eisen und Nickelchrom und die dann noch auftretenden Fehler:

| | | |
|--------------------|------------|-----------------------------|
| "Fe,NiCr" gegen Pt | +1,0177 mV | bei 50°C bezogen auf 0°C |
| (Fe gegen Pt | +0,93 mV) | |
| (NiCr gegen Pt | +1,085 mV) | |

| | Fe-Konst. gegen "Fe,NiCr"-Konst. (bei 50°C) | NiCr-Ni gegen "Fe,NiCr"-Ni (bei 50°C) |
|-----------|--|--|
| bei 100°C | -3,240 % | + 3,240 % |
| 200°C | -1,057 % | + 1,102 % |
| 300°C | -0,632 % | + 0,661 % |
| 400°C | -0,450 % | + 0,468 % |

Da die Thermokraft der Materialart "Fe,NiCr" für 100°C gerechnet wurde, sind die Absolutwerte der Fehler in diesem Falle gleich. Die Abweichungen bei den übrigen Temperaturen ergeben sich aus dem nichtlinearen Verhalten der beiden Meßelemente, deren Anzeigewert bei der Fehlerbestimmung als Bezugsgröße gilt. Die Thermoelemente werden in den meisten Fällen nur bei so hohen Temperaturen eingesetzt, daß der durch diese Vereinfachung entstehende Fehler unter $\pm 1\%$ liegt und somit die Messung nicht verfälscht.

5.3. Druckmessung [3]

Bei der Versuchsanlage sind Drücke und Differenzdrücke in verschiedenen Meßbereichen zu messen. Daher sind Meßinstrumente vorzusehen, die einen möglichst weiten Meßumfang und dazu eine recht hohe Genauigkeit haben.

Diese Forderungen werden von Meßumformern für Druck- und Differenzdruckmessungen erfüllt, wie sie in Bild 5 und 6 dargestellt sind. Als Meßwertgeber dienen statische Bohrungen, Staurohre oder Drosselgeräte, die an das Meßwerk angeschlossen sind, das ein Membran-, Federbalg- oder Rohrfedermeßwerk sein kann. Dieses übt je nach Höhe des Druckes eine Kraft über ein einstellbares Übersetzungssystem auf einen Waagebalken aus, der an beiden Enden eine Tauchspule trägt. Die eine Spule ist als Differentialtransformator geschaltet und bewegt sich in einem elektromagnetischen Wechselfeld. In der Nulllage heben sich die induzierten Spannungen auf. Bei einer Krafteinwirkung wird der Waagebalken ausgelenkt, und die entstehende Differenzspannung wird dem Verstärker zugeführt. Dieser liefert einen Gleichstrom von 0 bis 20 mA, der durch die andere, sich in einem permanenten Magnetfeld befindliche Tauchspule fließt und die am Waagebalken angreifende Kraft kompensiert. Der in diesem Gleichstromkreis fließende Strom von 0 bis 20 mA ist proportional dem auf das Meßwerk wirkenden Druck und stellt sich unabhängig von einem Außenwiderstand bis zu 5 kOhm zwangsläufig ein.

Die Auslenkung des Waagebalkens ist nur sehr gering, denn schon eine kleine Spannung am Differentialtransformator reicht aus, um über den Verstärker den nötigen Gleichstrom für die Kompensation der angreifenden Kraft zu liefern. Durch die Hebelübersetzung ergibt sich dann am wirksamen Ende des Meßwerkes nur noch eine Auslenkung in der Größenordnung von einigen hundertstel Millimetern. Daher ist diese Meßmethode einer weglosen sehr ähnlich und hat den Vorteil, von den Materialeigenschaften (Hysterese-Erscheinung) nahezu unabhängig zu sein.

Bei allen Meßwertumformern dieser Bauart ist das Waagebalken- und Übersetzungssystem einheitlich. Die Kraft, die am unteren Hebel angreift, ist abhängig von dem zu messenden Druck und von den mechanischen Eigenschaften des eingebauten Meßwerkes. Auf den Waagebalken wirkt die kompensierende Kraft, die proportional dem Gleichstrom von 0 bis 20 mA ist. Der Zusammen-

hang zwischen der von außen durch das Meßwerk einwirkenden Kraft und der Gegenkraft ist gegeben durch das Übersetzungsverhältnis des Hebelsystems. Dieses läßt sich durch Verschieben eines Kupplungsstückes in einem gewissen Bereich verändern. Damit ändert sich auch der Meßumfang in einem bestimmten Maße. Durch Einbau von Meßwerken mit anderen mechanischen Eigenschaften kann man den Meßumformer auch auf andere Druckbereiche umstellen.

Der elektromechanische Teil und der Verstärker befinden sich in getrennten Gehäusen. Um die Funktion dieser Zusammenschaltung zu überprüfen, wird durch eine Stellschraube eine festgesetzte, einzustellende Federkraft auf den Waagebalken gebracht. Ein eingebauter Strommesser gibt nun durch seinen Zeigerausschlag auf einen vorgegebenen Wert eine Kontrolle für die richtige Funktion beider Geräteteile. Durch eine zweite Stellschraube läßt sich eine andere Federkraft, die auch auf den Waagebalken wirkt, stetig veränderlich einstellen. Mit einem Gleichstrommesser, der in den Meßkreis 0 bis 20 mA eingeschaltet ist, wird die Federkraft gerade so groß gewählt, daß das Meßinstrument 0 mA anzeigt. Folglich heben sich die beiden entgegengerichteten Spannungen am Differentialtransformator auf, und der Waagebalken befindet sich in der Ruhelage. Beide Federkräfte greifen allerdings nicht direkt am Waagebalken, sondern an einer Stelle des Hebelsystems mit großer Übersetzung an. Dadurch sind einmal die Federkräfte zu größeren und mechanisch besser zu beherrschenden Werten vorge-rückt, und zum anderen sind die Federwege im Verhältnis zur Federlänge bei der Auslenkung des Hebelsystems so gering, daß die Kräfte als konstant zu betrachten sind. Die Funktionskontrolle und die Einstellung des Nullpunktes ist vorzunehmen, nachdem das Meßwerk von der Druckleitung getrennt ist und unter Atmosphärendruck steht.

Wenn durch Verschieben des Kupplungsstückes in dem Hebelsystem das Übersetzungsverhältnis und damit der Meßbereich geändert wird, ist der Umformer neu zu eichen. An den Druckstutzen des Meßwerkes wird ein einstellbarer Druck angelegt und mit einem

Druckeichgerät gemessen. Zeigt das in den Meßkreis eingeschaltete Milliamperemeter nicht genau 20 mA an, dann ist mit einer Stellschraube ein zur Tauchspule parallelgeschalteter Widerstand (R_4) so zu verändern, daß dieser Wert erreicht wird. Wenn diese Feineinstellung nicht mehr möglich ist, muß das Kupplungsstück erneut verschoben und der Eichvorgang wiederholt werden. Nach jeder Änderung des Hebelsystems ist die Nulllage des Waagebalkens unbedingt zu kontrollieren.

Um für einen kleinen Meßbereich den vollen Ausschlag des Meßinstrumentes auszunutzen, gibt es die Möglichkeit der Meßbereichunterdrückung. Dazu wird eine Federkraft, die auf den unteren Hebel entgegen der Kraft des Meßwerkes wirkt, so eingestellt, daß der untere Bereich des angelegten Druckes bis zu einem zugelassenen Höchstwert beliebig unterdrückt ist. Zunächst wird der Meßbereich in der bekannten Weise durch Verschieben des Kupplungsstückes und durch Nacheichung eingestellt. Dabei gilt als Vergleichsdruck zu dem Strom von 20 mA die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Druck des gewünschten Meßbereiches. Der Nullpunkt ist dann nicht bei Atmosphärendruck, sondern bei dem gegebenen Anfangsdruck festzulegen. Dabei erfolgt die grobe Eichung durch die Feder für Nullpunktunterdrückung, während die Feineinstellung nach der angegebenen Vorschrift vorzunehmen ist.

Die Entfernung zwischen Druckgeber und Meßumformer muß möglichst kurz sein, damit keine zusätzlichen Verzögerungszeiten entstehen. Daher sind je sechs Meßumformer einschließlich Verstärker auf zwei Meßwagen angebracht. Einer der beiden Wagen trägt an seiner Stirnwand den beschriebenen Vergleichsstellenkorrektor zum Anschluß von 12 Thermoelementen. Ein Schaltbrett an jedem Wagen hat Netzanschluß. Von dort führt die Zuleitung über Sicherungen, Schalter und Kontrolllampen zu den einzelnen Verstärkern und zu dem Thermostaten. Diese wiederum sind durch lange Meßleitungen mit dem Meßpult verbunden.

5.4. Schreibende und anzeigende Meßinstrumente [3]

In den Schrankteil des Meßpultes sind zwei elektronische Kompensations-Punktdrucker eingebaut (Bild 7), die physikalische Meßwerte anzeigen und registrieren, die durch elektrische Gleichspannungen darzustellen sind. Die Thermospannungen können direkt gemessen werden, während der Gleichstrom von 0 bis 20 mA durch einen Widerstand $R = 5 \text{ Ohm}$ fließt. Nach dem Ohmschen Gesetz beträgt dann der Spannungsabfall an diesem Widerstand 0 bis 100 mV. Damit ist auch diese Spannung ein Maß für den an dem Meßumformer wirkenden Druck.

Der Punktdrucker arbeitet nach dem Kompensations-Meßprinzip von Poggendorff. In einer Wheatstone'schen Brücke befindet sich ein Präzisionsmeßpotentiometer, das durch einen vom Verstärker gesteuerten Motor angetrieben wird. Dieser Meßmotor stellt das Potentiometer so ein, daß der Geber unbelastet ist. Die Brücke wird mit einem konstanten Hilfsstrom gespeist, der automatisch oder durch Handbetätigung zu überwachen ist. Der Spannungsabfall des Brückenstromes in einem Normalwiderstand wird mit der Spannung eines Normalelementes verglichen. Weichen die Spannungen voneinander ab, verstellt der Meßmotor ein Hilfspotentiometer bis zum nötigen Abgleich, so daß der Hilfsstrom seinen ursprünglichen Wert wieder erreicht.

Das Instrument mißt die Vergleichsspannung, die der Meßspannung entgegengerichtet ist, zeigt sie auf der Skale an und druckt gleichzeitig diesen Meßpunkt auf den Schreibstreifen. Ein Synchromotor schaltet alle 2 Sekunden auf den nächsten der 12 Meßwerte um und treibt den Papiervorschub an. Die 12 gedruckten Meßwerte erscheinen auf dem Schreibstreifen in 6 verschiedenen Farben und als Punkte oder kleine Kreise. Dadurch ist der Verlauf der einzelnen Meßpunkte leicht zu verfolgen und als Kurve auszuziehen.

Jeder Kompensationsschreiber hat 12 Meßstellen, die auf bis zu 3 verschiedene Meßbereiche aufgeteilt werden können. Die Zahl der Meßstellen, die auf einen Meßbereich entfallen, ist beliebig. Die gesamte Schaltung, die den Meßbereich bestimmt, ist in einer als Steckkästchen ausgebildeten Meßbereicheinheit enthalten. Diese Einheiten sind untereinander austauschbar und gelten immer für die im Augenblick durch den Meßstellenumschalter eingeschaltete Meßstelle. Der Druckschreiber hat nur eine Meßbereicheinheit und mißt von 0 bis 100 mV. Dagegen besitzt der Temperaturschreiber 3 Steckkästchen für je 4 Meßstellen. Da die Skala in Grad Celsius geeicht ist, muß in der Schaltung auch die Materialart des Thermoelementes berücksichtigt sein. Weiterhin bietet das Steckkästchen die Möglichkeit, den Anfangsbereich in weiten Grenzen zu unterdrücken.

Wenn nur der Meßmotor angeschaltet ist, wirkt der Punkt-schreiber als normales Anzeigegerät. Erst der Synchronmotor betätigt den Meßstellenumschalter. Durch An- und Ausschalten des Antriebsmotors kann man jede beliebige Meßstelle, deren Nummer in einem Fenster des Druckkopfes erscheint, für längere Zeit beobachten. Um dabei aber von dem normalen Schreibablauf unabhängig zu sein, läßt sich durch Steckbuchsen bei dem Druckschreiber ein Milliampere-meter in Reihe zum Widerstand $R = 5 \text{ Ohm}$ und bei dem Temperaturschreiber ein Millivoltmeter parallel zum Meßwerk schalten, so daß je eine beliebige Meßstelle über längere Zeiten beobachtet werden kann. Jeder Schreiber ist mit einem Zeitmarkengeber versehen, der bei Betätigung am Rande des Papierstreifens eine Tintenmarkierung hinterläßt. Beim Versuchsa-blauf lassen sich so von außen durch unterschiedliche Zeichen wichtige Zeitpunkte und -abschnitte auf dem Papier festhalten. Die Zeitmarkengeber sind einzeln oder gleichzeitig zu schalten.

6. Erweiterungsmöglichkeiten der Steuer- und Meßeinrichtung

Das kombinierte Steuer- und Meßpult wurde so ausgelegt, daß es nicht nur für die vorgesehene Forschungsaufgabe, sondern auch für erweiterte Aufgaben verwendet werden kann. Der Platz ist in allen drei Teilen des Pultes nur zu etwa 50 % ausgenutzt, so daß noch eine größere Anzahl weiterer Geräte eingebaut werden kann. Die elektrische Verteilung ist mit 40 % der Nennleistung belastet. Einige Schaltelemente sind noch unbesetzt, und alle festverlegten Leitungen haben einen ausreichenden Querschnitt für die volle Nennleistung.

Bei den für die Forschungsaufgabe verwendeten Meßumformern können durch Austausch der Meßwerke andere Bereiche eingestellt werden. Bei den Kompensationsschreibern lassen sich durch Einstekken verschiedener Meßbereicheinheiten andere Anzeigebereiche einstellen oder es kann der Nullpunkt unterdrückt werden.

Die Kraftstoffanlage gestattet den gleichzeitigen Betrieb mit zwei Kraftstoffsorten und den schnellen Wechsel von einer Sorte zur anderen. Die vorgesehenen Pumpen können Einspritzdrücke bis 100 atü und Mengen bis 60 l/min liefern. Der Anschluß von Zweigleitungen und der Einsatz zusätzlicher Kraftstoffpumpen ist ohne weiteres möglich.

7. Literaturverzeichnis

- [1] O. L u t z,
M. Kallergis: Über eine Anlage zur Untersuchung der Vorgänge bei Überschallverbrennung,
DFL-Bericht Nr. 0115
- [2] W. W u e s t: Strömungssonden, Archiv Technisches Messen,
Dezember 1960, Seite 245 ff.
- [3] Druckschriften der Fa. Hartmann & Braun AG, Frankfurt/Main
- a) Elektrische und wärmetechnische Messungen
 - b) Genaue Temperaturmessungen mit Thermoelementen
 - c) Vergleichsstellenkorrektoren
 - d) Durchfluß-, Differenzdruck- und Druckmeßumformer
 - e) Elektronischer Kompensationsschreiber
Polycomp

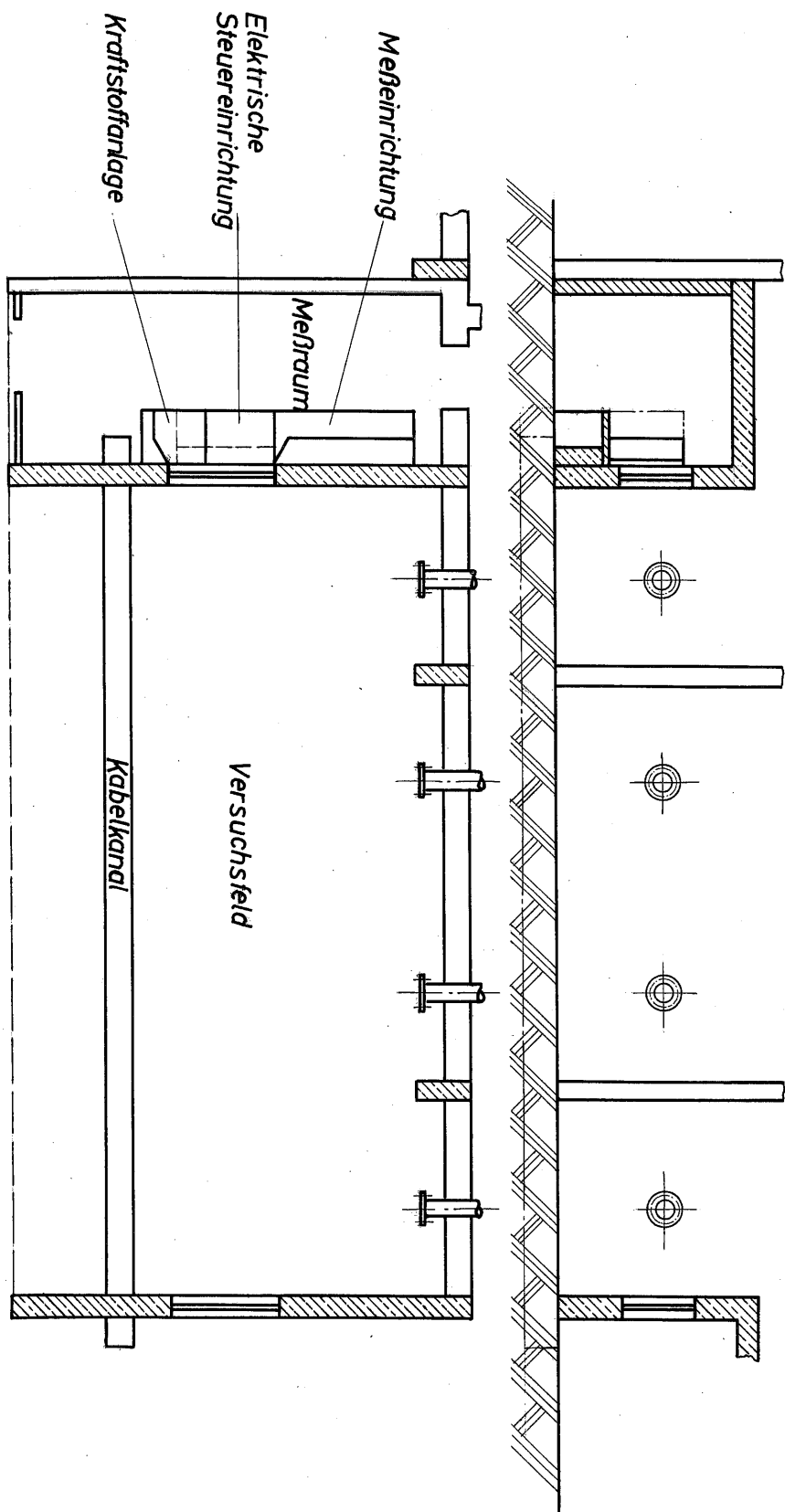


Bild 1: Lageplan

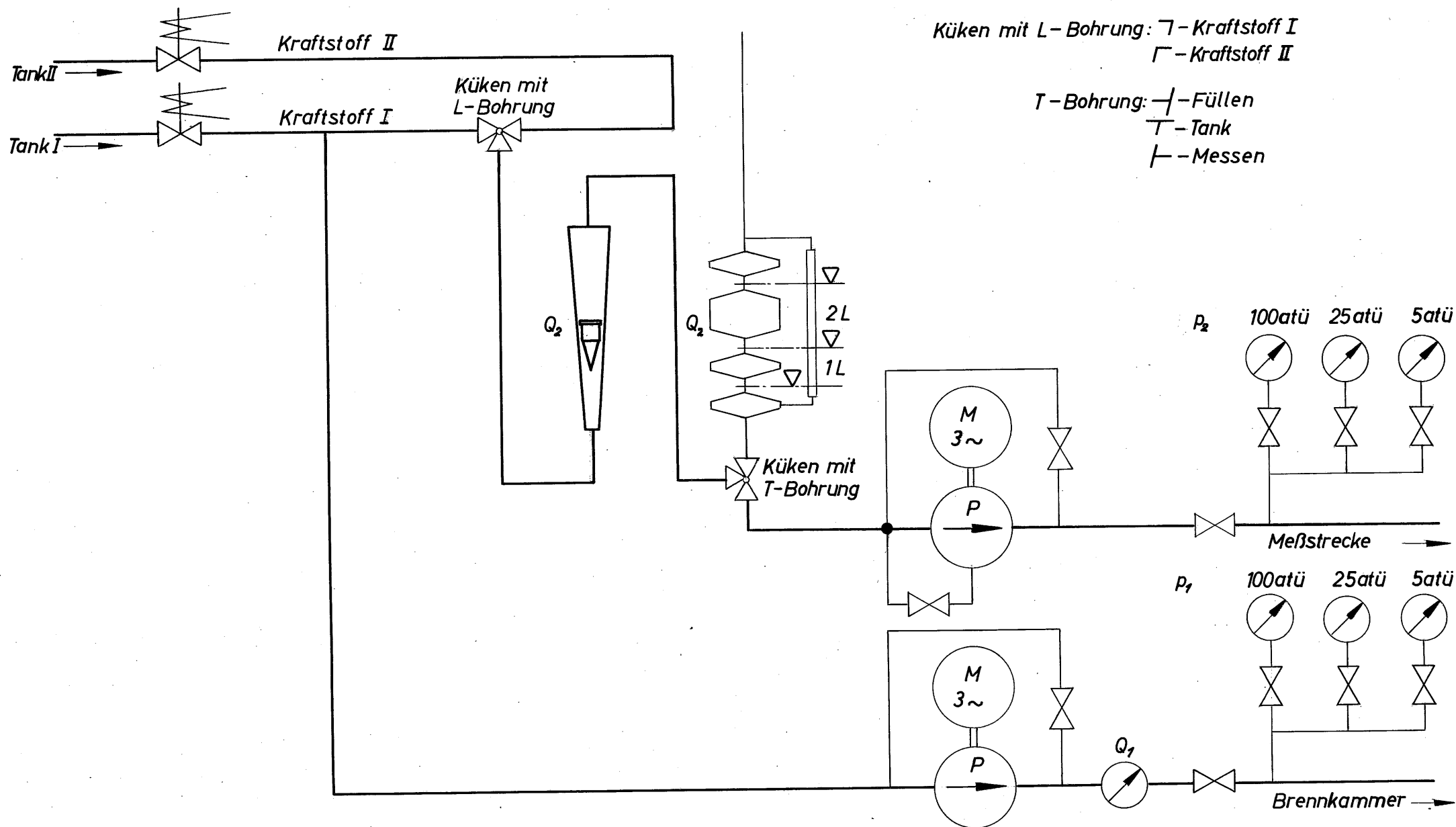


Bild 2: Schema der Kraftstoffanlage

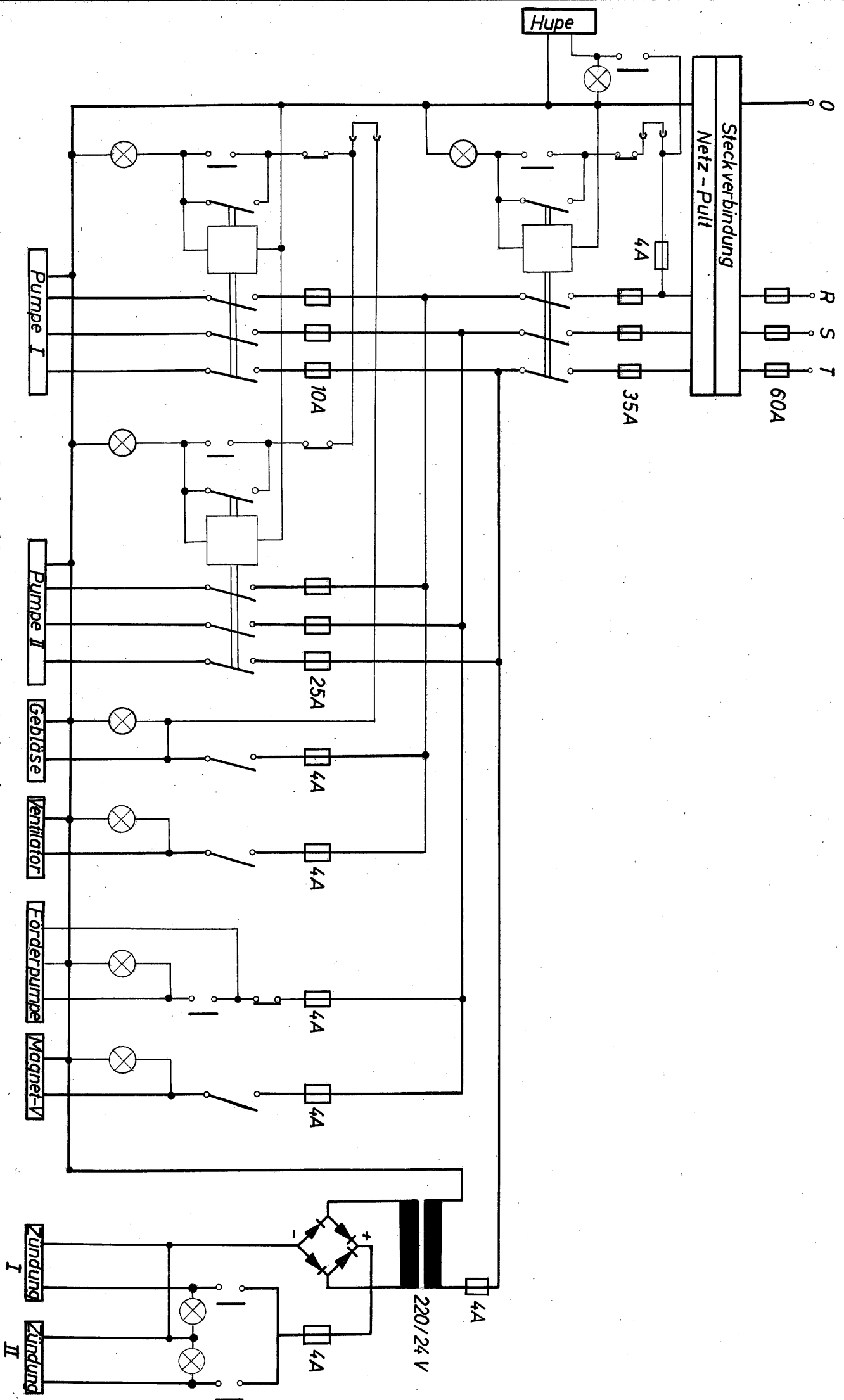


Bild 3: Schaltplan der elektrischen Steuerung

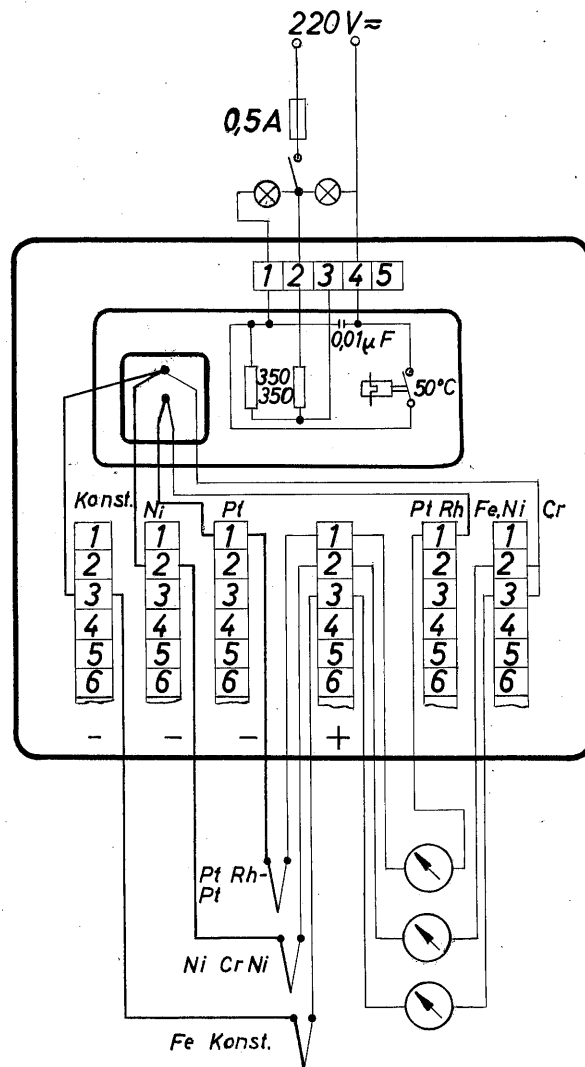


Bild 4: Temperaturmessung

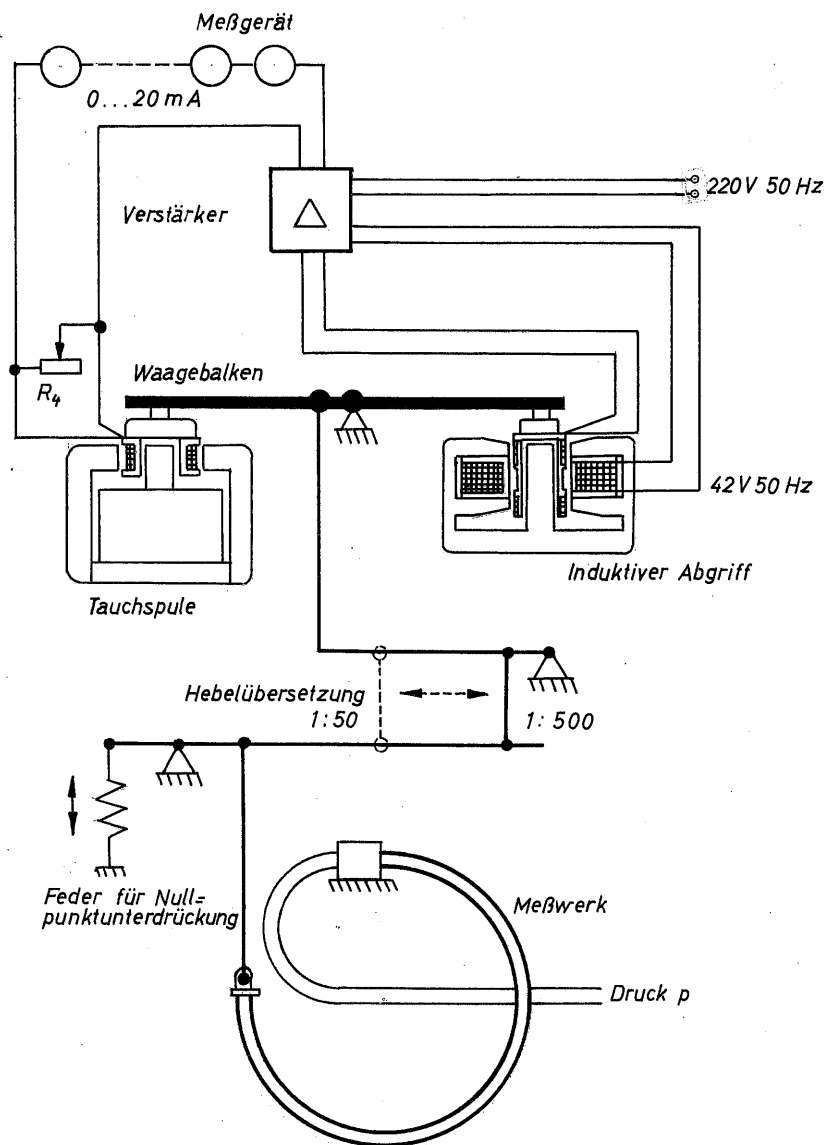


Bild 5: Prinzipbild des Druckmeßumformers

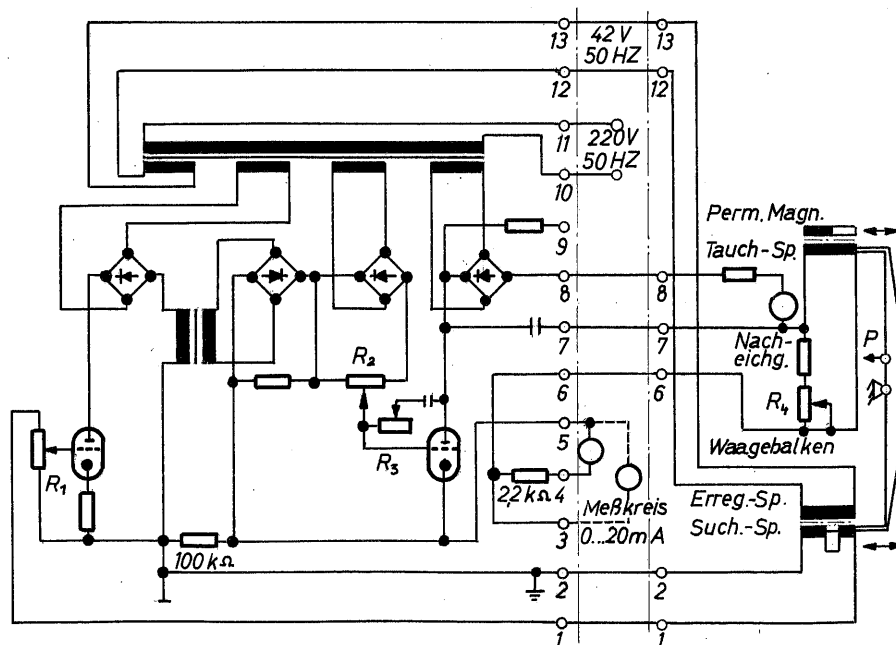


Bild 6: Schaltung des Verstärkers mit elektromech. Teil

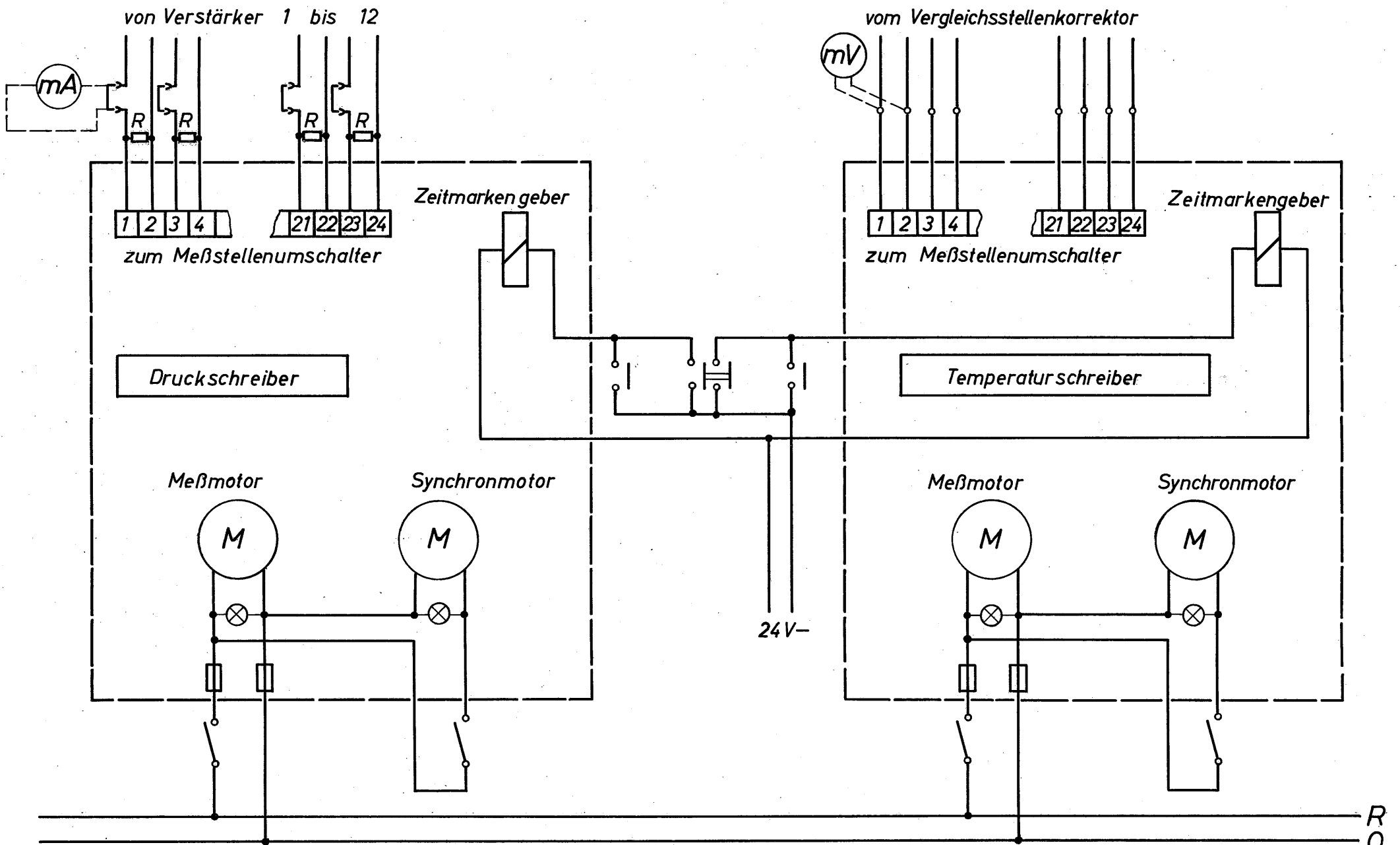


Bild 7: Anschlußschaltbild der Punktschreiber