

## **Diplomarbeit**

Entwicklung und Bau eines Teraohmmeters

von

Salar Fallah

Matrikelnummer s700077

Technische Fachhochschule Berlin  
Fachbereich VII Elektrotechnik  
Luxemburgerstr.10  
13353 Berlin

## 1 Aufgabenstellung

### 1.1 Beschreibung der Aufgabenstellung

Entwicklung eines einfachen, ökonomischen Widerstandsmeßgerätes zur Bestimmung von Widerständen im Teraohmbereich. Der Entwicklungs- oder Labormusterstand muß nicht überschritten werden.

#### 1.1.1 Vorüberlegung ( Kundenforderung )

- Messung von Widerständen bis etwa  $10 \text{ T}\Omega$
- 5 % Genauigkeit
- Ausgabe des Meßwertes auf einer 3- stelligen Anzeige, die bei der geforderten Toleranz von etwa 5% ausreicht
- automatische Festlegung des Meßbereichs

## 2 Einführung

### 2.1 Einsatzbereich

Teraohmeter dienen der Messung hochohmiger Widerstände oder von Flächenwiderständen .

Dazu zählen:

EMV- Schirmfolien und Beschichtungsfolien für Thermofenster, Displays und optische Gläser (Vermeidung von Reflektionen ).

Hierbei ist der Widerstandswert der Vergütung ( metallische Bedampfung ) derartiger Oberflächen von Interesse (Homogenitätsprüfung )..

Gummireifen für Rollstühle; elektrostatische Aufladung des Rollstuhls durch triboelektrische Vorgänge und ungewünschte Entladung über den Insassen. Die ESD- Eigenschaften von Gummireifen wirken sich direkt auf ihre Farbe aus, da die Leitfähigkeit des Reifens durch das Gummi- Ruß- Verhältnis im Reifen bestimmt wird, graue Reifen aber den besser leitenden schwarzen vorgezogen werden ( geringere Verschmutzung bei Abrieb ).

Widerstandsbestimmung von Isolatoren.

### 2.2 Meßprinzip

#### 2.2.1 Brückenschaltung

Die Brückenschaltung nach Wheatstone gestattet die Messung von Widerständen über einen weiten Bereich.

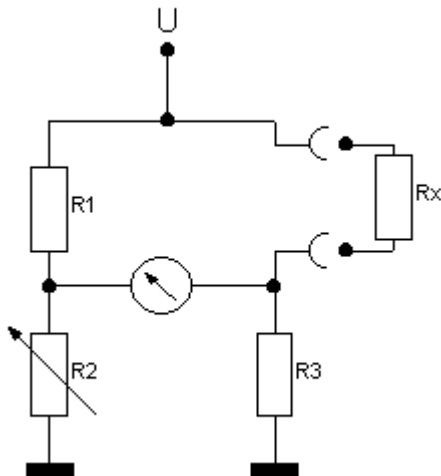
Ist das Verhältnis  $R_1 / R_2 = R_x / R_3$ , so sind  $R_2$  und  $R_3$  potentialgleich und es fließt kein Ausgleichstrom zwischen den Zweigen ( „Brücken- Null“).

Einer der Widerstände wird variabel und skaliert ausgeführt und die Brücke auf „Null“ abgeglichen; der gesuchte Widerstand wird berechnet.

Berechnung :

$$R1 \cdot \frac{R3}{R2} = R_x$$

Abbildung 1 Wheatstone'sche Brücke



## 2.2.2 Strommessung

Anlegen einer hinlänglich hohen Spannung und Messung des Stromes durch den zu messenden Widerstand.

### 2.2.2.1 Direkte Strommessung

Direkte Strommessungen lassen sich mit Drehspulinstrumenten durchführen; die Skalierung der Anzeige ist umgekehrt proportional und somit nichtlinear.

Abbildung 2 Kommerzielles Gerät mit analoger Anzeige



### 2.2.2.2 Indirekte Strommessung

Der gesuchte Widerstand wird über die Methode der indirekten Strommessung durch einen Strom- Spannungswandler bestimmt ( Messung der durch einen eingepprägten Strom an einem bekannten Widerstand abfallenden Spannung ).

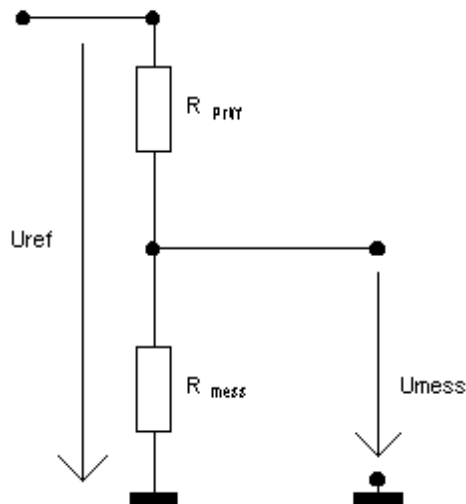


Abbildung 3 Indirekte Strommessung

Messung über Strom- Spannungswandlung

Abbildung 3 zeigt einen aus den Widerständen  $R_{prüf}$  und  $R_{meß}$  bestehenden Spannungsteiler;  $R_{prüf}$  stellt den zu messenden Widerstand und  $R_{meß}$  einen bekannten Referenzwiderstand dar.

Die bekannte Gleichspannung  $U_{ef}$  treibt einen von der Größe der Widerstände abhängigen Strom durch den Teiler und läßt eine proportionale Spannung an  $R_{meß}$  abfallen.

Beispiel.:

Liegt an einem Widerstandsprüfling von 1 T $\Omega$  eine Spannung von 1 V an, so fließt ein Strom von 1pA.

$$I_{ref} = \frac{U_{ref}}{R_{prüf}} = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ T}\Omega} = 1 \text{ pA}$$

Daraus folgt die Verwendung einer hinlänglich hohen Spannung, damit der zu messende Strom nicht zu klein wird.

Kommerzielle Meßgeräte arbeiten mit Spannungen um 1 kV oder darüber.

$$I_{ref} = \frac{U_{ref}}{R_{prüf}} = \frac{1000 \text{ V}}{1 \text{ T}\Omega} = 1 \text{ nA}$$

Über die Spannungsteilerformel

$$\frac{R_{gesamt}}{U_{gesamt}} = \frac{R_{Teil}}{U_{Teil}}$$

kann nun der unbekannte Widerstand bei bekanntem Gesamt- oder Teilwiderstand und bekannten Gesamt- und Teilspannungen berechnet werden.

Umgestellt nach  $R_{prüf}$  ergibt sich

$$R_{prüf} = \frac{U_{mess}}{R_{mess}} \cdot U_{ref} - R_{mess}$$

wobei  $R_{prüf} + R_{meß}$  den Gesamtwiderstand des Spannungsteilers darstellen.

Wählt man  $R_{meß} \ll R_{prüf}$ , kann der Referenzwiderstand  $R_{meß}$  in der Rechnung vernachlässigt werden. Es wird dann

$$R_{prüf} = \frac{U_{mess}}{R_{mess}} \cdot U_{ref}$$

### 3 Vorversuche

#### 3.1 Auswahl der Schaltung

##### 3.1.1 Brückenschaltung

Die Brückenschaltung wurde verworfen.

Sie beruht auf der Ermittlung von Widerstandsverhältnissen in Verbindung mit einem Brückennullindikator und liefert gute Ergebnisse über einen weiten Widerstandsbereich.

Verfügbar waren 10 M $\Omega$ / 0,1%- Referenzwiderstände, von denen 10 zusätzlich ausgemessene Exemplare in Reihe geschaltet einen Referenzwiderstand von 100 M $\Omega$ / besser 0,1 % realisieren. Bei einem angenommenen Verhältnis von  $R_x$  zu  $R_4$  von 1000 ist dann das präzise Ausmessen von Widerständen bis 100 G Ohm möglich.

Die Nullindikatorschaltung muß hochpräzise mit einem hohen Dynamikbereich arbeiten.

Der variable Widerstand  $R_x$  muß als Bauelement sehr präzise und kalibriert sein. Wird er aufgrund der Forderung nach digitaler Verarbeitung und Anzeige durch ein Halbleiterbauelement dargestellt, muß dessen Ersatzwiderstand durch Strom- und Spannungsmessung ermittelt und verrechnet werden.

##### 3.1.1 Indirekte Strommessung

Es wurde somit der Methode der indirekten Strommessung der Vorrang gegeben. Als Stromwandler wird der oben genannte 100 M $\Omega$ - Widerstand verwendet. Die an ihm abfallende Teilspannung wird verstärkt.

Aus Sicherheitserwägungen wurde zunächst mit Spannungen um 10 V experimentiert. Es fließt dann durch einen 10 T  $\Omega$ - Widerstand ein Strom von 1 pA, der an dem Meßwiderstand eine Spannung von 100  $\mu$ V abfallen läßt ( der Fehler durch die Vernachlässigung des zusätzlichen Einflusses der Reihenschaltung des Meßwiderstandes liegt in der Größenordnung von 0,1 % und wird an dieser Stelle und bei weiteren Abschätzungen vernachlässigt ).

### 3.2 Verstärker

#### 3.2.1 Einleitung

Für die Auswahl der geeigneten Operationsverstärker wurden verschiedene Verstärkertypen in einer Versuchsschaltung auf ihre Eigenschaften und ihr Verhalten untersucht.

Verwendung fand eine nicht -invertierende Operationsverstärkerschaltung mit hoher Eingangs- und niedriger Ausgangsimpedanz.

Als Operationsverstärker standen zur Verfügung :

TLC2652ACP, chopper- stabilized OpAmp ( Lownoise), Texas Instruments  
 TL061, Standard-OPV  
 OPA 129, Ultra- Low- Bias - Current OPV ( 100 fA ), Texas Instruments  
 AD8551, Ultra- Low- Bias - Current OPV ( 20 pA ), Analog Devices  
 TLC 271, Rail-to-Rail OpAmp, Texas Instruments

### 3.2.2 Untersuchung auf niedriges Grundrauschen.

Untersucht wurde ein Chopperverstärker TLC2652ACP der Fa. Texas Instruments. Diese Verstärker „zerhacken“ die angelegte Meßspannung, verstärken sie intern als Wechselspannungssignal und geben sie als korrespondierende Gleichgröße wieder aus. Diese Verstärker können somit auch sehr niedrige Gleichspannungen verstärken, allerdings auf Kosten eines – auch bei einer „Low- noise“- Type relativ hohen Rauschanteils.

Bei den Vorversuchen wurden erfolgreich Spannungen  $< 1$  mVDC präzise verarbeitet, dabei lag der oszilloskopisch gemessene Wechselanteil bei  $1,47$  mV<sub>SS</sub>. Dieser OPV ist nur als SMD- Type verfügbar und muß auf einer Adapterleiterplatte oberhalb der Analogleiterplatte montiert werden.

Die Auswahl fiel somit zunächst auf einen Standardtyp TL061 mit einer Rauschspannung von  $2,56$  mV<sub>SS</sub>; diese Type weist die Standardkontaktbelegung für das 8polige DIL- Gehäuse auf und kann somit bedarfsweise mühelos ausgetauscht werden.

### 3.2.3 Eingangsimpedanz

Der Meßverstärker soll die am hochohmigen Referenzwiderstand abfallende Spannung nicht undefiniert belasten ( Stromteiler ), so daß nur Typen mit niedrigem Input- Bias- Strom ( in der Größenordnung von pA oder besser fA ) in Frage kommen.

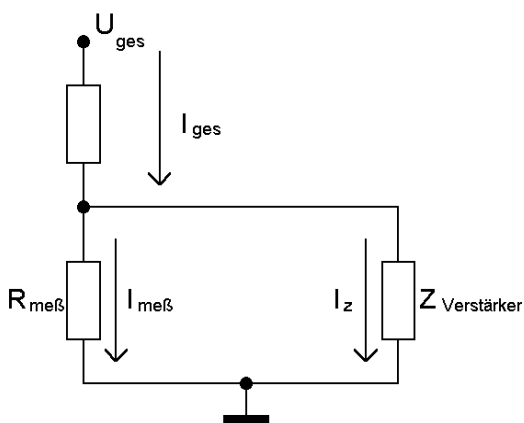


Abbildung 4 Stromteiler oder belasteter Spannungsteiler

Der Gesamtstrom  $I_{\text{ges}}$  wird aufgeteilt in den durch den Meßwiderstand fließenden Strom  $I_{\text{meß}}$  sowie den in die Eingangsimpedanz  $Z$  des Meßverstärkers fließenden Strom  $I_Z$ . Die dann am Meßwiderstand abfallende Spannung wird verfälscht

### 3.2.4 Zusammenfassung

Untersuchungen des Grundrauschens unterschiedlicher Operationsverstärker konnten in normaler ungeschirmter Laborumgebung aufgrund hochfrequenter Umgebungsstörungen nicht vorgenommen werden.

Zur Umgehung dieses Problems war daher ein Umzug des Meßplatzes in eine der EMV- Kabinen nötig. Die Kabine dämpft Umgebungsfelder zwischen 10 kHz und 1 GHz um ca. 100 dB.

Es zeigten sich weiterhin Störungen durch niederfrequente Felder der Vorschaltrosseln der Leuchtstoffröhren; während der Messungen wurde dann normales Glühlampenlicht genutzt.

Weiterhin wurden Störungen ( „unruhige Anzeige“ ) beobachtet, die aus Körperbewegungen des Meßpersonals resultierten ( statische Auf- und gleichzeitige Entladung der Kleidung und damit feldgebundene Beeinflussungen der hochempfindlichen Verstärker).

Der OPV- Eingang kann nicht mittels einer Z- Diode vor Überspannungen am Eingang geschützt werden, da der Sperrstrom durch die Diode sehr viel größer ist als der Strom durch den Prüfling. ( aus Datenblatt, zusätzlich meßtechnisch ermittelt ). Ein Einsatz von Dioden zum Schutz des Verstärkereingangs verfälscht daher auch das Meßergebnis.

Das zunächst als niedrig angenommene Grundrauschen des Chopperverstärkers konnte nicht bestätigt werden.

Der verwendete Verstärker soll mit einer positiven und einer negativen Spannung betrieben werden, um Pegelanpassungen zu vermeiden und den Eingangsbereich des AD- Wandlers von 5 V voll zu nutzen

Die Referenzspannung wurde erhöht, um einen größeren Strom durch den zu messenden Widerstand zu treiben und somit einen höheren Spannungsabfall am Meßwiderstand zu erzielen.

### 3.3 Auswahl der endgültigen Schaltung

Es wurde auf eine automatische Meßbereichsumschaltung verzichtet (Hystereseprobleme an Bereichsanfang und -ende). Statt dessen wird eine Vormessung bei geschütztem Verstärkereingang durchgeführt, der Meßbereich festgelegt und über LEDs angezeigt ( bzw Warnung bei zu kleinem Prüfwiderstand ). Der gewünschte Meßbereich wird dann manuell eingestellt.



Bei der Messung von Isolationswiderständen in der Größenordnung von  $G\Omega$  oder  $T\Omega$  werden die zu messenden Ströme extrem klein (siehe 2.2)  
Auch der Spannungsabfall am Meßwiderstand wird entsprechend klein, so daß dieser zur Weiterverarbeitung auf einen ausreichend hohen Betrag verstärkt werden muß.

Aus Sicherheitserwägungen wurde eine Prüfspannung zwischen 100 und 500 V gewählt ( tatsächlich 220 VDC, siehe unten ).

Der Meßwiderstand des Spannungsteilers besteht aus einer Widerstandskaskade in der Größe von  $100 M\Omega$ . Der Widerstand setzt sich zusammen aus selektierten 10- und  $1 M\Omega$  Widerständen mit einer Toleranz von 0,1 %. Diese Komponenten sind noch problemlos verfügbar.

Der Wert legt dann das Verhältnis von Prüf Widerstand zu Meßwiderstand fest ( siehe auch 2.2 ).

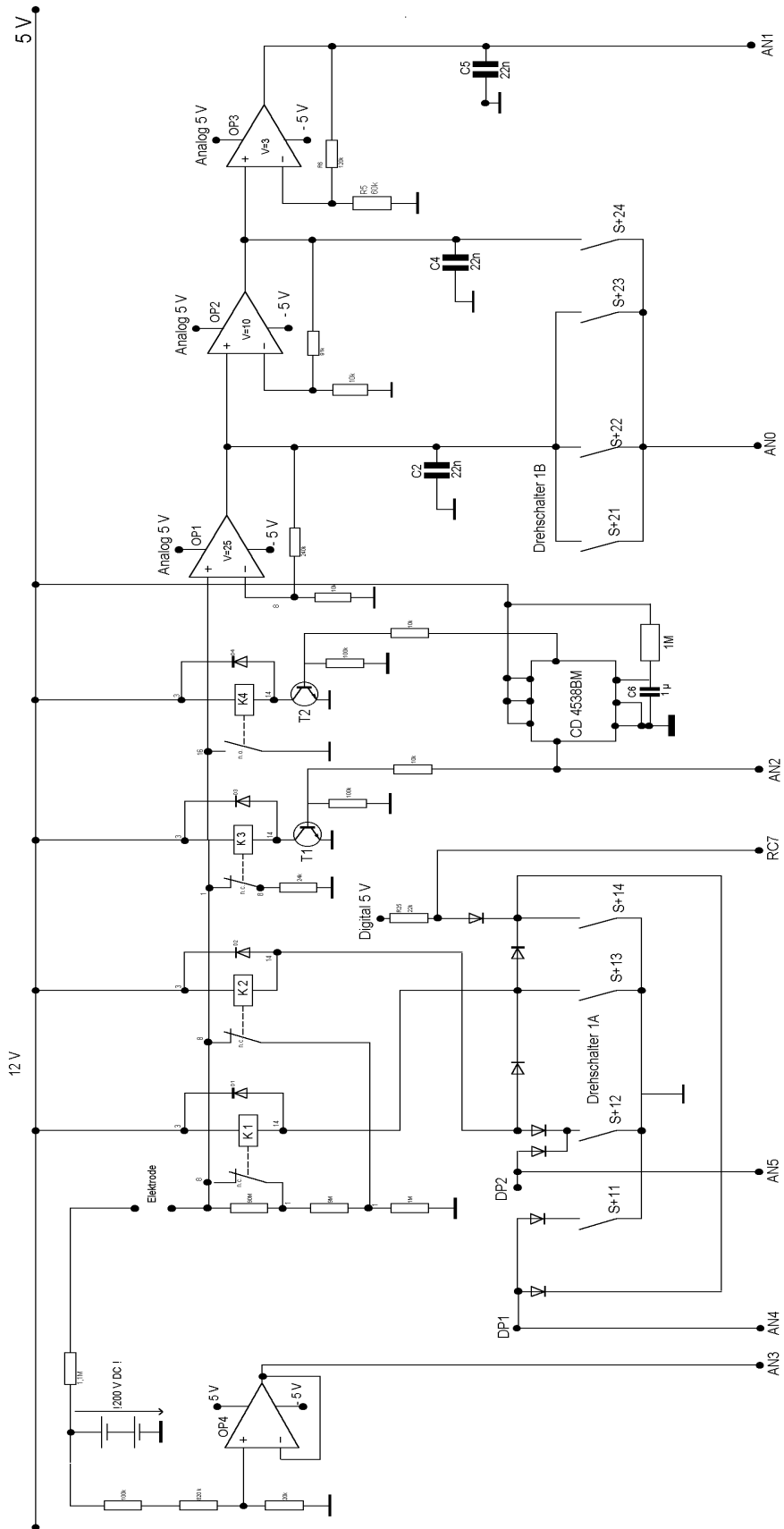


Abbildung 5 Verstärkerkaskade

Über die Relais K1 und K2 kann ein Meßwiderstand von 1, 10 oder 100 M $\Omega$  gewählt werden.

Es stellen sich dann am Meßwiderstand Spannungen gemäß Tabelle 1 ein.

Tabelle 1 Berechnung der Verstärkungsfaktoren

Meßbereich/ G $\Omega$	Rmeß/M $\Omega$	Meßspannung/ mV	Verstärkung V	Ausgangsspannung/V
1 bis 10	1	200 bis 20	25	5 bis 0.5
10 bis 100	10	200 bis 20	25	5 bis 0.5
100 bis 1000	100	200 bis 20	..... 25	5 bis 0.5
1 T bis 10 T	100	20 bis 2	.....250	5 bis 0.5

### 3.3.1 Verstärkungspfade

Im Ruhezustand ist der OP- Eingang über 24 kW geerdet und somit gegen Überspannungen geschützt. In Verbindung mit einem Prüf Widerstand gemäß Tabelle 2 stellt sich am Ausgang von OPV 3 mit  $V = 3$  eine Ausgangsspannung ein, die vom AD- Wandler ständig abgefragt und bewertet wird. Liegt die Ausgangsspannung innerhalb der angegebenen Grenzen, wird eine dazugehörige LED aktiviert. Bei versehentlichem Kurzschluß der Meßelektroden übersteigt die Spannung am 1. OP nicht 4,8 V, so daß eine Beschädigung vermieden wird. Die nachfolgenden Verstärker werden übersteuert. Am Ausgang des OPV 3 liegt dann eine Spannung von  $> 4$  V an, dieser Zustand wird durch Blinken aller 4 Bereichsindikator- LEDs angezeigt und warnt vor der Durchführung einer Messung. Der Eingang des AD- Wandlers wird durch eine 5,6 V- Z- Diode vor Überspannung geschützt.

Tabelle 2 Vormessung

Meßbereich/ GW	Rschutz/kW	Meßspannung/ $\mu$ V	Verstärkung V	Ausgangsspannung/ mV
1 1 bis 10	24	5300 bis 530	750	400 bis 4000
2 10 bis 100	24	530 bis 53	750	40 bis 400
3 100 bis 1000	24	53 bis 5,3	750	4 bis 40
4 1 T bis 10 T	24	5,3 bis 0,53	750	< 4

## 4 Realisierung

### 4.1 Musterbau

Gemäß der Forderungen aus 1.1 wird die Erstellung eines Funktions- oder Labormusters gefordert; ein Fertigungsstand kann nur nach einer Erprobungsphase, die nicht Bestandteil einer Diplomarbeit ist, erreicht werden.

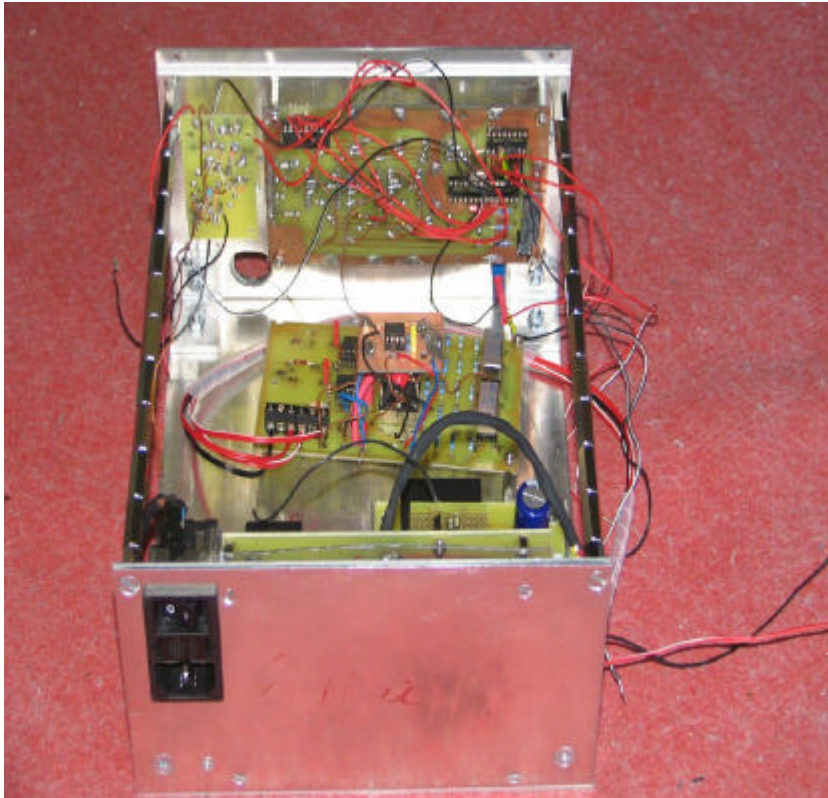
Liegt die Schaltung einzelner Baugruppen fest, wird hierfür eine Leiterkarte gefertigt. So wird eine Leiterkarte für den Digital- und Anzeigeteil hergestellt, die die Displays, LED, Treiber und den PIC enthält. Verbindungen zu den Segmenten der Displays werden als Leiterbahnen ausgeführt. Prozessorports, deren Verwendung zu Beginn des Leiterplattenentwurfs noch nicht vollständig festliegt, werden zur weiteren freien Verfügung auf Anschlußkontakte geführt.

Aus Sicherheitsgründen und zur Abschirmung der als empfindlich eingestuften Schaltung wird ein metallisches Tischgehäuse in Verbindung mit einem U-förmigen, selbstgefertigten Einschub benutzt.

Abbildung 6 Einschub von vorn

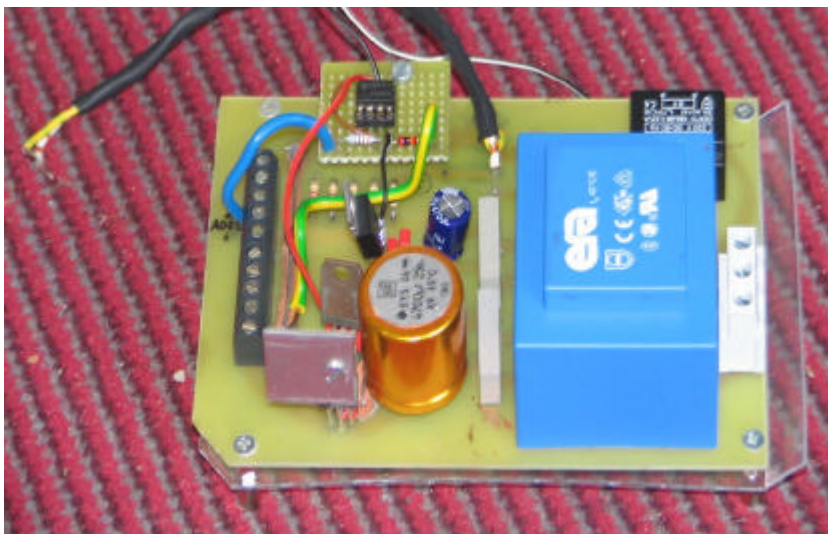


Abbildung 7 Einschub von hinten



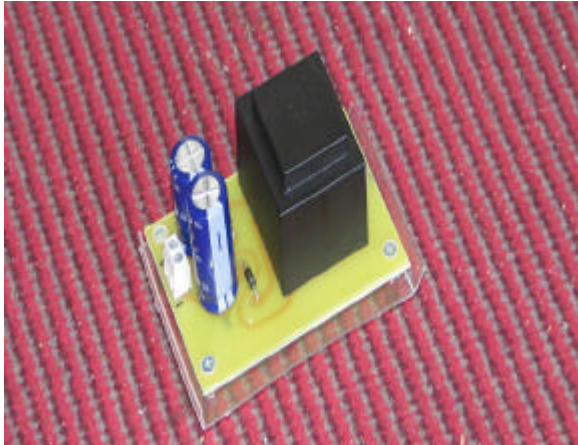
Die Versorgung erfolgt über das 230 V Netz ( Schutzklasse 1 ). Zwei gut berührungssicher konstruierte Leiterkarten umfassen die Kleinspannungs- und die 200 V- Versorgung. Diese Leiterkarten werden im hinteren Teil des Einschubs montiert, so daß nur eine kurze Verbindung zum mit Schalter und Sicherung versehenen 230 V- Einbaustecker nötig ist.

Abbildung 8 Kleinspannungsversorgung



Die 200 V- Versorgung wird separat realisiert . Die Gleichspannung wird über eine Leitung auf die Kleinspannungsleiterkarte geführt, wo sich auch der Schutzwiderstand von 1,1 MW und der Spannungsteiler mit Folgestufe für die Messung der 200 V- Spannung befinden.

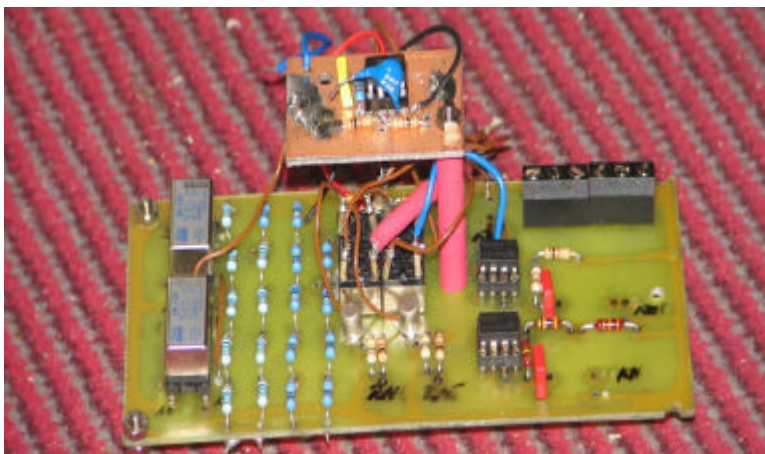
Abbildung 9 200 V- Versorgung



Die eigentliche Analogschaltung ( Meßverstärker ) wird mitsamt dem Eingangsspannungsteiler, den dazugehörigen Relais, den Schutzrelais K3 und K4, dem 10fach- Verstärker OPV 2 und dem 3fach- Verstärker OPV 3 auf einer weiteren Leiterkarte untergebracht. Diese Karte wird bedarfsweise in einem zusätzlichen Schirmkästchen aus Weißblech untergebracht.

Der eigentliche Meßverstärker OPV 1 wird auf einer separaten kleinen Leiterplatte untergebracht und oberhalb der Analogkarte montiert. Damit wird einem möglichen Modifikationsbedarf während der Entwicklung oder der Erprobungsphase des Gerätes Rechnung getragen.

Abbildung 10 Analogleiterkarte





## 4.2 Analogteil

### 4.2.1 Problemstellung bei der Realisierung

Aufgrund der mit dieser Schaltung zu messenden sehr kleinen Ströme dürfen keine Verfälschungen des Messvorgangs durch ungeeignete Komponenten erfolgen. Durch geeigneten Aufbau und Auswahl der Operationsverstärker wird versucht, die Querströme in die Verstärkerstufen und über das Leiterplattenmaterial klein zu halten.

Hierzu wird die hochimpedante nicht- invertierende Operationsverstärkerschaltung gewählt. Da auf Masse bezogene positive Spannungen gemessen werden, bedarf es keiner Pegelanpassung.

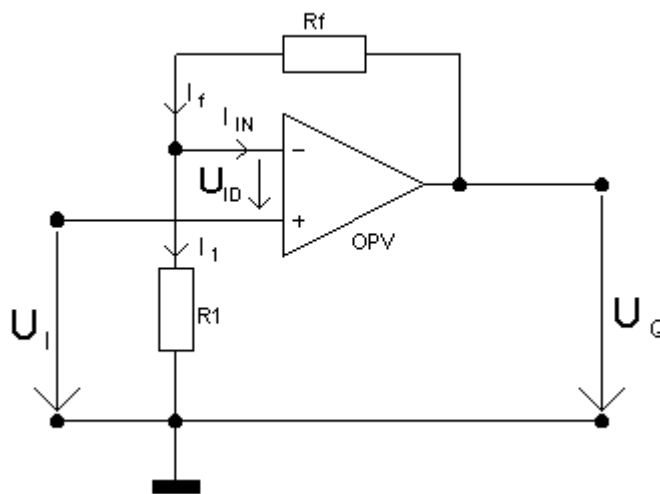


Abbildung 11 Grundschtung eines nicht- invertierenden Verstärkers

Berechnungsformel für die nicht- invertierende Operationsverstärkergrundschtung :

$$U_Q = U_I \cdot \left( 1 + \frac{R_f}{R_1} \right)$$

Zur Verstärkung des Meßsignals  $U_{\text{meß}}$  wird eine aus drei Operationsverstärkern bestehende Verstärkerkette aufgebaut ( Siehe Abbildung 5 Verstärkerkaskade..).

Meßbereich/ <b>GW</b>	Rmeß/ <b>MW</b>	Meßspannung/ mV	Verstärkung V	Ausgangsspannung
1	1 bis 10	200 bis 20	25	5 bis 0.5
2	10 bis 100	200 bis 20	25	5 bis 0.5
3	100 bis 1000	200 bis 20	..... 25	5 bis 0.5
4	1 T bis 10 T	20 bis 2	.....250	5 bis 0.5

Für die Meßbereiche 1..3 ist eine Verstärkung von 25-fach ausreichend, um den Pegel der Meßspannung dem Arbeitspegel des AD- Wandlers anzugleichen.

Die Meßspannung im Meßbereich 4 ist niedriger und wird durch den zweiten Operationsverstärker nochmals um den Faktor 10 verstärkt.

Hierdurch wird der bei 5 V liegende Arbeitsbereich des AD- Wandlers voll ausgenutzt. Zum Schutz vor Überspannungen wird liegt eine 5,6 V- Z- Diode am AD- Wandlereingang.

Der Operationsverstärker OPV1 muß einen extrem kleinen Biasstrom aufweisen ( siehe 3.

Die Wahl fiel zunächst auf den Operationsverstärker TLC 271 mit einem Biasstrom von < pA.

Die Verstärkung wurde mit den Widerständen  $R_{f1}$  und  $R_1$  auf den Wert  $V_1 = 25$  eingestellt :

$$V_1 = \frac{U_Q}{U_I} = 1 + \frac{R_{f1}}{R_1}$$

$$V_1 = 1 + \frac{240k\Omega}{10k\Omega} = 25$$

Das Ausgangssignal wird über den Bereichsumschalter zum Eingang AN 0 des AD- Wandlers geführt.

Für die zweite Verstärkerstufe wurde als Operationsverstärker OPV 2 gleichfalls ein TLC 271 gewählt

Die Verstärkung wurde mit den Widerständen  $R_{f2}$  und  $R_2$  auf den Wert  $V_2 = 10$  eingestellt :

$$V_2 = U_Q / U_I = 1 + R_{f2} / R_2$$

$$V_2 = \frac{U_Q}{U_I} = 1 + \frac{R_{f2}}{R_2}$$

$$V_2 = 1 + \frac{91k\Omega}{10k\Omega} = 10$$



Das Ausgangssignal von OPV2 wird über den Bereichsumschalter zum AD-Wandlereingang AN 0 des Prozessors geführt.

Auch für die dritte Verstärkerstufe wurde als Operationsverstärker OPV3 ein TLC 271 gewählt.

Dessen Verstärkung wurde durch externe Beschaltung auf  $V=3$  eingestellt :

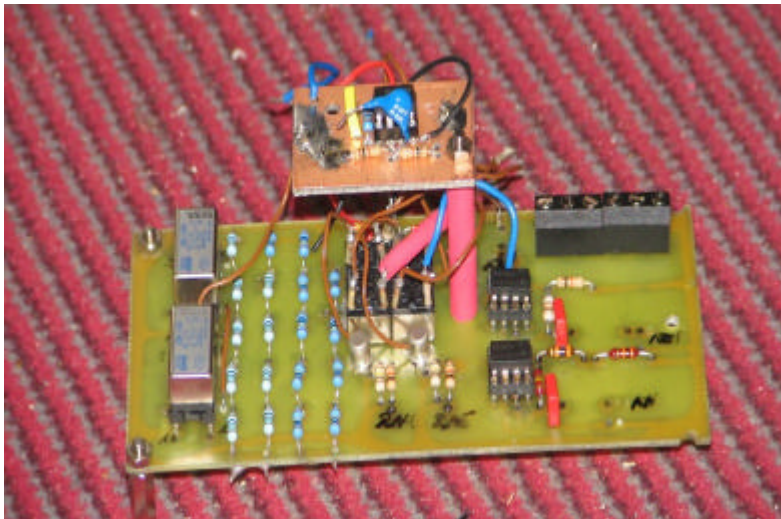
$$V_3 = \frac{U_o}{U_i} = 1 + \frac{R_{f3}}{R_3}$$

$$V_3 = 1 + \frac{120\text{k}\Omega}{60\text{k}\Omega} = 3$$

Diese letzte Verstärkerstufe verstärkt das Ausgangssignal des OPV2 und dient der Vormessung zur Meßbereichsermittlung.

Die Referenzwiderstandskette von  $100\text{M}\Omega$  besteht aus Metallschichtwiderständen mit einer Toleranz von 0,1 %. Die Löt pads auf der Leiterplatte wurden zur Reduktion von Kriechströmen über das Leiterplattenmaterial mit größtmöglichem Abstand angebracht.

Abbildung 12 Analogleiterplatte



Die Relais K1- K4 werden über eine Betriebsspannung von 12 V versorgt.

Die Relais K1 und K2 sind im Ruhezustand geschlossen und werden erst bei Betätigung des Drehschalters geöffnet :

Tabelle 3 Zustand der Relais

Relais K1	Relais K2	Referenzwiderstand
geschlossen	geschlossen	1 M $\Omega$
geschlossen	offen	10 M $\Omega$
offen	offen	100 M $\Omega$

Relais K3 ist ebenfalls im Ruhezustand geschlossen und wird erst während des Beginns eines Hauptmessvorgangs geöffnet ( Trennung des Schutzwiderstands vom OPV- Eingang ).

Relais K 4 ist im Ruhezustand offen und schließt bei Aktivierung den Eingang des OPV1 kurz, wodurch die exakte Offsetspannung von OPV1 oder der Reihenschaltung von OPV1 und OPV2 über den AD- Wandlereingang AN0 ermittelt wird.

Während der Vormessung wird die Spannung kontinuierlich alle 5 Sekunden gemessen.

Die 200 V- Referenzspannung wird über einen Spannungsteiler dem AD- Wandler AN3 zur Ermittlung des genauen Spannungsbetrags für die Berechnung des Meßergebnisses zugeführt.

Dieser Spannungsteiler besteht aus einem Schutzwiderstand von 100 k $\Omega$  und den Widerständen R = 820 k $\Omega$  und R = 20 k $\Omega$  sowie einem Impedanzwandler OPV 4, um den Spannungsteiler nicht mit dem niedrigen Eingangswiderstandes des AD- Wandlers zu belasten.

Für den Impedanzwandler wurde der Standardoperationsverstärker TL 061 gewählt.

### 4.3 Spannungsversorgung

Folgende Spannungen werden für die einzelnen Baugruppen benötigt :

- + 5 V DC – für Prozessor und 7- Segment- Anzeige
- +/- 9V DC für Meßverstärker
- +/- 12V DC optional für Meßverstärker
- 200 V Meßspannung für die Prüfelektrode

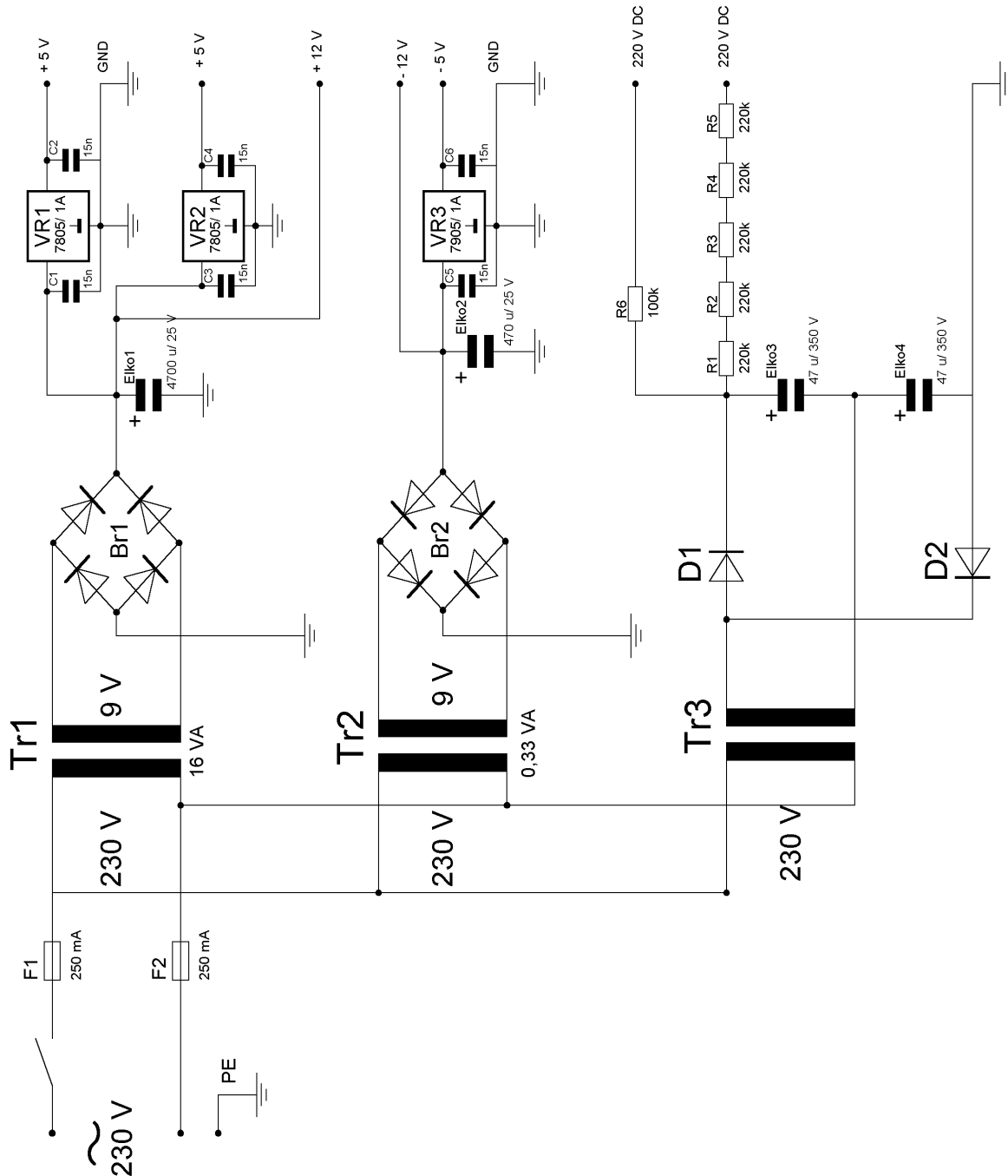


Abbildung 13 Stromlaufplan Spannungsversorgung

#### 4.3.1 Erzeugung der einzelnen Betriebsspannungen

Die 230 V Netzspannung wird mit dem Printtransformator Tr1 (16 VA, Pri 230 V/ Sec 9V) heruntertransformiert. Mit dem Brückengleichrichter BR1 wird diese Wechselfspannung gleichgerichtet, mit dem Elektrolytkondensator Elko1 ( 4700  $\mu$ F/ 25 V) geglättet und zum Festspannungsregler VR1 (L7805) geführt. Dieser erzeugt eine stabilisierte 5 V Spannung für den Digitalteil.

Mit einem weiteren Festspannungsregler VR2 (L7805 ) wird die stabilisierte 9 V - Spannung für den Analogteil erzeugt. Die am Elko anstehende Spannung von etwa +12 V wird über Anschlußleisten nach außen geführt ( Versorgung der Relais ).

Über den zweiten Printtransformator TR2 ( 0,33 VA, Pri 203 V/ Sec9 V ) und den Brückengleichrichter BR2 wird eine Spannung von etwa - 12 V erzeugt, die mittels des zweiten Festspannungsreglers VR3 ( L7909) auf – 9V stabilisiert wird.

Die Kondensatoren C1- C6 mit je 15nF an den Festspannungsreglern verhindern parasitäre Regelschwingungen..

Die 200 V Gleichspannung für die Meßelektrode werden über eine Spannungsverdopplerschaltung erzeugt .Diese besteht aus dem dritten Printtransformator T 3 mit zwei in Reihe geschalteten Sekundärspannungen von je 30 V und zwei in Reihe geschalteten Einweggleichrichterschaltungen ( „positiv“ und „negativ“ gegenüber dem gleichen Bezugspunkt ). Die tatsächliche Leerlaufspannung des Trafos beträgt etwa 80 V, die Spitzenspannung an den Elektrolytkondensatoren Elko 3 und Elko 4 (47 $\mu$ F/ 350 V) somit etwa 110 V, nach Reihenschaltung entsteht eine Gleichspannung von etwa 220 V.

Folgend wird die Referenzspannung betragsunabhängig “ 200 V“ genannt. Sie wird über die aus den Widerständen R1- R5 ( je 220 K $\Omega$  ) bestehende 1,1 M $\Omega$ - Widerstandskette zum Meßelektrodenanschluß geführt.

Diese Widerstände haben eine reine Schutzfunktion bei ungewolltem Berühren der Elektrode; es fließt dann ein maximaler, als ungefährlich eingestufte Berührungsstrom von etwa 0,5 mA. Dieser Wert ist als Ersatzableitstrom für Medizingeräte zulässig. Für den Fall eines Bauteilversagens werden 5 Widerstände in Reihe geschaltet.

Über den 100 k $\Omega$ - Widerstand R6 werden die 200 V DC über einen zweiten Abgriff bereitgestellt. Dieser Widerstand ist Teil einer Teilerkette, die aus zusätzlichen 820 k $\Omega$  und 20 k $\Omega$  besteht und die 200 V durch 47 teilt. Dieser wird über den als hochimpedanten Spannungsfollower beschalteten OPV 4 mit dem AD-Wandlereingang AN3 verbunden.

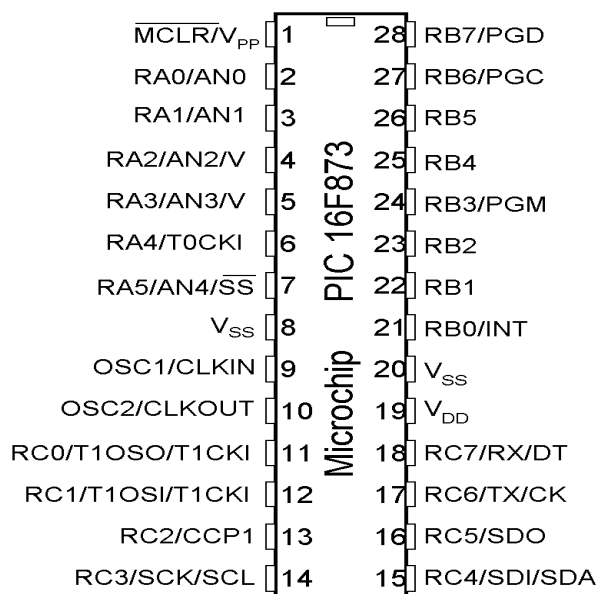
Siehe dazu auch Abbildung 13 „Stromlaufplan Spannungsversorgung“, "Abbildung 8 Kleinspannungsversorgung“ und „Abbildung 9 200 V- Versorgung“.

## 4.4 Digitalteil

### 4.4.1 Prozessor

Zur Verarbeitung der Meßspannungen, Realisierung der Anzeige und Steuerung des Meßablaufs wurde der Mikroprozessor PIC 16F873 von Mikrochip gewählt. Dieser hat sich unter den zahlreichen Mikrocontrollertypen als für die Lösung dieser Aufgaben als vollkommen ausreichend und zweckmäßig erwiesen.

**Abbildung 14 Pin- Belegung des PIC16F873**



Für die Auswahl dieses Prozessor ausschlaggebende Kriterien:

- für diese Zwecke ausreichenden Funktionen,
- problemlose Verfügbarkeit,
- günstiger Preis
- Stabilität und Leistungssicherheit
- Second source: Möglichkeit des Austauschs durch äquivalente Typen.

Eigenschaften (Features) des PIC 16F873 :

- RISC- Prozessor
- Arbeitsfrequenzen bis 20 MHz
- 4 k Flash Program Memory ( 14- Bit- Worte )
- Data Memory Bytes 192
- EEPROM DATA Memory 128
- 13 Interrupts
- I/O Ports : A, B, C
- 3 Timer
- 10- Bit Analog- to- Digital Modul
- 35 Instructionsets

Seine Aufgaben sind :

- Ansteuerung der Anzeige
- Messen der Meßspannungen an den einzelnen OPV- Ausgängen
- Messen der Referenzspannung
- Speichern der Meßspannungen
- Berechnen und Anzeigen des Widerstandswerts

Zur Erstellung des Quellcodes in der Programmiersprache C wurde der CCS C Compiler verwendet.

Der Flash- Rom des Controllers wurde über das Universalprogrammiergerät Galep 3 der Firma ConiTech und der dazugehörigen Software beschrieben.

#### 4.4.1.1 Aufbau der Prozessorplatine :

Da der PIC16F873 keinen internen Oszillator besitzt, muß der nötige Arbeitstakt des Prozessors über eine externe Beschaltung eingestellt werden. Eine Arbeitsfrequenz von 4 MHz reicht zur Bearbeitung der Aufgaben vollkommen aus; es wurde eine Oszillatorschaltung mit einem 4MHz- Quarz ( verbunden mit den PINs 9 (Osz1/Clkin) und 10 (Osz2/Clkout)) und zwei 22 pF Kondensatoren gegen Masse, aufgebaut.

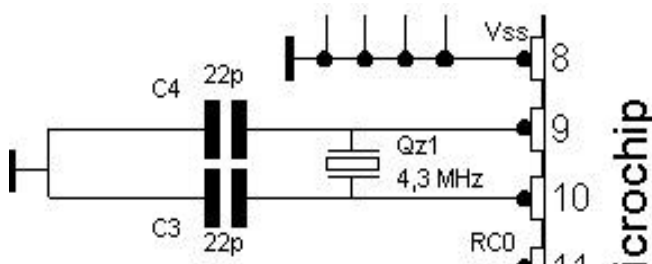


Abbildung 15 Oszillatorschaltung

#### 4.4.1.2 Anzeige

Die Ausgabe des Meßergebnisses erfolgt über drei 7- Segment- Anzeigen. Diese besitzen je eine gemeinsame Anode und werden im Multiplexverfahren betrieben.

Der Prozessor kann für diesen Zweck keinen ausreichend hohen Strom für eine optimale Helligkeit der Anzeigen liefern. Somit werden die Anoden der Anzeigen über je einen PNP- Transistor angesteuert. Die Ansteuersignale werden den Prozessorpins RB7 (1. Digit ), RB6 (2. Digit ) und RB5 (3. Digit ) entnommen. Die einzelnen Segmente der Anzeigen werden über die Prozessorpins RC0- RC7 (Seg a- Seg g) angesteuert ( siehe Abbildung 16 7- Segment- Anzeige + Prozessor ).

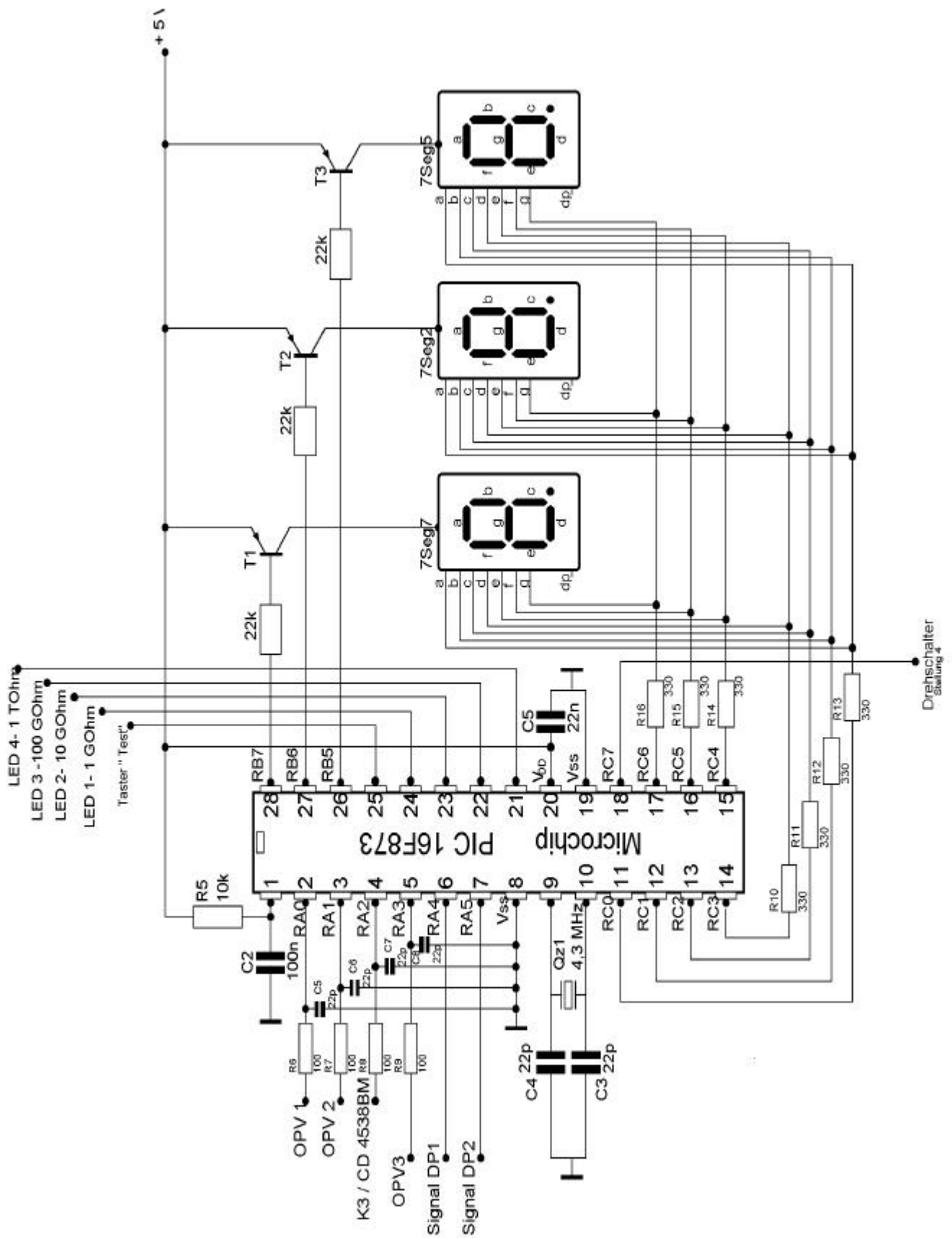


Abbildung 16 7- Segment- Anzeige + Prozessor

#### 4.4.2 Anzeigebetrieb

Zum Multiplexen der Anzeigen werden die Anoden der einzelnen Digits über die pnp-Transistoren T1- T3 mit einer Frequenz von mindestens 50 Hz ( Trägheit des menschlichen Auges ) angesteuert. Die Basis des jeweiligen pnp- Transistors wird über den jeweiligen Prozessorpin auf Low gelegt.

Außerdem werden die Segmente einer Anzeige der Ziffer entsprechend durch die Prozessorpins RC0- RC6 auf Low gelegt.

Ziffer	Port B zur Zifferausgabe								Hex- Wert
	RB0	RB1	RB2	RB3	RB4	RB5	RB6	RB7	
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0xC0
1	1	1	1	1	1	0	0	1	0xF9
2	1	0	1	0	0	1	0	0	0xA4
3	1	0	1	1	0	0	0	0	0xB0
4	1	0	0	1	1	0	0	1	0x99
5	1	0	0	1	0	0	1	0	0x92
6	1	0	0	0	0	0	1	0	0x82
7	1	1	1	1	1	0	0	0	0xF8
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0x80
9	1	0	0	1	0	0	0	0	0x90

Tabelle 4 Zuordnung der Pins des Port B und Ansteuerung zur Ziffernerzeugung

#### 4.4.3 Spannungsmessung

Zur Spannungsmessung werden die Eingänge AN0, AN1 und AN3 des prozessorinternen AD- Wandlers verwendet.

Diese werden ebenfalls im Multiplexverfahren betrieben und zu definierten Zeitpunkten angesteuert .

Am AD- Wandlereingang AN1 wird alle 5 Sekunden die Ausgangsspannung des OPV 3 als Vormessung zur Bereichseinstellung ermittelt.

Der exakte Betrag der Referenzspannung Uref ( " 200V " ) wird über den Spannungsteiler auf der Versorgungsplatine und über den mit AD- Wandlereingang AN3 verbundenen Spannungsfollower erfaßt.

Nach der Vormessung über AN1 wird dem Benutzer über die vom Prozessor angesteuerten Leds neben der 7- Segment- Anzeige der zu wählende Meßbereich signalisiert.

Dieser Meßbereich wird dann über den Drehschalter mit vier Stellungen und zwei Schalteebenen eingestellt.

Die eine Schalteebene ist über die Diodenmatrix, bestehend aus den Dioden D1- D7, mit den Digitalpunkten DP1 und DP2, sowie mit den Relais K1 und K2 verbunden. Mit der zweiten Schalteebene wird, abhängig vom Meßbereich, der Ausgang des OPV1 oder OPV2 mit dem AD- Wandlereingang AN0 verbunden.



Nach dem Einstellen des Meßbereichs über den Anwender muß der Taster "Test" zum Starten des Meßvorgangs betätigt werden. Dieser sendet ein High- Signal zum Prozessor- PIN RB0.

In Schalterstellung 4 ( oberster Meßbereich ) wird gleichzeitig über einen Pull- up- Widerstand ein Low- Signal an das Prozessorpin RC7 gegeben, welches dem Prozessor mitteilt, daß die Meßspannung nun über den Operationsverstärker OPV2 ermittelt wird.

Bei der Verrechnung des Meßspannungswertes wird nun der Faktor 10 mit berücksichtigt .

Weitere Pinbelegung des Prozessors :

Zur Ansteuerung der 4 LEDs für den ermittelten Meßbereich aus der Vormessung dienen :

RB4 Led 1, 1G  
 RB3 Led 2, 10 G  
 RB2 Led 3, 100G  
 RB1 Led 4, 1T

Die restlichen PINs des PORT A sind wie folgt belegt :

AN2 Ansteuerung des Relais K3 und des Monoflops ( indirekte Ansteuerung des Relais K4 )

AN4 Signal zur Erkennung des Meßwiderstandes über Digitalpunkt 1

AN5 Signal zur Erkennung des Meßwiderstandes über Digitalpunkt 2

#### 4.4.4 Erkennung des jeweiligen Meßwiderstands

Für eine exakte Berechnung des zu messenden Prüflingwiderstands muß dem Prozessor mitgeteilt werden, über welchen Betrag der Widerstandskaskade die aktuelle Meßspannung ermittelt wurde.

Da die Anzahl der Pins des Prozessor begrenzt ist, wurde zum Ansteuern der Relais K3 und K4 und zur Signalisierung des richtigen Meßwiderstandes folgende Lösung entwickelt :

Das Monoflop CD 4538 BM und das Relais K3 ( Vormessung; Schutz des Verstärkereingangs ) werden gleichzeitig über das Pin RA3 des Prozessors mit einer High- Flanke angesteuert.

Das Relais K4 wird über den Ausgang des Monoflops für die Zeit  $t = 1$  s geschlossen ( OPV1- Eingang gegen Masse ) .

Der Prozessor ermittelt innerhalb dieses Zeitfensters die Offsetspannung des OPV1 oder der Summe aus OPV1 und OPV2.

Die Zeitkonstante des Monoflops wurde durch externe Beschaltung mit einem R- C- Glied realisiert :

$$T = R \cdot C = 1 \text{ MOhm} \cdot 1 \mu\text{F} = 1 \text{ s ( Formel gemäß Herstellerangaben )}$$

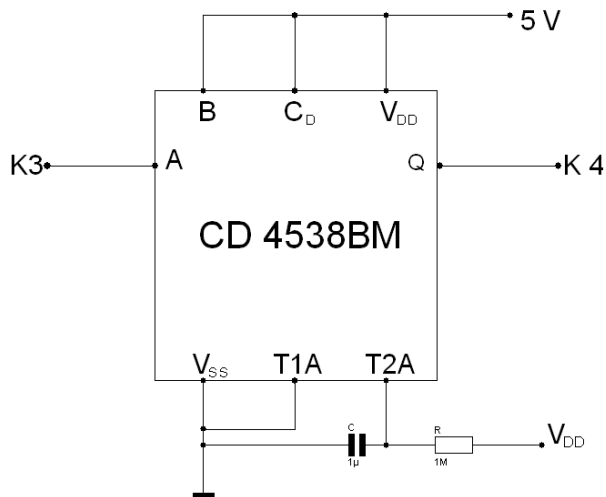


Abbildung 17 Monoflop CD 4538 BM

Über die Diodenmatrix ( Ansteuerung der Digitalpunkte DP1 und DP2 ) und das Low- Signal von RC7 ( 10-Fach Verstärkung ) kann der Prozessor über folgende Wahrheitstabelle den eingestellten Meßwiderstand erkennen :

Drehschalterstellung	Meßwiderstand	Ansteuerung von		
		PIN RC7	AN4 / DP1	AN5 / DP2
1	1 M	0	0	0
2	10 M	1	1	0
3	100 M	1	0	0
4	100 M	0	0	1

Tabelle 5 Meßwiderstandserkennung

## 4.5 Programmablauf

Nach Einschalten des Meßgeräts wird zuerst die Initialisierungsfunktion des Programms aufgerufen. Hiermit wird der AD-Wandler des Prozessors eingestellt.

Es erfolgt:

- Löschen des Anzeigebuffers ( Ausgabe der Ziffern 000 auf der Anzeige )
- Einstellung der jeweiligen Port- Pins als Ausgänge und Eingänge
- Voreinstellungen des AD- Wandlers
- Konstantendefinition der auszugebenden Ziffern
- Initialisierung des Timers 0 ( Reload- Wert, Timer 0- Freigabe )
- Globale Interruptfreigabe
- Eingang RBO für Taster " Test " definiert als Boole'sches Ergebnisformat
- Initialisierung der Port- Pins mit definierten Werten

-Zusätzlich wird der AD- Wandler gestartet und das Ergebnisregister auf „rechtsbündig“ festgelegt.

-Die Samplingfrequenz des AD- Wandlers wird aus dem Arbeitstakt des Prozessors abgeleitet und auf die halbe Oszillatorfrequenz eingestellt.

-Die Ansteuerung der drei 7-Segment-Anzeigen erfolgt durchgehend; wird kein Meßwert angezeigt, so wird auf jeder der Anzeigen die Ziffer 0 ausgegeben (Default-Wert).

### 4.5.1 Ablauf des main-Programms

- Vormessung
- bedingte Hauptmessung (OPV1 oder OPV2 )
- Rechnung
- Ausgabe auf der Anzeige

Zu Beginn wird alle 5 s eine Vormessung zur groben Ermittlung des Meßbereichs durchgeführt.

Anschließend wird durch eine bedingte Abfrage im Programm, abhängig vom Meßbereich, eine der vier LEDs oder alle ( OverfLow ) angezeigt.( siehe Tabelle 1 )

### 4.5.2 Hauptmessung

Starten eines Meßvorgangs durch Betätigen des Tasters "Test "bricht die Vormessung ab.

Der Meßablauf in der Funktion Hauptmessung geschieht in folgender Reihenfolge :

Der AD- Wandlerkanal AN0 wird eingestellt. Das Relais K3 wird geöffnet ( Trennung des Verstärkereingangs vom 24 k $\Omega$ - Schutzwiderstand ) und der Verstärkereingang des OPV1 wird für die Dauer von 1 s ( Querverweis ) über das Relais K4 - kurzgeschlossen.

Die Offsetspannung wird bestimmt und abgespeichert.

Im obersten Meßbereich ( 1 T Ohm ) wird die Summe der Offset- Spannungen des OPV1 und OPV2 über den Verstärker OPV2 bestimmt.

Die Meßspannung über den eingestellten Meßwiderstand (1- 10- 100 MOhm) wird verstärkt, ermittelt und abgespeichert.

Im obersten Meßbereich ( 1T Ohm ) wird der Port AN2 über den Drehschalter auf Low gezogen. Damit wird signalisiert, daß die Messung über OPV 2 erfolgt. ( V = 10 zur Widerstandsberechnung )

Bei der Messung des zu prüfenden Widerstands erfolgt eine Aufladung der Kapazitäten des Prüfaufbaus, so daß die eigentliche Meßspannung möglicherweise nur langsam ansteigt ( Zeitkonstante von einigen TΩ und einigen pF ).

Hierzu wird der der vorherigen Meßwert mit dem aktuellen Meßwert verglichen :  
 $U_{\text{meß-alt}} < U_{\text{meß-neu}}$  .

Es wird solange im 5- s- Takt gemessen, bis die letzten drei Meßwerte konstant bleiben; anschließend wird der letzte Meßwert verarbeitet und angezeigt

Ein Meßvorgang kann somit durchaus einige 100 s dauern.

Solange kein Ergebnis vorliegt, werden auf der Anzeige drei blinkende Nullen ausgegeben.

Nach Abschluß dieser Meßreihe wird der AD- Kanal AN3 eingestellt, der genaue Betrag der 200 V Referenzspannung bestimmt und abgespeichert.

Nach der Hauptmessung wird die Funktion zur Berechnung des Widerstands aufgerufen.

In der eigentlichen Widerstandsberechnung wird der letzte Meßwert um den Wert der Offsetspannung korrigiert.

Für den obersten Meßbereich ( 1 T Ω ) wird der Verstärkungsfaktor auf V = 250 geändert.

Nach erfolgter Widerstandsberechnung wird über die Funktion „Segmentzuweisung“ die jeweilige Ziffer des Rechenergebnisses dem entsprechenden Digit der Anzeige zugeordnet und angezeigt.

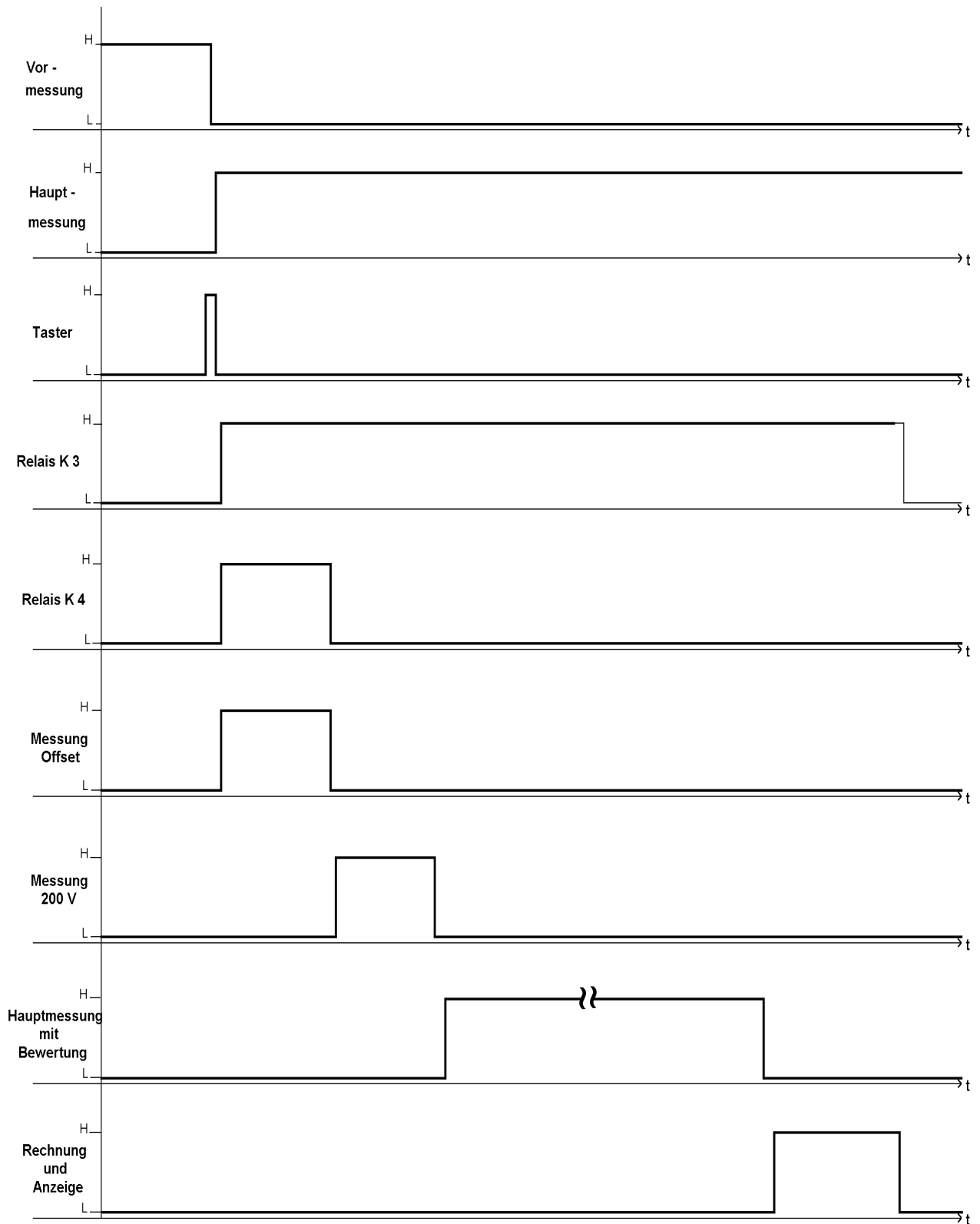


Abbildung 18 Zustandsdiagramm zum Programmablauf

## 4.5.3 Flußdiagramm

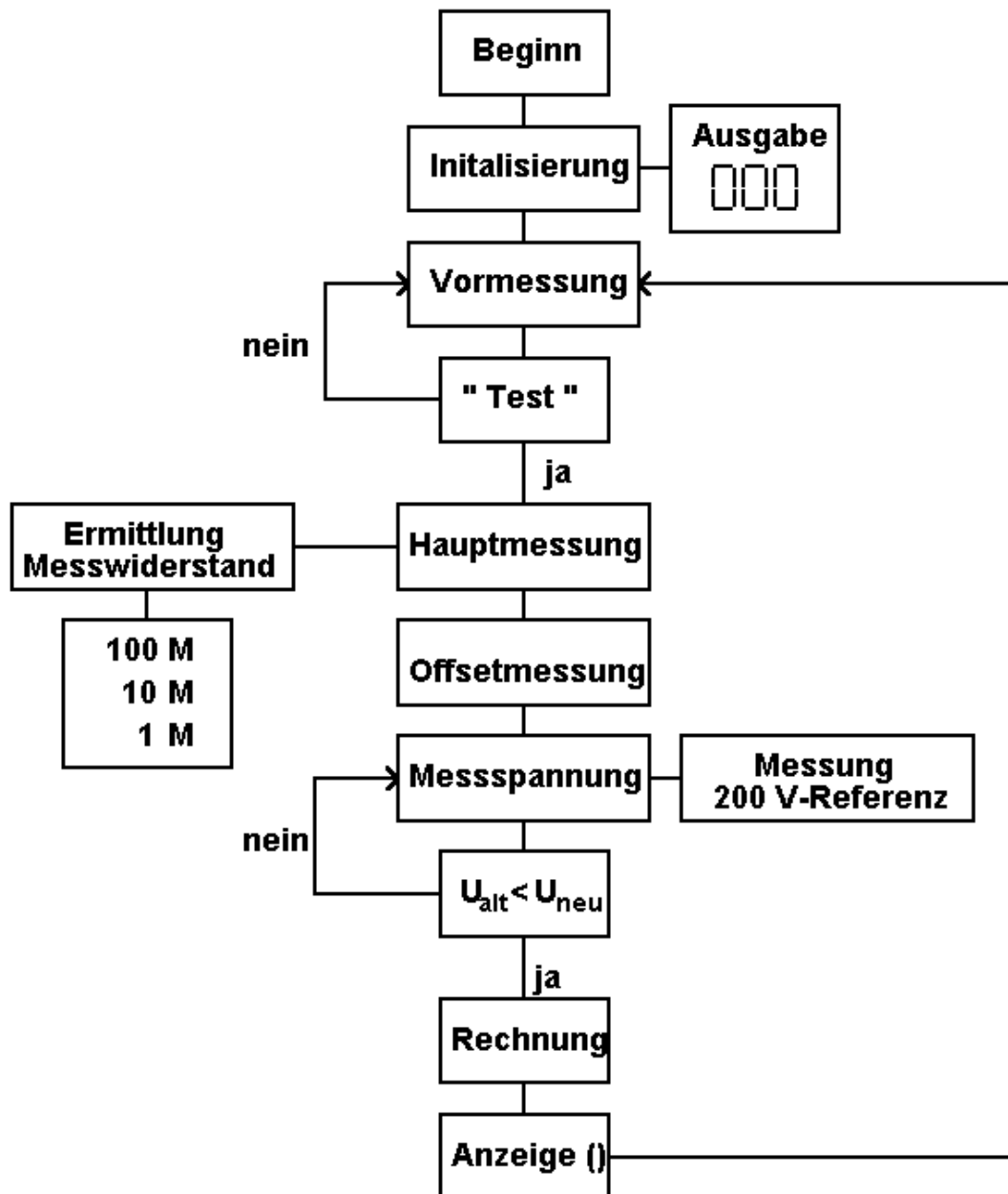


Abbildung 19 Flußdiagramm

## 4.6 Bedienung

### 4.6.1 Sicherheitshinweis

An der Meßelektrode liegen hochohmig ständig etwa 220 VDC an. Im Betrieb wird die Elektrode mit einer Schutzhaube versehen.

Es wird eine Elektrode gemäß MilStd 883 mit 2 metallischen Kontakten ( Schneiden ) bei einer Kantenlänge von 1 Zoll ( 25,4 mm ) zur Ermittlung des Flächenwiderstands mitgeliefert. Die Nutzung anderer Elektroden ist möglich.

### 4.6.2 Meßreihenfolge

Zur Gewährleistung einer präzisen Messung ist folgende Reihenfolge einzuhalten :

Die Meßelektroden werden mit definierter Kraft auf die zu vermessende Oberfläche gedrückt.

Während der Vormessung wird ein Meßbereich ermittelt, der vom über den Drehschalter eingestellt wird.

Der Bediener startet über den Schalter " Test " den eigentlichen Meßvorgang. Der Meßvorgang kann einige 100 s dauern-

### 4.6.3 Handhabung

Aufgrund der sehr hohen Empfindlichkeit dieses Meßgerätes wird die Einhaltung folgender Handhabungsvorschriften empfohlen.

Verwendung nur in gut geschützter Umgebung ( Meßkabine, geschirmter Kasten ).  
Plausibilitätsprüfung ( Durchführung mehrerer Messungen ).

Abbildung 20 Gesamtgerät von vorn



Abbildung 21 Gesamtgerät von hinten





Abbildung 22 Elektrode zur Oberflächenwiderstandsmessung

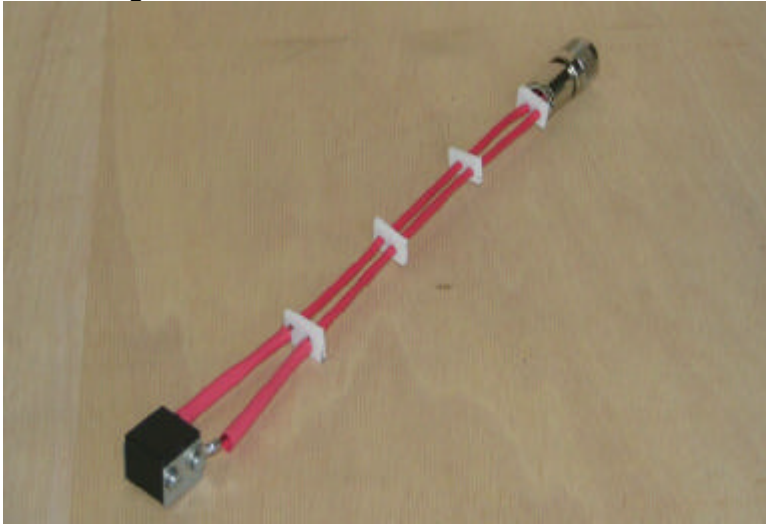
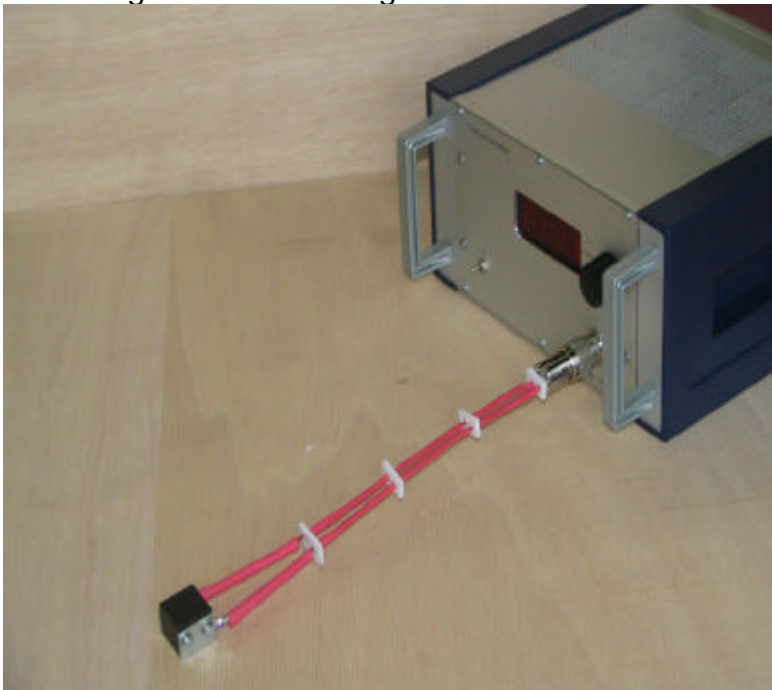


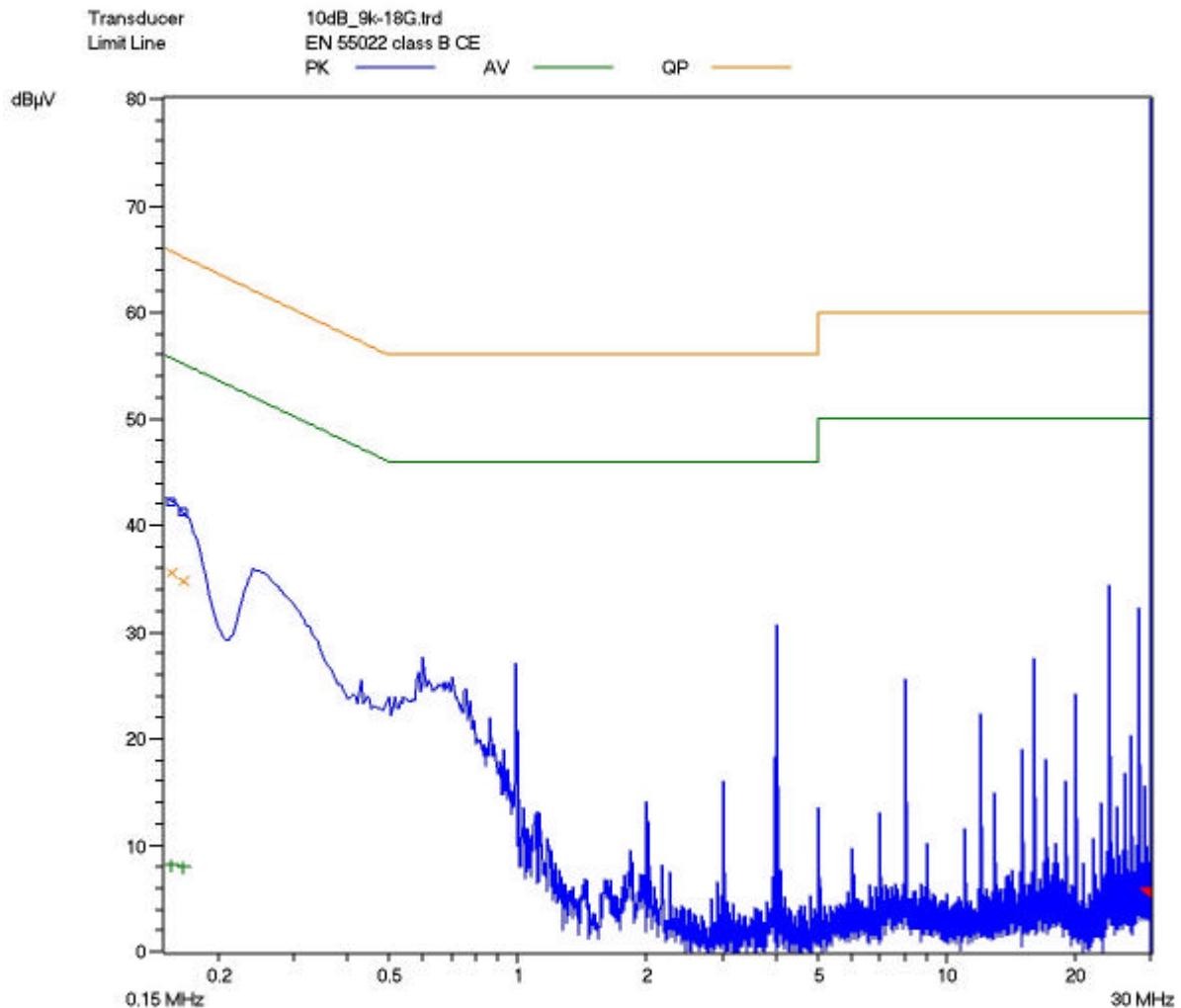
Abbildung 23 Elektrode angeschlossen



#### 4.7 EMV

Das Gerät wird gemäß EN 61326-1 nach „Einrichtung für Labor- und Leittechnik“ bei „gelegentlichem Gebrauch“ klassifiziert.

#### Diagramm der Funkstörspannung auf der Versorgungsleitung



Im Bereich zwischen 0,15 und etwa 1 MHz ist deutlich die von den Gleichrichterdiode generierte Rauschspannung zu erkennen. Als diskrete Signale treten alle Harmonischen von  $\frac{1}{4}$  der genutzten Taktfrequenz auf ( alle 1 MHz ). Die Meßwerte der Funkstörstrahlungsmessung liegen unterhalb der Meßgrenze des Empfängers.

Auf eine Störfestigkeitsprüfung wurde aus den Erwägungen gemäß „Handhabung“ verzichtet.

## 5 Überprüfung

### 5.1 Fehlerbetrachtung

Das Meßergebnis ist ein Funktion der Meßwerte :

$$y = f (x_1, x_2, \dots x_n)$$

Die Fehlerfortpflanzung behandelt den Einfluß der Meßfehler der Meßwerte auf das Meßergebnis .

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + \dots + F_n^2}$$

Die bei einer Messung entstehende Fehlerkette setzt sich zusammen aus :

- Vormessungsfehler
- Hauptmessungsfehler
- Rundungsfehler durch Widerstandsberechnung
- Quantisierungsfehler
- Anzeigefehler
- Meßfehler durch Leckströme über die Isolation ( nicht meßbar )
- Meßfehler durch Biasströme der Operationsverstärker ( nicht meßbar )
- Fehler durch Thermospannungen im  $\mu\text{V}$ -Bereich durch Kupfer- Zinn-Kontaktierungen ( nicht meßbar )

#### 5.1.1 Fehler bei der Referenzspannungsmessung

Das genaue Teilerverhältnis des Spannungsteilers wurde meßtechnisch zu 47,4657:1 ermittelt. (  $F_R = 0,1 \%$  )

Dieser Faktor ist über die Software berücksichtigt worden.

Hinzu kommt ein Quantisierungsfehler von  $F_{QR} = 0,1 \%$ .  
(  $1 \text{ LSB} = U_{\text{ref}} / 2^8 = 5\text{V} / 1024 = 4,8828 \text{ mV}$  )

#### 5.1.2 Fehler bei der Meßspannungsmessung

Die Widerstandstoleranzen der Präzisionsmeßwiderstand liegen bei 0,1% Genauigkeit.

Die genauen Verstärkungsfaktoren der ersten beiden Verstärker der Verstärkerkette wurden auf 0,1 % Genauigkeit bestimmt :

$$V_1 = 25,8859 \quad (F_{M1} = 0,1 \%)$$

$$V_2 = 10,1637 \quad (F_{M2} = 0,1 \%)$$

Im Meßbereich 4 ( 1T ) ist der Meßfehler daher um 0,1 % größer als in den unteren Meßbereichen.

Hinzu kommt ein Quantisierungsfehler von  $F_{QM} = 0,1 \%$  .

### 5.1.3 Fehler bei der Offsetspannungsmessung

### 5.1.4 Rundungsfehler bei der Widerstandsberechnung

### 5.1.5 Anzeigefehler

### 5.1.6 Fehlerfortpflanzungsbetrachtung

Über die bekannte Formel der Fehlerfortpflanzung

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + \dots + F_n^2}$$

läßt sich der gesamte Meßfehler des Meßgerätes bestimmen :

( Indizierung gemäß "Fehler bei der Referenzspannungsmessung" und „Fehler bei der Meßspannungsmessung“ )

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_R^2 + F_{QR}^2 + F_{M1}^2 + F_{M2}^2 + F_{QM}^2} \\ F &= \sqrt{1\% + 1\% + 1\% + 1\% + 1\%} \\ &= 5\% \end{aligned}$$

Dieses ist die Genauigkeit, die von den Meßverstärkern geleistet werden kann. Eine Überprüfung durch Anlegen hochpräziser Spannungen mit 200, 20 und 2 mV direkt an den Eingang des OPV 1 bestätigte das Ergebnis.

## 6 Conclusio

Die Meßergebnisse im unteren Meßbereich bis 100 GOhm sind zufriedenstellend. In dieser Größenordnung sind Widerstandsprüflinge noch ohne Probleme verfügbar oder herstellbar bzw es können Referenzmessungen mit verfügbaren Meßgeräten durchgeführt werden.

Die Überprüfung oberhalb etwa 100 G Ohm ist mangels geeigneter Widerstandsnormale problematisch.

Es gibt noch keine Erfahrungen über die Isolationseigenschaften des Leiterplattenmaterials, der verwendeten Stecker- Buchsen- Kombination oder auch des Trägermaterials der Meßelektrode.

Das Gerät wird jetzt einer Erprobungsphase zugeführt. So werden weitere Untersuchungen mit anderen Operationsverstärkertypen folgen.

Ebenso wird der Programmablauf der Software überarbeitet und angepaßt.

## 7 Anhänge

### 7.1 Datenblätter

Unnumeriert im Anhang

### 7.2 Quellcode

Wird im Endzustand des Gerätes beigelegt

### 7.3 Literaturverzeichnis

Analoge Schaltungen; Prof. Dr. Manfred Seifart, 3.Auflage, VEB Verlag Technik Berlin

Elemente der angewandten Elektronik ; Erwin Böhmer, 12. Auflage, Vieweg- Verlag

Einführung in die Elektronik; Möschwitzer, Rumpf, 6. Auflage, VEB Verlag Technik Berlin

Halbleiterschaltungstechnik; Tietze, Schenk, 10. Auflage, Springer- Verlag

Elektronik, Band 1 und 2 ; Bodo Morgenstern, 1. Auflage, Vieweg- Verlag

Grundlagen der Elektronik; Prof. Stefan Goßner, 4. ergänzte Auflage, Shaker Verlag

Grundlagen der Elektrotechnik/ Elektronik, Band1 und 2 ; Elschner, 1. Auflage , Verlag technik GmbH Berlin

Elektrische Meßtechnik, Grundlagen; Prof. Dr. Suchanek, TFH-Berlin

Mikrorechner- Technik, Band1 und 2; Helmut Bähring, 3. Auflage, Springer- Verlag

Mikroprozessortechnik; Thomas Flik, 6. Auflage Springer- Verlag Berlin

Programmieren in C. ANSI; Kernighan, Ritchie, 1999 Hanser- Verlag

Internetquellen :

[www.microchip.com](http://www.microchip.com)

[www.ti.com](http://www.ti.com)

[www.analog.com](http://www.analog.com)

[www.mikrokontroller.net](http://www.mikrokontroller.net)

[www.roboternetz.de](http://www.roboternetz.de)

[www.sprut.de](http://www.sprut.de)

[www.fernando-heitor.de](http://www.fernando-heitor.de)

[www.c++.com](http://www.c++.com)

#### 7.4 Meßgeräteliste

Inv.-Nr	Gerätetyp	Bezeichnung	Hersteller	Seriennr.
50138	Speicheroszilloskop 0,5 GHz	9350 CL	LeCroy	13023
50121	NF- Generator	SPN	R&S	881625/005
50122	RLC- Meßbrücke	VideoBridge 2000	ESI	
50123	Speicheroszilloskop 0,2 GHz	THS 730 A	Tektronix	B011749
50124	Prüfgerät Schutzmaßnahmen	PG 0701N	Gossen	C2 97269
50125	Digitalvoltmeter	3456 A	HP	2825A-20387

7.5	Abbildungsverzeichnis	
Abbildung 1	Wheatstone'sche Brücke.....	3
Abbildung 2	Kommerzielles Gerät mit analoger Anzeige.....	3
Abbildung 3	Indirekte Strommessung.....	4
Abbildung 4	Stromteiler oder belasteter Spannungsteiler.....	7
Abbildung 5	Verstärkerkaskade .....	10
Abbildung 6	Einschub von vorn.....	12
Abbildung 7	Einschub von hinten.....	13
Abbildung 8	Kleinspannungsversorgung .....	13
Abbildung 9	200 V- Versorgung .....	14
Abbildung 10	Analogleiterkarte .....	14
Abbildung 11	Grundschtung eines nicht- invertierenden Verstärkers.....	15
Abbildung 12	Analogleiterplatte .....	17
Abbildung 13	Stromlaufplan Spannungsversorgung.....	19
Abbildung 14	Pin- Belegung des PIC16F873.....	21
Abbildung 15	Oszillatorschaltung .....	22
Abbildung 16	7- Segment- Anzeige + Prozessor.....	23
Abbildung 17	Monoflop CD 4538 BM .....	26
Abbildung 18	Zustandsdiagramm zum Programmablauf .....	29
Abbildung 19	Flußdiagramm .....	30
Abbildung 20	Gesamtgerät von vorn.....	32
Abbildung 21	Gesamtgerät von hinten.....	32
Abbildung 22	Elektrode zur Oberflächenwiderstandsmessung .....	33
Abbildung 23	Elektrode angeschlossen.....	33
7.6	Tabellen	
Tabelle 1	Berechnung der Verstärkungsfaktoren	11
Tabelle 2	Vormessung	11
Tabelle 3	Zustand der Relais	18
Tabelle 4	Zuordnung der Pins des Port B und Ansteuerung zur Ziffernerzeugung	24
Tabelle 5	Meßwiderstandserkennung	26



7.7	Inhaltsverzeichnis	
1	Aufgabenstellung	2
1.1	Beschreibung der Aufgabenstellung	2
1.1.1	Vorüberlegung ( Kundenforderung )	2
2	Einführung	2
2.1	Einsatzbereich	2
2.2	Meßprinzip	2
2.2.1	Brückenschaltung	2
2.2.2	Strommessung	3
2.2.2.1	Direkte Strommessung	3
2.2.2.2	Indirekte Strommessung	4
3	Vorversuche	6
3.1	Auswahl der Schaltung	6
3.1.1	Brückenschaltung	6
3.1.1	Indirekte Strommessung	6
3.2	Verstärker	6
3.2.1	Einleitung	6
3.2.2	Untersuchung auf niedriges Grundrauschen	7
3.2.3	Eingangsimpedanz	7
3.2.4	Zusammenfassung	8
3.3	Auswahl der endgültigen Schaltung	8
3.3.1	Verstärkungspfade	11
4	Realisierung	12
4.1	Musterbau	12
4.2	Analogteil	15
4.2.1	Problemstellung bei der Realisierung	15
4.3	Spannungsversorgung	19
4.3.1	Erzeugung der einzelnen Betriebsspannungen	20
4.4	Digitalteil	21
4.4.1	Prozessor	21
4.4.1.1	Aufbau der Prozessorplatine :	22
4.4.1.2	Anzeige	22
4.4.2	Anzeigebetrieb	24
4.4.3	Spannungsmessung	24
4.4.4	Erkennung des jeweiligen Meßwiderstands	25
4.5	Programmablauf	27
4.5.1	Ablauf des main-Programms	27
4.5.2	Hauptmessung	27
4.5.3	Flußdiagramm	30
4.6	Bedienung	31
4.6.1	Sicherheitshinweis	31
4.6.2	Meßreihenfolge	31
4.6.3	Handhabung	31
4.7	EMV	34
5	Überprüfung	35
5.1	Fehlerbetrachtung	35
5.1.1	Fehler bei der Referenzspannungsmessung	35
5.1.2	Fehler bei der Meßspannungsmessung	35
5.1.3	Fehler bei der Offsetspannungsmessung	36
5.1.4	Rundungsfehler bei der Widerstandsberechnung	36
5.1.5	Anzeigefehler	36

5.1.6 Fehlerfortpflanzungsbetrachtung .....	36
6 Conclusio.....	37
7 Anhänge.....	38
7.1 Datenblätter .....	38
7.2 Quellcode .....	38
7.3 Literaturverzeichnis .....	38
7.4 Meßgeräteleiste.....	39
7.5 Abbildungsverzeichnis .....	40
7.6 Tabellen.....	40
7.7 Inhaltsverzeichnis .....	41
8 Erklärung .....	43

## 8 Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig und ausschließlich unter Verwendung der im Text und Literaturverzeichnis angegebenen Informationsquellen angefertigt zu haben.

Berlin, im August 2005