

# **Wirkleistungsmessgerät**

Nils Hintze

12. Januar 2011

# Vorwort

Dieses Wirkleistungsmessgerät wurde gebaut, um die Leistungsaufnahme von Kleinverbrauchern wie z.B. Steckernetzgeräten möglichst genau ermitteln zu können. Zwar sind für diesen Zweck sogenannte Energiekostenmessgeräte im Handel erhältlich, diese sind jedoch meistens zum Messen von Leistungen von mehreren tausend Watt dimensioniert und haben im einstelligen Wattbereich keine ausreichende Auflösung und Genauigkeit. Das hier beschriebene Messgerät verfügt über einen 10-W-Messbereich mit einer Auflösung von 0,01 W und einen 100-W-Messbereich mit einer Auflösung von 0,1 W, und ist damit zur Messung von besonders kleinen Leistungen geeignet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Messprinzip</b>	<b>5</b>
1.1 Beispiel . . . . .	5
<b>2 Hauptplatine</b>	<b>8</b>
2.1 Schaltplan . . . . .	8
2.1.1 Netzteil . . . . .	10
2.1.2 Spannungsmessung . . . . .	10
2.1.3 Strommessung . . . . .	13
2.1.4 Multiplikation . . . . .	13
2.1.5 Mittelwertbildung . . . . .	14
2.2 Layout . . . . .	14
<b>3 Stromwandler</b>	<b>17</b>
3.1 Beschaltung . . . . .	17
<b>4 Anzeige</b>	<b>19</b>
4.1 Netzteil . . . . .	19
<b>5 Verdrahtungsplan</b>	<b>21</b>
<b>6 Aufbau</b>	<b>22</b>
6.1 Hauptplatine . . . . .	22
6.2 Stromwandler und LCD-Modul-Netzteil . . . . .	24
6.3 Montage . . . . .	27
6.4 Abgleich . . . . .	31
6.4.1 Prüfung des Netzteils . . . . .	31
6.4.2 Offset-Abgleich der Operationsverstärker . . . . .	32
6.4.3 Offset-Abgleich des Analogmultiplizierers . . . . .	32
6.4.4 Abgleich der Spannungsmessung . . . . .	32
6.4.5 Abgleich der Strommessung . . . . .	33
6.5 Inbetriebnahme . . . . .	33

# 1 Messprinzip

Bei ohmschen Verbrauchern, bei welchen keine Phasenverschiebung zwischen Spannung  $U$  und Strom  $I$  besteht, erhält man durch Multiplikation der Effektivwerte von Spannung und Strom die Wirkleistung  $P$ :

$$P = U \cdot I$$

Die Einheit der Wirkleistung ist das Watt (W). Wenn eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom besteht, erhält man mit der genannten Vorgehensweise die Scheinleistung  $S$ :

$$S = U \cdot I$$

Zur Unterscheidung von Wirk- und Scheinleistung wird für letztere die Einheit Voltampere (VA) verwendet, wobei ein Voltampere einem Watt entspricht. Zur Berechnung von Wirk- und Blindleistung muss der Phasenverschiebungswinkel  $\varphi$  (griechischer Kleinbuchstabe Phi) bekannt sein. Die Wirkleistung wird dann durch Multiplikation von Scheinleistung und Wirkfaktor ( $\cos \varphi$ ) berechnet:

$$P = S \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Die Blindleistung  $Q$  kann mit dem Blindfaktor ( $\sin \varphi$ ) berechnet werden:

$$Q = S \cdot \sin \varphi = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Für die Blindleistung wird die Einheit Var (var) verwendet, wobei ein Var einem Watt entspricht.

Das Wirkleistungsmessgerät muss die Leistung auch bei einem phasenverschobenen und nichtsinusförmigen Stromverlauf messen können, da dieser bei den zu messenden Verbrauchern zu erwarten ist. Um die Wirkleistung auch in diesen Fällen korrekt zu ermitteln, muss der Mittelwert der Augenblicksleistung über eine oder mehrere Perioden gebildet werden. Nach diesem Prinzip arbeitet das Wirkleistungsmessgerät.

## 1.1 Beispiel

Nachfolgend soll die Leistungsaufnahme eines Verbrauchers berechnet werden, der bei einer Spannung von 2 V einen Strom von 1 A (Effektivwerte) aufnimmt. Zuerst wird von einem ohmschen Verbraucher ausgegangen, bei dem keine Phasenverschiebung besteht. Mit der oben genannten Formel kommt man zu folgendem Ergebnis:

$$P = U \cdot I = 2 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 2 \text{ W}$$

Abb. 1.1 zeigt den Verlauf von Spannung, Strom und Leistung während einer Periode sowie den Mittelwert der Leistung.

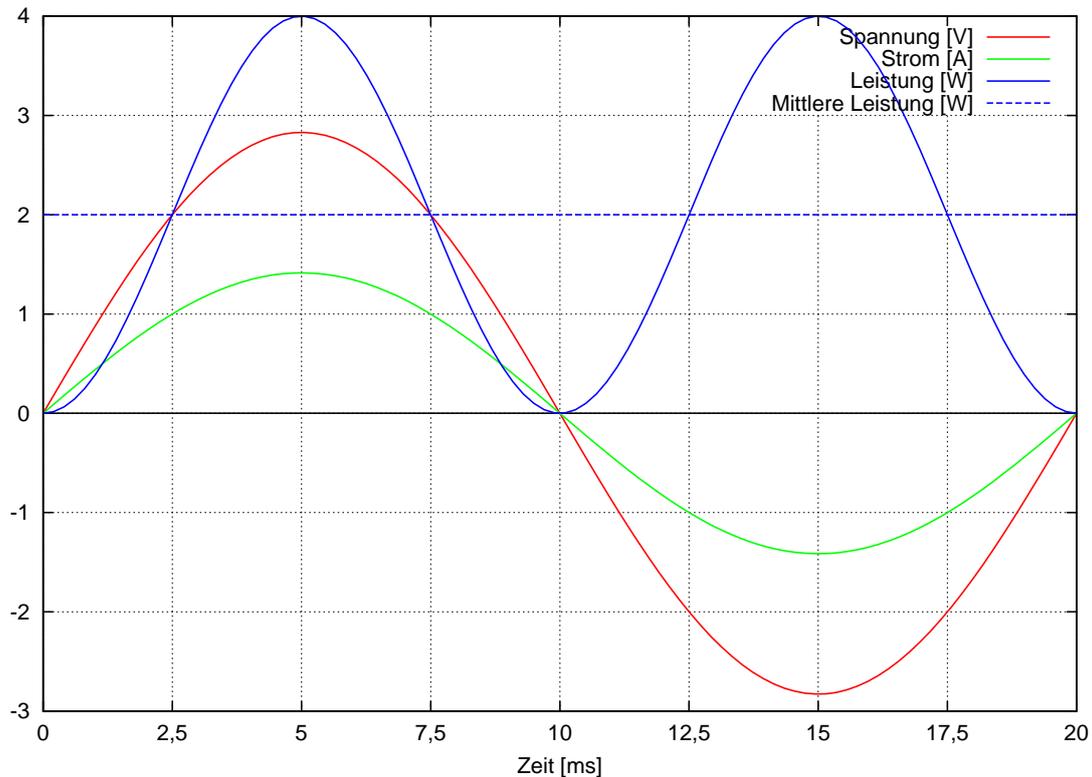


Abbildung 1.1: Verlauf von Spannung, Strom und Leistung ohne Phasenverschiebung

Da es sich um einen ohmschen Verbraucher handelt, verhält sich der Strom immer proportional zur Spannung. Daher hat der Strom immer die gleiche Polarität wie die Spannung – wenn die Spannung negativ wird, so wird auch der Strom negativ. Die Kurve der Leistung stellt das Produkt von Spannung und Strom dar. Wenn Spannung und Strom immer die gleiche Polarität haben, wird die Leistung niemals negativ, da das Produkt von zwei Werten mit gleichem Vorzeichen immer positiv ist. Die Leistung schwankt zwischen 0 W und ihrem Maximalwert von 4 W, der Mittelwert über eine Periode – und damit die Wirkleistung – beträgt 2 W.

Nun wird von einem Verbraucher ausgegangen, bei dem der Strom der Spannung um  $60^\circ$  nacheilt. Da sich an den Effektivwerten von Spannung und Strom nichts verändert hat, erhält man durch Multiplikation von  $U$  und  $I$  nach wie vor das gleiche Ergebnis wie im vorherigen Fall:

$$S = U \cdot I = 2 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 2 \text{ VA}$$

Da eine Phasenverschiebung vorhanden ist, erhält man mit dieser Vorgehensweise jedoch nur die Scheinleistung. Die tatsächlich aufgenommene Wirkleistung beträgt:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 2 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} \cdot \cos 60^\circ = 1 \text{ W}$$

Die Blindleistung beträgt:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 2 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} \cdot \sin 60^\circ \approx 1,73 \text{ var}$$

Möchte man aus der Wirk- und Blindleistung wieder die Scheinleistung errechnen, so muss man  $P$  und  $Q$  geometrisch addieren:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1 \text{ W}^2 + 1,73 \text{ var}^2} \approx 2 \text{ VA}$$

Während Spannung und Strom im vorherigen Fall immer von gleicher Polarität waren, gibt es in dem aktuellen Fall Zeitspannen, in denen sich die Polarität unterscheidet, wie auf Abb. 1.2 zu erkennen ist.

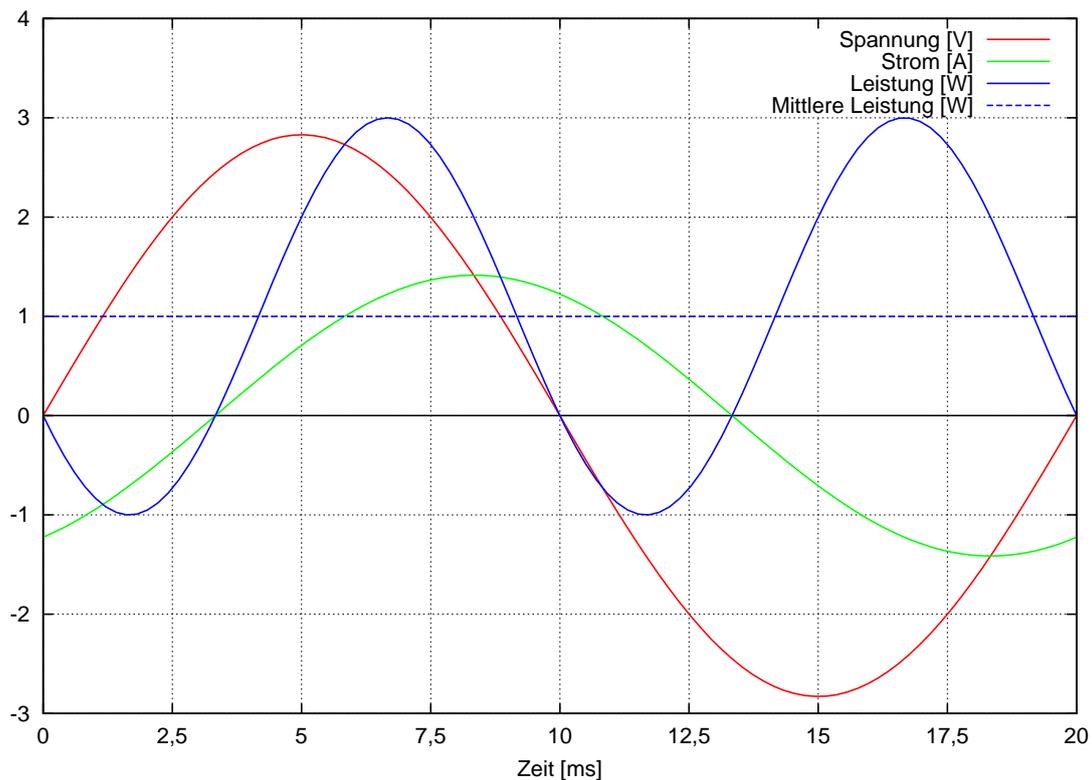


Abbildung 1.2: Verlauf von Spannung, Strom und Leistung bei  $60^\circ$  Phasenverschiebung

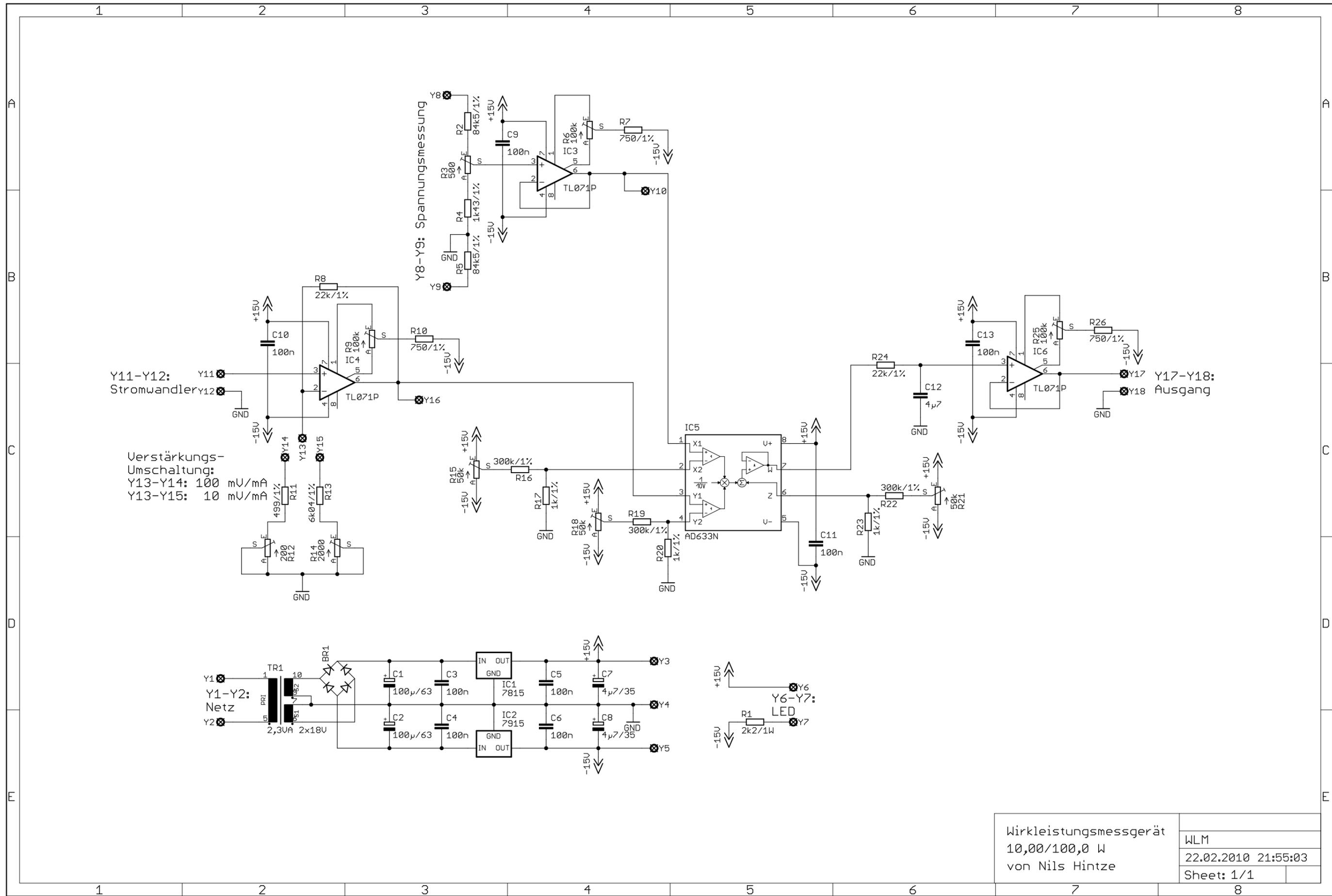
Damit kann die Leistung nun auch negativ werden, wodurch sich der Mittelwert der Leistung nach unten verschiebt. Die Leistung schwankt zwischen  $-1 \text{ W}$  und  $3 \text{ W}$ , der Mittelwert über eine Periode – und damit die Wirkleistung – beträgt  $1 \text{ W}$ .

## 2 Hauptplatine

Die Hauptplatine ist das Herzstück des Wirkleistungsmessgerätes. Ihre Aufgabe ist es, die Netzspannung und die Stromaufnahme des Verbrauchers zu messen, und daraus eine zur aufgenommenen Wirkleistung proportionale Spannung zu erzeugen. Die Messung der Netzspannung erfolgt über einen Spannungsteiler, die Messung des Stroms erfolgt durch einen Stromwandler. Beide Messwerte werden mit dem Analogmultiplizierer AD633 von Analog Devices multipliziert, das Ergebnis wird mit einem RC-Glied integriert.

### 2.1 Schaltplan

Nachfolgend wird der Schaltplan der Hauptplatine gezeigt und die Schaltung beschrieben.



Wirkleistungsmessgerät 10,00/100,0 W von Nils Hintze	WLM
	22.02.2010 21:55:03
	Sheet: 1/1

### 2.1.1 Netzteil

Das Netzteil erzeugt aus der Netzspannung eine symmetrische Spannung von +15 V und -15 V zur Versorgung der Schaltung. Die an Y1 und Y2 angelegte Netzspannung wird vom Trafo TR1 heruntertransformiert und vom Brückengleichrichter BR1 gleichgerichtet. Im positiven Zweig wird die gleichgerichtete Spannung mit dem Elko C1 geglättet und mit dem Spannungsregler IC1 auf +15 V geregelt. C3 und C5 sind die Abblockkondensatoren für IC1. Im negativen Zweig wird die gleichgerichtete Spannung mit dem Elko C2 geglättet und mit dem Spannungsregler IC2 auf -15 V geregelt. C4 und C6 sind die Abblockkondensatoren für IC2. An Y6 und Y7 wird eine LED als Betriebsanzeige angeschlossen. Der Vorwiderstand R2 ist für eine grüne LED bei Strom von 12,5 mA ausgelegt. Die LED dient zugleich als obligatorische Grundlast für das Netzteil. Bei fehlender Grundlast würde die gleichgerichtete Leerlaufspannung des Trafos die höchstzulässige Eingangsspannung der Spannungsregler überschreiten. Die beiden Ausgangsspannungen sind jeweils mit ca. 40 mA belastbar. An Y3, Y4 und Y5 können die Ausgangsspannungen zur Prüfung des Netzteils gemessen werden.

### 2.1.2 Spannungsmessung

Die Spannungsmessung hat die Aufgabe, eine zum Augenblickswert der Netzspannung proportionale Spannung zu erzeugen. Die zu messende Spannung wird an Y8 und Y9 angelegt. Die Messung erfolgt über einen Spannungsteiler bestehend aus den Widerständen R2, R3, R4 und R5. Der Spannungsteiler teilt die Spannung auf ein Hundertstel herunter, dementsprechend liegt bei einer Eingangsspannung von 230 V am Ausgang eine Spannung von 2,3 V an. Mit dem Trimmer R3 kann die Ausgangsspannung variiert werden, um die Toleranzen der Widerstände auszugleichen. Der Operationsverstärker IC3 ist als Impedanzwandler beschaltet und macht die Ausgangsspannung durch die nachfolgende Schaltung belastbar. Dies ist für den hochohmigen Eingang des Analogmultiplizierers zwar nicht erforderlich, verhindert jedoch beim Abgleich des Messgerätes eine Belastung des Spannungsteilers, beispielsweise durch ein Multimeter. Der Trimmer R6 dient zum Offset-Abgleich von IC3. C9 ist der Abblockkondensator für IC3. An Y10 kann das Ausgangssignal der Spannungsmessung zu Abgleichzwecken abgegriffen werden.

### Berechnung des Spannungsteilers

Nachfolgend wird beschrieben, wie zur Berechnung der Widerstandswerte des Spannungsteilers vorgegangen wurde.

Bei der Berechnung wird davon ausgegangen, dass die Netzspannung  $U$  230 V beträgt und die Ausgangsspannung mit dem Trimmer R3 in einem Bereich von 2 bis 2,6 V einstellbar sein soll. Der Spannungsabfall an R4 ( $U_{R4}$ ) gibt die minimal einstellbare Ausgangsspannung an, der Spannungsabfall an R3 ( $U_{R3}$ ) gibt den Bereich an, in dem die Ausgangsspannung variiert werden kann. Um die Ausgangsspannung des Spannungsteilers im gewünschten Bereich von 2 bis 2,6 V einstellbar zu machen, muss  $U_{R4}$  2 V und  $U_{R3}$  0,6 V betragen. Zuerst muss der gewünschte Strom  $I$  durch den Spannungsteiler

festgelegt werden. Der Strom wird nur durch die zulässige Verlustleistung am Spannungsteiler begrenzt. Der größte Teil der Spannung fällt an R2 und R5 ab, daher haben diese Widerstände auch die größte Verlustleistung. Um die Erwärmung in Grenzen zu halten, wurde die Verlustleistung für R2 und R5 auf jeweils 150 mW festgelegt. Die Gesamtverlustleistung  $P_{ges}$  für den Spannungsteiler beträgt demzufolge ca. 300 mW. Damit wurde nun der Strom berechnet:

$$I = \frac{P_{ges}}{U} = \frac{300 \text{ mW}}{230 \text{ V}} \approx 1,3 \text{ mA}$$

Bei gegebenem Strom müssten R4 und R3 folgende Werte haben, damit die gewünschten Spannungen abfallen:

$$R_4 = \frac{U_{R4}}{I} = \frac{2 \text{ V}}{1,3 \text{ mA}} \approx 1538,5 \Omega$$

$$R_3 = \frac{U_{R3}}{I} = \frac{0,6 \text{ V}}{1,3 \text{ mA}} \approx 461,5 \Omega$$

Aufgrund der Verfügbarkeit wurde der Wert von R4 auf 1,43 k $\Omega$  und der Wert von R3 auf 500  $\Omega$  festgelegt. Da sich mit den Widerstandswerten auch der Ausgangsspannungsbereich verändert, wurde überprüft, ob sich die Spannung noch im geforderten Bereich einstellen lässt:

$$U_{R4} = R_4 \cdot I = 1,43 \text{ k}\Omega \cdot 1,3 \text{ mA} \approx 1,86 \text{ V}$$

$$U_{R3} = R_3 \cdot I = 500 \Omega \cdot 1,3 \text{ mA} = 0,65 \text{ V}$$

Mit den ausgewählten Widerstandswerten wäre die Ausgangsspannung nun in einem Bereich von  $U_{R4} = 1,86 \text{ V}$  bis  $U_{R4} + U_{R3} = 2,51 \text{ V}$  einstellbar. Die Ausgangsspannung kann zwar auf ihren Minimalwert von 2 V eingestellt werden, der Maximalwert von 2,6 V wird jedoch nicht erreicht. Um die Ausgangsspannung auf ihren Maximalwert einstellbar zu machen, muss an R4 und R3 insgesamt eine Spannung von mindestens 2,6 V abfallen. Dafür muss der Strom auf folgenden Wert geändert werden:

$$I = \frac{2,6 \text{ V}}{R_4 + R_3} = \frac{2,6 \text{ V}}{1,43 \text{ k}\Omega + 500 \Omega} \approx 1,347 \text{ mA}$$

Jetzt wird erneut der Ausgangsspannungsbereich berechnet:

$$U_{R4} = R_4 \cdot I = 1,43 \text{ k}\Omega \cdot 1,347 \text{ mA} \approx 1,93 \text{ V}$$

$$U_{R3} = R_3 \cdot I = 500 \Omega \cdot 1,347 \text{ mA} \approx 0,67 \text{ V}$$

Die Ausgangsspannung wäre hiermit von 1,93 bis 2,6 V einstellbar, der geforderte Bereich von 2 bis 2,6 V wird also abgedeckt. Nun müssen noch die Werte von R2 und R5 berechnet werden. Im Schaltplan ist ersichtlich, dass an R2 und R5 die übrige Netzspannung abfallen muss, die nicht an R4 und R3 abfällt. An R2 und R5 muss also folgende Spannung insgesamt abfallen:

$$U - (U_{R4} + U_{R3}) = 230 \text{ V} - (1,93 \text{ V} + 0,67 \text{ V}) = 227,4 \text{ V}$$

Da sich der Spannungsabfall gleichmäßig auf die beiden Widerstände aufteilen soll, muss an jedem Widerstand genau die Hälfte der eben errechneten Spannung abfallen.  $U_{R2}$  und  $U_{R5}$  müssen also jeweils 113,7 V betragen. Nun können die Werte von R2 und R5 berechnet werden:

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I} = \frac{113,7 \text{ V}}{1,347 \text{ mA}} \approx 84,41 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = \frac{U_{R5}}{I} = \frac{113,7 \text{ V}}{1,347 \text{ mA}} \approx 84,41 \text{ k}\Omega$$

Aufgrund der Verfügbarkeit wurden die Werte von R2 und R5 auf je 84,5 k $\Omega$  festgelegt. Damit sind nun alle Widerstandswerte bekannt.

Um sicherzustellen, dass die Werte korrekt sind, wird noch einmal der Ausgangsspannungsbereich berechnet. Zuerst wird der Gesamtwiderstand ( $R_{ges}$ ) ausgerechnet:

$$R_{ges} = R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = 84,5 \text{ k}\Omega + 500 \Omega + 1,43 \text{ k}\Omega + 84,5 \text{ k}\Omega = 170,93 \text{ k}\Omega$$

Dann wird der Strom durch den Spannungsteiler berechnet:

$$I = \frac{U}{R_{ges}} = \frac{230 \text{ V}}{170,93 \text{ k}\Omega} \approx 1,346 \text{ mA}$$

Jetzt wird der Ausgangsspannungsbereich berechnet:

$$U_{R4} = R_4 \cdot I = 1,43 \text{ k}\Omega \cdot 1,346 \text{ mA} \approx 1,93 \text{ V}$$

$$U_{R3} = R_3 \cdot I = 500 \Omega \cdot 1,346 \text{ mA} \approx 0,67 \text{ V}$$

Die Ausgangsspannung ist von 1,93 bis 2,6 V einstellbar. An R2 und R5 fällt die übrige Spannung ab:

$$U_{R2} = R_2 \cdot I = 84,5 \text{ k}\Omega \cdot 1,346 \text{ mA} = 113,7 \text{ V}$$

$$U_{R5} = R_5 \cdot I = 84,5 \text{ k}\Omega \cdot 1,346 \text{ mA} = 113,7 \text{ V}$$

Anschließend wird noch die Verlustleistung an den Widerständen überprüft:

$$P_{R4} = U_{R4} \cdot I = 1,93 \text{ V} \cdot 1,346 \text{ mA} \approx 2,6 \text{ mW}$$

$$P_{R3} = U_{R3} \cdot I = 0,67 \text{ V} \cdot 1,346 \text{ mA} \approx 0,9 \text{ mW}$$

$$P_{R2} = U_{R2} \cdot I = 113,7 \text{ V} \cdot 1,346 \text{ mA} \approx 153 \text{ mW}$$

$$P_{R5} = U_{R5} \cdot I = 113,7 \text{ V} \cdot 1,346 \text{ mA} \approx 153 \text{ mW}$$

Die Verlustleistung an R4 und R3 liegt im einstelligen Milliwattbereich und verursacht damit praktisch keine Erwärmung. Die Verlustleistung an R2 und R5 weicht nur geringfügig von den oben festgelegten Werten ab.

### 2.1.3 Strommessung

Dieser Schaltungsteil hat die Aufgabe, eine zum Augenblickswert der Stromaufnahme der zu messenden Last proportionale Spannung zu erzeugen. Die Messung des Stroms erfolgt durch einen externen Stromwandler. Der Ausgang des Stromwandlers wird an Y11 und Y12 angeschlossen. Die Beschaltung des Stromwandlers muss so ausgelegt sein, dass am Ausgang eine Spannung von 2,5 V pro Ampere Primärstrom anliegt. Außerdem muss die Ausgangsspitzenspannung auf höchstens 15 V begrenzt werden, damit IC4 nicht durch Überspannung am Eingang zerstört werden kann. Das Signal des Stromwandlers wird von IC4 auf 10 V/A bzw. 100 V/A verstärkt. Der Verstärkungsfaktor kann durch einen an Y13, Y14 und Y15 angeschlossenen Schalter (Messbereichsumschalter) umgeschaltet werden. Wenn Y13 mit Y14 verbunden ist bzw. sich das Messgerät im 10-W-Messbereich befindet, so wird das Signal auf 100 V/A verstärkt. Mit dem Trimmer R12 kann der Verstärkungsfaktor für Eingangsspannungen von 2,22 bis 3,1 V/A angepasst werden, um Toleranzen auszugleichen. Wenn Y13 mit Y15 verbunden ist bzw. sich das Messgerät im 100-W-Messbereich befindet, so wird das Signal auf 10 V/A verstärkt. Mit dem Trimmer R14 kann der Verstärkungsfaktor für Eingangsspannungen von 2,15 bis 2,68 V/A angepasst werden, um Toleranzen auszugleichen. Der Trimmer R9 dient zum Offset-Abgleich von IC4. C10 ist der Abblockkondensator für IC4. An Y16 kann das Ausgangssignal der Strommessung zu Abgleichzwecken abgegriffen werden.

### 2.1.4 Multiplikation

Die Multiplikation der gemessenen Spannungs- und Stromwerte erfolgt durch den Analogmultiplizierer IC5. Das Ausgangssignal der Spannungsmessung wird dem Eingang X1 zugeführt. Zum Ausgleich des X-Eingangs-Offsets stellt die Anordnung aus R15, R16 und R17 eine einstellbare Spannung von -50 bis +50 mV bereit, die dem Eingang X2 zugeführt wird. Das Ausgangssignal der Strommessung wird dem Eingang Y1 zugeführt. Zum Ausgleich des Y-Eingangs-Offsets stellt die Anordnung aus R18, R19 und R20 eine einstellbare Spannung von -50 bis +50 mV bereit, die dem Eingang Y2 zugeführt wird. Zum Ausgleich des Ausgangs-Offsets stellt die Anordnung aus R21, R22 und R23 eine einstellbare Spannung von -50 bis +50 mV bereit, die dem Eingang Z zugeführt wird. Am Ausgang W liegt nun eine zum Augenblickswert der Leistung proportionale Spannung an. Nachfolgend wird das Verhältnis dieser Spannung zur Leistung in Volt pro Watt berechnet. Die Übertragungsfunktion des Analogmultiplizierers lautet wie folgt:

$$U_W = \frac{(U_{X1} - U_{X2}) \cdot (U_{Y1} - U_{Y2})}{10 \text{ V}} + U_Z$$

Es ist ersichtlich, dass das Produkt der Multiplikation im Analogmultiplizierer durch 10 geteilt wird. Am X-Eingang liegt eine Spannung von einem Hundertstel der Netzspannung an. Wenn Y13 mit Y14 verbunden ist bzw. sich das Messgerät im 10-W-Messbereich befindet, so liegt am Y-Eingang eine Spannung von 100 V/A an. Die Ausgangsspannung des Analogmultiplizierers beträgt in diesem Fall:

$$U_W = \frac{\frac{U}{100} \cdot (I \cdot 100)}{10} = 0,1 \text{ V/W}$$

Wenn Y13 mit Y15 verbunden ist bzw. sich das Messgerät im 100-W-Messbereich befindet, so liegt am Y-Eingang eine Spannung von  $10 \text{ V/A}$  an. Die Ausgangsspannung des Analogmultiplizierers beträgt in diesem Fall:

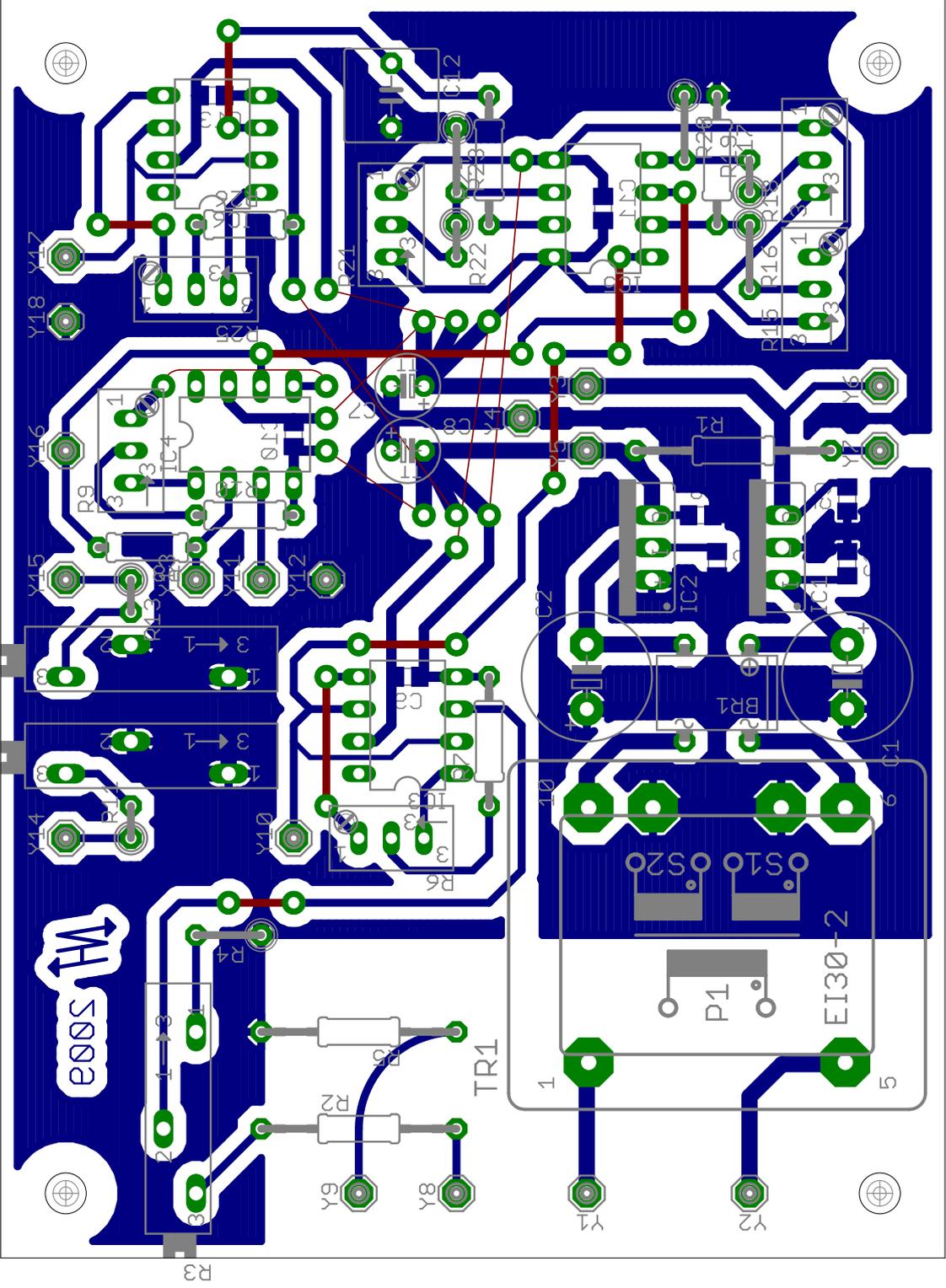
$$U_W = \frac{\frac{U}{100} \cdot (I \cdot 10)}{10} = 0,01 \text{ V/w}$$

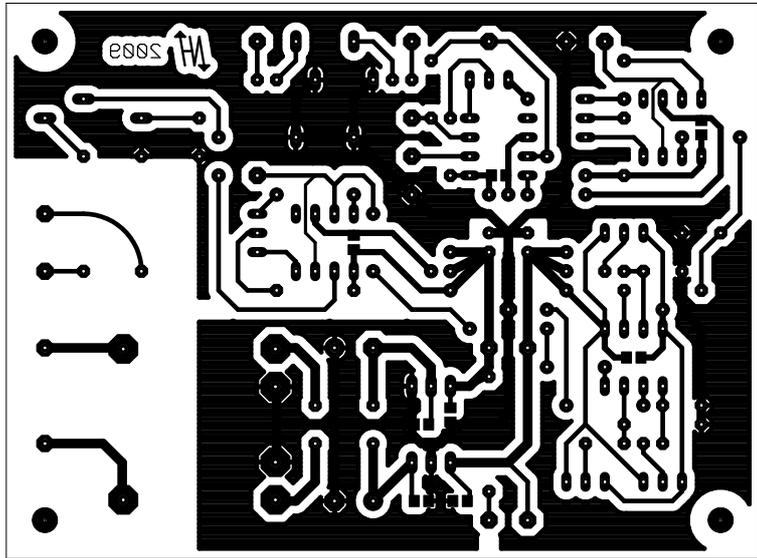
### 2.1.5 Mittelwertbildung

Am Ausgang des Analogmultiplizierers liegt eine pulsierende, zum Augenblickswert der Leistung proportionale Spannung an. Um eine zur Wirkleistung proportionale Spannung zu erhalten, muss der Mittelwert dieser Spannung gebildet werden. Hierzu dient das RC-Glied bestehend aus R24 und C12. Die Werte von R24 und C12 sind so ausgelegt, dass die Ausgangsspannung bei einer Frequenz von 100 Hz eine Restwelligkeit von ca. 1,5 % hat. Der Operationsverstärker IC6 ist als Impedanzwandler verschaltet und macht die Ausgangsspannung des RC-Gliedes durch das am Ausgang der Hauptplatine angeschlossene Anzeigeelement belastbar. Der Trimmer R25 dient zum Offset-Abgleich von IC6. C13 ist der Abblockkondensator für IC6. Zwischen Y17 und Y18 liegt nun die zur Wirkleistung proportionale Spannung an.

## 2.2 Layout

Es wurde ein Layout mit den Maßen  $99,06 \times 73,66 \text{ mm}$  zur Herstellung einer Platine erstellt. Nachfolgend wird das Layout im Maßstab 2:1 gezeigt. Leiterbahnen und Lötäugen sind blau und grün gefärbt. Die roten Linien sind Drahtbrücken auf der Oberseite der Platine. Die mit breiter Linie dargestellten Brücken werden mit blankem, versilberten Kupferdraht ausgeführt. Die mit schmaler Linie dargestellten Brücken kreuzen eventuell andere Brücken und werden daher mit isoliertem Schaltaht ausgeführt. Ein Film zur Belichtung von fotobeschichtetem Basismaterial im Maßstab 1:1 wird ebenfalls gezeigt. Die Belichtung muss so erfolgen, dass der Schriftzug „NH 2009“ auf der Lötseite der Platine lesbar ist.





## 3 Stromwandler

Der verwendete Stromwandler wurde speziell für dieses Wirkleistungsmessgerät angefertigt. Als Kern wurde ein Ringbandkern aus einem Fehlerstromschutzschalter (4-polig,  $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ ,  $I_n = 25 \text{ A}$ ) verwendet. Der Kern wurde neu bewickelt mit 13 Windungen Schaltdraht als Primärwicklung und ca. 115 Windungen 0,2-mm-Kupferlackdraht als Sekundärwicklung. Abb. 3.1 zeigt den mit neuen Wicklungen versehenen Stromwandler von der Seite.

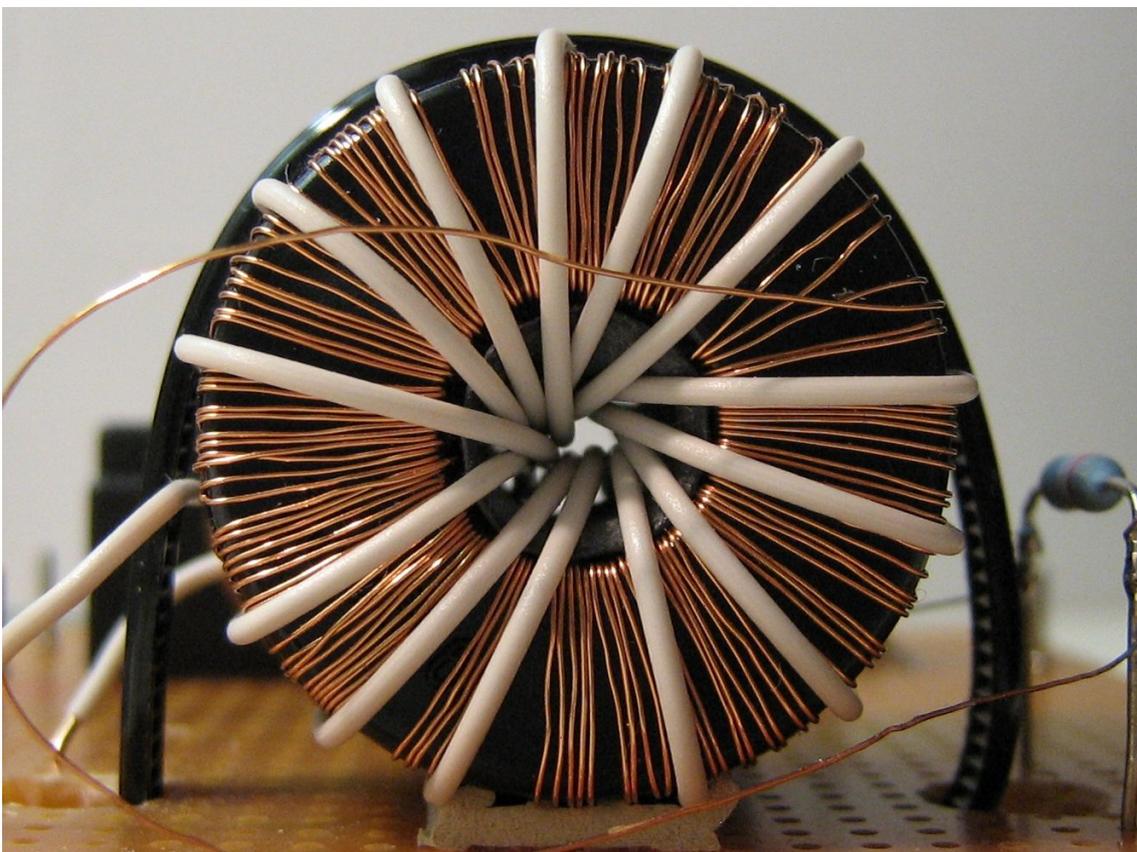


Abbildung 3.1: Stromwandler mit neuen Wicklungen

### 3.1 Beschaltung

Abb. 3.2 zeigt die Beschaltung des Stromwandlers.

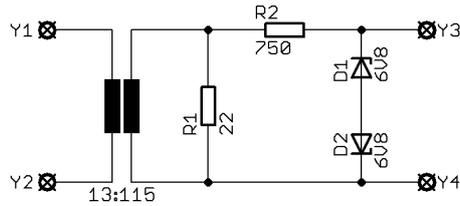


Abbildung 3.2: Beschaltung des Stromwandlers

Die Primärwicklung ist an Y1 und Y2 angeschlossen. R1 ist der Lastwiderstand für den Stromwandler. Der Wert des Lastwiderstands bestimmt gemeinsam mit den Windungszahlen das Verhältnis der Ausgangsspannung  $U_a$  zum Primärstrom  $I_{pri}$ . Nachfolgend wird der Wert von R1 für eine Ausgangsspannung von 2,5 V pro Ampere Primärstrom berechnet. Dazu muss zuerst der Sekundärstrom  $I_{sek}$  bei gegebenem Primärstrom, abhängig von den Windungszahlen, berechnet werden:

$$I_{sek} = I_{pri} \cdot \frac{N_{pri}}{N_{sek}} = 1 \text{ A} \cdot \frac{13}{115} \approx 113 \text{ mA}$$

Bei einem Primärstrom von einem Ampere würden also 113 mA durch die Sekundärwicklung fließen. Mit dem ohmschen Gesetz kann nun der nötige Lastwiderstand berechnet werden:

$$R_1 = \frac{U_a}{I_{sek}} = \frac{2,5 \text{ V}}{113 \text{ mA}} \approx 22,12 \Omega$$

Der Wert von R1 wurde auf den nächsten verfügbaren Wert von  $22 \Omega$  festgelegt. Die Zener-Dioden D1 und D2 begrenzen zusammen mit R2 die Ausgangsspitzenspannung auf ca. 7,5 V, um eine Beschädigung der nachfolgenden Schaltung durch Überspannung zu verhindern. An Y3 und Y4 liegt die Ausgangsspannung an.

## 4 Anzeige

Zur Anzeige des Messwertes dient ein handelsübliches 3<sup>1</sup>/<sub>2</sub>-stelliges LCD-Voltmeter-Modul mit einem Messbereich von  $\pm 199,9\text{ mV}$  sowie einem frei konfigurierbaren Dezimalpunkt. Der Messbereich des Moduls wird durch einen Spannungsteiler bestehend aus einem  $900\text{-k}\Omega$ - und einem  $100\text{-k}\Omega$ -Präzisionswiderstand mit je  $0,1\%$  Toleranz auf  $\pm 1,999\text{ V}$  erweitert. Der Dezimalpunkt wird vom Messbereichsumschalter umgeschaltet. Bei dem hier verwendeten LCD-Modul handelt es sich um ein PeakTech® LDP-135. Abb. 4.1 zeigt die Anschlussbelegung des verwendeten LCD-Moduls mit den im Verdrahtungsplan benutzten Bezeichnungen.

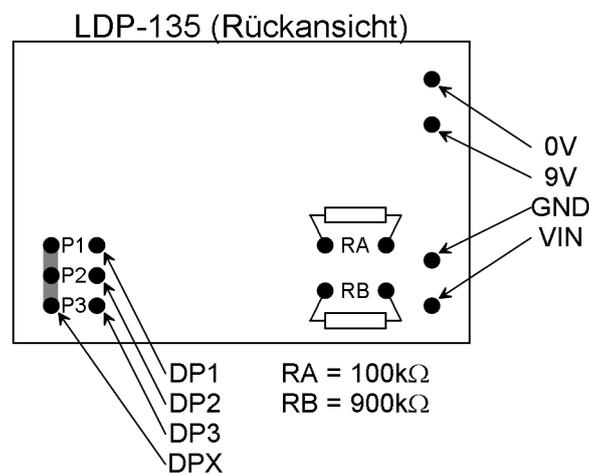


Abbildung 4.1: Anschluss des LCD-Moduls PeakTech® LDP-135

### 4.1 Netzteil

Das LCD-Modul benötigt ein eigenes Netzteil, da die Versorgungsspannung galvanisch vom Messkreis getrennt sein muss und somit nicht vom Netzteil der Hauptplatine bereitgestellt werden kann. Die Versorgungsspannung des LCD-Moduls beträgt  $9\text{ V}$ , die Stromaufnahme ca.  $1\text{ mA}$ . Abb. 4.2 zeigt die Schaltung des Netzteils.

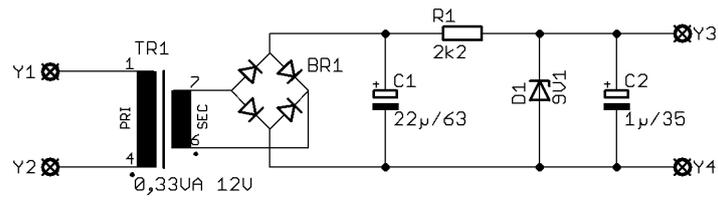


Abbildung 4.2: Schaltplan des LCD-Modul-Netzteils

Die an Y1 und Y2 angelegte Netzspannung wird vom Trafo TR1 heruntertransformiert und vom Brückengleichrichter BR1 gleichgerichtet. Die gleichgerichtete Spannung wird mit dem Elko C1 geglättet und mit R1 und der Zener-Diode D1 auf ca. 9 V stabilisiert. Die Ausgangsspannung liegt an Y3 und Y4 an und ist mit ca. 3 mA belastbar.

# 5 Verdrahtungsplan

Abb. 5.1 zeigt, wie die einzelnen Elemente miteinander verdrahtet werden.

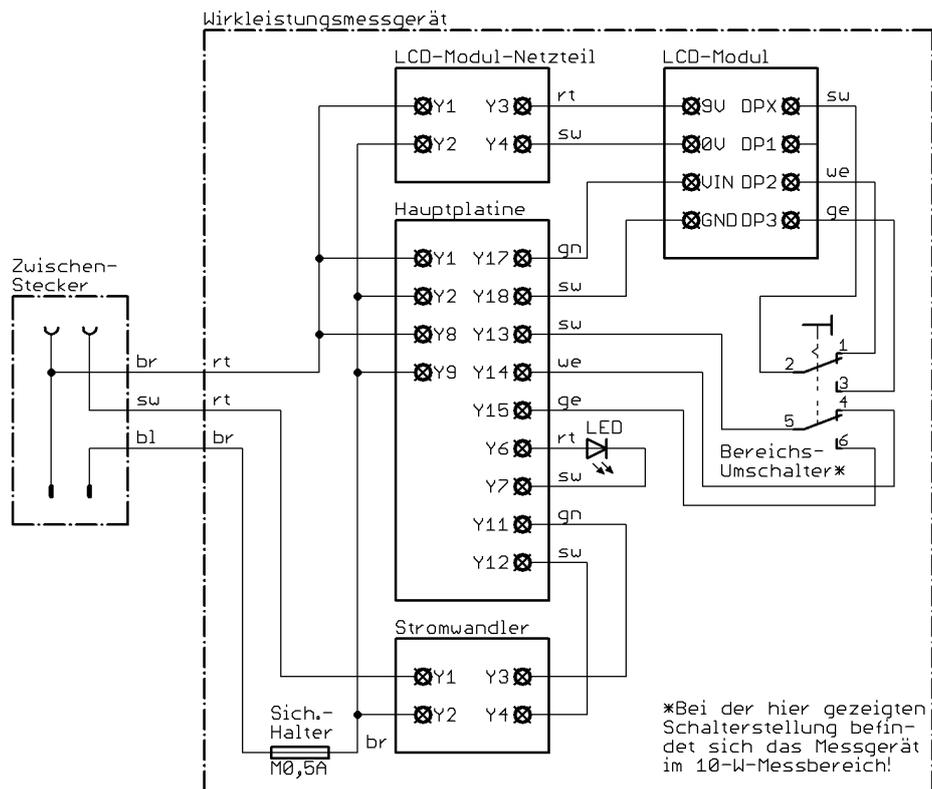


Abbildung 5.1: Verdrahtungsplan

Die Netzspannung wird den Versorgungseingängen von Hauptplatine und LCD-Modul-Netzteil sowie dem Eingang der Spannungsmessung zugeführt. Die Primärwicklung des Stromwandlers ist in Reihe mit dem Verbraucher geschaltet. Der Ausgang des Stromwandlers ist mit dem Eingang der Strommessung verbunden. Die Ausgangsspannung der Hauptplatine wird dem Messeingang des LCD-Moduls zugeführt, welches vom LCD-Modul-Netzteil versorgt wird. Der Messbereichsumschalter steuert mit dem einen Wechsler den Verstärkungsfaktor der Strommessung und mit dem anderen Wechsler den Dezimalpunkt des LCD-Moduls. Die LED ist mit den entsprechenden Lötstiften an der Hauptplatine verbunden.

## 6 Aufbau

In diesem Abschnitt wird der Bau des Wirkleistungsmessgerätes sowie der Abgleich beschrieben.

### 6.1 Hauptplatine

Mit dem oben gezeigten Film wurde ein Stück fotobeschichtetes Basismaterial belichtet. Anschließend wurde es entwickelt, geätzt und gebohrt.

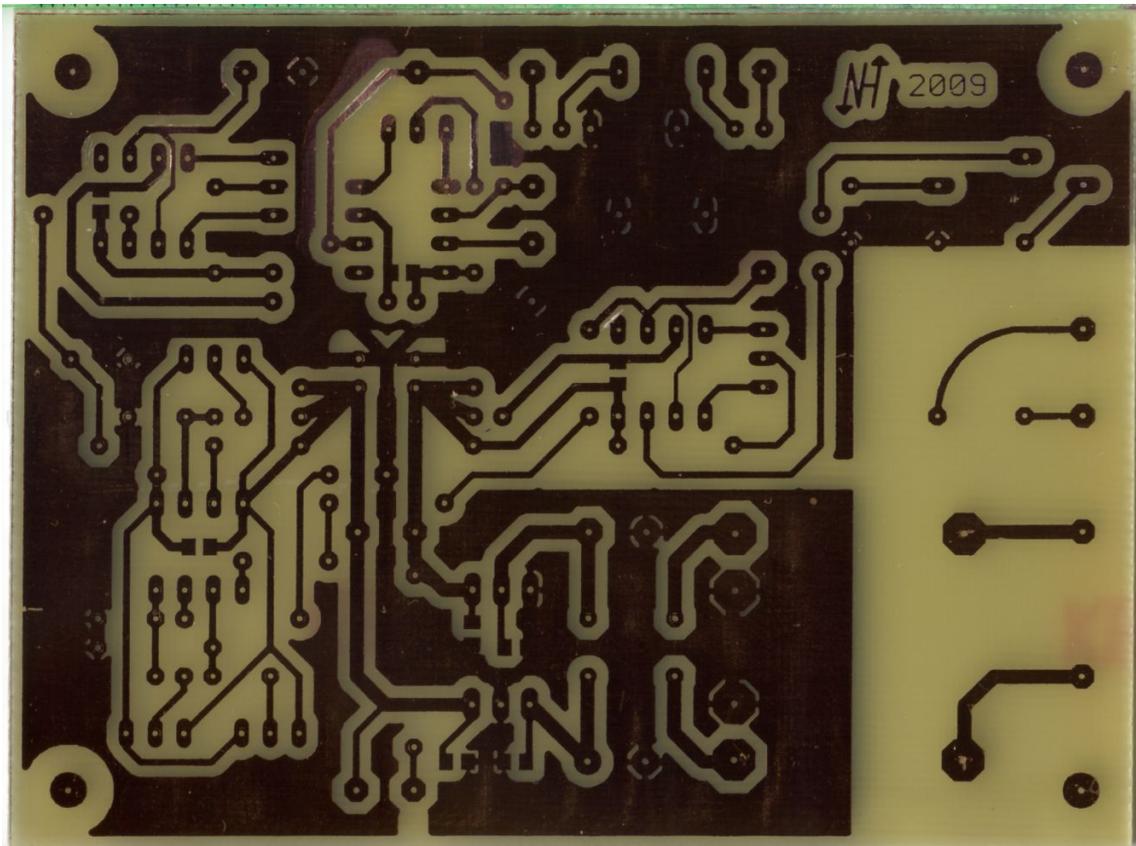


Abbildung 6.1: Hauptplatine geätzt

Abb. 6.1 zeigt die fertig geätzte Platine. Das Leiterbild weicht etwas von dem oben gezeigten Film ab, da die Platine mit einer älteren und fehlerhaften Version belichtet wurde. Die Fehler wurden später durch Trennen von drei Leiterbahnen und Anbringen

von drei Drahtbrücken auf der Lötseite der Platine behoben. Bei dem oben gezeigten Film handelt es sich um eine fehlerfreie Version.

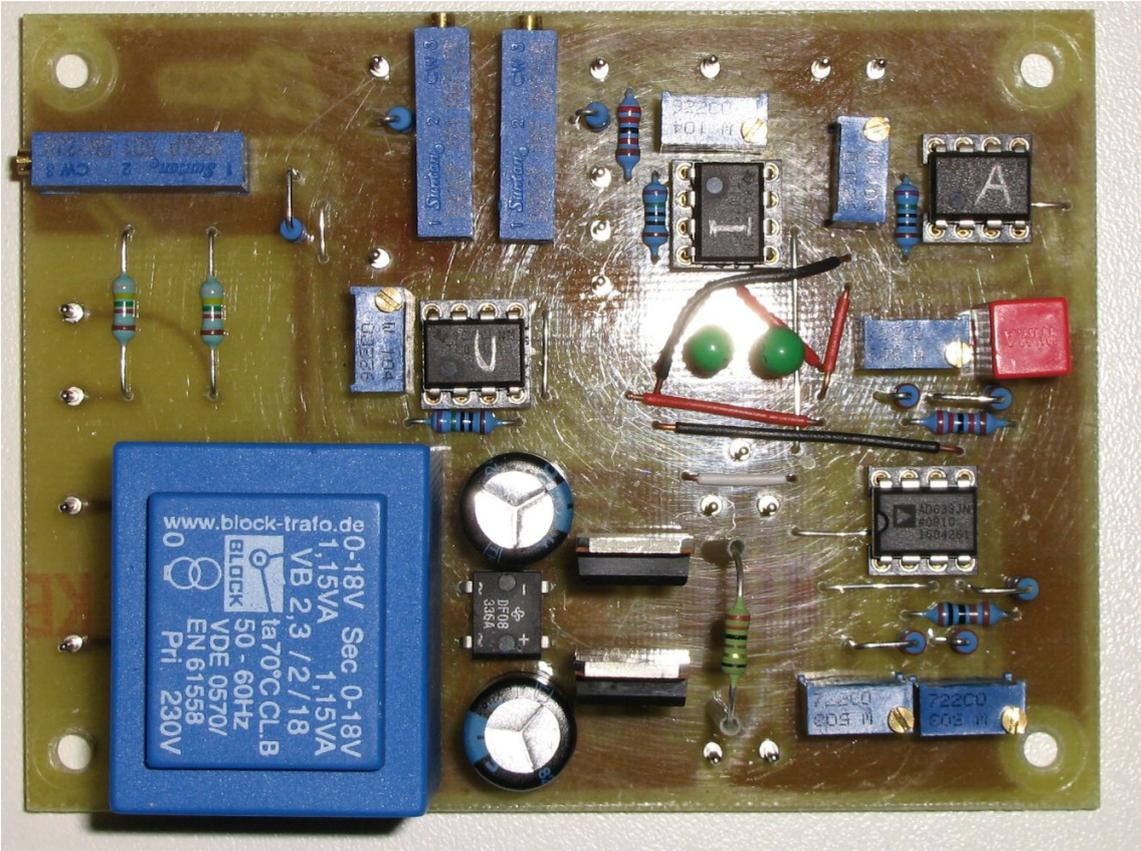


Abbildung 6.2: Hauptplatine bestückt

Abb. 6.2 zeigt die bestückte Platine.

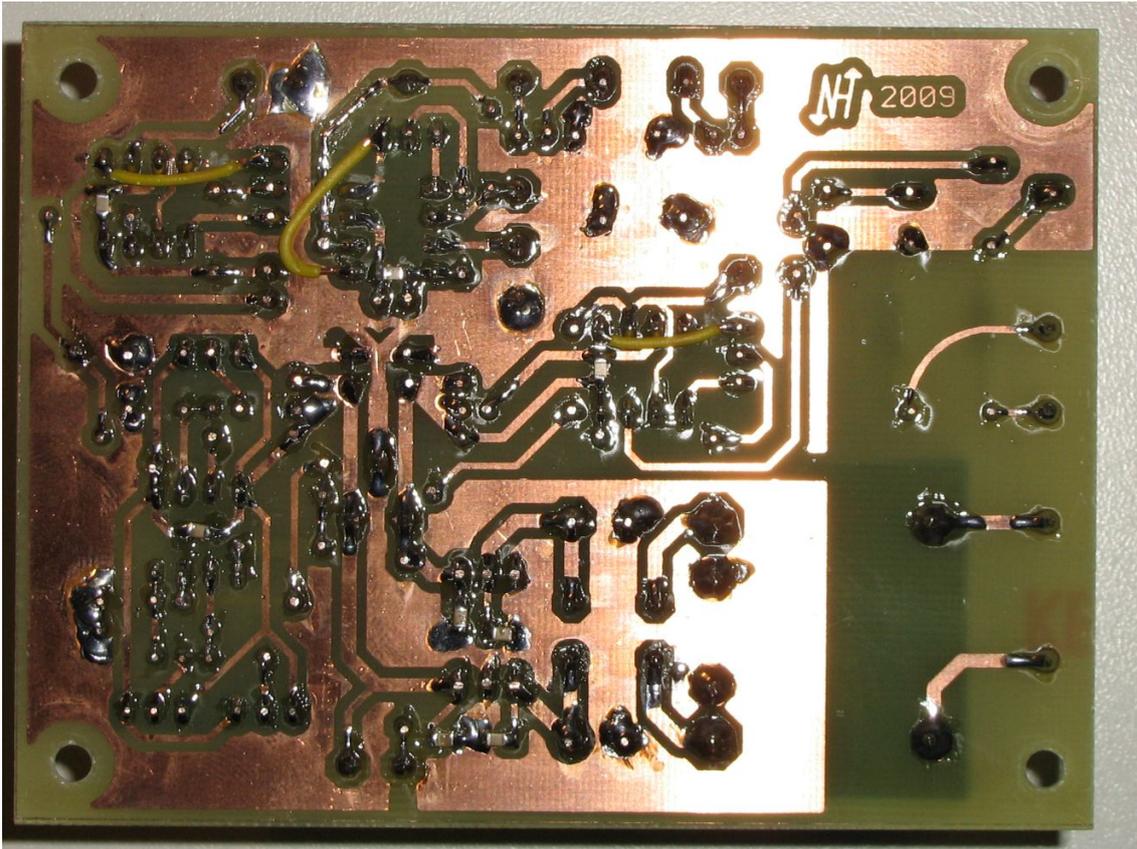


Abbildung 6.3: Hauptplatine bestückt, Lötseite

Abb. 6.3 zeigt die Lötseite der bestückten Platine. Zu erkennen sind die mit gelbem Schaltdraht ausgeführten Drahtbrücken zur Korrektur der oben erwähnten Fehler.

## 6.2 Stromwandler und LCD-Modul-Netzteil

Der Stromwandler und das LCD-Modul-Netzteil wurden auf einer ca. 100×75 mm großen Punktrasterplatine aufgebaut, welche dafür in zwei Sektoren von gleicher Größe unterteilt wurde.

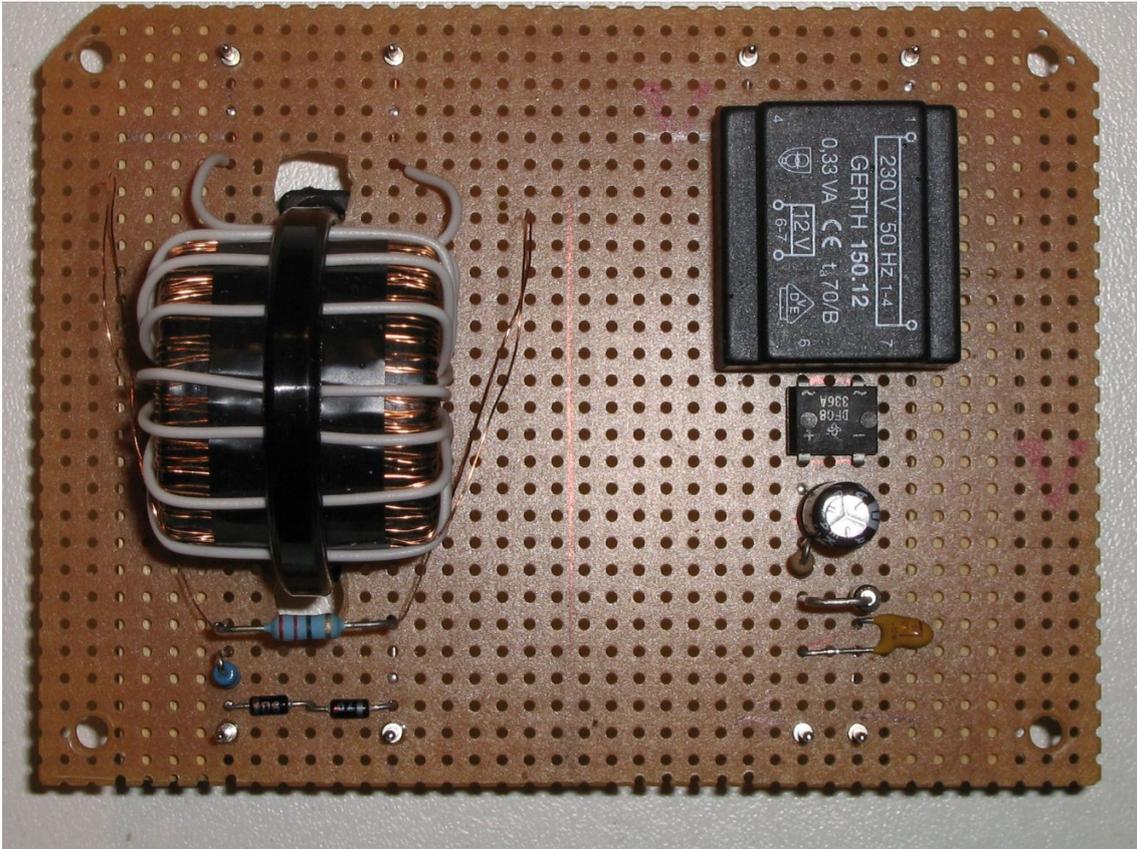


Abbildung 6.4: Platine mit Stromwandler und LCD-Modul-Netzteil

Abb. 6.4 zeigt die bestückte Platine. Links ist der Stromwandler mit seiner Beschriftung zu erkennen. Rechts ist das Netzteil mit dem Printtrafo zu sehen.

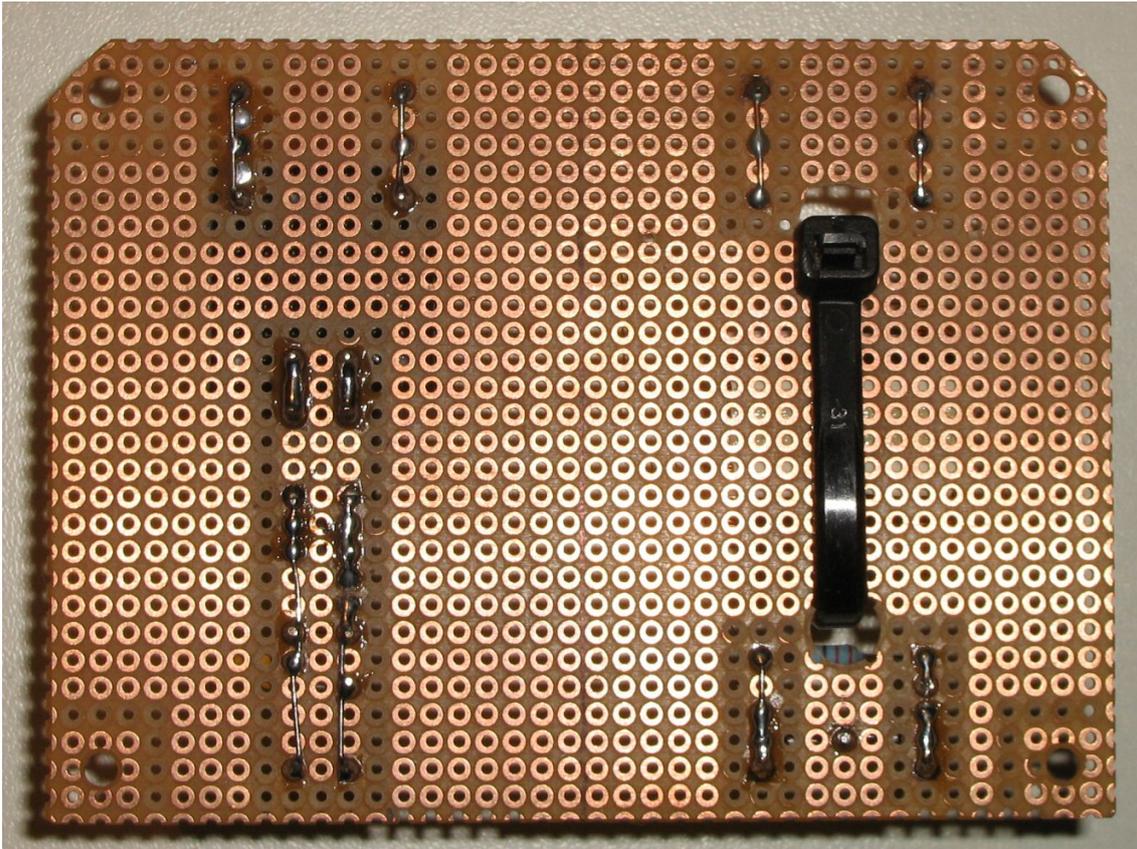


Abbildung 6.5: Platine mit Stromwandler und LCD-Modul-Netzteil, Lötseite

Abb. 6.5 zeigt die Lötseite der Platine. Es wurden einige Lötäugen entfernt, um ausreichende Isolationsabstände zu erreichen. Der Stromwandler wird von einem schwarzen Kabelbinder gehalten.

## 6.3 Montage

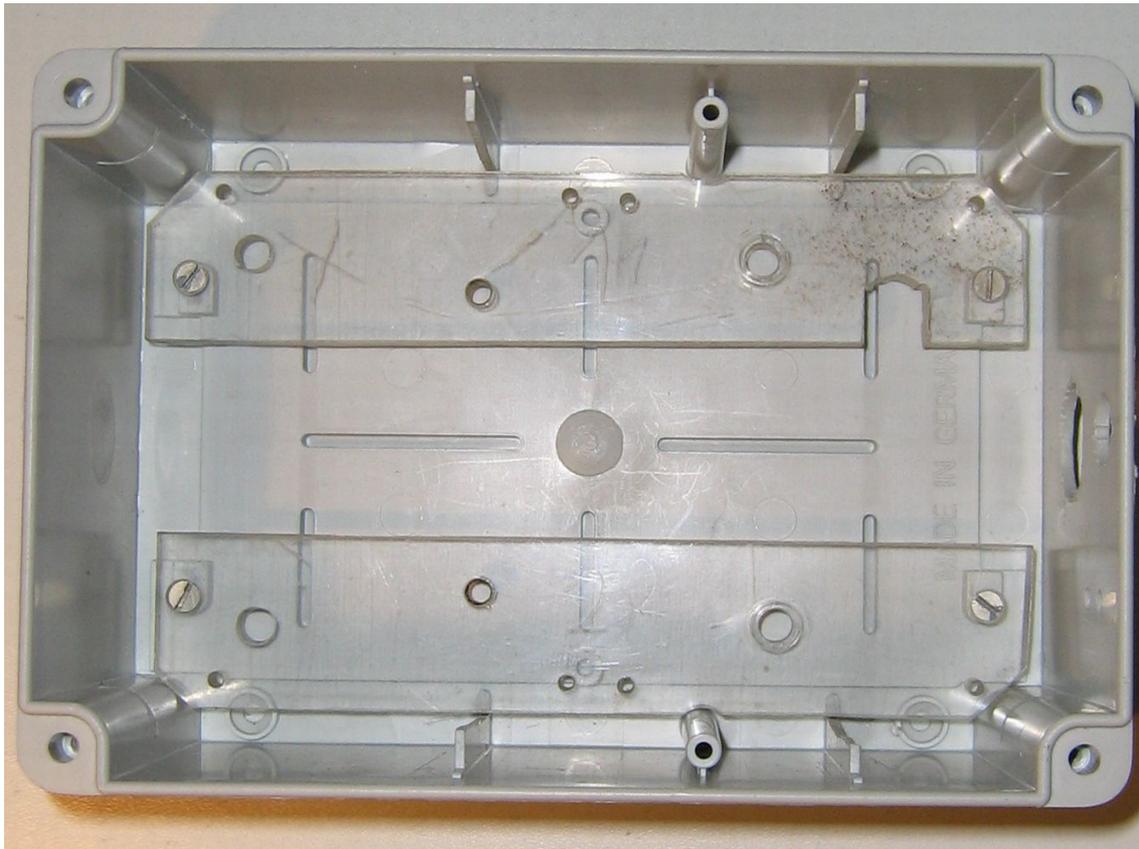


Abbildung 6.6: Gehäuse mit Platinenhalterung

Auf Abb. 6.6 ist das Gehäuse mit der Platinenhalterung bestehend aus zwei Plexiglasstreifen zu erkennen. Die Plexiglasstreifen haben jeweils vier Bohrungen mit M3-Gewinde zur Montage der Platinen und sind mit jeweils zwei M3-Senkkopfschrauben am Gehäuseboden befestigt. Am rechten Bildrand sind eine 20-mm-Bohrung für die Kabeleinführung, eine 12-mm-Bohrung für den Sicherungshalter sowie zwei 3,5-mm-Bohrungen zur Befestigung einer Lüsterklemme mittels zwei M3-Schrauben zu sehen.

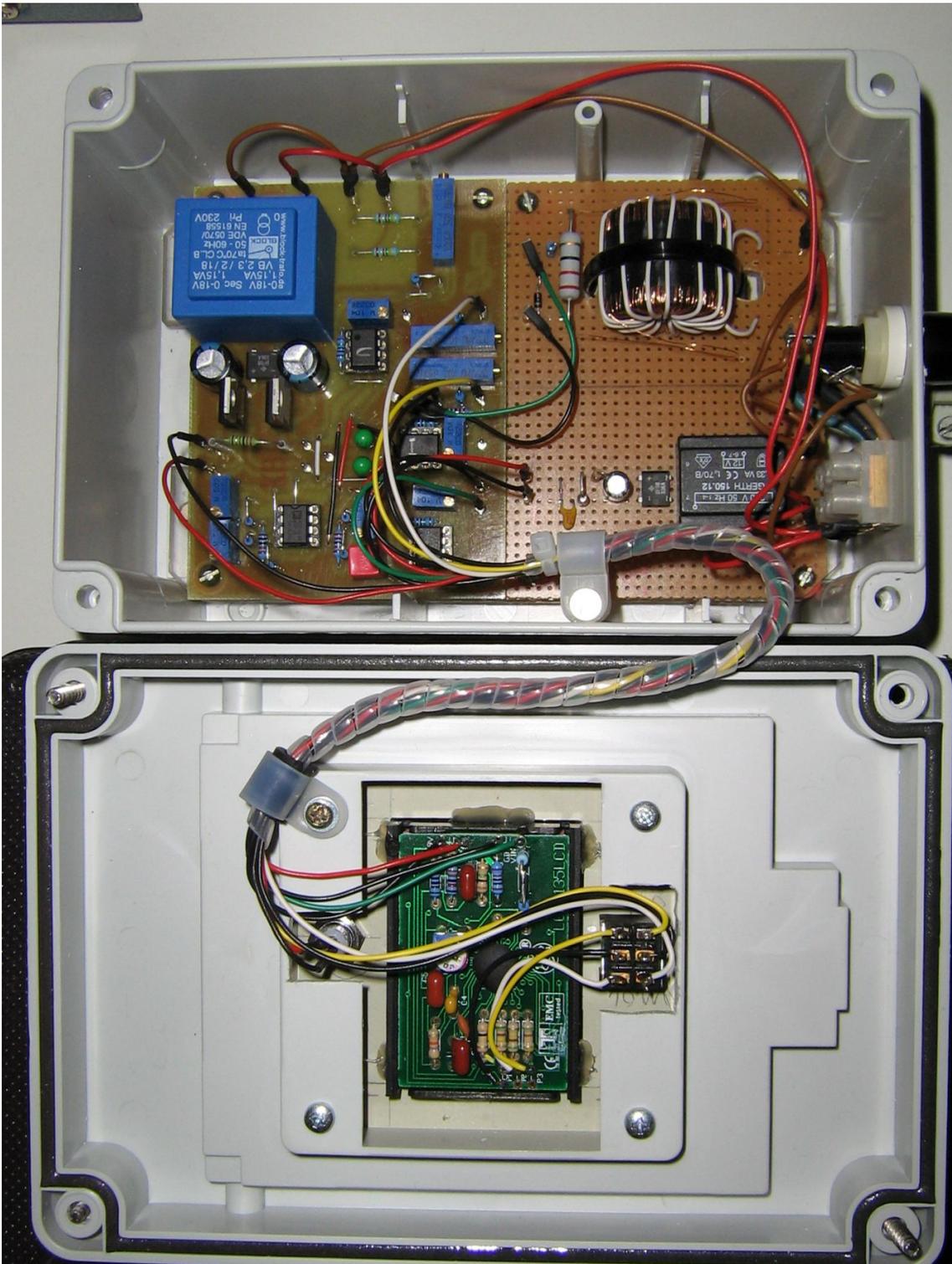


Abbildung 6.7: Gehäuse mit Platinen, Oberteil und Verdrahtung

Auf Abb. 6.7 sind die Platinen bereits montiert und mit dem Gehäuseoberteil verdraht-

tet. Das Oberteil enthält das LCD-Modul, die LED sowie den Messbereichsumschalter. Die Verbindung von Ober- und Unterteil erfolgt mit 0,14-mm<sup>2</sup>-Litzen, die mit einem Spiralband zusammengefasst und mit zwei Kabelschellen am Ober- und Unterteil befestigt sind. Die netzspannungsseitige Verdrahtung wurde mit 0,3-mm<sup>2</sup>-Litzen ausgeführt.

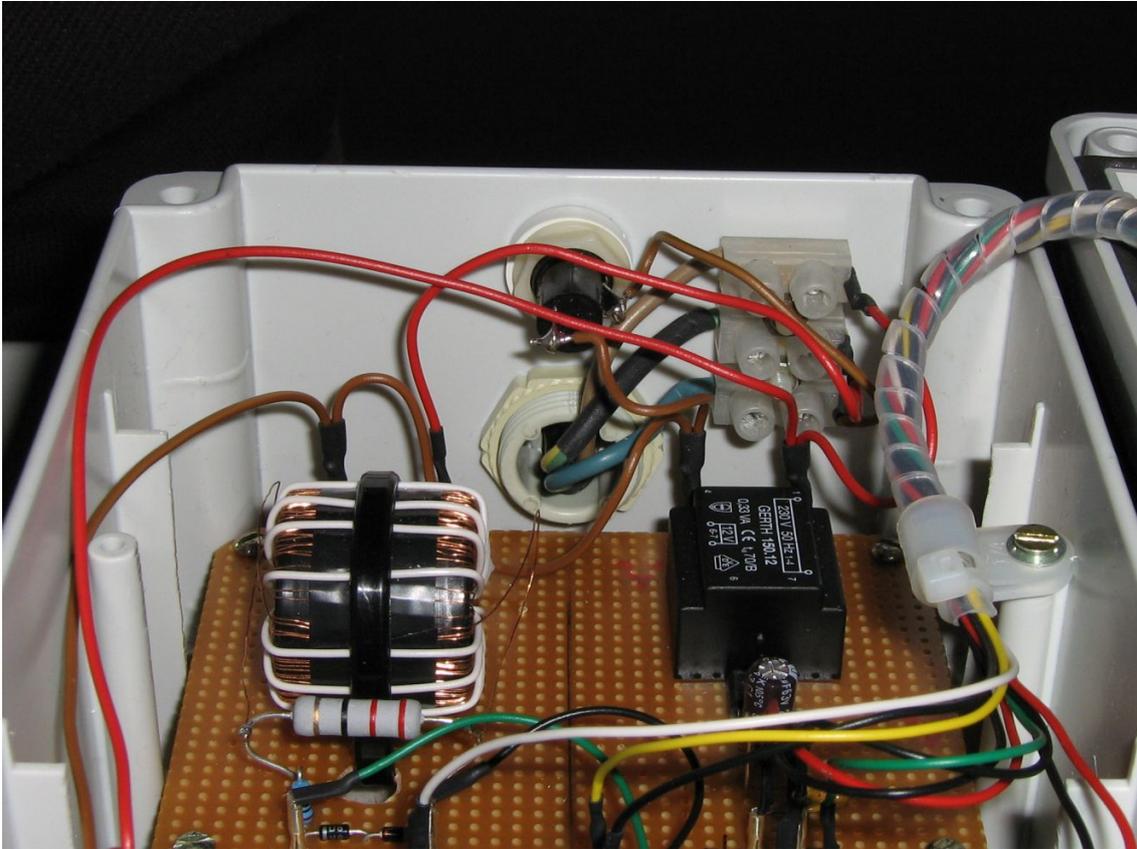


Abbildung 6.8: Anschluss der Zuleitung

Abb. 6.8 zeigt, wie die Zuleitung an die Lüsterklemme angeschlossen wird. Da der gelb-grüne Leiter nicht als Schutzleiter verwendet wird, wurde er mit einem schwarzen Schrumpfschlauch markiert.



Abbildung 6.9: Anschluss des Zwischensteckers

Auf Abb. 6.9 ist zu erkennen, wie die Zuleitung im Zwischenstecker angeschlossen wird. Auch hier wurde der gelb-grüne Leiter mit Schrumpfschlauch markiert.



Abbildung 6.10: Fertig aufgebautes Wirkleistungsmessgerät

Das fertiggestellte und betriebsbereite Wirkleistungsmessgerät ist auf Abb. 6.10 zu sehen. Die Bedienelemente werden durch einen klappbaren Kunststoffdeckel geschützt.

## 6.4 Abgleich

Nachfolgend wird der Abgleich des Wirkleistungsmessgerätes beschrieben. Der Abgleich sollte vor dem Einbau der Hauptplatine erfolgen, da die Trimmer dann leichter zugänglich sind.

### 6.4.1 Prüfung des Netzteils

Bevor die ICs in ihre Fassungen gesteckt werden, sollte die Funktion des Netzteils überprüft werden, um eine Beschädigung der ICs bei fehlerhaftem Netzteil zu verhindern. Es wird ein Voltmeter zur Messung von Gleichspannungen von ca. 15 V benötigt. An Y6 und Y7 muss eine LED als Grundlast angeschlossen werden. An Y4 bzw. Masse wird der Minuspol des Voltmeters angeschlossen. An Y1 und Y2 wird nun die Netzspannung angelegt. An Y3 muss eine Spannung von +15 V ( $\pm 0,75$  V) messbar sein. Ist die Spannung wesentlich geringer, weist dies auf einen Kurzschluss (verursacht z.B. durch Lötbrücken)

oder Verpolung bzw. Defekt von BR1, C1 oder IC1 hin. An Y5 muss eine Spannung von  $-15\text{ V}$  ( $\pm 0,75\text{ V}$ ) messbar sein. Ist die Spannung wesentlich geringer, weist dies auf einen Kurzschluss (verursacht z.B. durch Lötbrücken) oder Verpolung bzw. Defekt von BR1, C2 oder IC2 hin.

### **6.4.2 Offset-Abgleich der Operationsverstärker**

Es wird ein Voltmeter mit möglichst hoher Auflösung zur Messung von Gleichspannungen im zweistelligen Millivoltbereich benötigt. Y11 wird mit Y12 bzw. Masse verbunden, damit der nichtinvertierende Eingang von IC4 auf einem festen Potential liegt. An Y6 und Y7 muss eine LED als Grundlast angeschlossen werden. An Y1 und Y2 wird nun die Netzspannung angelegt. Das Voltmeter wird an die Anschlüsse 2 und 3 von IC3 angeschlossen. Durch Verstellen des Trimmers R6 wird die angezeigte Spannung auf exakt  $0\text{ V}$  justiert. Das Voltmeter wird an die Anschlüsse 2 und 3 von IC4 angeschlossen. Durch Verstellen des Trimmers R9 wird die angezeigte Spannung auf exakt  $0\text{ V}$  justiert. Das Voltmeter wird an die Anschlüsse 2 und 3 von IC6 angeschlossen. Durch Verstellen des Trimmers R25 wird die angezeigte Spannung auf exakt  $0\text{ V}$  justiert.

### **6.4.3 Offset-Abgleich des Analogmultiplizierers**

Achtung! Da dem Autor dieses Dokumentes keine praktikable Vorgehensweise zum Offset-Abgleich des Analogmultiplizierers bekannt ist, beschreibt die folgende Anleitung lediglich, wie die entsprechenden Trimmer in Mittelstellung gebracht werden. Die Eingangs- und Ausgangs-Offsets des Analogmultiplizierers werden dadurch nicht ausgeglichen.

Es wird ein Voltmeter mit möglichst hoher Auflösung zur Messung von Gleichspannungen im zweistelligen Millivoltbereich benötigt. Y11 wird mit Y12 bzw. Masse verbunden, damit der nichtinvertierende Eingang von IC4 auf einem festen Potential liegt. An Y6 und Y7 muss eine LED als Grundlast angeschlossen werden. An Y1 und Y2 wird nun die Netzspannung angelegt. Das Voltmeter wird an den Anschluss 2 von IC5 und an Y4 bzw. Masse angeschlossen. Durch Verstellen des Trimmers R15 wird die angezeigte Spannung auf exakt  $0\text{ V}$  justiert. Das Voltmeter wird an den Anschluss 4 von IC5 und an Y4 bzw. Masse angeschlossen. Durch Verstellen des Trimmers R18 wird die angezeigte Spannung auf exakt  $0\text{ V}$  justiert. Das Voltmeter wird an den Anschluss 6 von IC5 und an Y4 bzw. Masse angeschlossen. Durch Verstellen des Trimmers R21 wird die angezeigte Spannung auf exakt  $0\text{ V}$  justiert.

### **6.4.4 Abgleich der Spannungsmessung**

Es wird ein Voltmeter zur Messung der Netzspannung und ein Voltmeter zur Messung von Wechselfspannungen von einem Hundertstel der Netzspannung benötigt. Y11 wird mit Y12 bzw. Masse verbunden, damit der nichtinvertierende Eingang von IC4 auf einem festen Potential liegt. An Y6 und Y7 muss eine LED als Grundlast angeschlossen werden. An Y8 und Y9 wird das Voltmeter zur Messung der Netzspannung angeschlossen. Das zweite Voltmeter wird an Y10 und Y4 bzw. Masse angeschlossen. An Y1 und Y2 sowie

an Y8 und Y9 wird nun die Netzspannung angelegt. Durch Verstellen des Trimmers R3 wird die auf dem zweiten Voltmeter angezeigte Spannung auf exakt ein Hundertstel der auf dem ersten Voltmeter angezeigten Netzspannung justiert. Beispielsweise muss bei 230 V Netzspannung die Spannung auf 2,3 V eingestellt werden.

#### **6.4.5 Abgleich der Strommessung**

Es wird ein Amperemeter zur Messung von Wechselströmen von ca. 5 und 50 mA, ein Voltmeter zur Messung von Wechselspannungen von ca. 0,5 V sowie eine Wechselstromquelle, die es ermöglicht, Ströme von ca. 5 und 50 mA ( $\pm 20\%$ ) durch die Primärwicklung des Stromwandlers fließen zu lassen, benötigt. An Y11 und Y12 wird der Ausgang des Stromwandlers angeschlossen. Die Primärwicklung des Stromwandlers wird in Reihe mit dem Amperemeter an die Stromquelle angeschlossen. An Y16 und Y4 bzw. Masse wird das Voltmeter angeschlossen. An Y6 und Y7 muss eine LED als Grundlast angeschlossen werden. An Y1 und Y2 wird nun die Netzspannung angelegt. Y13 wird mit Y14 verbunden. Die Wechselstromquelle wird auf 5 mA eingestellt. Durch Verstellen des Trimmers R12 wird die auf dem Voltmeter angezeigte Spannung auf exakt 100 mV pro auf dem Amperemeter angezeigtem Milliampere justiert. Beispielsweise muss bei einem Strom von 5 mA die Spannung auf 500 mV eingestellt werden. Die Verbindung von Y13 mit Y14 wird getrennt. Y13 wird mit Y15 verbunden. Die Wechselstromquelle wird auf 50 mA eingestellt. Durch Verstellen des Trimmers R14 wird die auf dem Voltmeter angezeigte Spannung auf exakt 10 mV pro auf dem Amperemeter angezeigtem Milliampere justiert. Beispielsweise muss bei einem Strom von 50 mA die Spannung auf 500 mV eingestellt werden.

### **6.5 Inbetriebnahme**

Nachdem der Abgleich vorgenommen wurde kann das Wirkleistungsmessgerät erstmalig in Betrieb genommen werden. Der Messbereichsumschalter sollte sich in der 100-W-Stellung befinden. Der Zwischenstecker wird in eine Steckdose gesteckt. Die Anzeige muss jetzt exakt 0 W zeigen. Nun wird ein Verbraucher wie z.B. eine 25-W-Glühlampe angeschlossen. Das Wirkleistungsmessgerät muss nun die aufgenommene Leistung des Verbrauchers anzeigen. Sollte der angezeigte Wert ein negatives Vorzeichen haben, so muss an der Stromwandlerplatine entweder Y1 mit Y2 oder Y3 mit Y4 vertauscht werden. Alternativ kann auch an der Hauptplatine Y8 mit Y9 oder Y11 mit Y12 vertauscht werden.



Abbildung 6.11: Wirkleistungsmessgerät in Betrieb

Abb. 6.11 zeigt das Wirkleistungsmessgerät während der Messung der Leistungsaufnahme eines Steckernetzgerätes.

# Fazit

Das Wirkleistungsmessgerät erreicht eine erstaunlich hohe Genauigkeit, wobei der Materialwert weniger als 50 € beträgt. Selbst eine Leistung von ca. 0,03 W (1,58-M $\Omega$ -Widerstand an 230 V) kann noch erfasst werden. Die angezeigte Wert weicht über den gesamten 10-W-Messbereich nicht mehr als 3 % von der tatsächlichen Leistung ab. Als nachteilig hat sich erwiesen, dass im 10-W-Messbereich nur Ströme bis zu einem Spitzenwert von 100 mA gemessen werden können. Die Ursache dafür ist, dass der Analogmultiplizierer nur Spannungen bis 10 V verarbeiten kann, und eben diese 10 V werden von der Strommessung bei einem Strom von 100 mA ausgegeben. Für ohmsche Verbraucher mit sinusförmigem Stromverlauf ist dies völlig ausreichend, es könnten sogar Leistungen von  $230 \text{ V} \cdot \frac{100 \text{ mA}}{\sqrt{2}} \approx 16,26 \text{ W}$  gemessen werden. Bei Verbrauchern, die die Netzspannung direkt gleichrichten und glätten (z.B. Schaltnetzteile oder Kompaktleuchtstofflampen), kann dies jedoch zu Messfehlern führen. Derartige Verbraucher verursachen beim Nachladen des Glättungskondensators eine kurze Stromspitze, welche die maximal messbaren 100 mA überschreiten kann und nicht korrekt gemessen wird. Dies hat zur Folge, dass der angezeigte Messwertes geringer ist als die tatsächlich aufgenommene Leistung. Beispielsweise wurde bei einer Kompaktleuchtstofflampe mit einer tatsächlichen Leistungsaufnahme von 7,4 W im 10-W-Messbereich nur 5,6 W angezeigt. Diese Einschränkung muss auch bei der Messung von Verbrauchern, die zwar einen sinusförmigen, jedoch phasenverschobenen Stromverlauf haben, beachtet werden. Die Wirkleistung kann in diesem Fall nur dann korrekt gemessen werden, wenn die Scheinleistung die oben errechneten 16,26 W nicht überschreitet. Bei einem Verbraucher mit 10 W Wirkleistungsaufnahme und 60° Phasenverschiebung beträgt die Scheinleistung bereits 20 W, was einem Spitzenstrom von  $\frac{20 \text{ W}}{230 \text{ V}} \cdot \sqrt{2} \approx 130 \text{ mA}$  entspricht. Im Zweifelsfall sollte man in den größeren Messbereich umschalten, um die Plausibilität des im 10-W-Messbereich angezeigten Messwertes zu überprüfen.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Verlauf von Spannung, Strom und Leistung ohne Phasenverschiebung . . .	6
1.2	Verlauf von Spannung, Strom und Leistung bei 60° Phasenverschiebung .	7
2.1	Schaltplan der Hauptplatine . . . . .	9
2.2	Layout der Hauptplatine . . . . .	15
2.3	Film der Hauptplatine . . . . .	16
3.1	Stromwandler mit neuen Wicklungen . . . . .	17
3.2	Beschaltung des Stromwandlers . . . . .	18
4.1	Anschluss des LCD-Moduls PeakTech® LDP-135 . . . . .	19
4.2	Schaltplan des LCD-Modul-Netzteils . . . . .	20
5.1	Verdrahtungsplan . . . . .	21
6.1	Hauptplatine geätzt . . . . .	22
6.2	Hauptplatine bestückt . . . . .	23
6.3	Hauptplatine bestückt, Lötseite . . . . .	24
6.4	Platine mit Stromwandler und LCD-Modul-Netzteil . . . . .	25
6.5	Platine mit Stromwandler und LCD-Modul-Netzteil, Lötseite . . . . .	26
6.6	Gehäuse mit Platinenhalterung . . . . .	27
6.7	Gehäuse mit Platinen, Oberteil und Verdrahtung . . . . .	28
6.8	Anschluss der Zuleitung . . . . .	29
6.9	Anschluss des Zwischensteckers . . . . .	30
6.10	Fertig aufgebautes Wirkleistungsmessgerät . . . . .	31
6.11	Wirkleistungsmessgerät in Betrieb . . . . .	34

© **Nils Hintze**

Dieses Dokument ist für die Veröffentlichung auf der Webseite [www.elektronikpage.de](http://www.elektronikpage.de) bestimmt. Die Verbreitung des Dokumentes ist ausschließlich durch Verweise auf diese Webseite erlaubt. Die Verteilung von Kopien dieses Dokumentes auf anderen Webseiten ist nicht gestattet.