

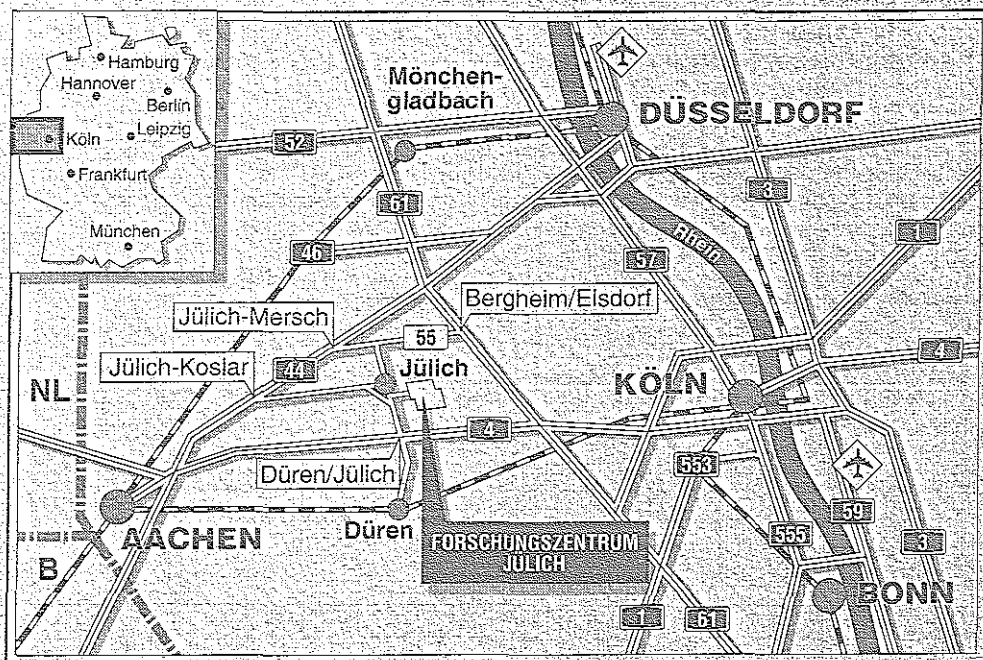
*Institut für Kernphysik*

**Schnelle Widerstandsmessung  
zur Temperaturüberwachung  
am COSY-Extraktionsseptum**

Markus Ebel Michael Lange







**Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 2964**

ISSN 0944-2952

Institut für Kernphysik Jül-2964

Zu beziehen durch : Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek  
D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland

Telefon : 02461/61-6102 · Telefax : 02461/61-6103 · Telex : 833556-70 kfa d

# **Schnelle Widerstandsmessung zur Temperaturüberwachung am COSY-Extraktionsseptum**

Markus Ebel Michael Lange



## Vorwort

Diese Diplomarbeit entstand im Institut für Kernphysik (IKP-COSY) des Forschungszentrums Jülich GmbH.

*Für die interessante Aufgabenstellung und Betreuung möchten wir uns bei  
Herrn Prof. Dr. -Ing. U. Schwarz  
bedanken. Bei  
Herrn Prof. -Ing. K. G. Giese  
bedanken wir uns für die Übernahme des Koreferates.*

*Wir bedanken uns für die hervorragende Betreuung innerhalb der KFA bei  
den Herren*

*Dipl. Ing. M. Sauer und Dr. U. Bechstedt*

*Für die phantastische technische Unterstützung bei unseren Testaufbauten  
möchten wir uns besonders bei  
G. Dolfus und T. Sagefka  
bedanken.*

*Besonderer Dank gilt den Mitarbeitern des Zentrallabors für Elektronik  
(ZEL)*

*Dipl. -Ing. J. Abel und H. Larue*

*für die Zurverfügungstellung des Emulatorsystems sowie für Tip's und  
Trick's.*

*Für moralische Unterstützung und Eiskonfekt bedanken wir uns herzlich bei  
Herrn G. Schruck*

*Unser ganz besonderer Dank geht an*

*Herrn Dipl. -Ing. H. Schneider*

*für praktische Unterstützung und hervorragende Zusammenarbeit !*

*Außerdem möchten wir uns für die freundliche Unterstützung bei allen  
Mitarbeitern des Institutes IKP der KFA bedanken.*



# Inhaltsverzeichnis

|          |                                             |           |
|----------|---------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                           | <b>7</b>  |
| 1.1      | COSY                                        | 8         |
| 1.1.1    | Elektronenkühlung                           | 9         |
| 1.1.2    | Stochastische Kühlung                       | 10        |
| 1.2      | Problemstellung                             | 11        |
| 1.2.1    | Zielsetzung                                 | 12        |
| <b>2</b> | <b>Vorbetrachtung</b>                       | <b>13</b> |
| 2.1      | Technische Daten Extraktionsseptum          | 14        |
| 2.2      | Technische Daten Földi-Netzgerät            | 14        |
| 2.2.1    | Interlock                                   | 15        |
| 2.3      | Mathematische Vorbetrachtung                | 15        |
| 2.3.1    | Temperatur- Zeitverhalten Extraktionsseptum | 15        |
| 2.3.2    | Empfindlichkeit des Systems                 | 17        |
| 2.3.3    | Widerstand bei Gleichgewichtstemperatur     | 19        |
| <b>3</b> | <b>Messung am Extraktionsseptum</b>         | <b>20</b> |
| 3.1      | Meßgeräte                                   | 21        |
| 3.1.1    | DCCT                                        | 21        |
| 3.1.2    | Schlumberger Systemvoltmeter SI 7061        | 24        |
| 3.1.3    | Temperaturmeßgerät MAWI                     | 25        |
| 3.1.4    | Funktionsgenerator HP 8116A                 | 25        |
| 3.1.5    | Oszilloskop Gould 1604                      | 26        |
| 3.1.6    | UNIX-Workstation                            | 26        |
| 3.1.7    | HP VEE                                      | 26        |
| 3.2      | Fehlerbetrachtung                           | 28        |
| 3.2.1    | Fehler der Spannungsmessung                 | 29        |
| 3.2.2    | Fehler der Strommessung                     | 30        |
| 3.2.3    | Temperaturmeßgerät                          | 31        |
| 3.2.4    | Abschließende Fehlerbetrachtung             | 31        |
| 3.3      | Durchführung und Auswertung der Messung     | 32        |

|          |                                                   |           |
|----------|---------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.1    | Meßaufbau Extraktionsseptum . . . . .             | 33        |
| 3.3.2    | Meßergebnisse . . . . .                           | 33        |
| 3.3.3    | Abschließende Betrachtung der Messung . . . . .   | 39        |
| <b>4</b> | <b>Hardware</b> . . . . .                         | <b>41</b> |
| 4.1      | Anforderungen an das System . . . . .             | 42        |
| 4.2      | Schematischer Aufbau des Systems . . . . .        | 43        |
| 4.3      | Trennverstärkerkarte . . . . .                    | 43        |
| 4.3.1    | Trennverstärker AD210BN . . . . .                 | 44        |
| 4.3.2    | Schaltungsbeschreibung . . . . .                  | 45        |
| 4.3.3    | Fehlerbetrachtung . . . . .                       | 46        |
| 4.4      | AD-Wandlerkarte . . . . .                         | 46        |
| 4.4.1    | Schaltungsbeschreibung . . . . .                  | 47        |
| 4.4.2    | Adressdekodierung . . . . .                       | 47        |
| 4.4.3    | Anpassung der AD-Wandler-Karte . . . . .          | 48        |
| 4.5      | Ausgabeplatine . . . . .                          | 50        |
| 4.5.1    | Adressdecodierung . . . . .                       | 50        |
| 4.5.2    | LED Ansteuerung . . . . .                         | 51        |
| 4.5.3    | Watchdog MAX705 . . . . .                         | 52        |
| 4.6      | DSP-Karte . . . . .                               | 54        |
| 4.6.1    | Digitaler Signal Prozessor (DSP) MB8764 . . . . . | 54        |
| <b>5</b> | <b>Digitale Signalverarbeitung</b> . . . . .      | <b>61</b> |
| 5.1      | Digitaler Butterworth-Tiefpaß . . . . .           | 62        |
| 5.2      | Medianwert-Filter . . . . .                       | 64        |
| 5.3      | Widerstandsgrenzwert-Berechnung . . . . .         | 65        |
| 5.4      | Gleichgewichtstemperatur . . . . .                | 67        |
| 5.5      | Differenzspannungsbewertung . . . . .             | 69        |
| <b>6</b> | <b>Software</b> . . . . .                         | <b>71</b> |
| 6.1      | DSP-Emulator . . . . .                            | 72        |
| 6.1.1    | Emulationsprogramm XBugger 640 . . . . .          | 72        |
| 6.1.2    | Assembler XASM. EXE . . . . .                     | 75        |
| 6.1.3    | Editor XEDIT. EXE . . . . .                       | 75        |
| 6.2      | Programmbeschreibung . . . . .                    | 76        |
| 6.2.1    | Flußdiagramm . . . . .                            | 78        |
| <b>7</b> | <b>Testaufbau</b> . . . . .                       | <b>85</b> |
| 7.1      | Oktupolmagnet . . . . .                           | 86        |
| 7.2      | Heinzinger Netzgerät . . . . .                    | 87        |
| 7.3      | Messung am Oktupol . . . . .                      | 89        |
| 7.4      | Test des Temperaturüberwachungssystems . . . . .  | 91        |

|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8 Inbetriebnahme des Systems</b>                                   | <b>96</b>  |
| <b>9 Schlußbetrachtung</b>                                            | <b>99</b>  |
| 9.1 Möglichkeiten der Systemverbesserung . . . . .                    | 100        |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                                           | <b>102</b> |
| <b>Anhang</b>                                                         | <b>104</b> |
| <b>A DSP-Karte</b>                                                    | <b>104</b> |
| A.1 Schaltplan . . . . .                                              | 105        |
| A.2 Bestückungsplan . . . . .                                         | 110        |
| <b>B TV-Karte</b>                                                     | <b>111</b> |
| B.1 Schaltplan . . . . .                                              | 112        |
| B.2 Bestückungsplan . . . . .                                         | 113        |
| B.3 Stückliste . . . . .                                              | 114        |
| <b>C ADC-Karte</b>                                                    | <b>115</b> |
| C.1 Schaltplan . . . . .                                              | 116        |
| C.2 Bestückungsplan . . . . .                                         | 117        |
| C.3 Stückliste . . . . .                                              | 118        |
| C.4 PAL-Programm . . . . .                                            | 119        |
| <b>D Ausgabe-Karte</b>                                                | <b>120</b> |
| D.1 Schaltplan . . . . .                                              | 121        |
| D.2 Bestückungsplan . . . . .                                         | 123        |
| D.3 Stückliste . . . . .                                              | 124        |
| D.4 PAL-Programm . . . . .                                            | 125        |
| <b>E DSP-Programmierung</b>                                           | <b>126</b> |
| E.1 Befehlsliste des MB8764 . . . . .                                 | 126        |
| E.1.1 Register . . . . .                                              | 126        |
| E.1.2 Transferbefehle . . . . .                                       | 128        |
| E.1.3 Arithmetisch/logische Operationen . . . . .                     | 130        |
| E.1.4 Sprungbefehle . . . . .                                         | 131        |
| E.1.5 Spezielle Anweisungen für die indizierte Adressierung . . . . . | 132        |
| E.1.6 Weitere Assembler-Anweisungen . . . . .                         | 132        |
| E.2 DSP-Programm . . . . .                                            | 134        |

# Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                |    |
|------|----------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | COSY-Ring . . . . .                                            | 8  |
| 1.2  | Blick in den Beschleunigertunnel . . . . .                     | 9  |
| 1.3  | Elektronenkühlung . . . . .                                    | 10 |
| 1.4  | stochastische Kühlung . . . . .                                | 10 |
| 1.5  | Magnetisches Extraktionsseptum . . . . .                       | 12 |
| 2.1  | Qualitative Darstellung Temperatur- Zeitverlauf . . . . .      | 17 |
| 2.2  | Temperaturempfindlichkeit in Abhängigkeit vom Strom . . . . .  | 18 |
| 3.1  | Prinzipschaltbild DCCT . . . . .                               | 21 |
| 3.2  | Fehlerdefinition DCCT . . . . .                                | 23 |
| 3.3  | Beispiel VEE-Oberfläche . . . . .                              | 27 |
| 3.4  | Meßaufbau Extraktionsseptum . . . . .                          | 32 |
| 3.5  | R über I bei 12,7 bar . . . . .                                | 34 |
| 3.6  | R über I bei unterschiedlichen Vorlaufdrücken . . . . .        | 35 |
| 3.7  | R über $\vartheta$ . . . . .                                   | 35 |
| 3.8  | Spannung am Septum ohne Filterung . . . . .                    | 36 |
| 3.9  | Spannung am Septum mit 1 kHz-Tiefpaß . . . . .                 | 36 |
| 3.10 | Hochfahren Földi-Netzgerät von 0-2670 A . . . . .              | 37 |
| 3.11 | Abschaltung Földi-Netzgerät bei 2670 A . . . . .               | 38 |
| 3.12 | Differenzspannung der Spulen ( $U_{SM2} - U_{SM1}$ ) . . . . . | 39 |
| 4.1  | Frontansicht Temperaturüberwachungssystem . . . . .            | 41 |
| 4.2  | Schematischer Aufbau des Systems . . . . .                     | 43 |
| 4.3  | Frontblende der Trennverstärkerkarte . . . . .                 | 44 |
| 4.4  | Blockschaltbild AD-Wandlerkarte . . . . .                      | 46 |
| 4.5  | Frontblende der ADC-Karte . . . . .                            | 50 |
| 4.6  | Frontblende der Ausgabekarte . . . . .                         | 52 |
| 4.7  | Programmiermodell DSP MB8764 . . . . .                         | 55 |
| 4.8  | Aufbau der DSP-Karte . . . . .                                 | 60 |
| 5.1  | Prinzipschaltbild digitale Signalverarbeitung . . . . .        | 62 |
| 5.2  | R L C-Glied . . . . .                                          | 63 |

|     |                                                      |     |
|-----|------------------------------------------------------|-----|
| 5.3 | Signalflußplan Z-Transformation . . . . .            | 64  |
| 5.4 | Widerstandsabweichung Meß- und Rechenwerte . . . . . | 68  |
| 5.5 | R über I-Grenzwertkurve und Meßkurve . . . . .       | 68  |
| 5.6 | Spannungsdifferenz- und Grenzwerte . . . . .         | 70  |
| 6.1 | Programmieroberfläche Emulator . . . . .             | 72  |
| 7.1 | Oktupolmagnet . . . . .                              | 86  |
| 7.2 | Blockschaltbild Meßaufbau Oktupol . . . . .          | 89  |
| 7.3 | R über I am Oktupol . . . . .                        | 90  |
| 7.4 | Blockschaltbild Testaufbau Oktupol . . . . .         | 91  |
| 7.5 | Systemreaktionszeiten . . . . .                      | 94  |
| 7.6 | Gesamtreaktionszeiten . . . . .                      | 95  |
| 8.1 | Blockschaltbild System am Septum . . . . .           | 97  |
| A.1 | DSP-Karte . . . . .                                  | I   |
| B.1 | Trennverstärker-Karte . . . . .                      | III |
| C.1 | A/D-Wandler-Karte . . . . .                          | V   |
| D.1 | Ausgabe-Karte . . . . .                              | VII |

# Tabellenverzeichnis

|     |                                                    |    |
|-----|----------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Technische Daten Extraktionsseptum . . . . .       | 14 |
| 2.2 | Lastdaten Földi . . . . .                          | 15 |
| 2.3 | Kennwerte Septum . . . . .                         | 16 |
| 3.1 | Technische Daten PCT 30-10 . . . . .               | 23 |
| 3.2 | Technische Daten DVM SI-7061 . . . . .             | 24 |
| 3.3 | Technische Daten Temperaturmeßgerät . . . . .      | 25 |
| 3.4 | Gleichspannungsfehlergrenzen DVM SI 7061 . . . . . | 29 |
| 3.5 | Relative Fehler DCCT – DVM . . . . .               | 30 |
| 3.6 | Gesamtfehler Strommessung . . . . .                | 31 |
| 4.1 | Technische Daten AD210BN . . . . .                 | 45 |
| 4.2 | Technische Daten ADC674AKH . . . . .               | 47 |
| 4.3 | Bedeutung der LED's . . . . .                      | 51 |
| 7.1 | Technische Daten Oktupol . . . . .                 | 87 |
| 7.2 | Technische Daten Heinzinger Netzgerät . . . . .    | 88 |

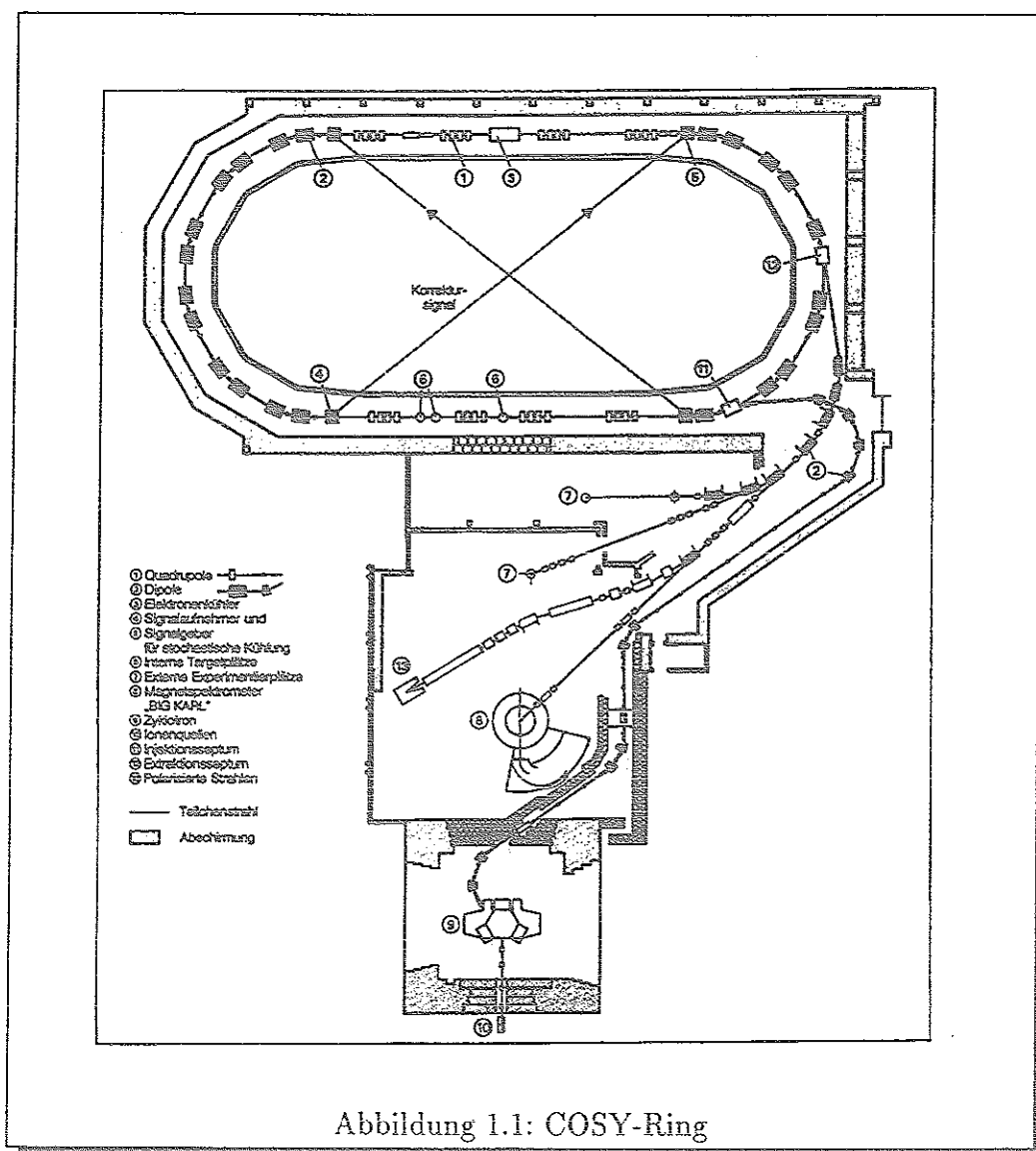
# Kapitel 1

## Einleitung



## 1.1 COSY

Das COoler SYnchrotron COSY am Institut für Kernphysik im Forschungszentrum Jülich ist ein Beschleuniger und Speicherring für Protonen. Als Vorbeschleuniger dient das Zyklotron *JULIC*, mit dessen Ionenquellen die unterschiedlichen Teilchen erzeugt werden. Über eine 100 m lange Strahlführung werden die Ionen in den Speicherring injiziert. Der Speicherring besteht aus zwei 52 m langen Bögen, die den Teilchenstrahl je um 180 Grad umlenken und zwei 40 m langen, geraden Strecken [1]. Die Protonen sind in einer



ringförmigen Vakuumröhre eingeschlossen und werden durch insgesamt 24

Dipolmagnete abgelenkt und durch 56 Quadrupolmagnete auf die Umlaufbahn fokussiert. Die Energie der umlaufenden Teilchen kann durch Hochfrequenzfelder verändert werden. Zusammen mit der Änderung der Dipol- und Quadrupolfelder ist man in der Lage, die Protonen auf eine Endenergie von ca. 2,5 GeV zu beschleunigen. Die Besonderheit bei COSY ist die ho-

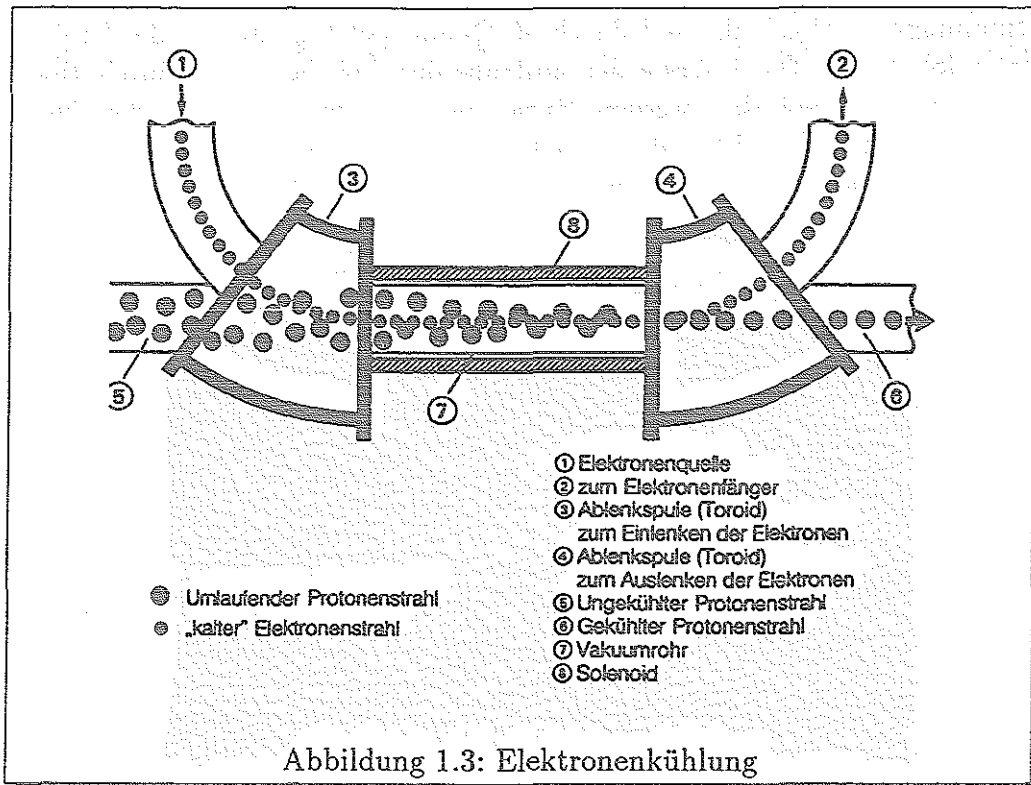


Abbildung 1.2: Blick in den Beschleunigertunnel

he Strahlqualität welche durch die sogenannte Strahlkühlung erzeugt wird. Durch die Strahlkühlung werden die von der Bahn abweichenden Bewegungen der Teilchen sowohl transversal als auch longitudinal auf ein Minimum reduziert. Bei COSY kommen zwei Kühlverfahren zum Einsatz.

### 1.1.1 Elektronenkühlung

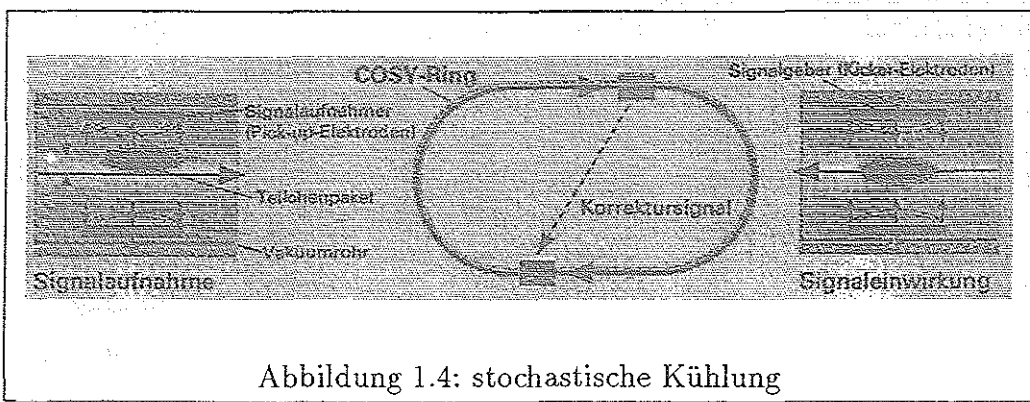
Die Elektronenkühlung wird bei einer Einschußenergie von 40 MeV angewandt, da sie dort besonders effektiv ist. Dabei wird ein monoenergetischer, wohlgeordneter *kalter* Elektronenstrahl durch ein torodiales Magnetfeld in den Protonenstrahl eingeschleust. Diese beiden Strahlen durchmischen sich auf einer Länge von 2 m.



Durch ein weiteres torodiales Magnetfeld wird der Elektronenstrahl wieder ausgelenkt und vom Protonenstrahl getrennt. Die geordnete Bewegung der Elektronen wird dabei auf die Protonen übertragen, und es entsteht ein geordneter *gekühlter* Strahl.

### 1.1.2 Stochastische Kühlung

Das stochastische Kühlen wird bei höheren Energien des umlaufenden Strahles angewendet.



Durch Signalaufnehmer wird die mittlere Abweichung eines vorbeifliegenden Teilchenpaketes von der Sollbahn innerhalb eines Zeitabschnitts ermittelt. Aus dieser Abweichung wird ein Korrektursignal erzeugt, welches auf direktem Weg zu den Signalgebern gesendet wird. Dadurch wird der Strahl-  
abstand zu seiner vorgesehenen Soll-Lage verringert.

Der Kühlprozeß wird, aufgrund der höheren Energie und der damit verbundenen höheren Geschwindigkeit, ca. eine Million mal pro Sekunde wiederholt.

Durch die so erreichbare Strahlqualität schafft man Voraussetzungen für neuartige Experimente auf den Gebieten der Kern- und Mittelenergiephysik. Die Mittelenergiephysik befaßt sich mit der Untersuchung von subnuklearen Strukturen.

## 1.2 Problemstellung

Für die Auslenkung des gesamten in COSY umlaufenden Teilchenpakets ist eine *Strahlweiche*, bestehend aus dem elektrostatischen Hochspannungsseptum und dem magnetischen Extraktionsseptum, erforderlich. Das Hochspannungsseptum bewirkt eine geringfügige Ablenkung des umlaufenden Strahls in den Bereich des ersten Septumsmagneten. Erst im Extraktionsseptum erfolgt die endgültige Auslenkung in Richtung der externen Targets.

Bei dieser Arbeit interessiert hauptsächlich das magnetische Extraktionsseptum.

Das magnetische Extraktionsseptum besteht aus jeweils zwei wassergekühlten zweipoligen Magneten mit einem C-Kern dessen offene Seite des Eisens sehr dünn ist (12,9 mm) um ein homogenes Hauptfeld und gleichzeitig eine sehr geringe Streuung auf der Strahlseite ( $< 0,2\%$  des Nutzfeldes) zu bekommen. Die dünne Wicklungsseite, vergleichbar mit einer stromdurchflossenen Platte, nennt man *Septum*.

Da die Stromdichte in den Magnetwicklungen mehr als  $80 A/mm^2$  betragen kann, ist eine permanente Kühlung der Wicklungen unter Verwendung von Hohlkupferleitern erforderlich. Die Kühlung erfolgt durch zwölf parallele Kühlkreisläufe pro Magnet.

Ein Ausfall der Kühlung führt zu einem sehr schnellen Temperaturanstieg der Wicklungen. Die errechnete Burn-out-Zeit liegt bei 1,2 Sekunden. Da die üblichen Schutzmaßnahmen z.B. Temperaturüberwachung durch Thermoklicks, bedingt durch ihre relativ großen Zeitkonstanten, zu langsam für die Erfassung eines schnellen Temperaturanstiegs sind, ist ein weiterer Schutz erforderlich.

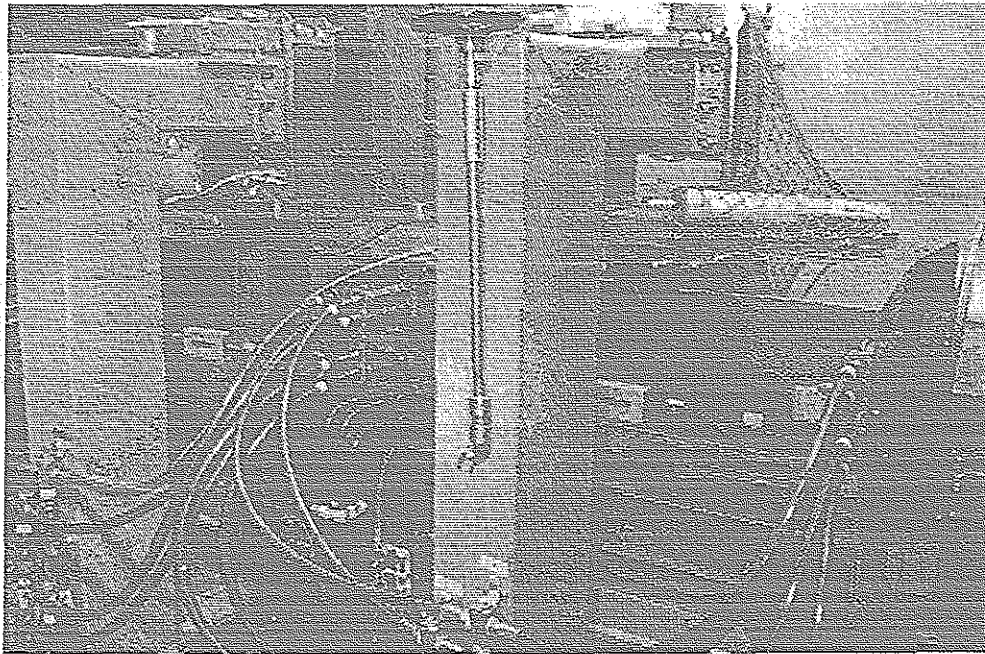


Abbildung 1.5: Magnetisches Extraktionsseptum

### 1.2.1 Zielsetzung

Ziel ist die Entwicklung eines eigenständigen Temperaturüberwachungssystems für das magnetische Extraktionsseptum an COSY.

Grundlage für das System ist eine ständige Messung von Strom und Spannung und deren Auswertung über einen digitalen Signalprozessor (DSP). Der sich aus dem Quotienten von Strom und Spannung ergebende Wicklungswiderstand läßt einen direkten Rückschluß auf die mittlere Temperatur der Septumwicklungen zu. Der so ermittelte Wicklungswiderstand wird mit einem Grenzwert verglichen. Wird dieser Grenzwert überschritten, erfolgt über die Interlockschleife die Abschaltung des speisenden Netzgerätes.

Desweiteren werden die Spulenwiderstände der beiden Septumsspulen ständig miteinander verglichen um auch die Verstopfung eines der zwölf Kühlkreisläufe und die dadurch folgende Erhitzung erfassen zu können.

# Kapitel 2

## Vorbetrachtung

|      |      |
|------|------|
| 1.   | 100% |
| 2.   | 100% |
| 3.   | 100% |
| 4.   | 100% |
| 5.   | 100% |
| 6.   | 100% |
| 7.   | 100% |
| 8.   | 100% |
| 9.   | 100% |
| 10.  | 100% |
| 11.  | 100% |
| 12.  | 100% |
| 13.  | 100% |
| 14.  | 100% |
| 15.  | 100% |
| 16.  | 100% |
| 17.  | 100% |
| 18.  | 100% |
| 19.  | 100% |
| 20.  | 100% |
| 21.  | 100% |
| 22.  | 100% |
| 23.  | 100% |
| 24.  | 100% |
| 25.  | 100% |
| 26.  | 100% |
| 27.  | 100% |
| 28.  | 100% |
| 29.  | 100% |
| 30.  | 100% |
| 31.  | 100% |
| 32.  | 100% |
| 33.  | 100% |
| 34.  | 100% |
| 35.  | 100% |
| 36.  | 100% |
| 37.  | 100% |
| 38.  | 100% |
| 39.  | 100% |
| 40.  | 100% |
| 41.  | 100% |
| 42.  | 100% |
| 43.  | 100% |
| 44.  | 100% |
| 45.  | 100% |
| 46.  | 100% |
| 47.  | 100% |
| 48.  | 100% |
| 49.  | 100% |
| 50.  | 100% |
| 51.  | 100% |
| 52.  | 100% |
| 53.  | 100% |
| 54.  | 100% |
| 55.  | 100% |
| 56.  | 100% |
| 57.  | 100% |
| 58.  | 100% |
| 59.  | 100% |
| 60.  | 100% |
| 61.  | 100% |
| 62.  | 100% |
| 63.  | 100% |
| 64.  | 100% |
| 65.  | 100% |
| 66.  | 100% |
| 67.  | 100% |
| 68.  | 100% |
| 69.  | 100% |
| 70.  | 100% |
| 71.  | 100% |
| 72.  | 100% |
| 73.  | 100% |
| 74.  | 100% |
| 75.  | 100% |
| 76.  | 100% |
| 77.  | 100% |
| 78.  | 100% |
| 79.  | 100% |
| 80.  | 100% |
| 81.  | 100% |
| 82.  | 100% |
| 83.  | 100% |
| 84.  | 100% |
| 85.  | 100% |
| 86.  | 100% |
| 87.  | 100% |
| 88.  | 100% |
| 89.  | 100% |
| 90.  | 100% |
| 91.  | 100% |
| 92.  | 100% |
| 93.  | 100% |
| 94.  | 100% |
| 95.  | 100% |
| 96.  | 100% |
| 97.  | 100% |
| 98.  | 100% |
| 99.  | 100% |
| 100. | 100% |

Die Ergebnisse der Vorbetrachtung sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Die Ergebnisse der Vorbetrachtung sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Die Ergebnisse der Vorbetrachtung sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Die Ergebnisse der Vorbetrachtung sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Die Ergebnisse der Vorbetrachtung sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Die Ergebnisse der Vorbetrachtung sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

## 2.1 Technische Daten Extraktionsseptum

Für die Vorbetrachtung sind zunächst die technischen Daten des Septums erforderlich [3].

Die Magnetwicklungen bestehen aus hochleitfähigem, sauerstofffreiem OFHC-

|            |                                                        |      |       |
|------------|--------------------------------------------------------|------|-------|
| Electrical | Magnetic field                                         | 1,1  | T     |
|            | Magnetic length                                        | 947  | mm    |
|            | Number of turns                                        | 12   |       |
|            | Coils current                                          | 2750 | A     |
|            | Coil resistance                                        | 13,2 | mΩ    |
|            | Operating Voltage                                      | 36   | V     |
|            | Power dissipation                                      | 99   | kW    |
| Cooling    | Water flow rate                                        | 51   | l/min |
|            | Differential water pressure                            | 13   | bar   |
|            | Water temperature difference                           | 27   | °C    |
|            | Copper temperature difference<br>for septum conductors | 39   | °C    |
|            | - Water velocity                                       | 11   | m/s   |
|            | - Burn out time                                        | 1,2  | s     |

Tabelle 2.1: Technische Daten Extraktionsseptum

Kupfer mit einem Temperaturkoeffizienten von  $\alpha = 0,00396 \frac{1}{K}$  [4].

Zur Kühlung der Wicklungen ist das Septum am internen Wasserkühlkreislauf angeschlossen. Der Wasserdruck liegt zwischen 11 – 14 bar und die Vorlauftemperatur wird auf  $21^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$  geregelt.

Das Septum wird bisher durch Thermoklicks zur Temperaturüberwachung und Durchflußwächter für das Kühlwasser geschützt. Beide Systeme sind nicht in der Lage das Septum bei hohen Betriebsströmen ausreichend zu schützen, da die Thermoklicks bei schnellen Temperaturanstiegen zu langsam sind und die Durchflußwächter geringe Durchflußänderungen, z. B. durch Verstopfung nur eines Kühlkanals, nicht erfassen können.

## 2.2 Technische Daten Földi-Netzgerät

Das magnetische Extraktionsseptum wird durch ein stromgeregeltes Gleichstromnetzgerät der Fa. I. Földi AG gespeist.

**Kurzbeschreibung:**

Eine vollgesteuerte Doppel-Sechspuls-Brückenschaltung (Parallelschaltung) mit nachgeschaltetem LC-Filter liefert die Gleichspannung an den Ausgangsklemmen. Das Netzgerät arbeitet als Stromquelle. Die Feinregelung des Ausgangsstroms erfolgt mit einem aktiven Widerstand der transformatorisch in den Ausgangskreis eingekoppelt wird. Die Bedienung ist lokal oder über einen Rechner möglich. Die Sollwertvorgabe ist mit einem Tiefpaß  $5 \times \tau = 10\text{s}$  verzögert. Die interne Strommessung erfolgt mit einem Nullflußstromwandler (Földi-DCCT – PCT 30-10) dessen Funktion in Kapitel 3.1.1 (S. 21) beschrieben wird.

|                              |           |       |
|------------------------------|-----------|-------|
| Nennspannung $U_n$ :         | 94        | V     |
| Nennstrom $I_n$ :            | 3000      | A     |
| Arbeitsbereich:              | 5 - 100 % | $I_n$ |
| zul. Stromripple bei 3000 A: | $\pm 300$ | mA    |

Tabelle 2.2: Lastdaten Földi

**2.2.1 Interlock**

Zur Überwachung der Temperatur und des Wasserdurchflusses von angeschlossenen Verbrauchern ist eine Interlockschleife vorgesehen. Wird diese geöffnet, z. B. durch das Auslösen eines Thermoklicks bei Übertemperatur, wird das Netzgerät abgeschaltet. Die Schleife wird mit der internen, potentialfreien Steuerspannung (24V bei 60mA) betrieben.

**2.3 Mathematische Vorbetrachtung****2.3.1 Temperatur– Zeitverhalten Extraktionsseptum**

Aus der Arbeit von Wolfgang Kluthe [4] geht hervor, daß sich das *theoretische* Temperatur– Zeitverhalten des Septums wie folgt darstellt. Dazu werden folgende Vereinbarungen getroffen:

- *Konstanter Strom.* Am Septumsmagneten wird ein konstantes Magnetfeld mit hoher Stabilität gewünscht. Somit ist der Betrieb an einem stromgeregelten Netzgerät zwingend.

- *Keinerlei Wärmeableitung während des Aufheizens.* Da die betrachteten Zeiträume im Vergleich zu den thermischen Zeitkonstanten klein sind, ist diese Vereinbarung zulässig.
- *Abrupte Unterbrechung der Kühlung.* Ein Nachlaufen des Kühlwassers bleibt unberücksichtigt. Der hier verursachte Fehler liegt auf der sicheren Seite.
- *Spezifische Wärmekapazität und Temperaturkoeffizienten werden als Konstanten angesehen.* Diese Vereinfachung ist möglich, da sich diese Faktoren, in dem von uns betrachteten Temperaturbereich, nur unwesentlich ändern. Die Vereinfachung ist notwendig um eine Berechnung zu ermöglichen.

Da der Innenwiderstand einer Konstantstromquelle gegen  $\infty$  geht, wird die Zeitkonstante  $\tau = \frac{L}{R}$  gegen null gehen. Ein angeschlossener, induktiver Verbraucher zeigt dann rein ohmsches Verhalten. Die Verlustleistung bewirkt eine Erwärmung am ohmschen Wicklungswiderstand. Diese Erwärmung führt zur Vergrößerung des Widerstandes, was eine weitere Erhöhung der Verlustleistung zur Folge hat.

$$\Delta\vartheta = \frac{W}{C_{Cu} m_{Cu}} \quad \Delta\vartheta(t) = \frac{I^2 R_{(\Delta\vartheta)} t}{C_{Cu} m_{Cu}} \quad (2.1)$$

$$R_{(\Delta\vartheta)} = R_0(1 + \alpha \Delta\vartheta) \quad (2.2)$$

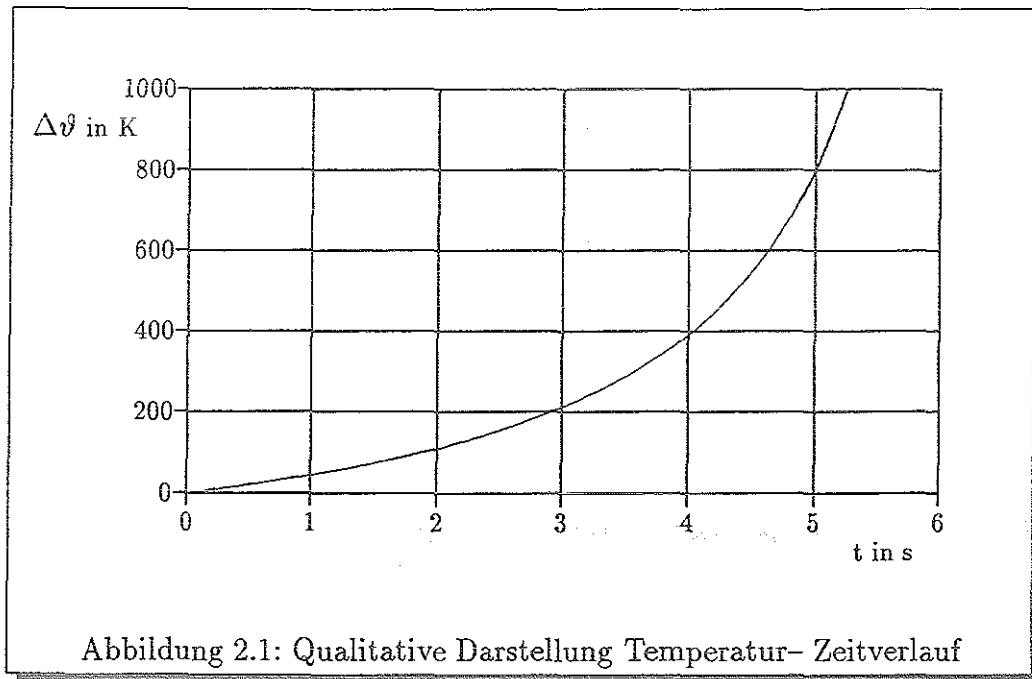
Setzt man Gleichung (2.2) in (2.1) ein, so ergibt sich für das Temperatur-Zeitverhalten:

$$\Delta\vartheta(t) = \frac{t}{\frac{C_{Cu} m_{Cu}}{I^2 R_0} - \alpha t} \quad (2.3)$$

Mit den Daten des Septums [3] ergibt sich folgender Verlauf

|           |     |         |                  |                                   |
|-----------|-----|---------|------------------|-----------------------------------|
| $\alpha$  | $=$ | 0,00396 | $\frac{1}{K}$    | Temperaturkoeffizient OFHC-Kupfer |
| $I = I_n$ | $=$ | 2750    | A                | Nennstrom                         |
| $m_{Cu}$  | $=$ | 6,684   | kg               | Masse Kupferspule                 |
| $C_{Cu}$  | $=$ | 389,00  | $\frac{J}{kg K}$ | Wärmekapazität OFHC-Kupfer        |
| $R_0$     | $=$ | 13,2    | m $\Omega$       | Anfangswiderstand                 |

Tabelle 2.3: Kennwerte Septum



Der in Abbildung (2.1) dargestellte, errechnete Temperaturverlauf läßt erkennen, daß bei Ausfall der Kühlung innerhalb kürzester Zeit eine Abschaltung des Netzgerätes erforderlich ist, da sonst der starke Temperaturanstieg die Spulen zerstören würde.

### 2.3.2 Empfindlichkeit des Systems

In der nachfolgenden Berechnung wird gezeigt, in welchem Bereich die Empfindlichkeit des Systems liegt.

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta\vartheta) \quad (2.4)$$

$$\Delta R = R_0 \alpha \Delta\vartheta \quad (2.5)$$

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial i} \Delta i \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial u} \Delta u \right| \quad (2.6)$$

Durch differenzieren von (2.6) und gleichsetzen mit (2.5) folgt:

$$R_0 \alpha \Delta\vartheta = \frac{R_0(1 + \alpha \Delta\vartheta)}{I} \Delta i + \frac{1}{I} \Delta u$$

Setzt man nun für einen 12-Bit AD-Wandler

$$\Delta u = \frac{U_{max}}{2^{12}} \quad \text{und} \quad \Delta i = \frac{I_n}{2^{12}} \quad \text{sowie} \quad R_{max} = \frac{U_{max}}{I_n}$$

und stellt nach  $\Delta\vartheta$  um, so erhält man auf  $I_n$  normiert

$$\Delta\vartheta = \frac{R_0 + R_{max}}{R_0 \alpha \left( 2^{12} \frac{I}{I_n} - 1 \right)}$$

Mit

$$R_{max} = R_0 \alpha \Delta\vartheta_{max} \quad \text{wird}$$

$$\Delta\vartheta = \frac{2 + \alpha \Delta\vartheta_{max}}{\alpha \left( 2^{12} \frac{I}{I_n} - 1 \right)} \quad (2.7)$$

$R_{max}$  ist der maximal meßbare Widerstand, der bei  $I_n$  und gewähltem  $U_{max}$  (Eingangsspannungsbereich AD-Wandler) möglich ist.

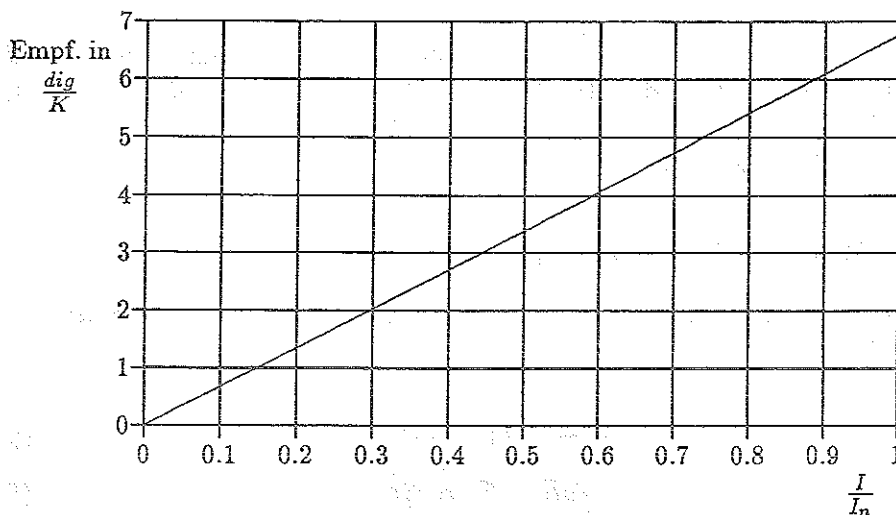


Abbildung 2.2: Temperaturempfindlichkeit in Abhängigkeit vom Strom

Wie aus der Abbildung (2.2) zu erkennen ist, nimmt die Auflösung des Meßsystems bei höheren Strömen zu. Bei einer geforderten Auflösung von mindestens  $1 \frac{K}{dig}$  ergibt sich ein Verhältnis  $\frac{I}{I_n}$  von 0,15. Bei einem maximalen Betriebsstrom des Septums von 2750 A entspricht dies einem Stromwert von 412,5 A. Es wird ein Meßbereichsanfang von 500 A gewählt, da bis zu diesem Bereich der Schutz durch Thermoklicks ausreichend ist.

### 2.3.3 Widerstand bei Gleichgewichtstemperatur

Die *konstante* Temperatur, die sich bei einer *konstanten*, zugeführten Leistung einstellt, bezeichnen wir als *Gleichgewichtstemperatur*.

Um den zulässigen Widerstand bei verschiedenen Strömen berechnen zu können, werden folgende Überlegungen gemacht:

Die Wärmemenge  $Q$  berechnet sich aus

$$Q = k A \Delta \vartheta \quad (2.8)$$

mit dem Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  und der Fläche des Wärmeübergangs  $A$ . Eine Gleichgewichtstemperatur stellt sich ein, wenn die abgeführte Wärmemenge  $Q$  gleich der zugeführten Leistung  $P$  ist. Mit Gleichung (2.8) und

$$P = U I = I^2 R \quad \text{folgt aus} \quad P = Q :$$

$$I^2 R = k A \left( \frac{R - R_0}{R_0 \alpha} \right)$$

Für den Widerstand ergibt sich dann:

$$R = \frac{R_0}{1 - I^2 \underbrace{\left( \frac{R_0 \alpha}{k A} \right)}_C}$$

Bei der Gleichgewichtstemperatur wird sich dieser Widerstand einstellen. Um eine Temperaturtoleranz zuzulassen, muß die Gleichung um eine Widerstandsänderung erweitert werden.

$$R = \frac{R_0}{1 - I^2 C} + \Delta R \quad (2.9)$$

Hierbei errechnet sich  $\Delta R$  aus Gleichung (2.5) mit  $\Delta \vartheta =$  zulässige Temperaturtoleranz.

Diese Überlegung berücksichtigt nicht, daß das Septum Wärme durch Wärmeleitung oder Konvektion an die Umgebung abgibt. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, daß sich das System adiabatisch verhält. Diese Vereinfachung ist zulässig, weil die Wärmeabfuhr durch Wärmeleitung und Konvektion, aufgrund des starken Kühlwasserdurchsatzes, vernachlässigbar klein ist.

## Kapitel 3

# Messung am Extraktionsseptum

### 3.1 Meßgeräte

#### 3.1.1 DCCT

Für Gleichstromversorgungsgeräte bei Teilchenbeschleunigern in Instituten für Kernforschung sind hohe Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen. Deswegen werden Nullflußstromwandler (DC Current Transformer) zur hochgenauen, galvanisch getrennten Messung von Gleich- und Wechselströmen eingesetzt.

#### Wirkungsweise des DCCT

Zur Strommessung, mit Hilfe von Meßwandlern, benutzt man das Prinzip des Gleichgewichts zwischen den Amperewindungen, die vom zu messenden Strom in der Primärwicklung und einem Vergleichsstrom in der Sekundärwicklung durchflossen werden. [5]

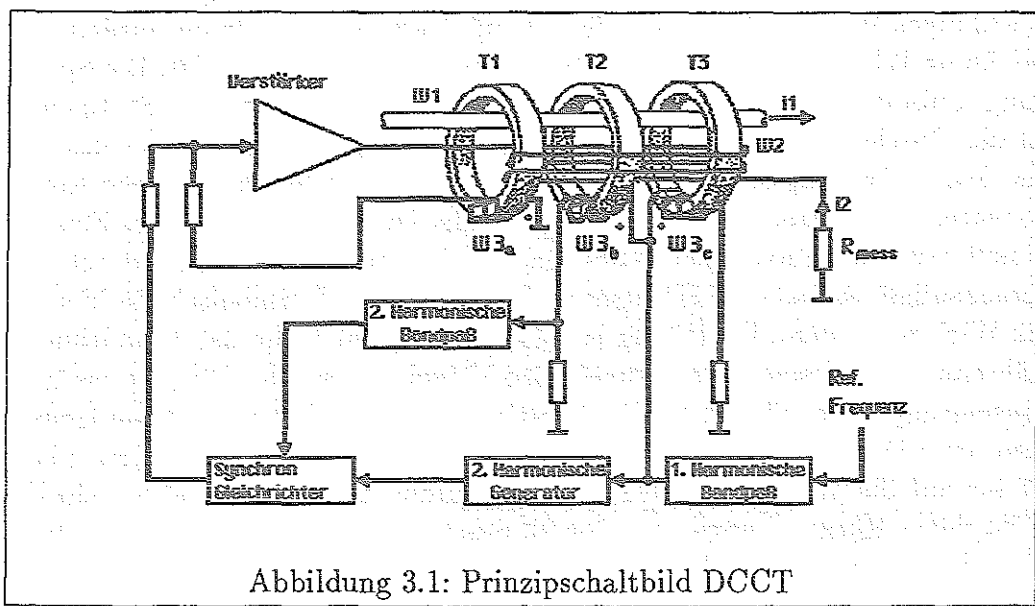


Abbildung 3.1: Prinzipschaltbild DCCT

Nullflußstromwandler bestehen aus mindestens einem ferromagnetischen Kern, der mit drei Wicklungen bewickelt wird, und zwar einer Primärwicklung (W1) für den Hauptstrom, einer Sekundärwicklung (W2) für den von einer externen Stromquelle erzeugten Kompensationsstrom und einer Indikatorwicklung (W3). Die Indikatorwicklung W3a ist mit den Eingangsklemmen eines Verstärkers mit hohem Verstärkungsfaktor verbunden. Der Ausgang dieses Verstärkers speist den hochgenauen Meßwiderstand ( $R_{mess}$ ) über die

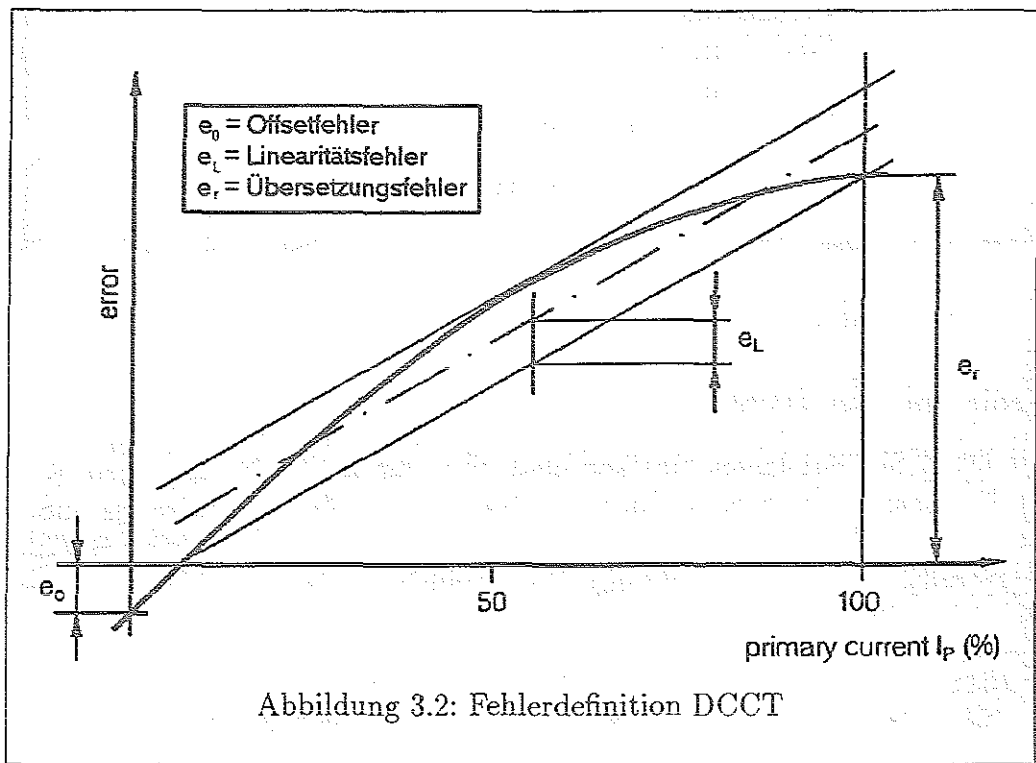
Sekundärwicklung W2. Durch jede Flußänderung im Kern, z. B. hervorgerufen durch Änderung des zu messenden Stroms in der Primärwicklung W1, wird in W3<sub>a</sub> eine Spannung induziert. Der Verstärker erzeugt in der Sekundärwicklung W2 einen dieser Spannung entsprechenden Strom, der so gepolt ist, daß er der Änderung des magnetischen Flusses entgegen wirkt. Wenn im Idealfall der Verstärkungsfaktor gegen unendlich geht und keine Störspannungen (Nullpunktdrift) vorhanden sind, wird in W3<sub>a</sub> keine Spannung induziert, was zu konstantem Fluß führt. In diesem Fall bildet der Sekundärstrom den Primärstrom perfekt ab. Dies gilt nicht nur für Wechselstrom, sondern auch für Gleichstrom.

In der Praxis haben Verstärker allerdings nur einen endlichen Verstärkungsfaktor und eine Nullpunktdrift. Ein gewisser Ausgangsstrom des Verstärkers verlangt dann eine Spannung  $\neq$  null am Verstärkereingang. Daher müßte dauernd eine Spannung in W3<sub>a</sub> induziert werden, um das benötigte Feldgleichgewicht aufrecht zu erhalten, wodurch der Fluß zunehmen würde, was den Kern in die Sättigung treibt. Um diesen Nachteil zu kompensieren, wird ein zweiter Kern (T2) mit einer zusätzlichen Wicklung (W3<sub>b</sub>) benutzt. Die Wicklungen W1 und W2 werden über beide Kerne geführt. In die zusätzliche Wicklung W3<sub>b</sub> wird eine sinusförmige Referenzspannung gespeist. Die Spannung treibt den Kern T2 abwechselnd in die positive und negative Sättigung. Ist der Durchschnittswert des Flusses aus  $I_1$  und  $I_2 = \text{null}$ , bedeutet das für den Magnetisierungsstrom in W3<sub>b</sub>, daß er nur ungerade, harmonische Komponenten der Referenzfrequenz enthält. Ist der Durchschnittswert des Flusses  $\neq$  null, tritt eine Unsymmetrie des Magnetisierungsstroms auf, die durch die geradzahlgigen Anteile der Frequenz meßbar ist. Die 2. Harmonische ist hierbei die Wichtigste, denn ihr Betrag ist proportional zur Höhe der Abweichung, während ihre Phasenlage das zugehörige Vorzeichen angibt. Durch geeignete Einspeisung dieses Signals in den Verstärker, der den Sekundärstrom treibt, kann eine Drift des Verstärkers kompensiert werden. Der dritte Kern (T3) ist bis auf die Wicklungsrichtung der Wicklung W3<sub>c</sub> mit T2 identisch. Er dient dazu, Rückwirkungen auf den Hauptstrom, die durch die Einspeisung der Referenzspannung entstehen, auszugleichen.

## Technische Daten Földi-DCCT PCT 30-10

|                               |        |                                     |
|-------------------------------|--------|-------------------------------------|
| Meßbereich:                   | 0-3000 | A                                   |
| Ausgangsspannung:             | 0-10   | V                                   |
| max. Ausgangsstrom:           | 5      | mA                                  |
| Linearitätsfehler $e_L$ :     | 10     | $\frac{\text{ppm}}{\text{FS}}$      |
| Rauschen effektiv (0-10 kHz): | 10     | $\frac{\text{ppm}}{\text{FS}}$      |
| Nullpunktfehler $e_0$ :       |        |                                     |
| - durch Versorgungsspannung   | 0,3    | $\frac{\text{ppm}}{\%}$             |
| - durch Temperaturänderung    | 1,5    | $\frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}}$ |
| - bei Lieferung               | 10     | $\frac{\text{ppm}}{\text{FS}}$      |
| - Verhältnis $e_r$            | 10     | $\frac{\text{ppm}}{\text{FS}}$      |
| Bandbreite (3dB):             | 30     | kHz                                 |
| Anstiegszeit:                 | 20     | $\frac{\text{V}}{\text{ms}}$        |
| Langzeitstabilität (500h)     | 5      | $\frac{\text{ppm}}{\text{FS}}$      |

Tabelle 3.1: Technische Daten PCT 30-10



Weitere Daten können dem Datenblatt [6] entnommen werden. Für unsere Messung wird der oben beschriebene DCCT der Fa. Földi, der zur Regelung des Netzgerätes dient, benutzt. Es bietet sich daher an, einen freien Ausgang des DCCT auch für das Überwachungssystem zu nutzen. Die Ausgangsspannung kann ebenfalls direkt am Bedienpanel des Földi-Netzgerätes abgegriffen werden.

### 3.1.2 Schlumberger Systemvoltmeter SI 7061

Sämtliche Messungen werden auf Spannungsmessungen zurückgeführt und mit dem integrierenden Digitalvoltmeter SI 7061 der Fa. Schlumberger durchgeführt. Das SI 7061 ist vollständig über die eingebaute IEEE-488-Schnittstelle bedien- und programmierbar. Weiterhin verfügt das Gerät über einen Meßwertspeicher, in dem bis zu 8000 Meßwerte zwischengespeichert werden können.

| Meßbereiche:     |                                 |    |
|------------------|---------------------------------|----|
| Gleichspannung:  | 0,2–1000                        | V  |
| Wechselspannung: | 0,2–750                         | V  |
| Gleichstrom:     | 2000                            | mA |
| Wechselstrom:    | 2000                            | mA |
| Widerstand:      | 0,2 k $\Omega$ –1000 M $\Omega$ |    |
| Integrationszeit | 0,67–8000                       | ms |

Tabelle 3.2: Technische Daten DVM SI-7061

Weitere Daten sind der Bedienungsanleitung [11] zu entnehmen.

#### Bedienung der DVM

Die DVM SI-7061 lassen sich komplett über den IEEE-Bus bedienen. Alle am Frontpanel verfügbaren Einrichtungen sind ebenfalls über Programmbeefehle zu erreichen. Im nachfolgenden Beispiel werden einige wichtige Befehle vorgestellt, die zur Initialisierung und Konfigurierung der DVM vor jeder Meßreihe dienen.

|            |                                |
|------------|--------------------------------|
| INIT       | Initialisiert das DVM          |
| CANCEL ALL | Schaltet die Programmwahl ab   |
| TRACK OFF  | Stoppt Wiederholungsmessungen  |
| DRIFT OFF  | Schaltet die Driftkorrektur ab |

|                      |                                            |
|----------------------|--------------------------------------------|
| Drift NOW            | Führt <i>einzelne</i> Driftkorrektur aus   |
| MODE VDC             | Betriebsart Gleichspannung                 |
| Filter ON            | Schaltet das Filter ein                    |
| EXTrig EDGE NEGATIVE | Externe Triggerung auf negative Flanke     |
| DIGits 5             | Gibt die Anzahl der Zahlenstellen an       |
| ONTRigger SAMPLE=1   | Triggersignal löst <i>eine</i> Messung aus |
| RANge 100            | Meßbereichswahl bis 200 V                  |
| RANge FIXED          | Schaltet autom. Meßbereichsumschaltung aus |
| DISPlay Off          | Schaltet das Display ab                    |

Um die Programmierung zu verkürzen, werden nur die großgeschriebenen Befehlssteile benötigt.

### 3.1.3 Temperaturmeßgerät MAWI

Das Temperaturmeßgerät arbeitet mit einem externen Thermoelement. Neben der optischen LCD-Anzeige kann die Temperatur auch als Spannungswert an einem Analogausgang abgegriffen werden. Die Temperatur wird mit dem stabförmigen Meßfühler jeweils am Kühlwasserrücklauf der Spulen gemessen.

|                |                           |                 |
|----------------|---------------------------|-----------------|
| Meßbereich:    | 50-1200                   | °C              |
| Genauigkeit:   | ±0,2% des Meßwertes       |                 |
| Analogausgang: | 1                         | $\frac{mV}{°C}$ |
| Ansprechzeit   | 2 s für 99% des Meßwertes |                 |

Tabelle 3.3: Technische Daten Temperaturmeßgerät

Die technischen Daten sind der Kluthe-Diplomarbeit [4] entnommen.

### 3.1.4 Funktionsgenerator HP 8116A

Der Funktionsgenerator HP 8116 arbeitet mit einem Frequenzbereich von 1 mHz bis 50 MHz [12]. Er wird zur Synchronisation der DVM genutzt. Als Triggersignal dient die abfallende Flanke des Rechteckimpulses mit TTL-Pegel und einer Impulsdauer von 500  $\mu$ s. Das Gerät wird ebenfalls über eine eingebaute IEEE-488-Schnittstelle angesteuert.

### 3.1.5 Oszilloskop Gould 1604

Zur Aufnahme von schnellen dynamischen Vorgängen kommt ein 4-Kanal-Speicheroszilloskop der Fa. Gould zum Einsatz. Das Gerät arbeitet mit 20 MSamples pro Sekunde. Desweiteren stehen 4 Differenzeingänge zur Verfügung. Zum Ausdruck der Oszillogramme besitzt das Gerät einen eingebauten 4-Farb-Plotter. Das Oszilloskop wird nicht zur Präzisionsmessung verwendet sondern nur zur Darstellung des zeitlichen Verhaltens der Signale. Der Meßfehler beträgt  $\pm 2\%$  vom Endwert ohne Meßwertspeicherung und  $\pm 3\%$  vom Endwert mit Meßwertspeicherung.

### 3.1.6 UNIX-Workstation

Für die Messung am Extraktionsseptum erfolgt die Ansteuerung der Meßgeräte über den UNIX-Server *ceylon* (HP 300), der über eine IEEE-488-Schnittstelle verfügt und sich im Netzgeräte Raum 1 befindet. Der Server *ceylon* wird über ein LAN mit der in der COSY-Warte befindlichen Workstation *lucy* (HP 700) bedient. Weiterhin dienen die Workstations zur Protokollierung und Auswertung der Messungen.

### 3.1.7 HP VEE

Mit dem Visual Engineering Environment der Fa. Hewlett Packard steht uns ein hervorragendes Programm zur Meßwerterfassung- und -verarbeitung zur Verfügung. Das Programm läuft auf einer HP-UNIX-Workstation mit einem X-Window-Aufsatz (X-11). Die HP VEE Serie besteht im Wesentlichen aus zwei Applikationen:

- *HP VEE-Engine* zur Auswertung und Anzeige von Meßdaten aus einem File oder aus Benutzereingaben und zur mathematischen Verknüpfung.
- *HP VEE-Test* beinhaltet alle Möglichkeiten von HP VEE-Engine und ermöglicht zusätzlich eine *visuelle* Kommunikation zwischen den verschiedenen Meßgeräten und Power-Supplies.

Die grundlegende Basis von VEE bilden sogenannte *Models*. Models sind eine Möglichkeit ingenieurstechnische Probleme zu lösen. Die Darstellung kommt Blockdiagrammen sehr nahe. Mit VEE werden grafische Objekte, welche z. B. Meßgeräte, Augabedateien- und Geräte, Formeln, Start- und Stopbutton etc. darstellen, über Linien miteinander verknüpft. Diese Models können beliebig manipuliert und erweitert werden ohne eine Programmzeile schreiben zu müssen, wodurch viel Zeit gespart werden kann[9].

Zur Verbindung von VEE und den zu bedienenden Geräten werden IEEE-488-Schnittstellen benutzt, welche sowohl an den Meßgeräten als auch an den Netzgeräten zur Verfügung stehen. Eine Ausnahme stellt das Földi-Netzgerät dar, welches über ein VME-Crate, das mit dem LAN verbunden ist, angesteuert werden kann. Die Ansteuerung erfolgt aus VEE über Telnet. Dies ermöglicht eine komplette *Fernsteuerung* der Geräte per Rechner.

Die DVM müssen vor der eigentlichen Messung erst initialisiert und konfiguriert werden. Dafür wird für jedes Gerät eine Datei erstellt, in der die entsprechenden Programmbefehle, laut DVM-Handbuch, als Strings abgelegt werden. Diese DVM-Dateien werden mit einem Start-Button verbunden, welcher nach Betätigung mit der Maus die Programmbefehle an die Meßgeräte schickt.

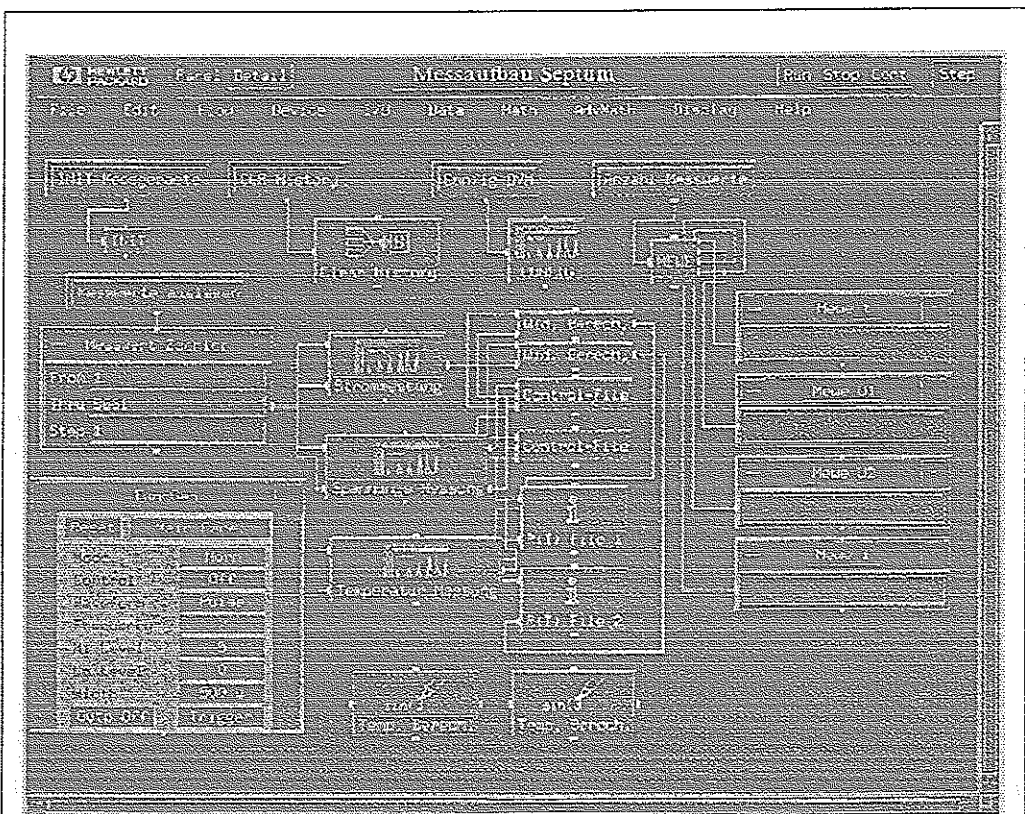


Abbildung 3.3: Beispiel VEE-Oberfläche

HP stellt für einige haus eigene Meßgeräte teilweise schon fertige Gerätetreiber zur Verfügung, so daß beispielsweise eine Programmierung des HP-Funktionsgenerators nicht nötig ist.

Während oder nach erfolgter Messung können die in den Speichern der Meßgeräte befindlichen Meßwerte ausgelesen werden. Die Möglichkeiten der Ausgabe sind hierbei sehr vielfältig. Es stehen beispielsweise numerische Anzeigen, Zeigerinstrumente, X-Y-Plots, ASCII-Dateien uvm. zur Verfügung. Desweiteren besteht die Möglichkeit, die Meßwerte mathematisch miteinander zu verknüpfen.

Die kompletten Features von VEE aufzuzeigen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

## 3.2 Fehlerbetrachtung

Bei den Strom-, Spannungs- und Temperaturmessungen sind folgende Fehlerarten zu betrachten:

### • Systematische Meßfehler

- Der Innenwiderstand der DVM liegt parallel zum Widerstand des Meßobjektes.
  - \* Bei der Spannungsmessung am Septum ist dieser Fehler vernachlässigbar, da der Innenwiderstand des DVM mit  $10\text{ M}\Omega$  sehr viel größer als der Spulenwiderstand ( $< 17\text{ m}\Omega$ ) ist.
  - \* Bei der Strommessung mit Hilfe des DCCT kann der Fehler, der durch die Parallelschaltung des DVM mit dem Meßsignalausgang des DCCT entsteht, vernachlässigt werden. Dieser Ausgang wird durch einen Operationsverstärker getrieben, dessen Ausgangswiderstand sehr klein ist und das DVM im  $20\text{ V}$ -Meßbereich einen Innenwiderstand von  $> 10\text{ G}\Omega$  besitzt.
  - \* Bei der Parallelschaltung von DVM und dem Temperaturmeßgerät liegen die Verhältnisse ähnlich wie bei der Strommessung.
- Ein Fehler durch das Einbringen der DCCT-Hauptwicklung in den Meßkreis tritt nicht auf, da der DCCT, bedingt durch sein Meßverfahren, dem zu messenden Strom keine Energie entnimmt.
- Die Temperaturen können aus baulichen Gründen nicht im Spuleninneren gemessen werden, so daß nur die Temperatur am Kühlwasserrücklauf gemessen wird. Diese Temperatur entspricht im Wesentlichen der durchschnittlichen Wicklungstemperatur, wobei

Abweichungen durch Konvektion und Wärmeübergangsverluste in Kauf genommen werden, da die Temperatur nur als grober Richtwert benutzt wird und in die späteren Betrachtungen nicht einfließt.

• Zufällige Meßfehler

- Ablesefehler treten bei einer rechnergestützten Meßwerterfassung nicht auf. Zur Ermittlung der möglichen Fehler, die durch nicht erfaßbare Änderungen der Meßgeräte oder der Umwelt hervorgerufen werden konnten, werden die von den Herstellern angegebenen garantierten Fehlergrenzen herangezogen.

### 3.2.1 Fehler der Spannungsmessung

| Nennbereich<br>in V | Stabilität<br>24h in ppm<br>der Anzeige | Fehlergrenzen<br>90d in ppm<br>der Anzeige | Fehlergrenzen<br>1y in ppm<br>der Anzeige |
|---------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 0,2                 | $\pm 7 + 5dig $                         | $\pm 20 + 5dig $                           | $\pm 30 + 5dig $                          |
| 20                  | $\pm 5 + 2dig $                         | $\pm 15 + 2dig $                           | $\pm 25 + 2dig $                          |
| 200                 | $\pm 8 + 2dig $                         | $\pm 25 + 2dig $                           | $\pm 35 + 2dig $                          |

Tabelle 3.4: Gleichspannungsfehlergrenzen DVM SI 7061

Im Nachfolgenden werden für die DVM beispielhaft einige Fehler berechnet. Alle DVM werden auf 51/2-stellige Anzeige konfiguriert.

• *Temperaturmeßgerät*  $\Rightarrow$  DVM Meßbereich: 0,2 V.

- Für 100 mV beträgt der absolute Fehler 5,7  $\mu$ V.
- Für 100 mV beträgt der relative Fehler 57 ppm.

• *DCCT*  $\Rightarrow$  DVM Meßbereich: 20 V.

- Für 10 V beträgt der absolute Fehler 250  $\mu$ V.
- Für 10 V beträgt der relative Fehler 25 ppm.

• *Spannungsmessung am Septum* Meßbereich: 200 V.

- Für 200 V beträgt der absolute Fehler 2,4 mV.
- Für 200 V beträgt der relative Fehler 48 ppm.

### 3.2.2 Fehler der Strommessung

Der Fehler bei der Strommessung setzt sich aus DVM-Fehler + DCCT-Fehler zusammen. Um die wahrscheinliche Gesamtfehlergrenze dieser Meßkette zu ermitteln, werden die Einzelfehler geometrisch addiert.

$$F = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}$$

Für zwei Meßkettenglieder ergibt sich dann

$$F = \sqrt{(\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2)}$$

Aus Tabelle (3.1, S. 23) ergibt sich für den DCCT ein Gesamtfehler von 45 ppm für den Meßbereichsendwert. Die sich aus diesem und den DVM-Fehlern errechneten, relativen Fehler sind für verschiedene Stromwerte in der folgenden Tabelle aufgeführt.

| Meßstrom<br>in A | relativer Fehler<br>DCCT in ppm | relativer Fehler<br>DVM in ppm |
|------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 500              | ±270                            | ±125                           |
| 1000             | ±135                            | ±65                            |
| 1500             | ±90                             | ±45                            |
| 2000             | ±67,5                           | ±35                            |
| 2500             | ±54                             | ±29                            |
| 2800             | ±48,2                           | ±26                            |

Tabelle 3.5: Relative Fehler DCCT - DVM

Daraus ergeben sich folgende Gesamtfehler:

| Meßstrom<br>in A | relativer Gesamtfehler<br>in ppm | absoluter Gesamtfehler<br>in mA |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 500              | $\pm 297,53$                     | $\pm 148,77$                    |
| 1000             | $\pm 149,8$                      | $\pm 149,8$                     |
| 1500             | $\pm 100,62$                     | $\pm 150,93$                    |
| 2000             | $\pm 76,03$                      | $\pm 152,06$                    |
| 2500             | $\pm 61,29$                      | $\pm 153,23$                    |
| 2800             | $\pm 54,77$                      | $\pm 153,36$                    |

Tabelle 3.6: Gesamtfehler Strommessung

### 3.2.3 Temperaturmeßgerät

Da die Werte der Digitalanzeige und des Analogausganges stark differieren, kann nicht davon ausgegangen werden, daß die angegebenen Fehlergrenzen auch für diesen Ausgang Gültigkeit haben. Daher wird eine Fehlerberechnung nicht durchgeführt.

Die Temperaturmeßwerte werden auch zu keiner genauen Berechnung herangezogen sondern sollen nur einen groben Überblick über den Temperaturbereich geben.

### 3.2.4 Abschließende Fehlerbetrachtung

Bei Benutzung eines 12-Bit AD-Wandlers ergibt sich für den Spannungsbe-  
reich an einer Septumsspule von 0-50 V eine Auflösung von  $12,2 \frac{mV}{digit}$ . Für  
den Strombereich von 0-2800 A liegt die Auflösung bei  $683,6 \frac{mA}{digit}$ . Da die  
berechneten Fehlergrenzen bei der Spannungsmessung mit 2% und bei der  
Strommessung mit 22% der Auflösung eines 12-Bit AD-Wandler liegen, wer-  
den sie bei der weiteren Berechnung vernachlässigt.

### 3.3 Durchführung und Auswertung der Messung

Um die Kennlinien der beiden Septumsmagneten in Abhängigkeit vom Strom zu ermitteln, sind Messungen direkt am Extraktionsseptum erforderlich. Die Messungen werden benötigt, um das Temperaturüberwachungssystem zu dimensionieren (z. B. Auflösung der ADC's, Anpassung der Eingangssignale). Dazu werden die Septumsspannungen, der Septumsstrom und die Kühlwasserrücklaufftemperatur aufgenommen. Zusätzlich werden zu jeder Messung die Vorlauftemperatur und der Kühlwasserdruck festgehalten.

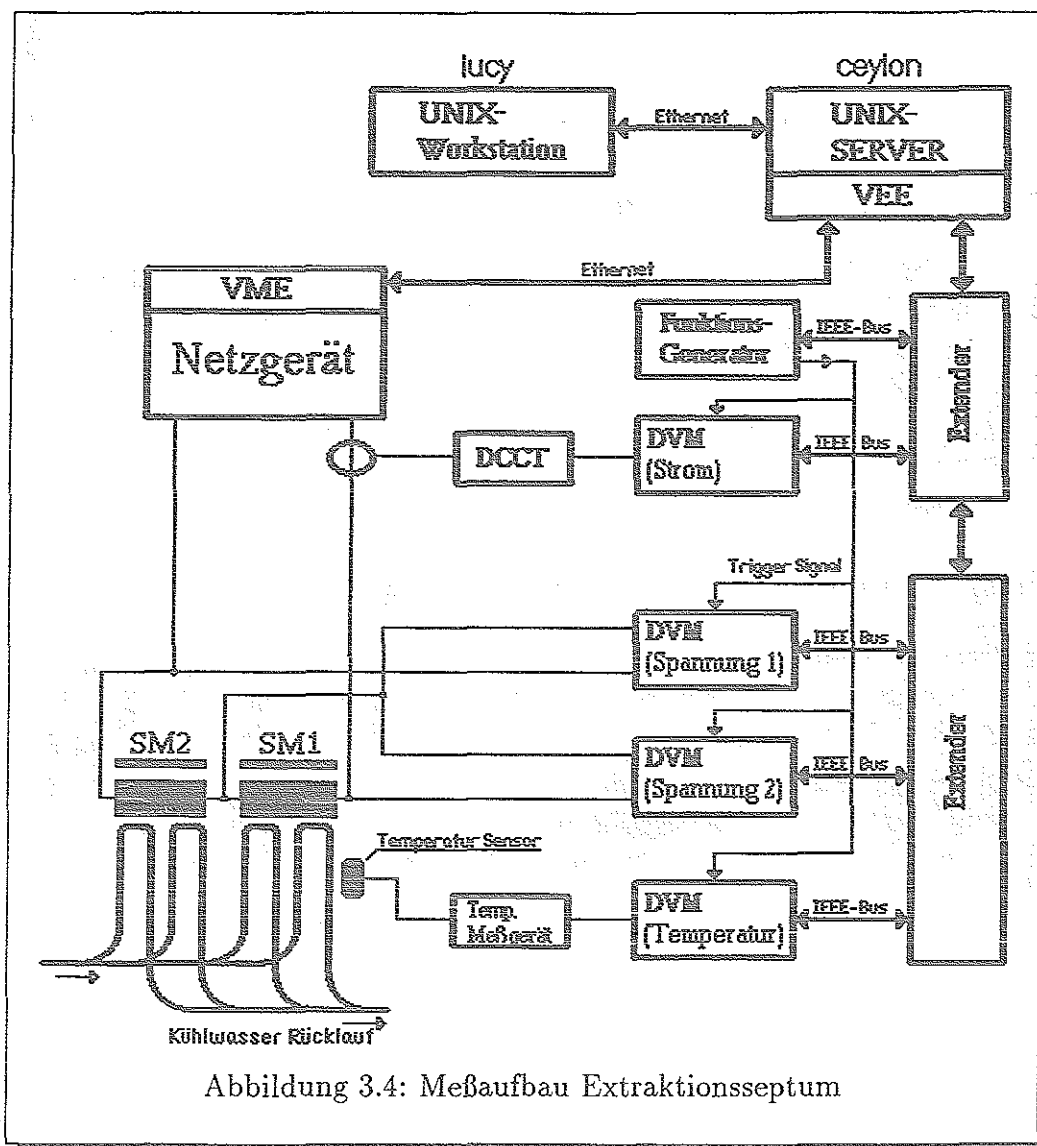


Abbildung 3.4: Meßaufbau Extraktionsseptum

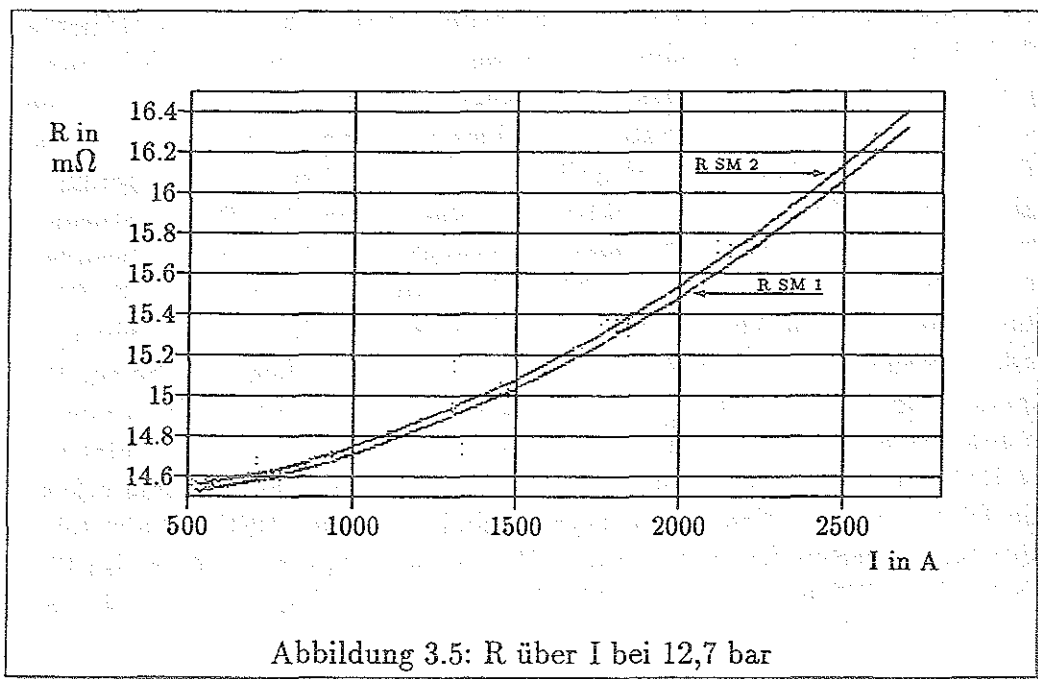
### 3.3.1 Meßaufbau Extraktionsseptum

Aufgrund der räumlichen Trennung zwischen Netzgerät (Netzgeräteraum 1) und Extraktionsseptum (COSY-Ring) ist es erforderlich, auch die Meßgeräte räumlich voneinander zu trennen, um die Meßleitungen möglichst kurz zu halten, und somit Einstreuungen zu verringern. Zu diesem Zweck wird das Stromsignal aus dem DCCT des Földi-Netzgerätes direkt von der Bedientafel abgenommen. Die Spannungssignale werden jeweils über ein DVM direkt an den Septumsspulen gemessen. Die Meßleitungen zur Spannungsmessung wurden von uns selbst hergestellt. Die Leitungen sind engverdrillt, um bei den kritischen Spannungssignalen die induzierten Störspannungen gering zu halten. Weiterhin wird die Rücklauftemperatur über das Temperaturmeßgerät in eine der Rücklauftemperatur proportionale Spannung gewandelt, die ebenfalls von einem DVM im COSY-Ring aufgenommen wird. Alle DVM werden mit dem Funktionsgenerator, welcher sich im Netzgeräteraum 1 befindet, getriggert. Die Triggerung der DVM ist erforderlich, um die zur Widerstandsberechnung nötige zeitliche Zuordnung von Strom und Spannungen zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird ein Hardwaretrigger benutzt und die DVM so konfiguriert, daß zu jedem Triggersignal eine Messung erfolgt. Die DVM und der Funktionsgenerator sind über die IEEE-Schnittstellen miteinander verbunden und von der Workstation *ceylon* aus über das Programm HP-VEE bedienbar. Die Meßdaten werden in den internen Speichern der DVM zwischengespeichert und ebenfalls über HP-VEE nach Beendigung der Meßreihe ausgelesen. Da mit dem parallelen IEEE-Datenbus nur relativ kurze Entfernungen überbrückt werden können, ist es nötig, die Geräte im Netzgeräteraum und im COSY-Ring (Entfernung  $\approx 80$  m) über Extender (IEEE-Treiber) miteinander zu verbinden.

### 3.3.2 Meßergebnisse

Um das Temperatur- bzw. Widerstandsverhalten in Abhängigkeit vom eingepprägten Strom zu erhalten, wird das Septum von 300 A bis 2690 A gefahren. Dazu wird der Stromwert ca. alle 21 Sekunden um ca. 18 A erhöht. Der Zeitraum ist so gewählt, damit sich in den Magnetwicklungen eine konstante Temperatur (Gleichgewichtstemperatur) einstellen kann. Die Meßfrequenz beträgt 2 Messungen pro Sekunde mit einer Auflösung von 5 Digits. Zudem ist das digitale Filter der DVM eingeschaltet, um den Rauschabstand zu erhöhen, indem die Integrationszeit von 20 ms auf 80 ms verlängert wird. Es werden mehrere Meßreihen mit verschiedenen Kühlwasserdrücken durchgeführt. Die Vorlauftemperatur ist geregelt und beträgt bei allen Messungen  $21,4^{\circ}\text{C}$ . Pro Meßreihe ergeben sich annähernd 6000 Meßwerte pro Meßgerät.

Die Bearbeitung der Meßwerte erfolgt mit den im UNIX-System enthaltenen Programmen `join`, `sort` und `awk`. Die Darstellung der Meßreihen erfolgt mit dem Plotprogramm `gnuplot` in der PC-Version 3. 5. Die Daten wurden zur Einbindung in diese Arbeit per Mail über das Internet an unsere PC's übertragen.



Die Abbildung (3.5) zeigt das Widerstandsverhalten beider Septumsmagneten bei einem Kühlwasserdruck von 12,7 bar im Vorlauf. Man erkennt eine Erhöhung des Widerstandes im  $m\Omega$ -Bereich bei zunehmender Stromstärke.

Das Verhalten des Widerstandes eines Septumsmagneten (hier SM 1) bei unterschiedlichen Vorlaufdrücken ist in Abbildung (3.6) zu sehen. Dieses zeigt, daß der Druck die Temperatur der Septumsmagnete erheblich beeinflusst, so daß er in der Gesamtbetrachtung nicht vernachlässigt werden darf. Abbildung (3.7) zeigt das Widerstands- Temperaturverhalten von Septumsmagnet 1. Man erkennt, daß der Zusammenhang zwischen Widerstand und Wicklungstemperatur annähernd linear ist, wodurch gezeigt ist, daß eine Widerstandsänderung *direkt* auf eine Temperaturänderung zurückgeführt werden kann.

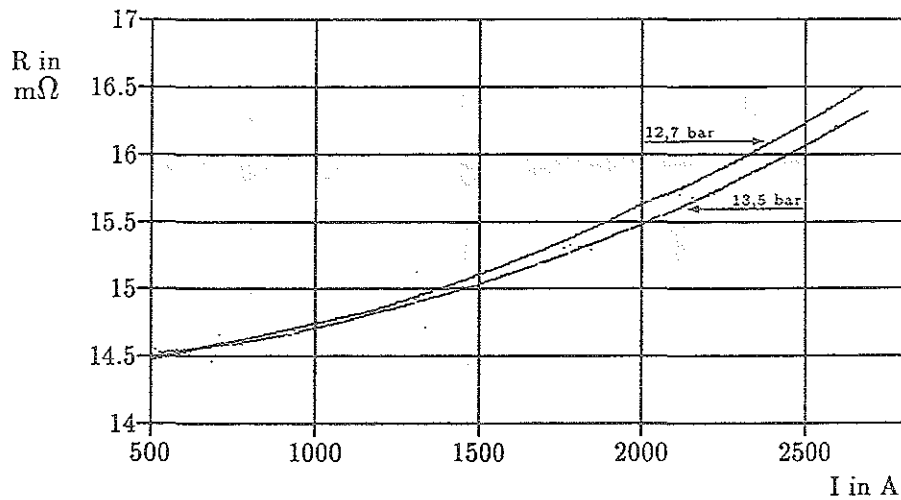
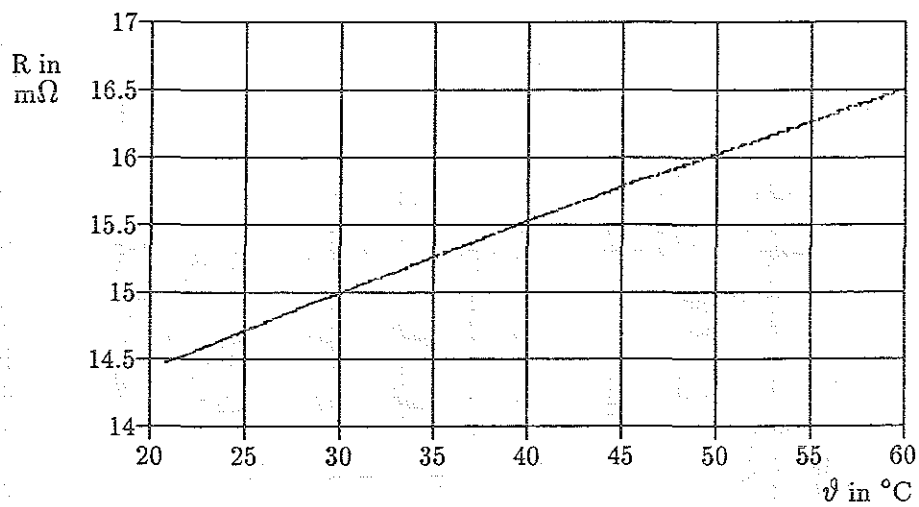


Abbildung 3.6: R über I bei unterschiedlichen Vorlaufdrücken

Abbildung 3.7: R über  $\theta$

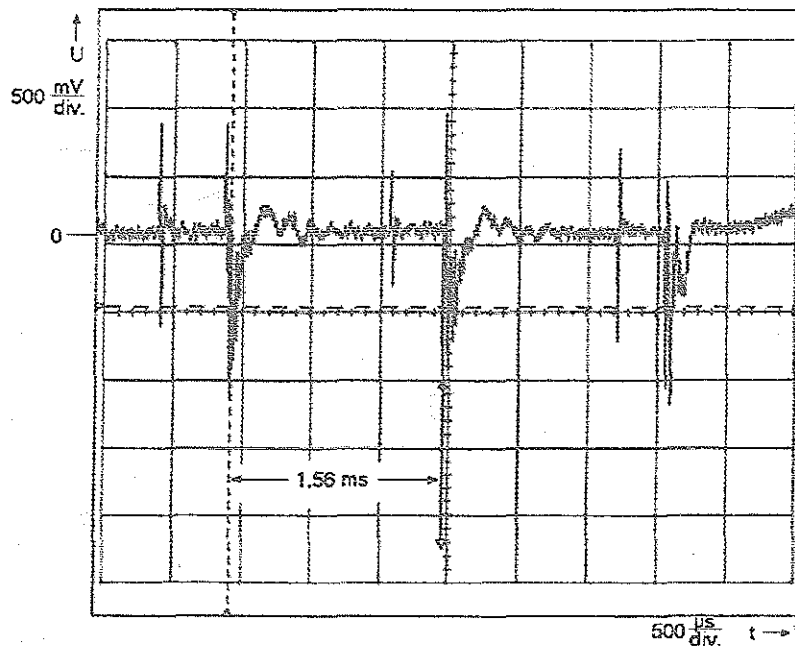


Abbildung 3.8: Spannung am Septum ohne Filterung

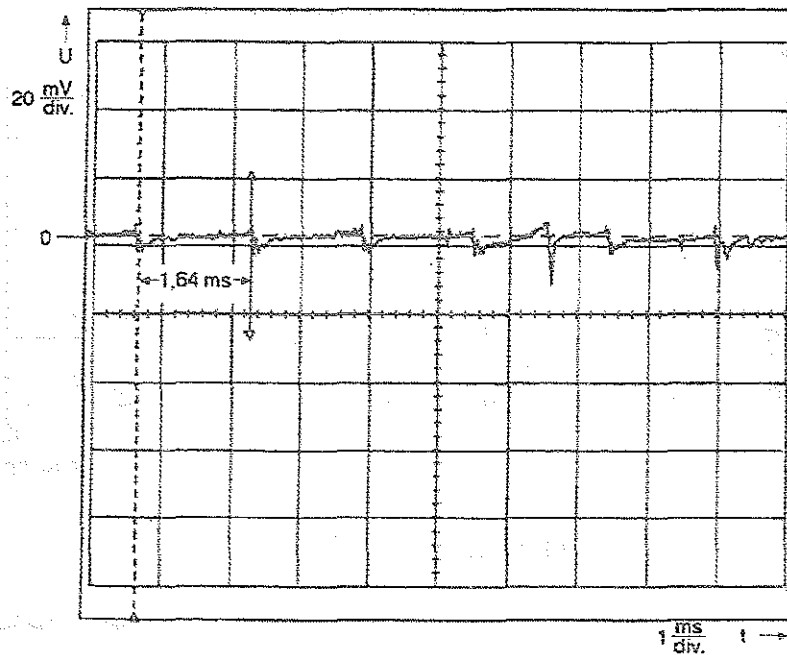


Abbildung 3.9: Spannung am Septum mit 1 kHz-Tiefpaß

Die beiden Oszillogramme (S. 36) zeigen die Spannung am Septumsmagnet 1 bei 500 A. Deutlich sind die Impulse der 12-pulsigen-Thyristorbrücke des Földi-Netzgerätes zu erkennen. Die Impulse treten alle  $1,6$  ms auf. Abbildung (3.9) zeigt, daß diese *Störimpulse* bereits durch die Vorschaltung eines 1 kHz-Tiefpasses von ca.  $2 V_{SS}$  auf ca.  $20 mV_{SS}$  gedämpft werden können. Die Messungen werden im AC-Modus des Oszilloskop durchgeführt, um den hohen Gleichanteil des Meßsignals zu unterdrücken. Ähnliche Störimpulse können auch auf dem Stromsignal des DCCT gemessen werden.

Aufgrund der Spuleninduktivität von  $L=0,61$  mH [7] kann die von uns *festgestellte* Stromänderungsgeschwindigkeit nicht erreicht werden, da sich mit  $u_L = L \frac{di}{dt}$  und einer maximalen Spannung von 96 V der Strom in diesen Zeitmaßstäben nicht so stark ändern kann. Wir vermuten, daß es sich bei diesen Impulsen um Einstreuungen handelt.

Desweiteren werden Hochfahr- und Abschaltzeit des Netzgerätes ermittelt. Dazu wird das Netzgerät von 0 auf 2670 A hochgefahren. Zur Messung ist das Oszilloskop am DCCT-Ausgang der Bedientafel des Földi-Netzgerätes angeschlossen. Die Ansteuerung des Netzgerätes erfolgt manuell.

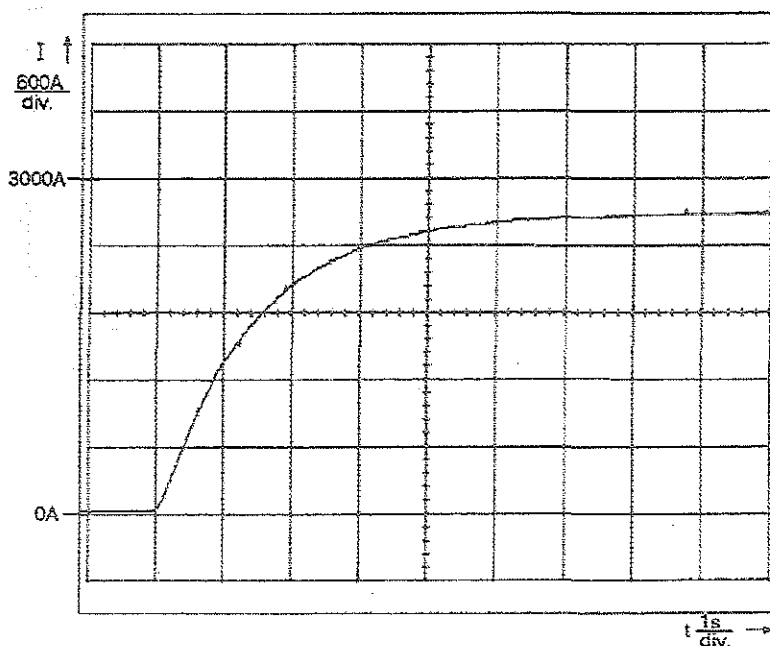
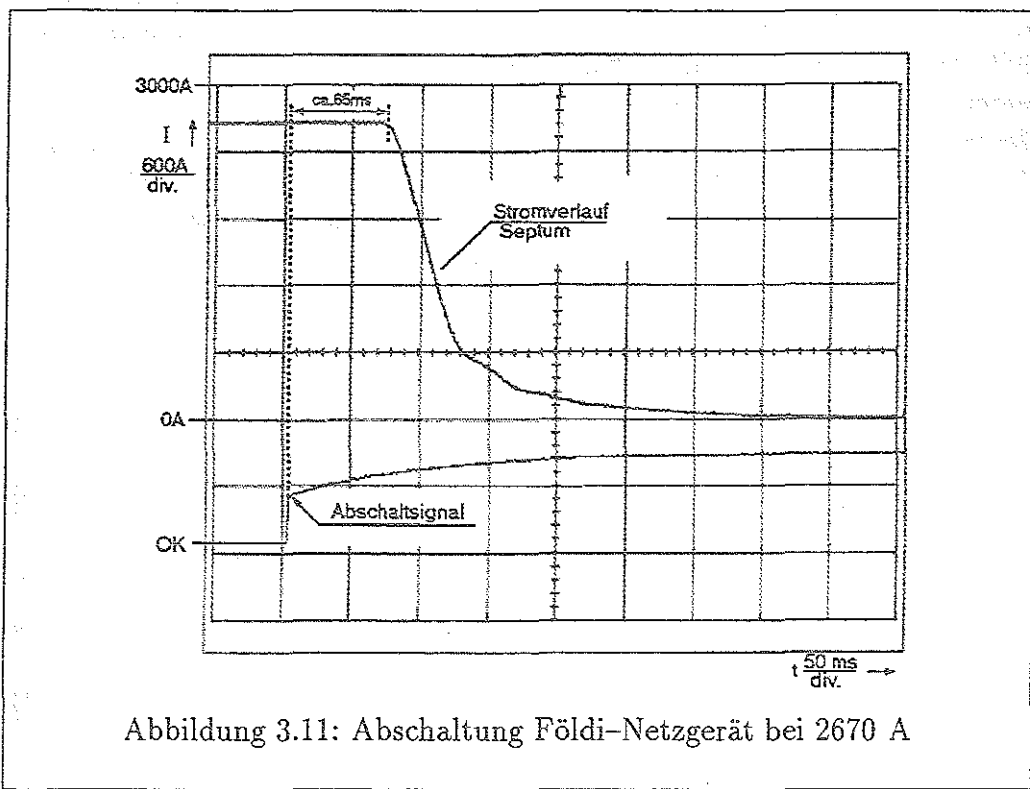


Abbildung 3.10: Hochfahren Földi-Netzgerät von 0-2670 A

Die Zeitdauer bis zum Erreichen des eingestellten Nennstromes beträgt ca. 10 s, da die Sollwertvorgabe durch einen Tiefpaßfilter ( $5 \times \tau = 10s$ )

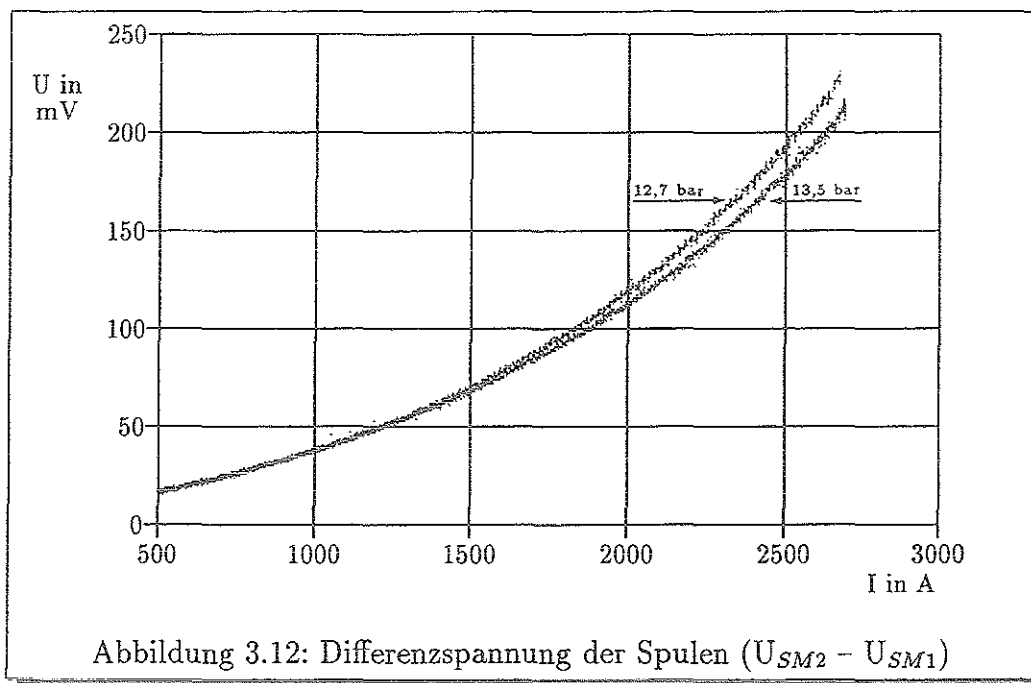
verzögert wird (3.10).

Um den Zeitraum vom Abschaltsignal durch die Interlockschleife bis zum Abschalten des Netzgerätes zu ermitteln wird die elektrische Versorgung der Durchflußwächter unterbrochen. Das dadurch erzeugte Abschaltsignal kann im Netzgerät abgegriffen werden. Wie in der Abbildung (3.11) zu erkennen ist, beträgt die Zeit bis das Netzgerät auf das Abschaltsignal reagiert ca. 65 ms. Diese Verzögerung ist auf hauptsächlich auf Relaisschaltzeiten zurückzuführen. Die obere Kurve zeigt den Freilauf des Septums während der Abschaltphase.



### 3.3.3 Abschließende Betrachtung der Messung

Die Messung zeigt, daß eine Änderung des Kühlwasservorlaufdruckes nicht unberücksichtigt bleiben darf. Aus diesem Grund erfolgt eine Auswertung der Differenzspannung zwischen den beiden Septumsmagneten bei unterschiedlichen Vorlaufdrücken.



In Abbildung (3.12) erkennt man, daß die Abhängigkeit der Differenzspannung vom Vorlaufdruck des Kühlwassers gering ist. Ein Druckunterschied von 0,8 bar bewirkt eine maximale Abweichung der Spannungsdifferenzkurven von 20 mV bei einem Betriebsstrom von 2674 A. Bei einem Temperaturunterschied von 1 K zwischen den Spulen erwarten wir bei diesem Strom eine Spannungsdifferenz, die um 154 mV von der Spannungsdifferenzkurve abweicht. Somit kann bei der Spannungsdifferenzauswertung eine Änderung des Kühlwasserdruckes in dieser Größenordnung erfolgen, ohne die Systemparameter neu bestimmen zu müssen.

Die Messungen bestätigen den erwarteten annähernd linearen Zusammenhang zwischen der Wicklungstemperatur und dem Wicklungswiderstand. Der Bereich dieser Änderung, von  $50 \frac{\mu\Omega}{K}$ , ist in dem von uns vorgesehenen Meß- und Auswertungsverfahren gut zu erfassen und bestätigt die in Kapitel (2.3.2, S. 17) vorgenommenen Berechnungen.

Die Messung der Abschaltzeit am Földi-Netzgerät zeigt eine deutliche Verzögerung zwischen Abschaltsignal und Reaktion des Netzgerätes. Diese

darstellt.

# Kapitel 4

## Hardware

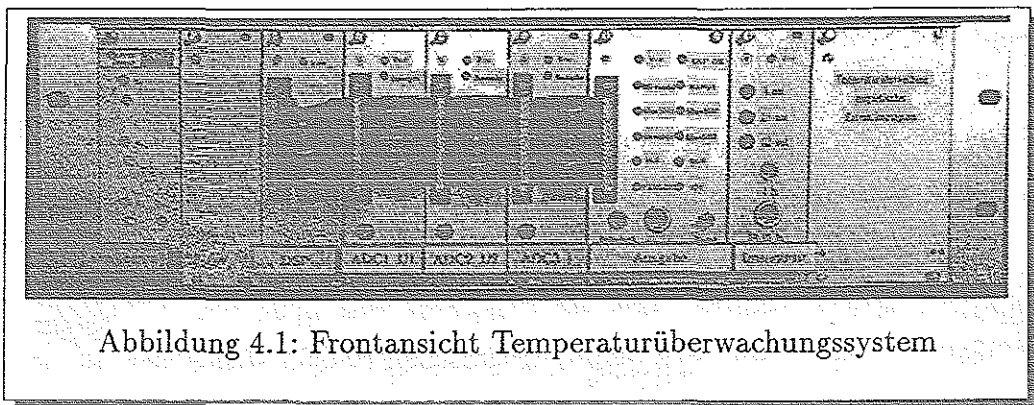


Abbildung 4.1: Frontansicht Temperaturüberwachungssystem

## 4.1 Anforderungen an das System

Um die mathematische Auswertung der drei Meßsignale mit ausreichender Geschwindigkeit durchführen zu können, wird ein digitaler Signalprozessor eingesetzt. Der Hauptgrund bei der Auswahl des DSP ist das Vorhandensein eines Emulatorsystems für den MB8764 der Fa. Fujitsu innerhalb der KFA. Zu diesem Emulatorsystem ist bereits eine DSP-Karte vom ZEL im Rahmen einer Diplomarbeit entwickelt worden. Desweiteren kann diese DSP-Karte modular mit weiteren Karten zu einem Gesamtsystem zusammengestellt werden. Für dieses System steht das Layout einer AD-Wandler-Karte zur Verfügung, die nach geringen Modifikationen in unserem Überwachungssystem eingesetzt wird.

Die Spannungssignale müssen erdpotentialfrei gemessen werden, da die Versorgungsspannung der Septumsmagneten bereits innerhalb des Netzgerätes geerdet ist. Jede zusätzliche Erdverbindung führt zur Abschaltung durch eine interne Überwachung des Netzgerätes. Auch das Stromsignal wird erdpotentialfrei gemessen, um Ausgleichsströme durch große Erdschleifen zu vermeiden.

Die Fehlermeldungen müssen detailliert ausgegeben werden, um die Fehlersuche zu vereinfachen. Weiterhin muß eine Schaltung entwickelt werden, die es ermöglicht, das Netzgerät sicher und schnell abzuschalten.

Eines der Hauptprobleme stellt die räumliche Trennung des Stromsignals (Netzgeräteraum 1) und den Spannungssignalen (COSY-Ring) dar. Bei der Entscheidung, das System vor Ort im Beschleunigertunnel zu installieren, spielen folgende Überlegungen eine Rolle:

- Das Stromsignal kann sich aus technischen Gründen nicht sprunghaft ändern, da es sich beim Extraktionsseptum um eine Induktivität handelt, welche im normalen Betrieb mit einem konstanten Strom versorgt wird. Es ist daher mit höherfrequenten Spannungssignalen zu rechnen.
- Bei Detektion eines Fehlers muß das Septum und dessen Wasserkühlung kontrolliert werden. Es ist daher eine Quittierung vor Ort üblich.
- Kompakte einfache Systeme besitzen naturgemäß eine geringere Störfähigkeit.

Als Nachteile werden bei dieser Lösung folgende Punkte akzeptiert:

- Die Wartungsfreundlichkeit des Meßsystems wird durch die Aufstellung im Beschleunigertunnel stark eingeschränkt, da dieser während des Strahlbetriebs nicht betreten werden darf.

- Im COSY-Ring kann, speziell an der Extraktion, radioaktive Strahlung entstehen, die sich nachteilig auf das Verhalten elektronischer Schaltkreise auswirken kann.
- Weiterhin muß bei der Aufstellung des Systems darauf geachtet werden, daß starke Magnetfelder auftreten können.

Die in Kauf genommenen Nachteile können durch eine hohe Zuverlässigkeit und Störsicherheit des Systems ausgeglichen werden.

## 4.2 Schematischer Aufbau des Systems

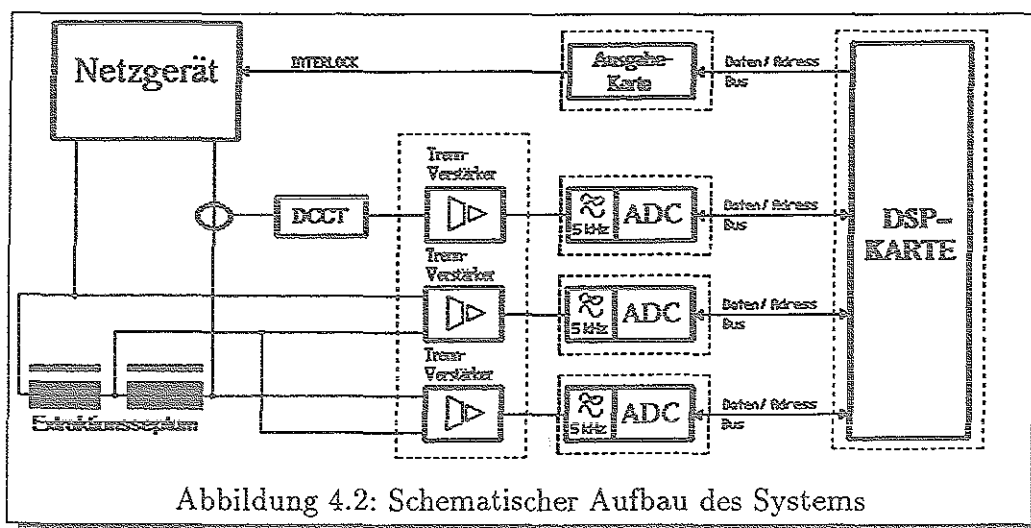


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau des Systems

## 4.3 Trennverstärkerkarte

Die zur Bestimmung der Wicklungswiderstände benötigten Spannungen werden direkt an den Stromschienen des Extraktionsseptums, die zwischen den Anschlußklemmen und den Wicklungen liegen, abgegriffen. Der Strom wird vom DCCT in eine Spannung umgewandelt, so daß alle Meßgrößen als Spannungen zur Verfügung stehen.

Die drei Meßsignale werden dem System über eine Trennverstärkerkarte zugeführt. Die Schaltung dient sowohl zur Pegelanpassung der Meßsignale als auch zur galvanischen Entkopplung der Meßseite zum System, um eventuell auftretende Störspannungen durch Potentialunterschiede zu vermeiden. Außerdem dürfen die Septumsanschlüsse an keiner Stelle mit Erdpotential verbunden werden, da die Erdung bereits im Netzgerät an definierter Stelle

erfolgt ist. Diese Erdung muß symmetrisch zwischen dem positiven und dem negativen Pol der Ausgangsspannung liegen. Die Symmetrie wird durch eine Logik im Netzgerät überwacht.

Die beiden Spannungen an den Septumsspulen werden über Spannungsteiler auf die Eingänge der Trennverstärker geschaltet, da diese Eingänge auf  $\pm 10$  V begrenzt sind, und die Septumsspannungen bei hohen Betriebsströmen bis um das 5-fache höher liegen können. Das DCCT liefert über den Eingangsbereich von 0–3000 A eine Ausgangsspannung von 0–10 V, so daß eine Anpassung dieses Signals (für den Trennverstärkereingang) nicht nötig ist.

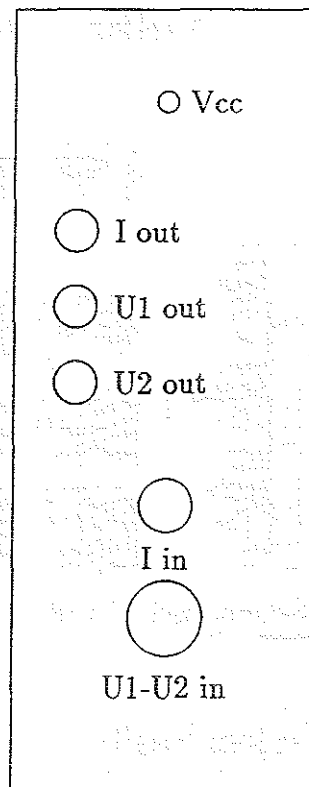


Abbildung 4.3: Frontblende der Trennverstärkerkarte

#### 4.3.1 Trennverstärker AD210BN

Der Trennverstärker AD210BN der Fa. Analog Devices besitzt drei, über eine kapazitive 5pF Isolationsbarriere, voneinander getrennte Einheiten:

- Eingangsseite
- Ausgangsseite

• Spannungsversorgung (+ 15V)

Das Eingangssignal kann über den Eingangsverstärker entweder verstärkt oder gepuffert werden. Ein Fullwave-Modulator übersetzt das Signal in eine Trägerfrequenz. Diese Frequenz wird über einen Transformator zur Ausgangsseite übertragen und dort von einem synchronisierten Demodulator in das Ausgangssignal umgewandelt. Durch ein 20 kHz 3-pol-Filter werden Ausgangsrauschen- und Welligkeit (Ripple) auf 100 kHz bzw. 10 mV begrenzt (Siehe auch [16]).

|                           |                            |                   |
|---------------------------|----------------------------|-------------------|
| Versorgungsspannung:      | 15                         | $V \pm 10\%$      |
| Verstärkung:              | 1-100                      | $\frac{V}{V}$     |
| max. Übersetzungsfehler:  | $\pm 1$                    | %FS               |
| max. Nichtlinearität:     | $\pm 0,012$                | %FS               |
| Isolierspannung bei 60Hz: | 2500                       | $V_{rms}$         |
| Isolierspannung bei DC:   | $\pm 3500$                 | $V_{peak}$        |
| Bandbreite (-3 dB) G=1    | 20                         | $kHz$             |
| Anstiegszeit:             | 1                          | $\frac{V}{\mu s}$ |
| Eingangsimpedanz:         | $10^{12} \Omega$           | (differential)    |
|                           | $5 G\Omega \parallel 5 pF$ | (Common Mode)     |
| Linearer Bereich:         | $\pm 10$                   | $V$               |

Tabelle 4.1: Technische Daten AD210BN

Der AD210BN stellt an Ein- und Ausgangsseite jeweils galvanisch getrennte Spannungen von  $\pm 15 V$  bei 5 mA zur Verfügung.

### 4.3.2 Schaltungsbeschreibung

Der Schaltplan zur Trennverstärkerkarte befindet sich im Anhang B.1. Die beiden Septumsspannungen werden den Trennverstärkern jeweils über die Spannungsteiler R1-R2 & R6-R7 zugeführt, so daß die Eingangsspannungen auf den Eingangsspannungsbereich des Trennverstärkers von  $\leq 10 V$  angepaßt werden. Die DCCT-Spannung wird direkt auf den Trennverstärkereingang geschaltet. Durch eine Verstärkung von 1 liegt auch am Ausgang der Trennverstärker dieser Wert an.

Die Widerstände R3-R4, R8-R9, R11-R12 sowie die Potentiometer P1-3 dienen zur Offsetkompensation.

Die Restwelligkeit von 100 kHz am Ausgang der Trennverstärker wird jeweils

durch 8 kHz-Tiefpässe (R5-C3, R10-C6, R13-C9) gedämpft. Die Elkos C10 & C11 dienen zur Glättung der Versorgungsspannung. Die Induktivität L1 wird zur Einschaltstrom- und Störspitzenbegrenzung in den Versorgungsleitungen eingesetzt.

### 4.3.3 Fehlerbetrachtung

Der Fehler der Trennverstärker setzt sich aus vier Komponenten zusammen:

- Verstärkungsfehler
- Offsetfehler (produktionsbedingt)
- Offsetfehler (temperaturbedingt)
- Nichtlinearitätsfehler

Der Verstärkungsfehler und die Offsetfehler werden durch den Abgleich der AD-Wandlerkarte kompensiert. Der Nichtlinearitätsfehler beträgt maximal  $\pm 1,2$  mV.

Der Fehler des AD210BN ist somit um den Faktor 10 kleiner als die Auflösung der AD-Wandler mit 12 mV und beeinträchtigt die Genauigkeit der Messung somit nur unwesentlich.

## 4.4 AD-Wandlerkarte

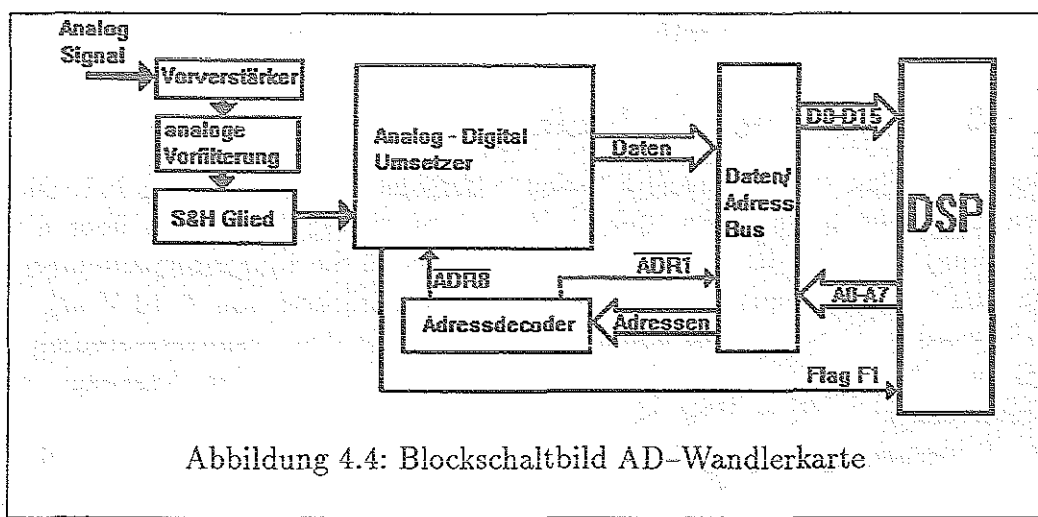


Abbildung 4.4: Blockschaltbild AD-Wandlerkarte

Um analoge Signale digital verarbeiten zu können, müssen die Signale abgetastet und die Abtastwerte digitalisiert werden. Diese digitalisierten Werte können dann von einem DSP bearbeitet werden.

#### 4.4.1 Schaltungsbeschreibung

Das Schaltbild der AD-Wandlerkarte befindet sich im Anhang C.1. Die ADC-Karte, die vom Zentrallabor für Elektronik (ZEL) entwickelt wurde, besteht aus einem 12-Bit AD-Wandler der Fa. Burr-Brown, der nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation arbeitet, und der über ein Sample & Hold-Glied mit der Eingangsstufe, bestehend aus Tiefpaßfilter und Eingangsverstärker, verbunden ist. Der Wandlerbaustein braucht maximal  $15 \mu s$  für die Umsetzung eines Signals in einen digitalen Wert. Das Sample & Hold-Glied (SHC 5320 der Fa. Burr Brown) ist mit einer Einstellzeit, von  $1,5 \mu s$  angegeben. Unter Einstellzeit versteht man die Zeit, die vergeht, bis das Signal am Ausgang des S&H Gliedes stabil anliegt, und somit dem ADC-Baustein zur Konvertierung zur Verfügung steht. Das Abtasthalteglied ist nötig, um dem AD-Wandlerbaustein für die Zeitdauer der Umwandlung des Analogen in einen digitalen Wert ein konstantes Signal zur Verfügung zu stellen, das sich um höchstens 1 LSB ändert.

|                           |                   |            |
|---------------------------|-------------------|------------|
| Eingangsspannungsbereich: | 0–10              | V          |
| Eingangsimpedanz:         | typisch 5         | k $\Omega$ |
| max. Wandelzeit:          | 15                | $\mu s$    |
| Lineritätsfehler:         | $\pm \frac{1}{2}$ | LSB        |

Tabelle 4.2: Technische Daten ADC674AKH

Die Ausgänge des ADC sind über Treiberbausteine und ein 34-poliges Flachbandkabel, das über die Frontblende angeschlossen wird, mit dem Datenbus der DSP-Platine verknüpft. Der ADC-Baustein wird in einem Modus betrieben, in dem alle 12 Bit gleichzeitig ausgelesen werden. Die Bits 0 bis 3 des 16-poligen Datenbusses sind mit Massepotential verbunden.

#### 4.4.2 Adressdekodierung

Die Ansteuerung des ADC, sowie der Bus-Treiberbausteine, erfolgt über einen PAL-Baustein, der mit dem Adress-/Steuerbus der DSP-Karte verbun-

den ist. Der PAL-Baustein ist so programmiert, daß der Start der Konvertierung mit der externen Adresse \$08h erfolgt.

$$\overline{ADR8} = \overline{AEN} \cdot \overline{EWE} \cdot \overline{A4} \cdot \overline{A3} \cdot \overline{A2} \cdot \overline{A1} \cdot \overline{A0}$$

Das Signal ADR8 ist mit dem ADC-Eingang  $R/\overline{C}$  (*read/convert*) verbunden und startet den Wandelvorgang. Da alle ADC-Karten parallel mit dem Steuerbus verbunden sind, werden durch das Anlegen der externen Adresse \$08h die drei ADC-Karten gleichzeitig gestartet. Durch diesen *Hardwaretrigger* wird ein zeitlicher Versatz der Messungen vermieden.

Das Auslesen der AD-Wandler erfolgt mit Hilfe einer weiteren externen Adresse, die sich aus der Stellung der auf der Karte befindlichen DIP-Schalter + \$01h berechnet:

$$\begin{aligned} \overline{ADREN} &= \overline{AEN} \cdot (\overline{A5} : + : \overline{DIP0}) \cdot (\overline{A6} : + : \overline{DIP1}) \cdot (\overline{A7} : + : \overline{DIP2}) \\ \overline{ADR1} &= \overline{ADREN} \cdot \overline{EWE} \cdot \overline{A4} \cdot \overline{A3} \cdot \overline{A2} \cdot \overline{A1} \cdot \overline{A0} \end{aligned}$$

Das so gewonnene Signal ADR1 steuert die Bus-Treiberbausteine, die das Ausgabebitmuster des ADC mit dem Datenbus verbinden. Die Statusmeldung der AD-Wandler sind so mit dem F1-Flag über den Steuerbus verbunden, daß das Flag gesetzt wird, wenn alle AD-Wandler die Konvertierung beendet haben.

#### 4.4.3 Anpassung der AD-Wandler-Karte

Diese Karten werden von uns wie folgt geändert:

- der Eingangsfilter wird angepaßt
- der Eingangsverstärker wird geändert
- der Spannungsbereich des ADC wird auf 0 – +10 V festgelegt

Der Eingangsfilter ist ein Butterworth-Tiefpaß zweiter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von  $f_g=5$  kHz, um bei einer Abtastfrequenz von  $f_a=30$  kHz eine Rekonstruktion des Meßsignals zu ermöglichen.

$$\text{Abtasttheorem: } f_a \geq 2f_g$$

Das Filter wird durch den Operationsverstärker OP1-2 (Typ TL074) mit den Widerständen R3, R4 und den Kondensatoren C1 und C2 gebildet. Die Übertragungsfunktion lautet [8]:

$$A(P) = \frac{1}{1 + \omega_g C_1 (R_3 + R_4) P + \omega_g R_3 R_4 C_1 C_2 P^2}$$

Die Dimensionierung der Bauteile erfolgt durch:

$$\frac{C_2}{C_1} \geq \frac{4 b_1}{a_1^2} \quad \text{und} \quad R_{3,4} = \frac{a_1 C_2 \mu \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4 b_1 C_1 C_2}}{4 \pi f_g C_1 C_2}$$

Für ein Butterworth-Filter 2. Ordnung gelten folgende Tabellenwerte [15]:

$$a_1 = 1,4142 \quad \text{und} \quad b_1 = 1$$

Für das Filter mit einer Grenzfrequenz von  $f_g=5000$  kHz ergeben sich folgende Bauteilwerte:

| berechnet                    | gewählt                     |
|------------------------------|-----------------------------|
|                              | $C_1 = 4,7 \text{ nF}$      |
| $C_2 = 9,4 \text{ nF}$       | $C_2 = 12 \text{ nF}$       |
| $R_3 = 2,56 \text{ k}\Omega$ | $R_3 = 2,7 \text{ k}\Omega$ |
| $R_4 = 7,01 \text{ k}\Omega$ | $R_4 = 7,5 \text{ k}\Omega$ |

Zur Pegelanpassung des Meßsignals wird ein Operationsverstärker als invertierender Verstärker geschaltet, in dessen Rückkopplungsweig sich ein Potentiometer befindet. Die Verstärkung kann somit von 0,9 bis 1,6 variiert werden.

Der ADC674 ist so verschaltet, daß er mit einem Eingangsspannungsbereich von 0 bis +10 V arbeitet. Eine auf der Platine befindliche Invertierung des höchstwertigen Bits wird überbrückt. Desweiteren sind alle nicht benutzten Eingänge der TTL-Gatter auf Masse-Potential gelegt.

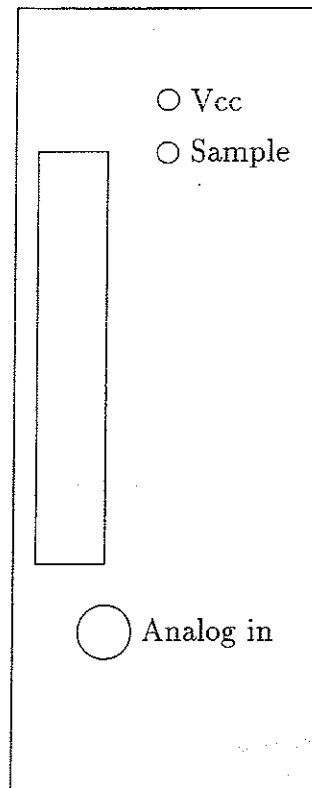


Abbildung 4.5: Frontblende der ADC-Karte

## 4.5 Ausgabeplatine

Die Ausgabeplatine dient zur Anzeige des Zustandes und der Fehlermeldungen des DSP sowie zur Ausgabe des Abschaltsignals an das Netzgerät. Außerdem ist ein Watchdog (MAX 705) mit integrierter Spannungsüberwachung untergebracht.

Die Anzeige des Programmzustandes erfolgt über die Leuchtdioden LED1-LED8. Sie werden über die externe Adresse \$04 des DSP angesprochen. Die Selektion dieser und der anderen Adressen der Ausgabekarte erfolgt, wie bei den AD-Wandler Karten, durch einen PAL-Baustein.

Der komplette Schaltplan befindet sich im Anhang D.1.

### 4.5.1 Adressdecodierung

Der PAL-Baustein ist eingangsseitig mit dem Adressbus und den Steuerleitungen *AEN* und *EWE* des DSP's gekoppelt. Er generiert aus diesen

Signalen die Steuersignale  $\overline{ADR\$4}$ ,  $\overline{ADR\$5}$  und  $\overline{ADR\$6}$ . Die logische Verknüpfung erfolgt durch die Gleichungen:

$$\begin{aligned}\overline{ADR\$4} &= ADREN \cdot \overline{EWE} \cdot \overline{A4} \cdot \overline{A3} \cdot A2 \cdot \overline{A1} \cdot \overline{A0} \\ \overline{ADR\$5} &= ADREN \cdot \overline{EWE} \cdot \overline{A4} \cdot \overline{A3} \cdot A2 \cdot \overline{A1} \cdot A0 \\ \overline{ADR\$6} &= ADREN \cdot \overline{EWE} \cdot \overline{A4} \cdot \overline{A3} \cdot A2 \cdot A1 \cdot \overline{A0}\end{aligned}$$

wobei das Signal  $ADREN$  durch die DIP-Schalter DIP0 bis DIP2 beeinflusst wird, die es ermöglichen, die Adressen zu verschieben. Die logische Verknüpfung für  $ADREN$  lautet:

$$ADREN = \overline{AEN} \cdot (A5 : + : DIP0) \cdot (A6 : + : DIP1) \cdot (A7 : + : DIP2)$$

Die dekodierte Adresse  $\overline{ADR\$4}$  steuert einen Bustreiberbaustein, der mit dem LSB des DSP-Datenbus gekoppelt ist. Durch einen Low-Pegel an die Steuereingänge des Bustreiberbausteins nehmen die Ausgänge den logischen Zustand der entsprechenden Eingänge an.

#### 4.5.2 LED Ansteuerung

Die Ausgänge des Bustreibers sind mit D-Flipflops verbunden, deren gemeinsamer Takteingang ebenfalls an  $\overline{ADR\$4}$  angeschlossen ist. Die Ausgänge der D-Flipflops sind mit Invertern verbunden, die als Treiberbausteine für die LED's fungieren. Somit werden die acht niederwertigen Bits des DSP-Datenbus in die D-Flipflops durch Ansprechen der externen Adresse \$04 übernommen und durch die LED's angezeigt. Der Zustand bleibt erhalten, bis die externe Adresse (e) \$04 erneut angesprochen wird.

| LED  | Farbe | Bedeutung              | Bitmuster (hex) |
|------|-------|------------------------|-----------------|
| LED1 | rot   | $\Delta$ U2            | \$01            |
| LED2 | rot   | $\Delta$ U1            | \$02            |
| LED3 | rot   | Windungsschluß Magnet2 | \$04            |
| LED4 | rot   | Windungsschluß Magnet1 | \$08            |
| LED5 | rot   | Übertemperatur Magnet2 | \$10            |
| LED6 | rot   | Übertemperatur Magnet1 | \$20            |
| LED7 | gelb  | Rampe                  | \$40            |
| LED8 | gelb  | Messung aktiv          | \$80            |

Tabelle 4.3: Bedeutung der LED's

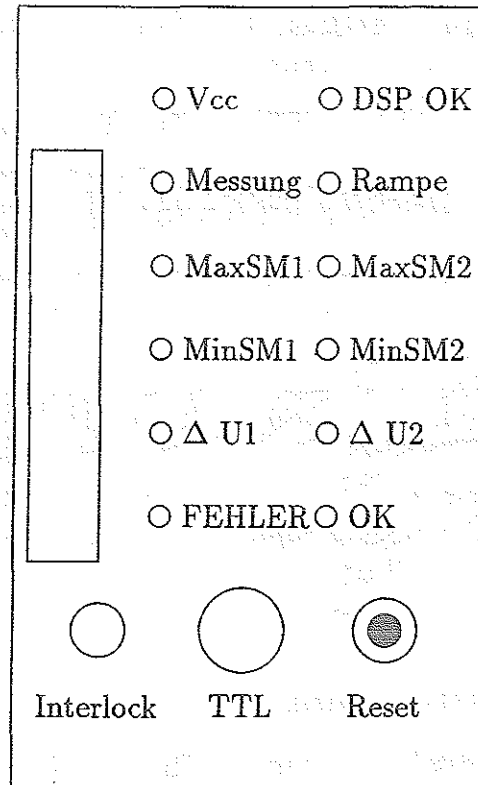


Abbildung 4.6: Frontblende der Ausgabekarte

Die Ausgabe der Fehlermeldung an den Interlock erfolgt über die externe Adresse \$05.

Die aus dem PAL-Baustein gewonnene  $\overline{ADR\$5}$  wird über ein Monoflop auf eine längere Impulsdauer gebracht und invertiert. Über ein Nand-Gatter wird das Watchdogausgangssignal eingekoppelt. Dieses Signal wird, durch als FF geschaltete Nand-Gatter, gespeichert. Das FF steuert durch seine Ausgänge, über als Treiber arbeitende Inverter, die Relais. Außerdem sind weitere Inverter an das FF gekoppelt, die es ermöglichen die Fehlermeldung als TTL-Pegel abzugreifen. Durch diese Verschaltung ist in jedem Betriebszustand ein Relais angesteuert und das jeweils andere in stromlosem Zustand. Diese Zustände werden durch die LED's OK und FEHLER angezeigt.

#### 4.5.3 Watchdog MAX705

Der Baustein MAX705 überwacht die Versorgungsspannung des Systems. Wenn die Betriebsspannung des Systems unter 4,65 V absinkt, wird der *RESET*-Ausgang auf LOW-Pegel gesetzt. Nach dem Überschreiten dieser

Schwelle, wird der Pegel nach 200ms auf High gesetzt.

Ein  $\overline{RESET}$ -Impuls kann auch durch den Taster S1 erzeugt werden, das ist allerdings nur möglich, wenn sich die beiden Relais in einem zulässigen Zustand befinden (eines der beiden Relais muß angezogen sein, während das jeweils Andere abgefallen ist). Diese Schaltung soll sicherstellen, daß die Interlockschleife nur geschlossen werden kann, wenn die Relais (und somit auch die vorgeschalteten Transistoren) korrekt arbeiten. Dieser Schutzmechanismus betrifft aber nur einen per Schalter erzeugten Reset, nicht den Power-Up Reset, der vom MAX705 automatisch erzeugt wird.

Ein Reset-Impuls setzt das Ausgabefflop in den Zustand OK zurück und sorgt dafür, daß die LED's 1-8 erlöschen. Weiterhin wird der DSP veranlaßt, das Programm neu zu starten. Zu diesem Zweck muß der  $\overline{RESET}$ -Ausgang der Ausgabekarte mit dem  $\overline{RESET}$ -Eingang der DSP-Karte, der an der VG-Leiste an Pin 30 verfügbar ist, verbunden werden.

Der MAX705 enthält auch einen Watchdogtimer, der wenn ein Impuls an dem Eingang WDI 1,6 Sekunden lang ausbleibt, den Ausgang  $\overline{WDO}$  vom HIGH in den LOW Zustand versetzt. Der Eingang  $\overline{WDI}$  ist über ein weiteres Monoflop, welches gewährleisten soll, daß der Impuls eine ausreichende Impulsdauer hat, mit  $ADR6$  verbunden.  $ADR6$  wird auch aus dem PAL-Baustein gewonnen. Er dekodiert die externe Adresse \$06 des DSP. Durch das DSP-Programm wird gewährleistet, daß die externe Adresse (e) \$06 in ausreichenden Zeitabständen angesprochen wird, solange das Programm korrekt arbeitet. Wenn der DSP nicht mehr arbeitet, die Datenleitung unterbrochen ist, wird das durch den Watchdogtimer detektiert, und nach 1,6 Sekunden wird dieser das  $\overline{WDO}$ -Signal auf LOW-Pegel setzen, was das FF in den Fehlerzustand versetzt und somit das Netzgerät abschaltet. Angezeigt wird dieser Fall durch Erlöschen der DSP-OK Leuchtdiode. Durch einen Reset an S1 wird der Watchdogtimer neu gestartet, was bedeutet, daß die DSP-OK Leuchtdiode mindestens weitere 1,6 Sekunden leuchtet.

Zu der Schaltung ist weiter zu sagen, daß die Eingänge aller unbenutzten Logikgatter auf Massepotential liegen und alle IC's mit einem Entstörkondensator (100 nF) versehen wurden. Diese schaltungstechnischen Maßnahmen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht im Schaltbild (Anhang D.1) aufgeführt.

## 4.6 DSP-Karte

Die Prozessor-Platine wurde für die digitale Signalverarbeitung, im Rahmen einer Diplomarbeit, vom Zentrallabor für Elektronik (ZEL) entwickelt. Die Karte besteht im Wesentlichen aus:

- dem digitalen Signal-Prozessor (DSP) MB8764
- der Logik-Steuerung
- der Ein-/Ausgabe-Steuerung
- dem Daten-/Programmspeicher

### 4.6.1 Digitaler Signal Prozessor (DSP) MB8764

Digitale Signalprozessoren werden, aufgrund ihrer Architektur und ihres Befehlssatzes, besonders für die digitale Signalverarbeitung eingesetzt.

Herkömmliche Mikroprozessoren besitzen eine *von-Neumann-Struktur*, bei der Befehle und Daten in einem gemeinsamen Speicher liegen und der Zugriff sequentiell erfolgt.

Digitale Signalprozessoren erreichen ihre hohe Leistungsfähigkeit durch Trennung von Programm- und Datenbussystem. Eine solche Struktur wird *Harvard-Struktur* genannt. Dadurch wird ermöglicht, Programmbefehle und Datenwörter gleichzeitig einzulesen, wodurch kurze Programmlaufzeiten erreicht werden.

Im Zusammenhang mit der Harvard-Struktur wird häufig das Pipeline-Prinzip benutzt, um Befehlszykluszeiten auf ein Minimum zu beschränken. Bei den meisten Prozessoren erfolgt die Abarbeitung eines Befehls in drei Zyklen:

1. Zyklus (**Fetch**) Lesen des Maschinenbefehls aus Programmspeicher
2. Zyklus (**Decode**) Dekodieren des Befehls
3. Zyklus (**Execute**) Ausführen des Befehls

Im Unterschied zu diesen Prozessoren befindet sich ein DSP in allen drei Zyklen gleichzeitig. Während er einen Befehl aus dem Programmspeicher in einem Fetch-Zyklus liest, wird der zuvor gelesene Befehl im Decode-Zyklus dekodiert und der davor dekodierte Befehl im Execute-Zyklus bereits ausgeführt. Das ermöglicht die Abarbeitung eines Befehls in einem Zyklus. Ein Nachteil dieser Methode ist, daß nach einem Sprung im Programm die Pipeline neu aufgefüllt werden muß, was einen erheblichen Geschwindigkeitsverlust zur Folge hat.

Ein weiteres Merkmal eines DSP's ist die schnelle Multiplikation. Herkömmliche Prozessoren führen eine Multiplikation als Abfolge von Additionen aus und benötigen daher viele Befehlszyklen. Der DSP besitzt einen speziellen Hardware-Multiplizierer, mit dem er in der Lage ist, eine Multiplikation mit nachfolgender Addition in einem Befehlszyklus durchzuführen.

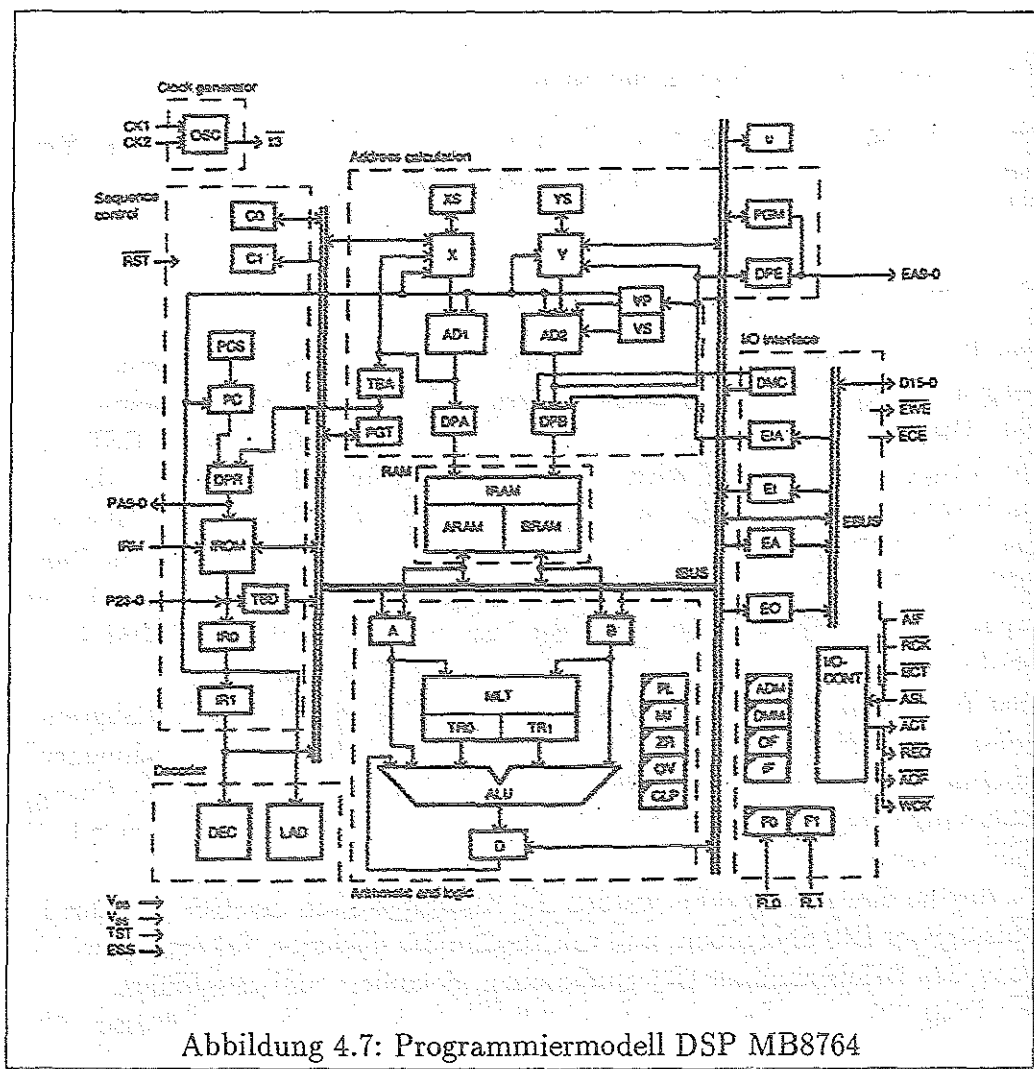


Abbildung 4.7: Programmiermodell DSP MB8764

Der Aufbau des von uns verwendeten Festkomma DSP MB8764 der Fa. Fujitsu lässt sich in sieben Funktionsgruppen einteilen:

- Takt-Generator
- Programmablaufsteuerung
- Befehlsdekoder

- Adressierungseinheit
- RAM
- Arithmetik- und Logikeinheit
- Ein-/Ausgabe-Schnittstelle

#### Takt-Generator(Clock generator)

Durch Anlegen eines Taktes an die Anschlüsse CK1 und CK2 wird in dieser Einheit der Taktzyklus  $\overline{f_3}$  erzeugt. Dieser Takt wird für alle internen Operationen genutzt und besitzt die halbe Taktfrequenz des angelegten Taktes.

#### Programmablaufsteuerung (Sequence control)

Der Programm-Code des DSP's ist in einem ROM (read only memory) einprogrammiert und kann durch die Programmablaufsteuerung ausgelesen werden. Diese Funktionsgruppe steuert die Programmausführung im DSP.

Der Programmzähler PC wird mit einem Reset-Impuls  $\overline{RST}$  auf Adresse 0 zurückgesetzt und mit der ansteigenden Flanke des Taktzyklus inkrementiert. Der Ausgang des Programmzählers ist über den ROM-Adressen-Zeiger DPR mit den Adresseingängen des internen ROM (IROM), das eine Datenkapazität von 1024 Worten  $\times$  24 Bit besitzt, verbunden. Die ROM-Daten werden entsprechend dem Wert des Programmzählers ausgelesen.

Den Wert des Zeigers DPR kann man an den Ausgängen PA9 – 0 abgreifen, wodurch sich ein externes ROM (EROM) auslesen läßt. Der Maschinencode wird in ROM über die Anschlüsse P23 – 0 eingelesen. Durch den Eingang IRM wird festgelegt, ob die Programmdaten des externen oder internen ROM gelesen werden sollen.

Zu Beginn eines Taktzyklus werden die Ausgangsdaten des ROM an das Befehlsregister IR0 übergeben, und mit Beginn des nächsten Taktzyklus werden sie in das Befehlsregister IR1 geschrieben, dekodiert und ausgeführt.

Um Programmverzweigungen zu ermöglichen, können Sprungadressen über das Register IR0 und dem internen Bus IBUS in den Programmzähler geladen werden. Der ursprüngliche Zählerstand kann im RAM oder über den internen Bus in einem anderen Register abgespeichert werden. Zur einfachen Unterprogrammbearbeitung wird der Speicher PCS benutzt. In ihm kann nur eine Adresse abgelegt werden. Die Register C0 und C1 sind Programmschleifen-zähler und werden über den internen Bus durch das Programm gesetzt.

### Befehlsdekoder (Decoder)

Die Befehle, die vom ROM aus in das Befehlsregister IR0 und IR1 geladen wurden, werden vom LAD (look ahead decoder) und dem Dekoder DEC übersetzt. Die Ausführung eines Befehls findet gleichzeitig mit der Speicherung des Befehls im Register IR1 statt. Der Ausgang des Dekoders steuert die Register, die für die Befehlsausführung benötigt werden.

Bevor ein Befehl ausgeführt wird, kontrolliert der LAD die Berechnung der effektiven RAM-Adresse, erkennt die Operationen, die von der Arithmetik und Logik ausgeführt werden sollen und ermittelt die Anzahl der Taktzyklen, die für die Befehlsausführung benötigt werden.

### Adressierungseinheit (Address calculation)

Diese Funktionsgruppe berechnet die effektive, auszuführende Adresse im RAM (IRAM/ERAM) oder ROM. Die Adressierungseinheit besteht aus den Indexregistern X und Y, den Speichern XS und YS der Indexregister, einem 7-Bit-Addierer AD1, einem 8-Bit Addierer AD2, einem Zeiger VP (virtual shift pointer) und dem Register VS (virtual shift mode).

Bei der indizierten Adressierung wird der Wert, der zu der ARAM- oder ROM-Adresse im Addierer AD1 addiert werden soll, in dem 7-Bit breiten X-Register abgespeichert. Das 8-Bit breite Y-Register speichert in ähnlicher Weise den Wert, der bei der indizierten Adressierung des BRAM, IRAM oder ERAM im Addierer AD2 hinzu addiert werden soll.

Um den Prozessor in den *virtual shift mode* zu versetzen, muß das Flag-Register VS logisch 1 gesetzt werden, was mit der SET-Anweisung erfolgt. Die Rücksetzung geschieht mit der CLR-Anweisung. In dem 4-Bit breiten Zeiger VP wird die Anzahl der virtuellen Verschiebungen gespeichert.

Bei einem Zugriff auf das IRAM, durch einen Befehl mit einer Adresse, wird die effektive Adresse zunächst im Addierer AD2 berechnet. Dieses Ergebnis wird dann genutzt, um über dem RAM-Zeiger DPB auf das IRAM zuzugreifen. Möchte man auf das IRAM mit einem Befehl auf zwei Adressen zugreifen, so wird die Ausführungsadresse für das ARAM im Addierer AD1 berechnet und die Zugriffsadresse für das BRAM im Addierer AD2. Der Zugriff auf das ARAM und BRAM erfolgt über die Zeiger DPA und DPB. Die Adressen im externen RAM (ERAM) werden ebenfalls im Addierer AD2 berechnet, der Zugriff auf diese ERAM-Adresse erfolgt dann über den ERAM-Adress-Zeiger DPE.

ROM-Adressen werden im Addierer AD1 berechnet. Der Zugriff auf die ROM-Adresse erfolgt dann über das Adressregister TBA, wobei das Seitenregister PGT den höherwertigen Teil der Adresse bildet.

Für die Adressierung des externen RAM's ERAM hat das Register *PGM* die Aufgabe des Seitenregisters.

### RAM (random access memory)

Das RAM dient als schneller Datenspeicher. Es können Daten eingelesen und ausgelesen werden.

Der Prozessor hat zwei 128-Wort  $\times$  16-Bit große RAM-Bereiche, die als ARAM und BRAM bezeichnet werden. Diese Bereiche können als zwei unabhängige Speicher oder als ein einziges RAM (IRAM) genutzt werden. Wenn der interne RAM-Speicher nicht ausreicht, kann dieser durch externe RAM-Bausteine ergänzt werden. Das ERAM kann als eine Erweiterung des BRAM oder IRAM betrachtet werden, aber seine Adressen sind unabhängig von denen des BRAM oder IRAM.

### Arithmetik und Logik

In dieser Funktionsgruppe werden die arithmetischen und logischen Befehle bzw. Funktionen ausgeführt. Die Ausführungszeit wird vom Maschinenzklus bestimmt. Diese Einheit besteht aus den beiden 16-Bit Eingaberegistern *A* und *B*, einem 26-Bit Akkumulatorregister *D*, in welchem die Ergebnisse abgelegt werden, einem Multiplizierer *MLT*, der Arithmetik-Logik-Einheit *ALU* und den fünf Flag-Registern *PL*, *MI*, *ZR*, *OV* und *CLP*.

Die Multiplikationen werden von einem zweistufigen Parallel-Multiplizierer durchgeführt, in dem *MLT*- und *ALU*-Funktionen nacheinander folgen. Der Multiplizierer *MLT* bildet bei jedem Befehl das Produkt aus *A* und *B* und legt das Zwischenergebnis in den Registern *TR1* und *TR2* ab. Das Endergebnis der Multiplikation erhält man, wenn die Werte aus *TR0* und *TR1* entsprechend einer nachfolgenden Multiplizieranweisung in der *ALU* addiert werden. Aufgrund dieser Multiplizierstruktur vergehen, zwischen dem Einladen der Werte in die Register *A* und *B* und dem Erscheinen des Ergebnisses im *D*-Register, zwei Taktzyklen. Alle anderen Rechenoperationen werden von der *ALU* alleine durchgeführt, und das Ergebnis wird direkt im *D*-Register abgespeichert.

Für bedingte Sprünge können die in dieser Funktionsgruppe enthaltenen Flags abgefragt werden:

**PI**  $\Rightarrow$  positives Ergebnis

**MI**  $\Rightarrow$  negatives Ergebnis

**ZR**  $\Rightarrow$  Ergebnis = 0

**OV**  $\Rightarrow$  Registerüberlauf

Das *D*-Register hat eine größere Wortlänge (26 Bit) als der interne Bus

bzw. die Register A und B. Um einen Überlauf des internen Busses anzuzeigen, ist das CLP-Register vorgesehen.

#### Ein- Ausgabe-Schnittstelle (I/O Interface)

Diese Schnittstelle ist für den Datenaustausch zwischen dem DSP und einer externen Schaltung vorgesehen. Sie besteht aus Ein- und Ausgabe-Registern, der Ein- und Ausgabe-Steuerung und Flags. Die E/A-Steuerung kontrolliert den Datentransfer zu, oder von einer externen Schaltung, unabhängig von der Ausführung der Befehle. Die Daten einer externen Schaltung können mit einer Adressinformation über das Register *EI* oder ohne Adressinformation über das Register *EIA* eingelesen werden. Es gibt drei Eingabe-Modi: den P-, D- und A-Modus. Die Modi sind durch die Werte gekennzeichnet, die durch Befehle in den Modus-Registern *ADM* und *DMM* gesetzt wurden. Wenn in *EI* Daten eingelesen werden wird das Eingabe-Flag gesetzt. Im P-Modus wird der *EI*-Wert durch das Programm in andere Register oder in das RAM übertragen. Im D- oder A-Modus wird der Wert des *EI*-Registers in das IRAM übertragen. Im D-Modus wird DMC als IRAM-Adresse genutzt, während im A-Modus *EIA* benutzt wird. Das IF-Flag wird zurückgesetzt, nachdem der Inhalt von *EI* an eine andere Stelle übertragen wurde.

Daten werden über das EA- und EO-Register an eine externe Schaltung übertragen. Hierbei gibt es zwei Ausgabe-Modi, die an den Befehlsdaten im EA-Register zu erkennen sind. Werden Daten in EA geschrieben, so wird das OF-Flag gesetzt. Das Flag wird zurückgesetzt, sobald die Datenübertragung an eine externe Schaltung abgeschlossen ist. Um eine Synchronisation zwischen Programm und externer Schaltung zu ermöglichen, stehen an der E/A-Schnittstelle die Flags  $\overline{F0}$  und  $\overline{F1}$  zur Verfügung, welche von der Schaltung gesetzt und vom Programm abgefragt werden können [7].

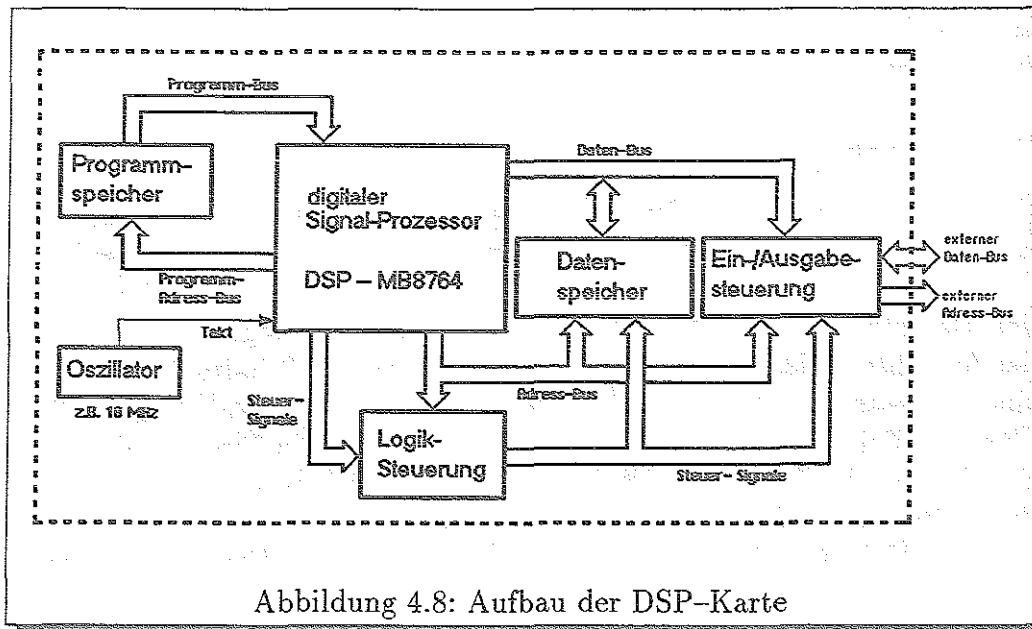
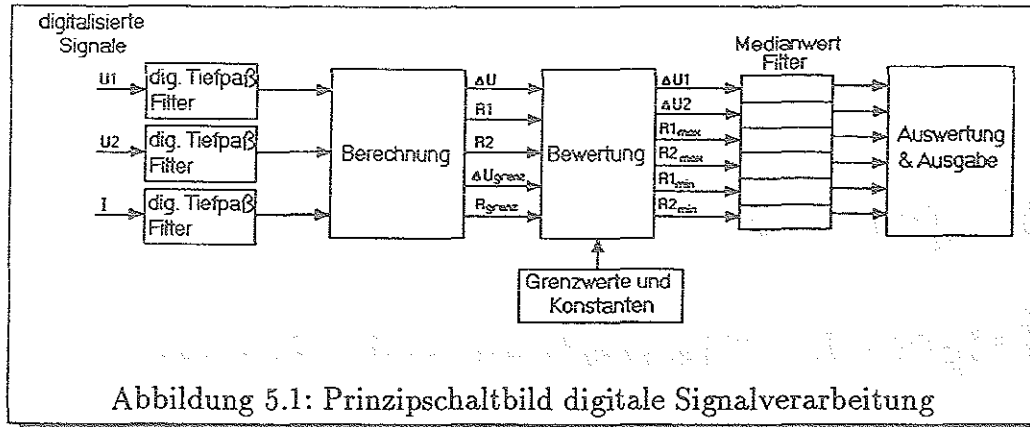


Abbildung 4.8: Aufbau der DSP-Karte

Der MB8764 ist auf der DSP-Karte in eine Schaltungsumgebung eingebettet, die es ihm ermöglicht, über einen Daten-, Adress- und Steuerbus, der über die Frontblende nach außen geführt wird, mit anderen Karten zu kommunizieren. Die Prozessorkarte, deren detaillierte Beschreibung der Diplomarbeit von T. Plum [7] entnommen werden kann, ist weiterhin mit einer Schnittstelle ausgerüstet, die den direkten Anschluß eines Emulatorsystems (auf das im weiteren noch eingegangen wird) ermöglicht. Die Schaltbilder der DSP-Karte befinden sich im Anhang A.1.

## Kapitel 5

# Digitale Signalverarbeitung



Nach der Digitalisierung der analogen Meßsignale erfolgt eine mathematische Weiterverarbeitung durch den DSP.

Die Vorteile der digitalen gegenüber der analogen Signalverarbeitung sind:

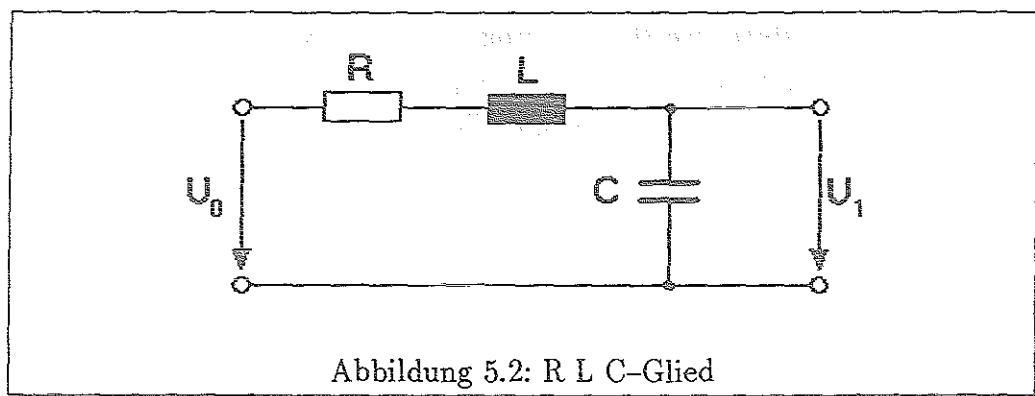
- Keine Bauteiltoleranzen
- Keine Temperatureinflüsse
- Geringere Störanfälligkeit
- Keine Bauteilealterung
- Einfachere Simulation und Änderung des Schaltungsverhaltens

Der von uns benutzte DSP dient nicht nur zur Nachbildung analoger Schaltkreise, sondern auch zu deren Integration in konventionelle Programmier technik. Das Prinzip der digitalen Signalverarbeitung unseres Temperaturüberwachungssystems ist in Abbildung (5.1) dargestellt. Im Nachfolgenden werden die wichtigsten von uns benutzten Verfahren beschrieben.

## 5.1 Digitaler Butterworth-Tiefpaß

Durch Filterung von Signalen lassen sich unerwünschte Frequenzanteile unterdrücken. Mit einem Tiefpaßfilter werden in unserem Fall speziell die Thyristorstörimpulse des Netzgerätes unterdrückt. Die Realisierung solcher Filter kann, je nach Anforderung, analog oder digital erfolgen. Die Vorteile der digitalen Filterung liegen in der höheren Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und der geringeren Störempfindlichkeit. Nachteilig ist der höhere Schaltungsaufwand.

Das von uns gewählte digitale Filter berechnet sich aus der Analogschaltung eines Butterworth-Tiefpasses 2. Ordnung.



Die Maschengleichungen für  $U_0$  und  $U_1$  lauten:

$$U_0(j\omega) = \left( R + L j\omega + \frac{1}{j\omega C} \right) i \quad (5.1)$$

$$U_1(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} i \quad (5.2)$$

Mit Hilfe der bilineraren Z-Transformation und der algebraischen Transformationsanweisung gilt:

$$p = \frac{2}{T_a} \frac{z-1}{z+1} \quad p = j\omega$$

Damit ergibt sich mit den Gleichungen (5.1) und (5.2):

$$U_1(z) = \frac{T_a}{2C} \frac{z+1}{z-1} I(z)$$

$$U_0(z) = \left( R + \frac{2L}{T_a} \frac{z-1}{z+1} + \frac{T_a}{2C} \frac{z+1}{z-1} \right) I(z)$$

Daraus folgt unter Berücksichtigung der Butterworthbedingung für das Gesamtübertragungsverhalten der Schaltung:

$$A(z) = \frac{U_1(z)}{U_0(z)}$$

$$A(z) = C_0 \frac{z^2 + 2z + 1}{z^2 + 2 \frac{1 - \left(\frac{2}{\omega_0 T_a}\right)^2}{1 + \left(\frac{2}{\omega_0 T_a}\right)^2 + \frac{2\sqrt{2}}{\omega_0 T_a}} z + \frac{1 + \left(\frac{2}{\omega_0 T_a}\right)^2 - \frac{2\sqrt{2}}{\omega_0 T_a}}{1 + \left(\frac{2}{\omega_0 T_a}\right)^2 + \frac{2\sqrt{2}}{\omega_0 T_a}}}$$

mit

$$C_0 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2}{\omega_0 T_a}\right)^2 + \frac{2\sqrt{2}}{\omega_0 T_a}}$$

Butterworthbedingung:  $\omega_0 \tau = \sqrt{2}$

Zur Bestimmung der Koeffizienten ist es nötig, die Abtastfrequenz zu kennen. Gewählt wird eine Abtastfrequenz von  $f_0 = 20$  kHz für eine Grenzfrequenz von  $f_a = 1$  kHz. Das Abtasttheorem  $f_a \geq 2 f_g$  ist somit erfüllt.

Mit

$$A(z) = \frac{K1 z^2 + K2 z + K3}{z^2 - K5 z + K4} \quad (5.3)$$

ergeben sich folgende Koeffizienten:

$$K1 = +0,019789$$

$$K2 = +0,039579$$

$$K3 = +0,019789$$

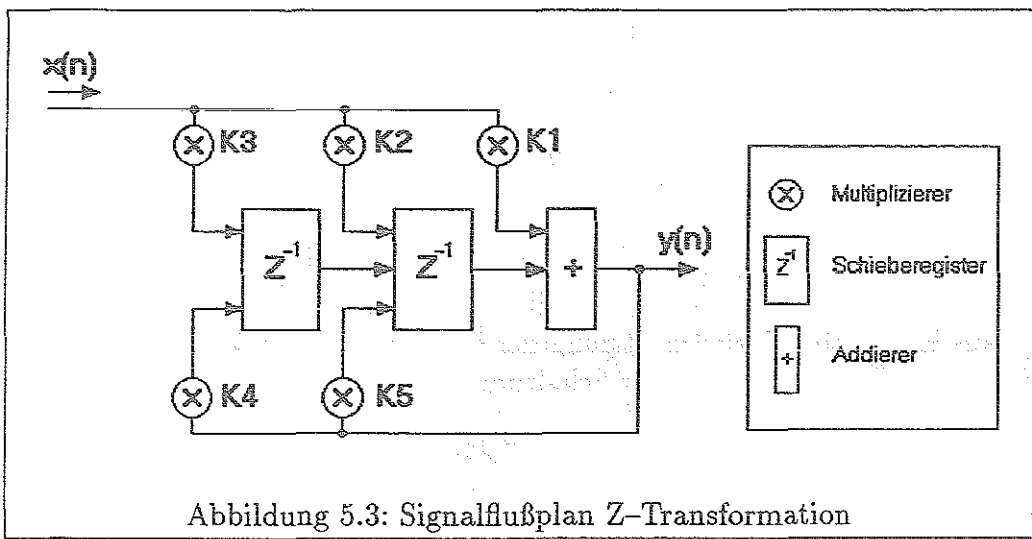
$$K4 = +0,643662$$

$$K5 = -1,564504$$

Setzt man für  $A(z) \frac{y(n)}{x(n)}$  ein, und stellt nach  $y(n)$  um, so erhält man:

$$y(n) = K1 x(n) + K2 x(n) z^{-1} + K3 x(n) z^{-2} + K5 y(n) z^{-1} + K4 y(n) z^{-2}$$

Dies führt zu folgendem Signalflußplan (Abb. 5.3), aus dem der Filteralgorithmus für den DSP direkt abgeleitet werden kann.



## 5.2 Medianwert-Filter

Um einer unnötigen Abschaltung durch Meßfehler, die durch die bereits erwähnten Spannungsripple entstehen können, wird ein weiteres Filterelement eingesetzt. Bei diesem Filter handelt es sich um ein Median- oder

Zentralwert-Filter, bei dem die Meßwerte  $X_i$  nach steigenden Werten geordnet werden. Als Ergebnis dient der *middleste* Zahlenwert.[14]

$$Z = \frac{X_{n+1}}{2} \quad \text{bei } n \text{ ungerade} \quad (5.4)$$

$$Z = \frac{X_{\frac{n}{2}} + X_{\frac{n}{2}+1}}{2} \quad \text{bei } n \text{ gerade} \quad (5.5)$$

Unser Verfahren unterscheidet sich von dem oben Erwähnten in zwei Punkten.

Eine Sortierung der Meßwerte erfordert, durch die hohe Anzahl der Programmschleifen, viel Rechenzeit. Außerdem muß für die Zwischenspeicherung der Meßwerte ausreichend Speicherplatz zur Verfügung stehen. Um dieses zu umgehen, werden die Werte direkt mit den Grenzwerten verglichen und nur das Ergebnis (High oder Low) zwischengespeichert. Dadurch ergibt sich nicht nur eine wesentliche Verkleinerung der Datenmenge, sondern es kann auch auf eine Sortierung verzichtet werden. Im Speicher befinden sich jetzt keine Meßwerte mehr sondern nur noch deren Bewertung mit

Low=Grenzwert nicht überschritten,

oder

High=Grenzwert überschritten.

Das Filter ist weiterhin von uns dahingehend geändert, daß nicht der *Mittlere* von 64 Meßwerten, sondern der 40. Wert das Ergebnis bildet. Dadurch erreichen wir eine noch höhere Störuneempfindlichkeit des Systems. Durch eine einfache Addition der Grenzwertüberschreitungen wird festgestellt, ob dieser Wert die vorgegebene Grenze überschritten hat. Damit dieses Filter seine Funktion erfüllt, muß die Zeitdauer der Meßwertaufnahme für einen Meßzyklus die maximal erwartete Dauer der Störimpulse, mindestens um den Faktor 2 überschreiten. Der von uns gewählte Meßzyklus überstreicht die gesamte Zeitdauer zwischen zwei Störimpulsen des Netzgerätes. Damit wird erreicht, daß der Zeitraum der zu erwartenden Störimpulse durch dieses Filter ausgeblendet wird.

### 5.3 Widerstandsgrenzwert-Berechnung

Eine der Hauptaufgaben des Überwachungssystems besteht darin, die aktuellen Widerstandswerte der Septumsspulen zu berechnen und mit Grenzwerten zu vergleichen. Die Grenzwerte berechnen sich aus:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta\vartheta) \quad \text{Mit}$$

$$R_0 \text{ Septumsmagnet 1} = 14,51 \text{ m}\Omega \text{ (für } 21,4^\circ\text{C)}$$

$$R_0 \text{ Septumsmagnet 2} = 14,55 \text{ m}\Omega \text{ (für } 21,4^\circ\text{C)}$$

$$\alpha_{20-80} = 0,00396 \frac{1}{K} \text{ aus [4]}$$

$$\Delta\vartheta = 80^\circ\text{C} - 21,4^\circ\text{C} = 58,6K$$

ergeben sich für  $R_{max}SM1 = 17,88 \text{ m}\Omega$  und  $R_{max}SM2 = 17,93 \text{ m}\Omega$  als maximale Grenzwerte.

Für die Widerstandsmindestwertberechnung beziehen wir die Widerstände auf eine Temperatur von  $10^\circ\text{C}$  und erhalten damit für

$$\Delta\vartheta = 10^\circ\text{C} - 21,4^\circ\text{C} = -11,4K$$

die Mindestwiderstandswerte  $R_{min}SM1 = 13,85 \text{ m}\Omega$  und  $R_{min}SM2 = 13,89 \text{ m}\Omega$ . Diese Berechnung erfolgt außerhalb der Spezifikation von  $\alpha$ , da dieses nur von  $20 - 80^\circ\text{C}$  angegeben ist. Der dadurch entstehende Fehler kann vernachlässigt werden, da diese Grenzwerte nur benutzt werden, um Fehler im Meßaufbau oder Windungsschlüsse zu erkennen. Wir rechnen im Fehlerfall mit einer erheblichen Unterschreitung dieses Wertes.

Zur Normierung der Widerstandswerte werden diese mit einem Faktor multipliziert. Für den MB 8764 erfolgt eine Normierung auf 2. Für einen Festkommaprozessor ist dieses zwingend erforderlich, um einen Überlauf der Register zu vermeiden. Damit entstehen die Normierungsvorschriften:

$$u_{norm} = \frac{2}{50V} U \quad \text{für die Spannung} \quad (5.6)$$

$$i_{norm} = \frac{2}{2800A} I \quad \text{für den Strom} \quad (5.7)$$

Das führt zu:

$$r_{norm} = \frac{2800A}{50V} R \quad \text{für den Widerstand} \quad (5.8)$$

Es ergeben sich folgende auf 2 normierte Werte:

$$r_{max} \text{ Septumsmagnet 1} = +1,0004759$$

$$r_{max} \text{ Septumsmagnet 2} = +1,0038790$$

$$r_{min} \text{ Septumsmagnet 1} = +0,7756000$$

$$r_{min} \text{ Septumsmagnet 2} = +0,7780170$$

## 5.4 Gleichgewichtstemperatur

Da die Zeitdauer bis zum Erreichen der 80 °C-Abschaltgrenze im Fehlerfall bei niedrigen Betriebsströmen des Septums relativ lang sein kann, wird eine weitere Methode eingesetzt. Aus den in Punkt (2.3.3, S. 19) gemachten Überlegungen, werden mit Hilfe der Gleichung (2.9) zum aktuellen Betriebsstrom die Widerstandswerte *online* berechnet.

$$R = \frac{R_0}{1 + I^2 C} + \Delta R \quad \text{mit} \quad C = -\frac{R_0 \alpha}{k A}$$

Der zur Berechnung notwendige Faktor C setzt sich aus

- $r_0$  Septumsmagnet 1 = +0,81256 (normiert)
- $r_0$  Septumsmagnet 2 = +0,81480 (normiert)
- $k_1 A$  Septumsmagnet 1 = 3571,43  $\frac{W}{m^2 K}$
- $k_2 A$  Septumsmagnet 2 = 3571,43  $\frac{W}{m^2 K}$
- $\alpha$

zusammen. Die  $k A$ -Werte werden mit Hilfe der Gleichung

$$k A = \frac{U I}{\Delta \vartheta}$$

aus den Messungen am Extraktionsseptum entnommen. Auch diese Werte müssen normiert werden, so daß wir mit den Gleichungen (5.6) und (5.7) auf die folgenden Gesamtfaktoren für C kommen:

$$C_1 \text{ Septumsmagnet 1} = -0,031534$$

$$C_2 \text{ Septumsmagnet 2} = -0,031621$$

Als  $\Delta R$  wird die von uns zugelassene Toleranz eingesetzt. Diese Toleranz berechnet sich aus  $\Delta R = R_0 \alpha \Delta \vartheta$  mit  $\Delta \vartheta = 10$  K und beträgt normiert:

$$\text{Für Spule 1} = +0,032177$$

$$\text{Für Spule 2} = +0,032288$$

Mit dieser Betrachtung läßt sich eine *Abschaltkurve* berechnen. Abbildung (5.4) zeigt die Differenz der berechneten Kurve (mit  $\Delta R=0$ ) zu den aufgenommenen Meßwerten.

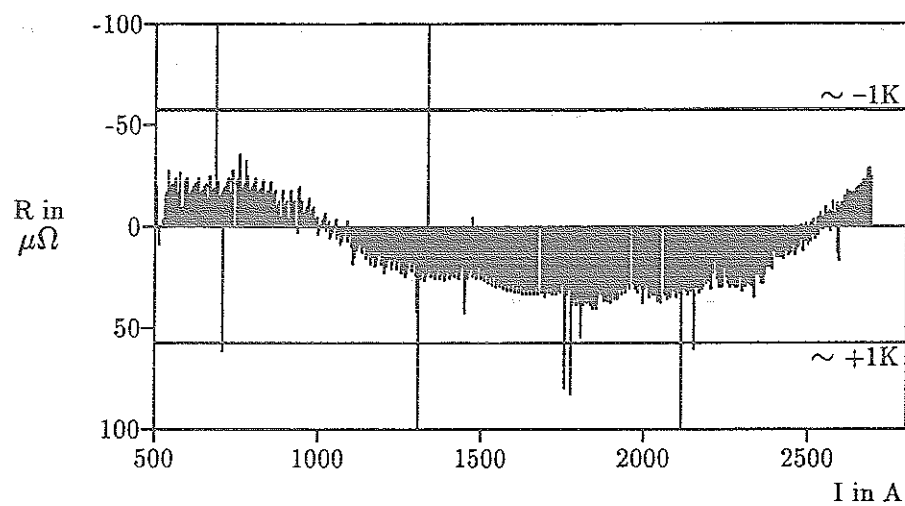


Abbildung 5.4: Widerstandsabweichung Meß- und Rechenwerte

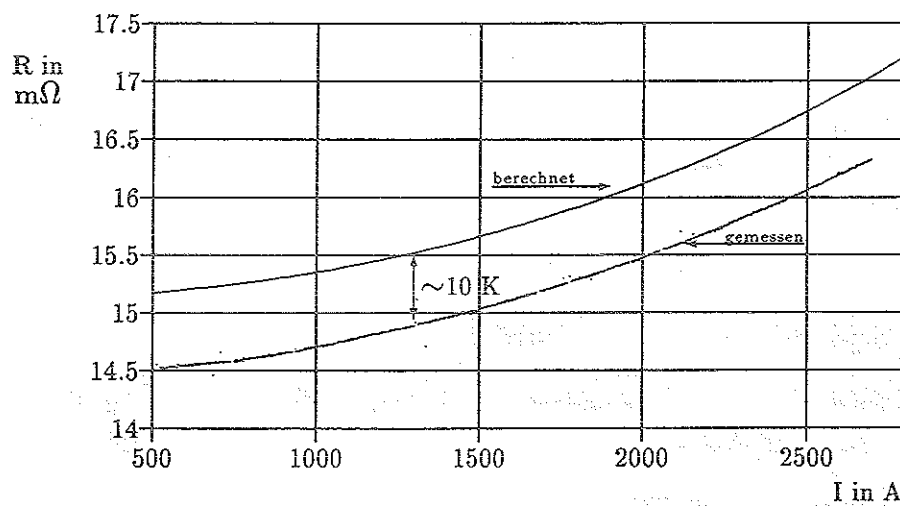


Abbildung 5.5: R über I-Grenzwertkurve und Meßkurve

Man erkennt, daß die Widerstandswerte um ca.  $\pm 40 \mu\Omega$  differieren. Das entspricht einer Temperaturdifferenz von etwa  $\pm 0,7 \text{ K}$ . Diese Toleranz können wir zulassen, wenn wir die Grenzwerte für 10 K Abweichung berechnen. Die zu erkennenden Peaks auf der Differenzkurve sind darauf zurückzuführen, daß bei dieser Meßreihe das Netzgerät *von Hand* gefahren wurde, da eine Steuerung per Rechner zu diesem Zeitpunkt nicht möglich war. Durch die manuelle Steuerung ändert sich der Strom sprunghafter als bei der Rechnersteuerung. Die dadurch resultierende Phasenverschiebung zeigt sich als Meßfehler im Widerstand, da nicht nur rein ohmsche Anteile vorhanden sind. Die Gegenüberstellung der errechneten Grenzwertkurve zur tatsächlich gemessenen Kurve ist in Abbildung (5.5) zu sehen.

## 5.5 Differenzspannungsbewertung

Die bisher beschriebenen Verfahren bieten keinen Schutz bei einer geringfügigen Änderung des Kühlwasserdurchsatzes, z. B. durch das Verstopfen eines der zwölf Kühlkreisläufe pro Spule. Zu diesem Zweck werden zusätzlich die Spannungen der beiden Magnete miteinander verglichen. Da die Septumspulen aus fertigungstechnischen Gründen nicht exakt gleich sind, besitzen sie auch unterschiedliche Widerstände. Deshalb ist ein Differenzspannungsprofil im EPROM des DSP abgelegt, welches aus 115 Tabellenwerten besteht. Hierbei wird der Strombereich von 500 – 2800 A in 20 A-Schritten abgedeckt. Diese Werte berechnen sich aus den Meßergebnissen wie folgt:

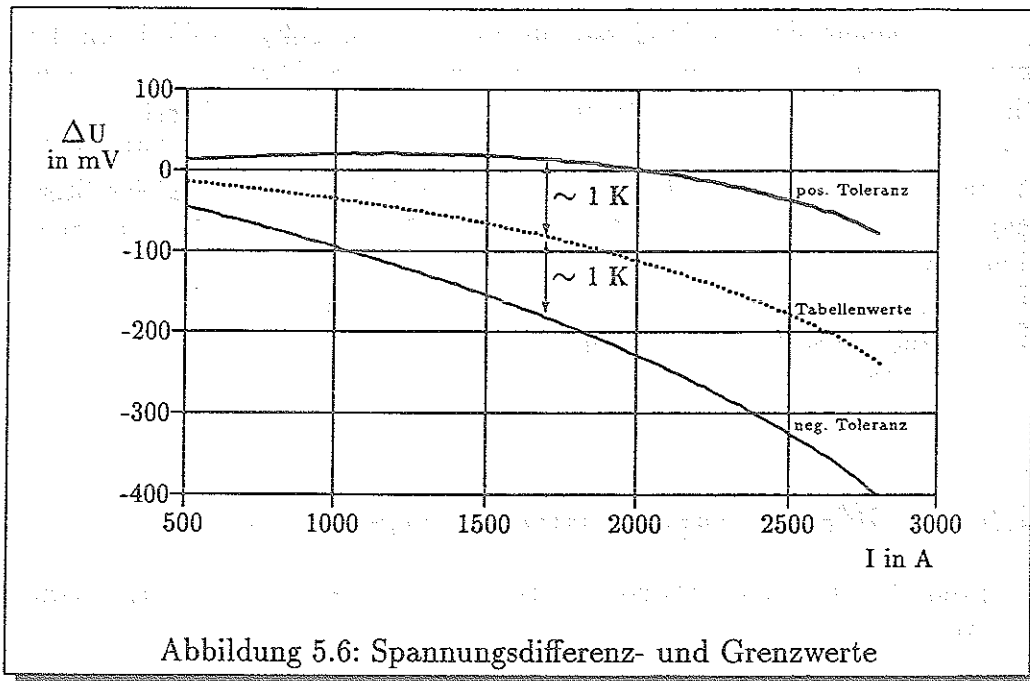
$$\Delta U_i = U_{1i} - U_{2i}$$

Die Normierung erfolgt mit Gleichung (5.6).

Die Berechnung der zulässigen Toleranzgrenzwerte erfolgt ebenfalls über den Strom mit der Gleichung

$$\Delta U_{zul.} = k_u I \quad \text{wobei} \quad k_u = R_0 \alpha \Delta \vartheta_{tol.} \quad \text{ist.}$$

Die Berechnung der Tabellenwerte für unser System erfolgt mit Hilfe des UNIX-Programms *awk* aus den Meßwerten. Mit  $R_0 = 14,5 \text{ m}\Omega$  und  $\Delta \vartheta_{tol.} = 1,0 \text{ K}$  erhält man für  $k_u$  einen Wert von 0,00321552, welcher als Konstante ebenfalls im EPROM abgelegt ist. Somit erhalten wir einen oberen und unteren Grenzwert für die Spannungsdifferenzen, nach dessen Überschreitung der Abschaltbefehl an das Netzgerät erfolgt.



Die Abbildung (5.6) zeigt die im EPROM abgelegte Differenzspannungstabelle vor der Normierung und die Abschaltgrenzen, die das System berechnet. Die Diskretisierung der Werte ist unberücksichtigt.

Die Differenzspannungsbewertung ermöglicht, es die Abschaltgrenzen für das System enger zu setzen, indem diese Methode unabhängig von der Vorlauf-temperatur arbeitet. Durch den Vergleich der beiden Spulen, die vom selben Kühlkreislauf gespeist werden, kann zudem noch der Vorlaufdruck des Kühlwassers in Grenzen variieren, ohne daß ein neuer Abgleich des Systems erforderlich wird.

# Kapitel 6

## Software

## 6.1 DSP-Emulator

Für die Programmierung des MB8764 wird uns vom ZEL ein Emulatorsystem zur Verfügung gestellt. Das System übernimmt die Steuerung des DSP während der Entwicklungsphase. Es ermöglicht, über einen PC mit serieller Schnittstelle, DSP-Programme zu editieren und assemblieren. Die assemblierten Programme können *ohne Verwendung* von PROM's, bzw. EPROM's, dem Prozessor zur Verfügung gestellt werden. Mit dem Emulator können bis zu 8 DSP's unabhängig voneinander programmiert werden.

### 6.1.1 Emulationsprogramm XBugger 640

Zur Bedienung des Emulatorsystems dient die Emulationssoftware XBugger 640. Nach Aufruf des Programms wird ein Statusfenster geöffnet, das anzeigt welche Konfiguration die Emulationshardware zu diesem Zeitpunkt hat. Die Oberfläche gestaltet sich in der Form eines Betriebssystems mit eigenem System-Prompt. Der Prompt setzt sich aus einer Ziffer (0...7, A) und einem Begrenzer (!) zusammen, wobei die Ziffer den momentan ausgewählten DSP bezeichnet (A=Alle). Hinter diesem Prompt können diverse Funktionen eingegeben werden. Im Menü werden nur die Funktionen dargestellt, die momentan zur Verfügung stehen.[13]

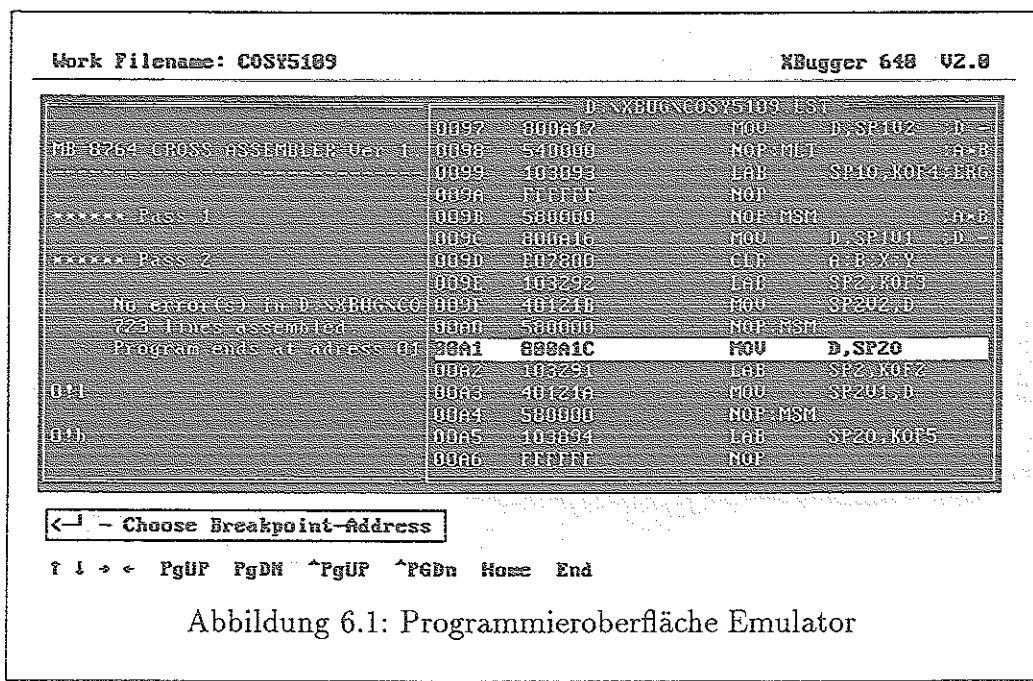


Abbildung 6.1: Programmieroberfläche Emulator

Die einzelnen Funktionen des Programms werden im Nachfolgenden er-

läutert.

### Funktionen des Emulationsprogramms

Folgende Zeichen werden zur Erklärung der Syntax verwendet:

- <abc> Durch das Kleiner- und Größerzeichen werden die Parameternamen gekennzeichnet.
- [] Alle Parameter in eckigen Klammern sind optional. Diese Parameter sind zur Steuerung des Befehls nicht unbedingt notwendig. Sie steuern meist bestimmte Funktionen eines Befehls.
- | Der senkrechte Strich trennt Parameter, die wahlweise angegeben werden können. Es darf jedoch nur ein Parameter pro Befehl verwendet werden.
- ^ Zeichen für die CTRL- oder STRG-Taste.
- ␣ Der Befehl muß mit der Eingabetaste bestätigt werden.

| Funktion    | Eingabe      | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>DSP</b>  | [0...7 A]    | Auswahl des aktuellen DSP (A=Alle)                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Edit</b> | E[+]␣        | Durch Eingabe des Befehls ohne Parameter wird das aktuelle, in der Statuszeile angegebene, Programm editiert. Das + Zeichen zeigt an, daß entweder ein neues Programm erstellt, oder ein anderes Programm editiert werden soll. Wird die darauf folgende Eingabeaufforderung mit der Eingabetaste bestätigt, wird eine Auswahlliste angezeigt. |
| <b>Xasm</b> | X            | Das aktuelle, in der Statuszeile angegebene, Programm wird assembliert.                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Load</b> | [<DSP>]L[+]␣ | Durch Eingabe des Befehls ohne Parameter wird das aktuelle, in der Statuszeile angegebene, Programm geladen. Durch Voranstellen von DSP wird die DSP-Nummer, in die das Programm geladen werden soll, vorgegeben. Das + Zeichen hat die entsprechende Funktion wie beim Edit-Befehl.                                                           |
| <b>Run</b>  | R            | Das aktuelle, in der Statuszeile angegebene, Programm wird gestartet.                                                                                                                                                                                                                                                                          |

| Funktion | Eingabe                                       | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| View     | V                                             | Zeigt das aktuelle Programm mit Programmadresse im ROM und den Objekt-Code an.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| ^Reset   | ^R <input type="button" value="←"/>           | Alle DSP's werden zurückgesetzt. Der aktuelle Status wird angezeigt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Break    | B[<Inc><Delay>]                               | Nach Eingabe des Befehls wird zunächst ein Fenster mit der Programmliste des aktuellen Programms dargestellt. Aus dieser Liste kann mit den Pfeiltasten der gewünschte <i>Breakpoint</i> markiert und mit der Eingabetaste bestätigt werden. Anschließend kann man optionale Parameter im hexadezimalen Zahlenformat eingeben. Wertebereich: $0 \leq \text{Inc} \leq \text{FFF}$ , $0 \leq \text{Delay} \leq \text{FFFF}$ . <i>Inc</i> gibt die Anzahl der nicht darzustellenden Breakpointwerte an. <i>Delay</i> gibt den Startpunkt der Anzeige vor. In der Breakpoint-Darstellung nach dem <i>Run</i> -Befehl werden alle Arbeitsregisterinhalte und Schleifenzähler, sowie die Register für die indizierte Adressierung, angezeigt. |
| MBtoBIN  | T                                             | Erzeugt drei 8-Bit breite Binärdateien zur (E)PROM-Programmierung.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Clear    | C                                             | Löscht den zuletzt definierten Breakpoint.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Step     | S[<NumOfBP>] <input type="button" value="←"/> | Mit dem Parameter <i>NumOfBP</i> wird angegeben, wieviele Registerinhalte angezeigt werden sollen. Danach hält das Programm an, bis eine Taste gedrückt wird und stellt den nächsten Block dar. Diese Option kann ausgeschaltet werden indem man S ohne Parameter, oder mit <i>NumOfBP</i> =0, aufruft.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Monitor  | M <input type="button" value="←"/>            | Nach Anhalten des Programms kann mit dem Befehl <i>Monitor</i> ein Speicher ausgelesen werden, der nach einem Programmstart die ersten 1024 Programmadressen enthält. Damit wird es möglich den Programmablauf zu verfolgen. Diese Daten werden zusätzlich in einer Datei mit der Extension FIF gespeichert.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| CLock    | O< 0...3 > <input type="button" value="←"/>   | Einstellen der DSP-Taktfrequenz:<br>0: Externer Takt<br>1: 4 MHz<br>2: 8 Mhz<br>3: 16 Mhz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

| Funktion | Eingabe                                                                                        | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                   |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Projekt  | P<PFileName>  | Mit dem Befehl <i>Projekt</i> und dem Parameter <i>PFileName</i> wird eine Stapeldatei, die zuvor angelegt werden muß, abgearbeitet. Diese Stapeldatei kann die Befehle <i>X</i> , <i>L</i> , <i>R</i> und <i>O</i> enthalten. |
| Delete   | D                                                                                              | Löscht sämtliche Dateien, die zum ausgewählten Quellcode-Programm gehören (.ASM, .LST, .HEX, .FIF).                                                                                                                            |
| Help     | H                                                                                              | Anzeigen der Kurzbeschreibung.                                                                                                                                                                                                 |
| Quit     | Q                                                                                              | Verlassen des Emulatorprogramms.                                                                                                                                                                                               |

### 6.1.2 Assembler XASM. EXE

Der Assembler generiert aus dem Quellcode eine List-Datei (.LST) die Zeilennummern, Adressen, Programmcode und das Quellprogramm enthält. Weiterhin wird eine Datei mit dem Maschinencode für den DSP im Intel-HEX-Format (.HEX) erzeugt. Diese Datei kann in den Emulator geladen und getestet werden. Die 24-Bit breit organisierten Programmbefehle aus dem Intel-HEX-Code können durch ein integriertes Programm, namens MBtoBIN, in drei 8-Bit organisierte Binärdateien konvertiert werden. Die drei entstehenden Binärdateien erhalten die Dateinamenserweiterungen H(igh), M(iddle) und L(ow) und sind mit fast jedem handelsüblichen Programmiergerät in (E)PROM's übertragbar.

### 6.1.3 Editor XEDIT. EXE

Zum Editieren des Quellprogramms wird ein ASCII-Editor benötigt. Die Wahl des Editors bleibt dem Benutzer freigestellt. Die einzigen Voraussetzungen sind, daß der Editor in *XEDIT. EXE* umbenannt wird und in der Lage ist, über Kommandozeile den Dateinamen als Parameter zu übernehmen.

## 6.2 Programmbeschreibung

Das Programm besteht hauptsächlich aus zwei voneinander unabhängigen Filteralgorithmen:

Das erste Filter bildet ein Butterworth-Tiefpaßfilter 2.Ordnung nach. Alle Signale werden durch dieses Filter, dessen Grenzfrequenz für 1 kHz berechnet wurde, geglättet.

Bei dem zweiten Filter handelt es sich um ein Zentralwert- oder Medianwertfilter.

Die Hauptschleife des Programms beginnt mit dem Einlesen und der Tiefpaßfilterung der drei Meßwerte. Die AD-Wandler werden sofort nach dem Einlesen der Werte neu gestartet, damit die Ergebnisse der Wandlung im nächsten Schleifenzyklus sofort zur Verfügung stehen.

Der Watchdog bekommt ein Signal, um ihm die korrekte Abarbeitung des Programms anzuzeigen.

Die Flags für die LED's werden gelöscht, und das Vorhandensein des Stromsignals wird geprüft. Dazu verlangt das Programm bei einer Spannung von mindestens 3 V, einen Strom größer 150 A. Wird dieser Wert nicht erreicht, wird ein Ereigniszähler (*IERROR*) inkrementiert.

Für beide Wicklungen werden nun anhand der ermittelten Spannungs- und Stromwerte die Widerstände berechnet. Zusätzlich wird zum aktuellen Stromwert ein *erwarteter* Widerstandswert bei Gleichgewichtstemperatur (+ 10 K) errechnet. Nun werden die aktuellen Wicklungswiderstände mit den Widerstandsgrenzwerten verglichen. Wenn eine Überschreitung des Maximalwertes oder eine Unterschreitung des Minimalwertes erfolgt, wird auf die entsprechenden Ereigniszähler eine 1 addiert.

Die Differenz der aktuellen Spannung wird gebildet. Die maximal zulässige Abweichung der Spannungsdifferenz wird berechnet.

Es wird überprüft, ob der zur Messung festgelegte Mindeststrom von 500 A erreicht ist. Ist dies nicht der Fall, werden alle Ereigniszähler, mit Ausnahme von *IERROR*, auf Null gesetzt und die LED-Flags gelöscht.

Bei Erreichen des Mindeststroms wird das Flag *LED-Messung* gesetzt. Nach Berechnung des Tabellenplatzes für den Spannungsdifferenzwert werden die Abweichungen ausgewertet. Sind die Grenzwerte überschritten, erfolgt je nach positiver oder negativer Abweichung, eine Inkrementierung der Ereigniszähler *STDU2* bzw. *STDU1*. Es folgt ein Vergleich des aktuellen Widerstandswertes mit dem 80 °C-Abschaltgrenzwert. Bei Überschreitung dieser Grenze werden die Ereigniszähler *STW1MA*, oder *STW2MA* hochgezählt. Der Schleifenzähler überprüft die Anzahl der Durchläufe der Hauptschleife. Ist diese noch nicht 64 mal durchlaufen worden, wird die Schleife neu gestartet.

Der aktuelle Stromwert wird in einem Stack gespeichert der aus 16 Datenworten besteht. Vor der Speicherung des Stromwerts wird der Stack aufgerückt, um Platz für den aktuellen Wert zu schaffen. Bei diesem Ringtausch wird der älteste Stromwert überschrieben.

Danach werden alle Ereigniszähler ausgewertet. Hat ein Ereigniszähler den Wert 50 überschritten, wird ein entsprechendes LED-Flag gesetzt.

Dieses beginnt mit der Ereigniszählerauswertung der 80 °C-Abschaltgrenze. Bevor die restlichen Ereigniszähler ausgewertet werden, erfolgt ein Test auf eine Stromrampe durch Differenzbildung zwischen dem ersten und letzten Stromstackwert. Ist die Differenz größer als 8,9 A, wird das Flag LED-Rampe gesetzt. In diesem Fall wird die Auswertung der nachfolgenden Ereigniszähler übersprungen:

Gleichgewichtstemperaturüberschreitung 1 *STW1MM*

Gleichgewichtstemperaturüberschreitung 2 *STW2MM*

Mindestwiderstandsunterschreitung 1 *STW1MI*

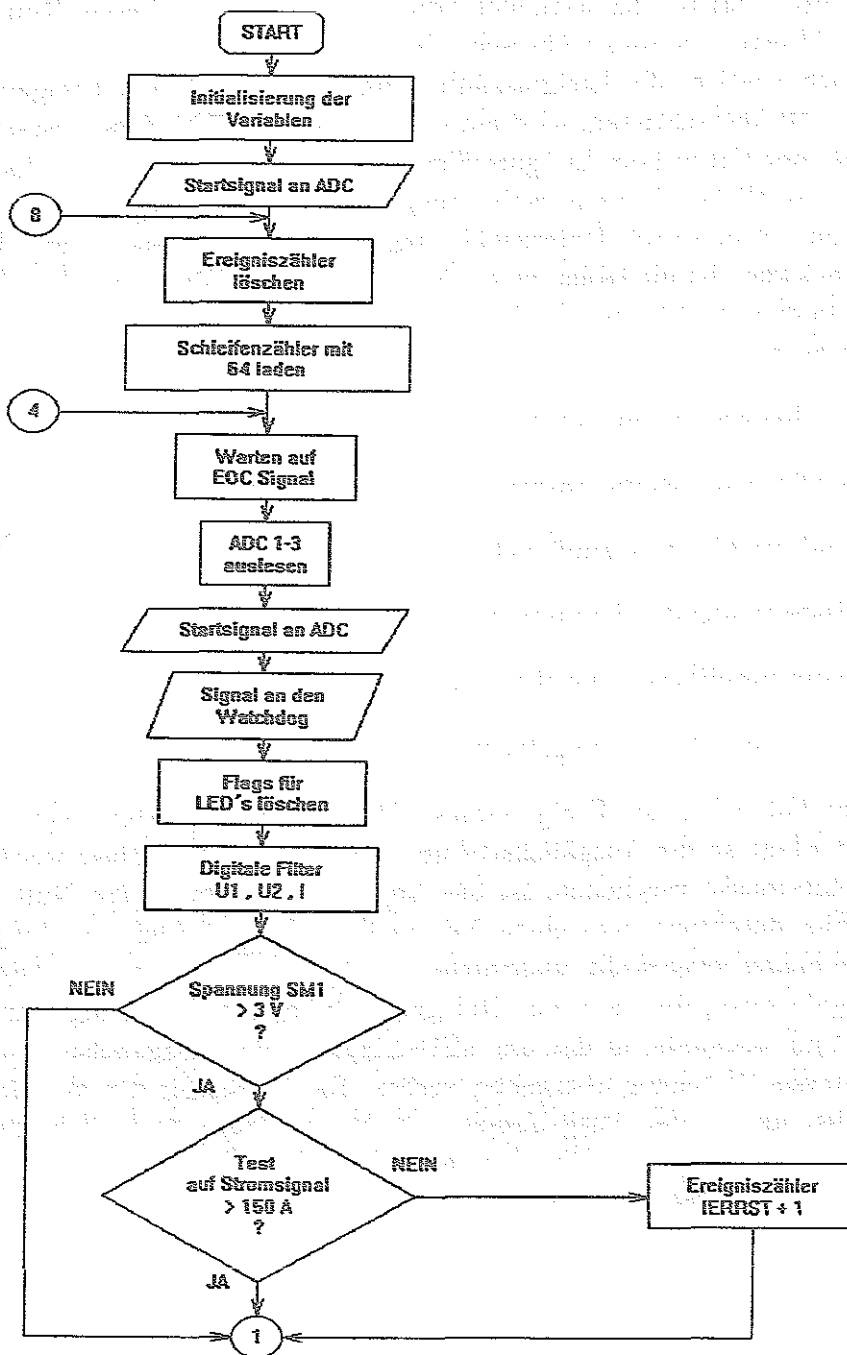
Mindestwiderstandsunterschreitung 2 *STW2MI*

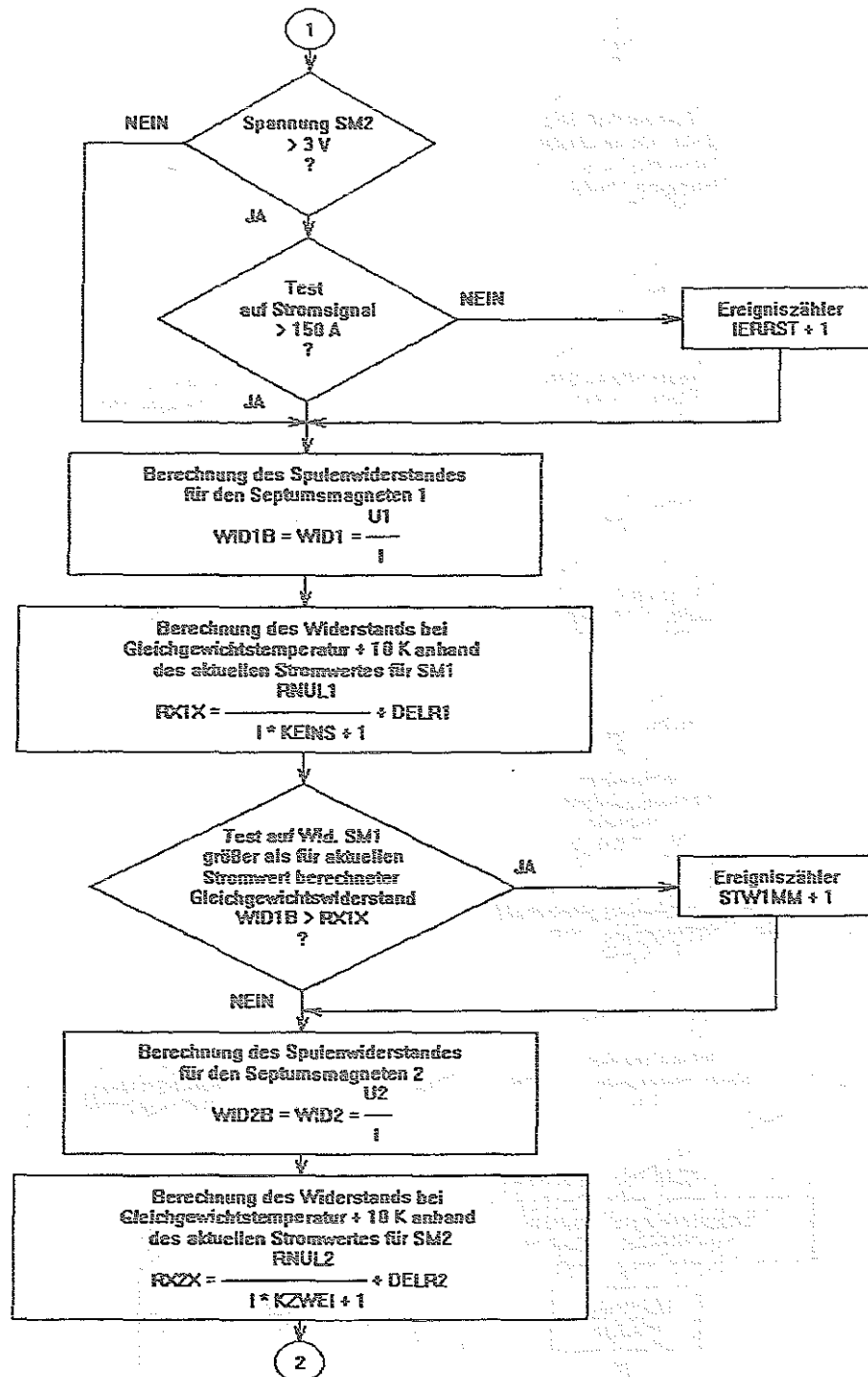
Spannungsdifferenz positiv überschritten *STDU1*

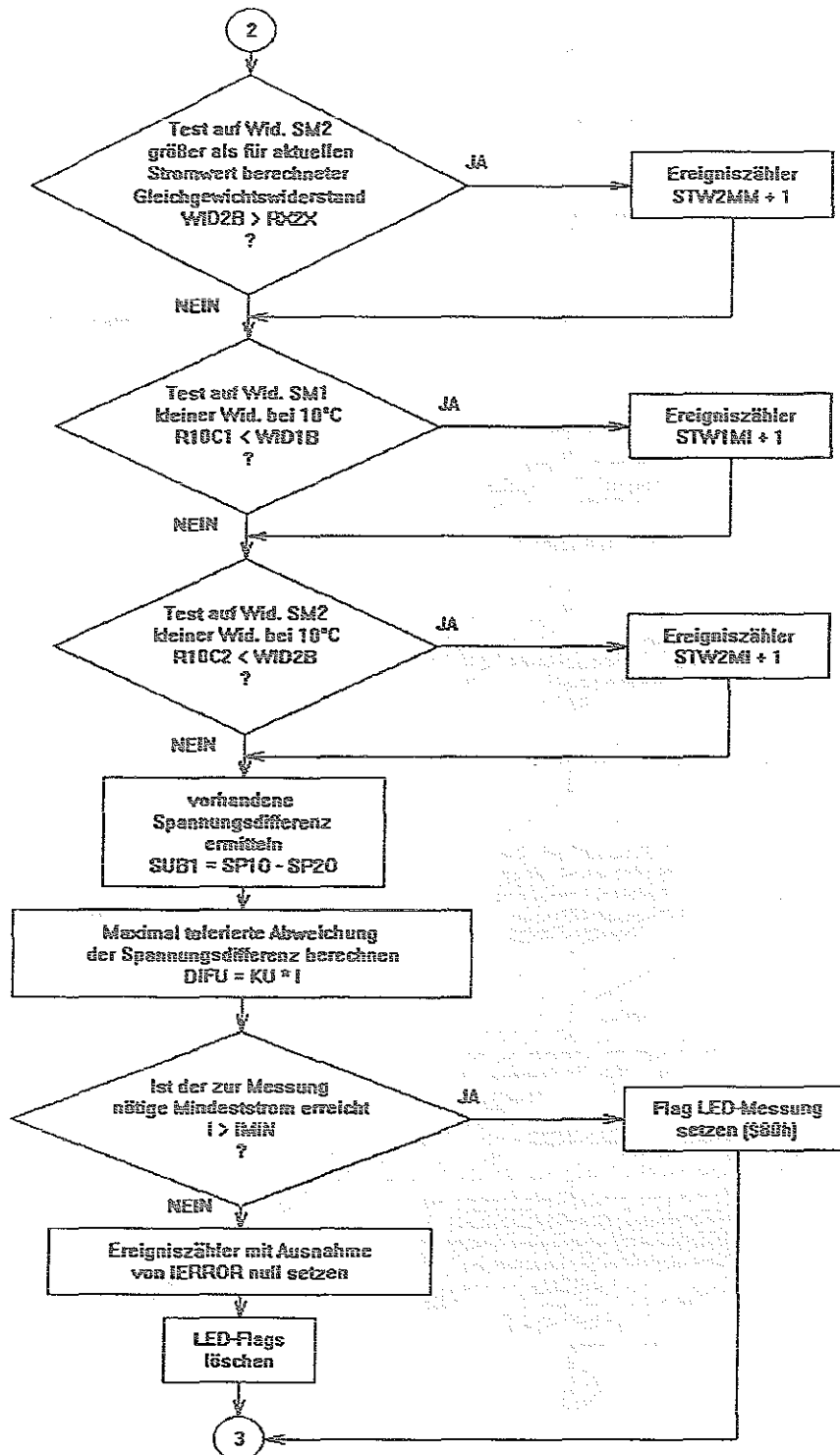
Spannungsdifferenz negativ überschritten *STDU2*

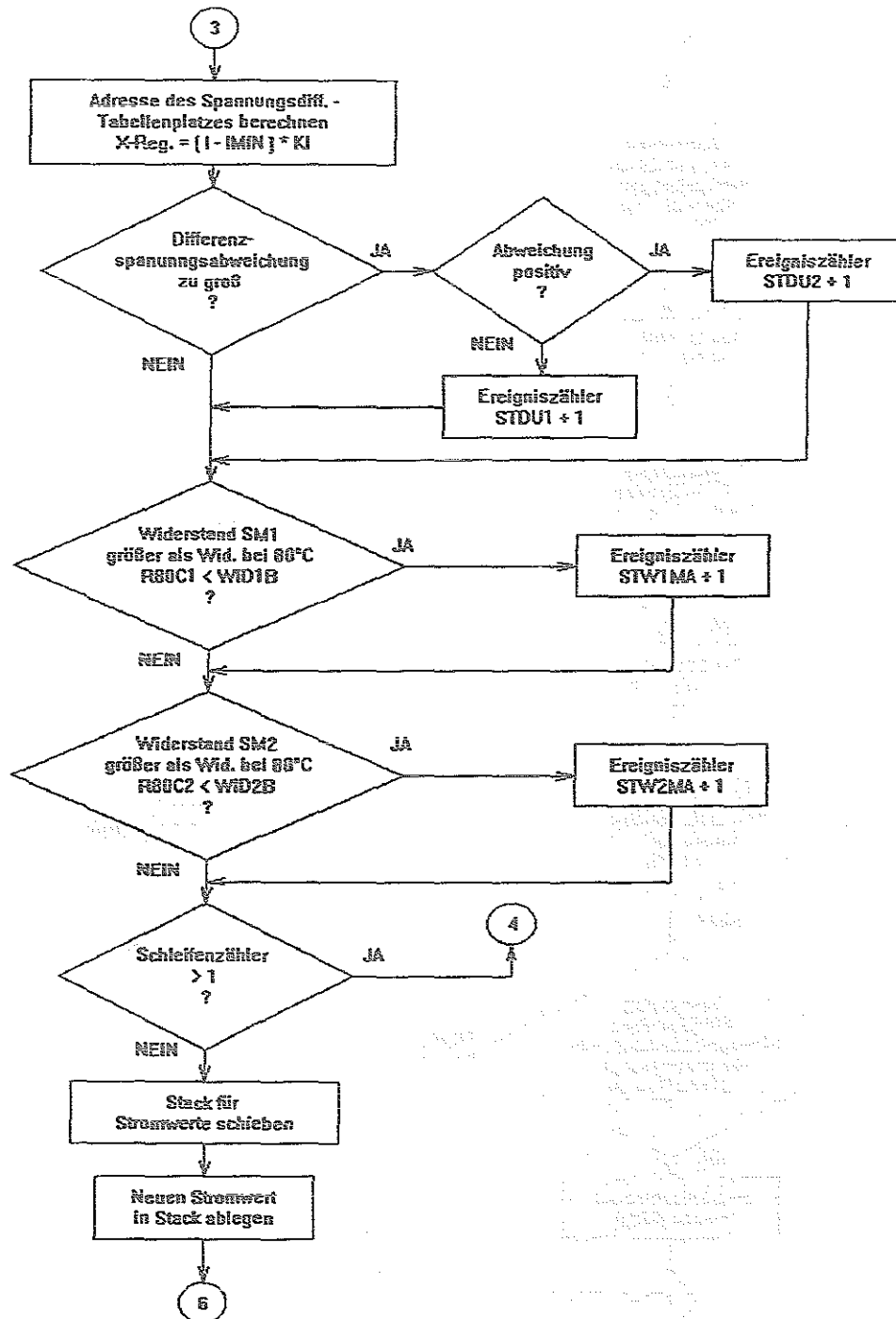
In jedem Fall wird der Ereigniszähler *IERRST* ausgewertet. Nun werden die LED-Flags an die Ausgabekarte übertragen. Die LED-Flags werden mit einer Fehlermaske verglichen. Ist das Vergleichsergebnis gleich Null, wurde kein Fehler detektiert, was einen Neustart der Hauptscheife zur Folge hat. Wird ein Fehler festgestellt, übermittelt das Programm ein Abschaltsignal an die Ausgabekarte, die dann das Netzgerät abschaltet. Das Programm läuft in eine Endlosschleife, in der die LED-Flags an die Ausgabekarte und ein Signal an den Watchdog übergeben werden. Das Signal für den Watchdog ist notwendig, um an der Ausgabekarte die Anzeige aufrecht zu erhalten, daß der DSP korrekt arbeitet. Das Programm kann in diesem Zustand nur durch einen *Hardwarereset* zurück gesetzt werden.

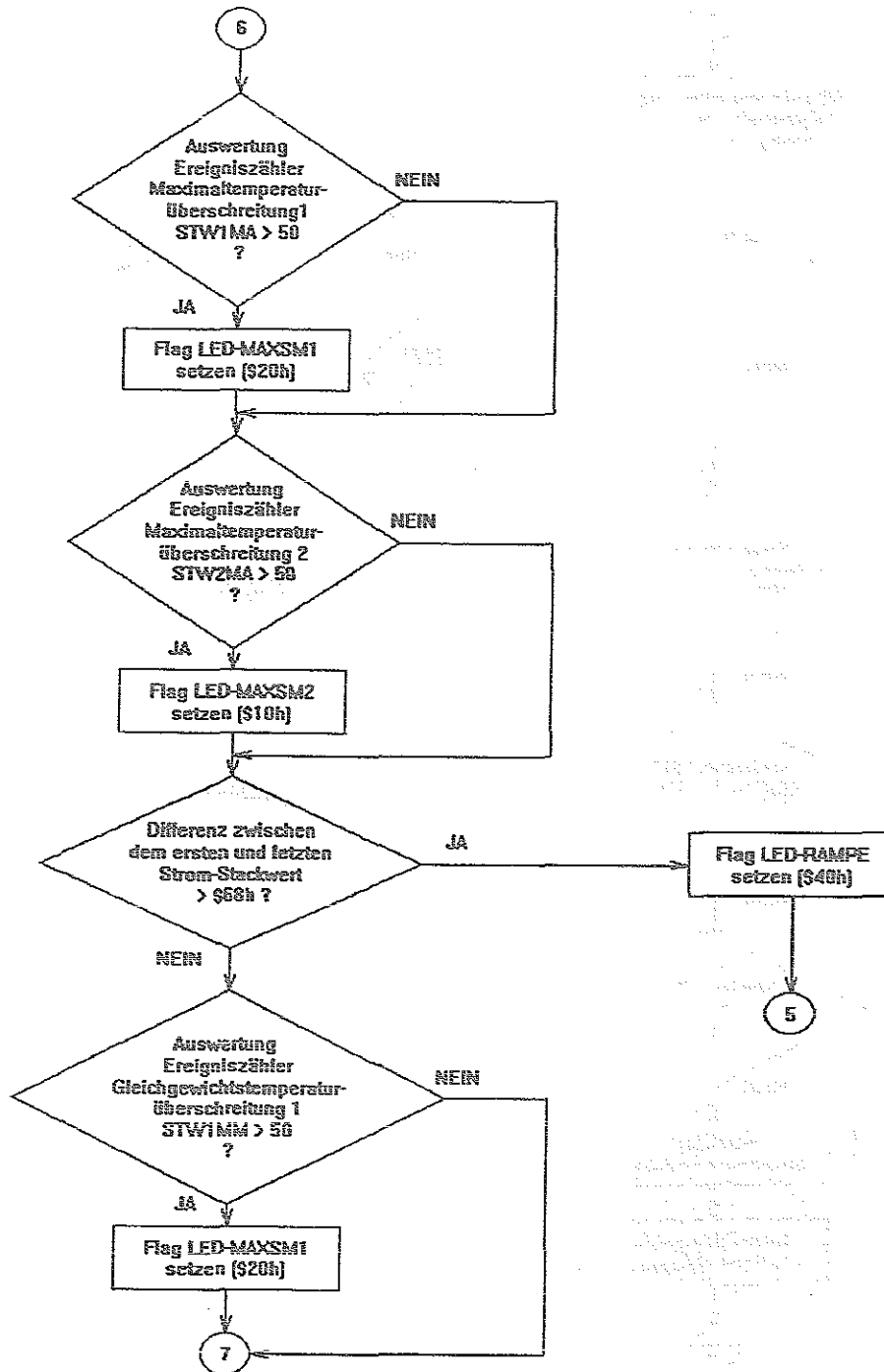
## 6.2.1 Flußdiagramm

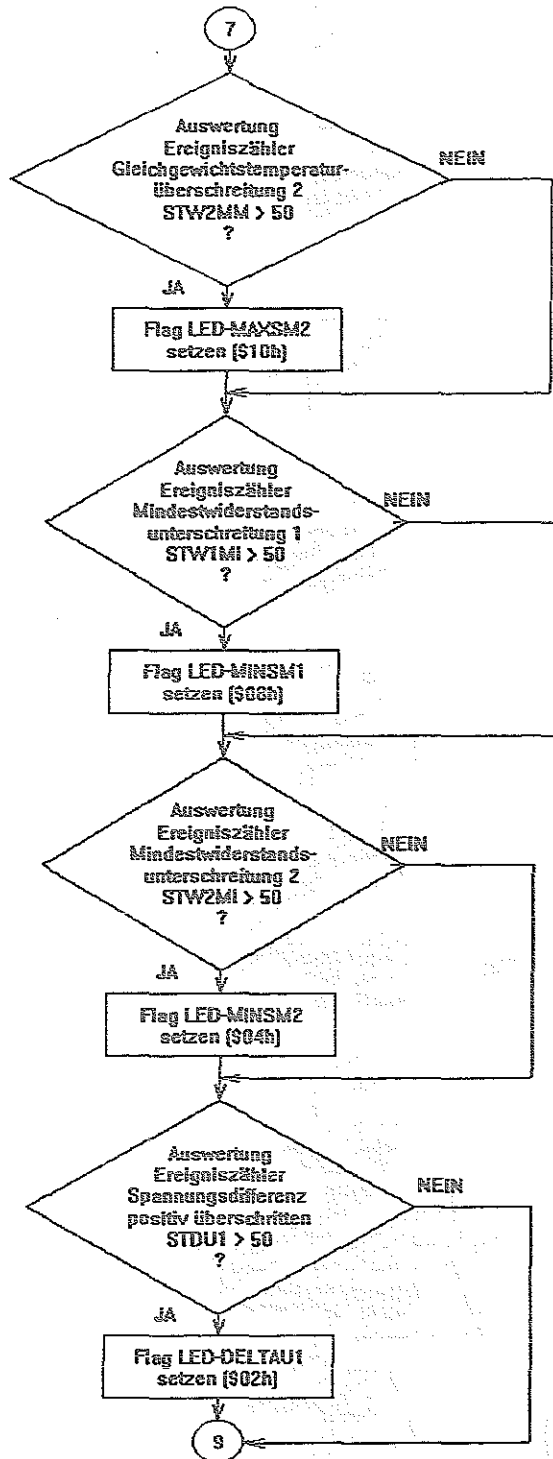


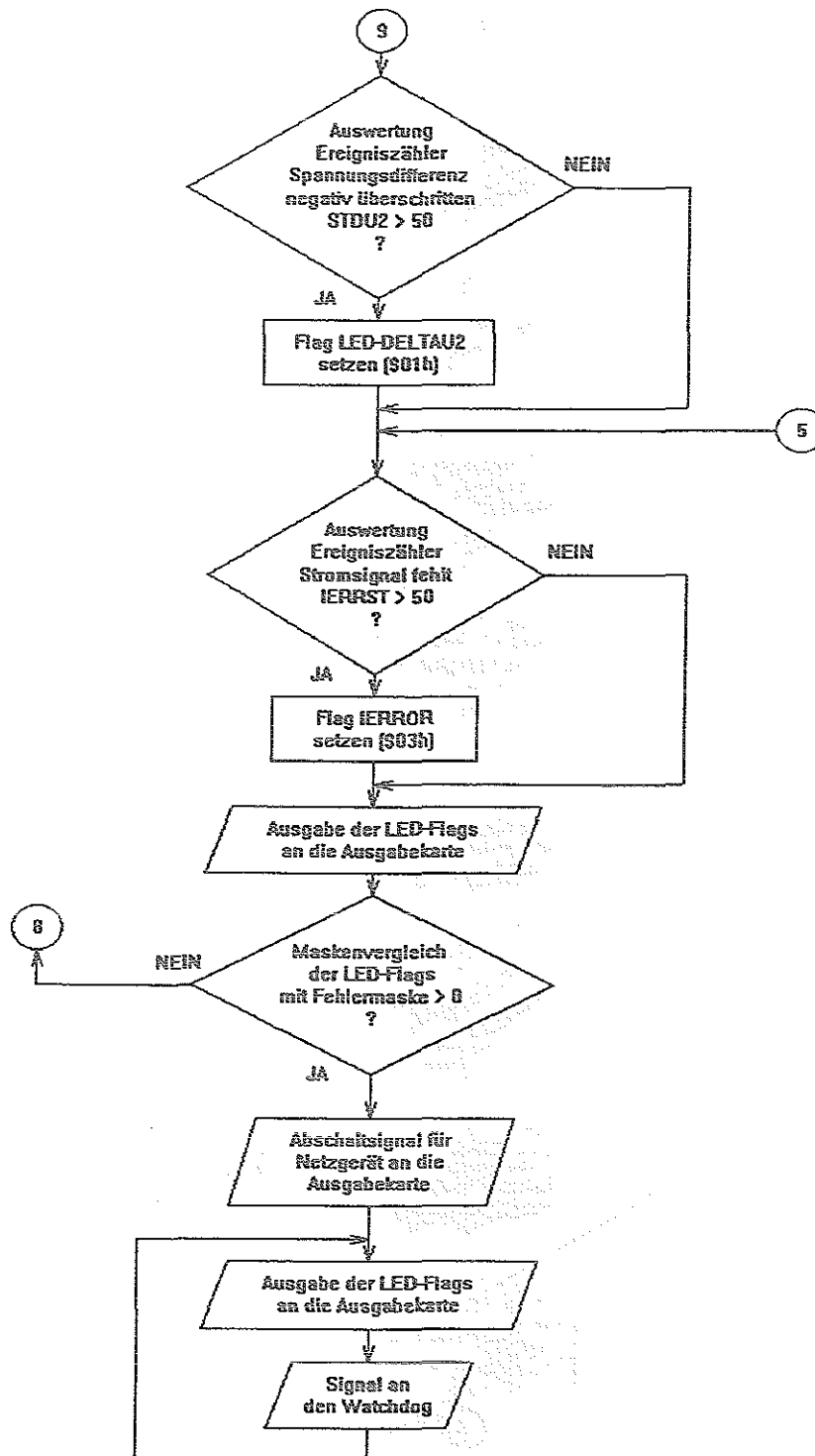












## Kapitel 7

# Testaufbau

Zum Test unseres Temperaturüberwachungssystems steht das magnetische Extraktionsseptum nicht zur Verfügung, da COSY im Strahlbetrieb, aus strahlenschutztechnischen Gründen, nicht betreten werden darf. Desweiteren ist eine Fehlersimulation zu *Testzwecken* am Septum selbst nicht möglich, da bei einer Fehlfunktion des Systems, die Zerstörung der Septumsspulen durch andere Schutzmaßnahmen nicht verhindert werden kann. Für den Testaufbau ist kein Magnet mit einer dem Septum vergleichbaren Stromdichte verfügbar. Um dennoch eine relativ realistische Simulation aufzubauen, wird ein Oktupolmagnet eingesetzt. Mit dem Testaufbau soll ein Fehler in der Wasserkühlung simuliert werden, um das Temperaturüberwachungssystem zu testen.

## 7.1 Oktupolmagnet

Der Oktupol ist ein Magnet mit acht Wicklungen und einem Kern aus ungeblechtem Eisen. Der Magnet war ursprünglich für den Betrieb am Magnet-spektrometer *BIG KARL* konzipiert, wurde dort aber nie eingesetzt.

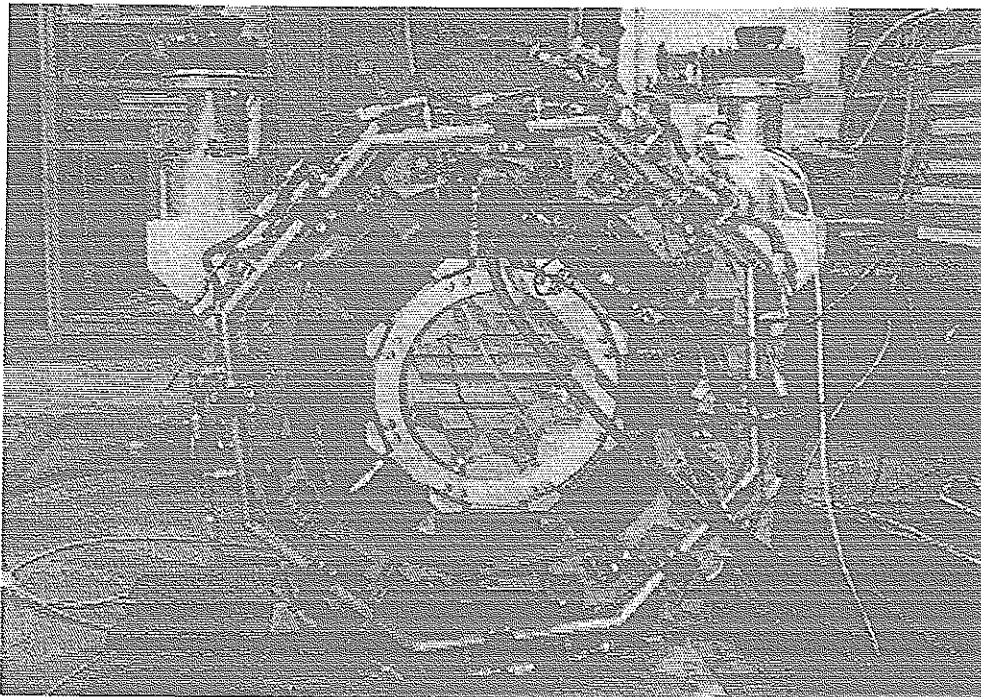


Abbildung 7.1: Oktupolmagnet

Jede Wicklung des Oktupols wird durch jeweils zwei Anschlüsse im Vorlauf und einem Anschluß im Rücklauf mit Kühlwasser versorgt. Ein Betrieb oberhalb des Nennstroms von 250 A ist wegen des maximal erreichbaren Kühlwasserdurchsatzes von  $76 \frac{l}{h}$  möglich [4]. Ein Test zeigt, daß die am Kühlwasserrücklauf befindlichen Thermoklicks, auch bei einem Betriebsstrom von 400 A, bei Kühlwasserunterbrechung, schnell genug auslösen ohne die Wicklung zu gefährden.

|          |   |      |                 |
|----------|---|------|-----------------|
| $I_n$    | = | 250  | A               |
| $A$      | = | 20   | mm <sup>2</sup> |
| $R_{20}$ | = | 30,6 | mΩ              |
| $L$      | = | 5-10 | mH              |
| $m_{Cu}$ | = | 6,12 | kg              |

Tabelle 7.1: Technische Daten Oktupol

Für den Testbetrieb werden zwei der acht Wicklungen in Serie geschaltet. Die restlichen 6 Wicklungen bleiben unbenutzt. Weiterhin wird einer der zwei Kühlwasservorlaufanschlüsse einer Wicklung mit einem Magnetventil versehen, um einen *Teilausfall* der Kühlung simulieren zu können.

## 7.2 Heinzinger Netzgerät

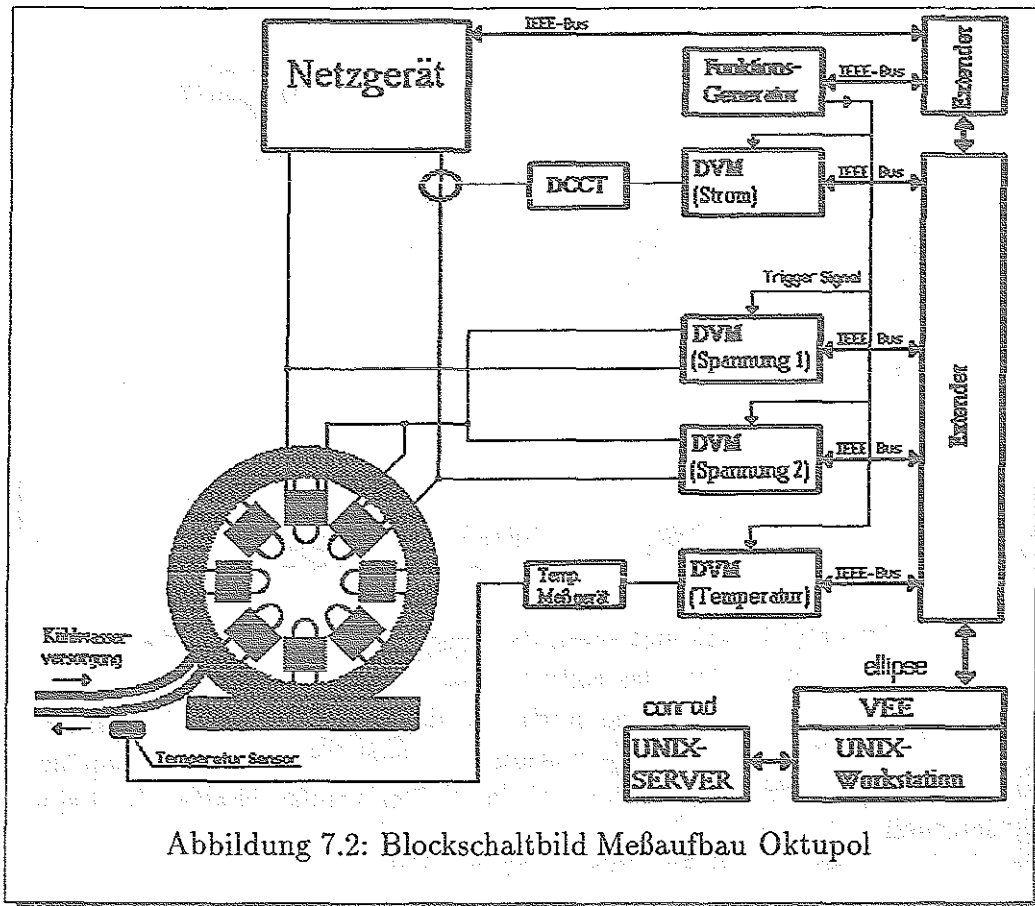
Zur Versorgung des Oktupolmagneten wird das Netzgerät TNs 65 - 65000 der Fa. Heinzinger eingesetzt. Das Gerät arbeitet als Stromquelle und besteht aus zwei getrennten, jedoch zusammenwirkenden Regelkreisen; einer thyristorgesteuerten Spannungsquelle und einer Transistorserienstabilisierung [10]. Die thyristorgesteuerte Spannungsquelle besteht aus drei Trenntransformatoren, einer gesteuerten 6-pulsigen Gleichrichterbrücke, Siebdrossel und Ladekondensator. Die Spannungsquelle liefert am Ladekondensator eine Spannung, die um einen festen Betrag höher ist als die Ausgangsspannung. Die Spannungsdifferenz wird am Serientransistor zur Ausregelung der Restwelligkeit benutzt. Der Ausgang des Netzgerätes ist potentialfrei.

|                              |                                                    |
|------------------------------|----------------------------------------------------|
| Netzanschluß:                | 380 V                                              |
| max. Ausgangsspannung:       | 65 V                                               |
| max. Ausgangsstrom:          | 1000 A                                             |
| <b>Stromstabilisierung</b>   |                                                    |
| Einstellbereich:             | von ca. 0,5% bis Nennstrom                         |
| Regelgenauigkeit:            |                                                    |
| bei $\pm 10\%$ Netzänderung: | $\pm 5 \times 10^{-5} v$ . Endwert $\pm 200 \mu A$ |
| bei $\pm 10\%$ Laständerung: | $\pm 1 \times 10^{-4} v$ . Endwert $\pm 100 \mu A$ |
| Restwelligkeit:              | $5 \times 10^{-4} v$ . Endwert effektiv            |

Tabelle 7.2: Technische Daten Heinzinger Netzgerät

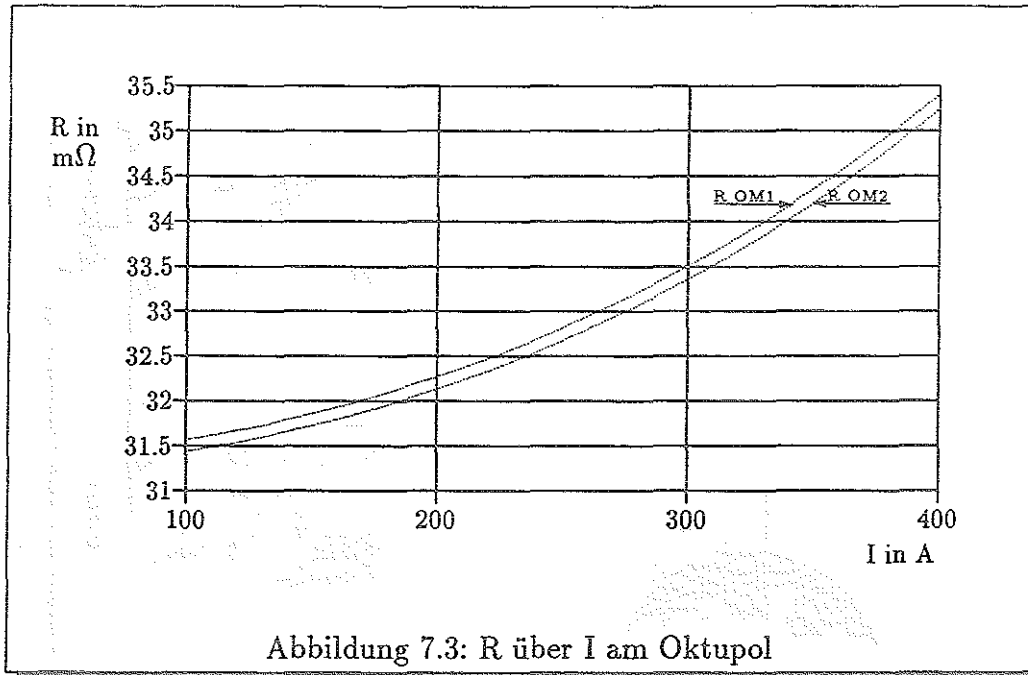
Das Netzgerät ist lokal oder über eine eingebaute IEEE-488-Schnittstelle per Rechner zu bedienen. Zur Überwachung dient, wie beim Földi-Netzgerät, eine Interlockschleife mit Thermoklicks. Für den Testbetrieb werden zusätzlich die Interlockkontakte der Ausgabekarte unseres Temperaturüberwachungssystems benutzt.

### 7.3 Messung am Oktupol



Um die erforderlichen Parameter für unser System zu ermitteln, sind am Oktupol die gleichen Messungen wie am magnetischen Extraktionsseptum notwendig. Ebenfalls kommen, mit Ausnahme des DCCT, die gleichen Meßgeräte zum Einsatz. Die Strommessung wird mit einem DCCT der Fa. HO-LEC (2000 SH) durchgeführt. Dieser Nullflußstromwandler liefert bei einem maximal zu messenden Strom von 2 kA eine Ausgangsspannung von 10 V.

Das Auslesen der Meßgeräte, sowie die Auswertung der Ergebnisse erfolgt mit der UNIX-Workstation ellipse.



In Abbildung (7.3) erkennt man, daß das Widerstandsverhalten des Oktupolmagneten ähnlich dem des Extraktionsseptums ist. Der Kaltwiderstand liegt mit ca. 31 mΩ doppelt so hoch wie der des Septums. Der Oktupol erreicht die 80 °C-Abschaltgrenze schon bei einem Strom von knapp über 400 A. Wie am Extraktionsseptum ist das Widerstandsverhalten der beiden Spulen zueinander, bis auf den Unterschied im Kaltwiderstand, fast identisch. Die Widerstandsdifferenz bei 22,5 °C beträgt 130 μΩ.

Wegen des geringeren möglichen Kühlwasserdurchsatzes am Oktupolmagneten, und der damit erreichbaren niedrigeren Stromdichte, ist das Temperatur-Zeitverhalten weitaus träger als am Extraktionsseptum.

Die am Septum meßbaren Spannungsripple treten in ähnlicher Form auch am Oktupol auf. Auch die auf dem Stromsignal festgestellten Störimpulse gleichen denen, die man am Földi-DCCT messen kann.

Aufgrund dieser Ergebnisse kommen wir zu dem Schluß, daß dieser Testaufbau den Verhältnissen am Septum soweit entspricht, daß er für einen Testbetrieb unseres Temperaturüberwachungssystems ausreicht. Für den Test müssen die Eingangsbeschaltungen unseres Systems auf die am Oktupol vorhandenen Strom- und Spannungsbereiche angepaßt werden.



## Zu 1:

Bei der Funktionsprüfung wird die obere Widerstandsabschaltgrenze getestet, indem der Oktupol mit einem Strom beaufschlagt wird, der über dem erforderlichen Mindeststrom liegt. Danach wird die Kühlwasserzufuhr unterbrochen. Dieses erfolgt durch:

- *Abschalten der Kühlwasserpumpen.*  
Die gesamte Kühlwasserzufuhr wird unterbrochen.
- *Abschalten durch das Magnetventil*  
Die Hälfte der Kühlwasserzufuhr einer Wicklung wird unterbrochen.

Bei einer kompletten Unterbrechung des Kühlwasserkreislaufs erhitzen sich die beiden Oktupolspulen gleichermaßen. Das System schaltet das Netzgerät nach Erreichen des maximalen Wicklungswiderstandes ab und zeigt die Überschreitung des Grenzwertes (MaxSM1, MaxSM2) an.

Wird das Kühlwasser durch die Abschaltung des Magnetventils unterbrochen, erhöht sich die Temperatur nur in der Spule 1 des Oktupols. Da der maximale Wicklungswiderstand in diesem Fall später erreicht wird als die maximal zulässige Differenzspannung zwischen den Spulen, schaltet die Überwachung das Netzgerät mit dem Fehler  $\Delta U1$  ab. Der Test für  $\Delta U2$  erfolgt durch *Zudrücken* einer der zwei Kühlwasserzuleitungen des Oktupolmagneten 2. Auch bei diesem Test schaltet das Netzgerät mit der richtigen Fehlermeldung ( $\Delta U2$ ) ab.

Die Überprüfung der Überwachung des Widerstandsminimalwertes erfolgt durch *Abziehen* der Spannungsmeßleitung. Das Netzgerät schaltet ab. Die Fehleranzeige für MinSM1 bzw. MinSM2, sowie die Anzeigen  $\Delta U1$  oder  $\Delta U2$  leuchten auf.

Wird die Meßleitung für den Strom unterbrochen, schaltet das System das Netzgerät mit der Fehlermeldung  $\Delta U1$  und  $\Delta U2$  ab.

Beim Verfahren des Betriebstromes fällt uns auf, daß das Überwachungssystem Fehler anzeigt. Wir führen diese Meldungen darauf zurück, daß sich die von uns berechneten Widerstandswerte erst kurz nach Erreichen des Sollstromes einstellen. Die Zuordnung des Stromwertes zum Widerstandswert ist somit, in diesem kurzen Zeitraum, nicht korrekt.

Eine Erhöhung der zulässigen Grenzwerte kommt nicht in Frage, da das System später reagieren würde. Wir haben uns entschlossen das DSP-Programm dahingehend zu erweitern, daß ein Teil der Auswertung für den Zeitraum einer Stromänderung  $+ 40 \text{ ms}$  ausgesetzt wird. Die Höhe der Stromänderung muß über  $31 \frac{A}{s}$  betragen. In diesem Fall findet nur eine Auswertung der  $80^\circ\text{C}$ -Abschaltgrenze statt. Die LED *Rampe* leuchtet.

**Zu 2:**

Die Langzeitstabilität des Temperaturüberwachungssystems, also eine einwandfreie Funktion ohne Fehlabschaltung, wird über mehrere Stunden getestet. Dieser Test wurde mit verschiedenen Betriebsströmen erfolgreich durchgeführt.

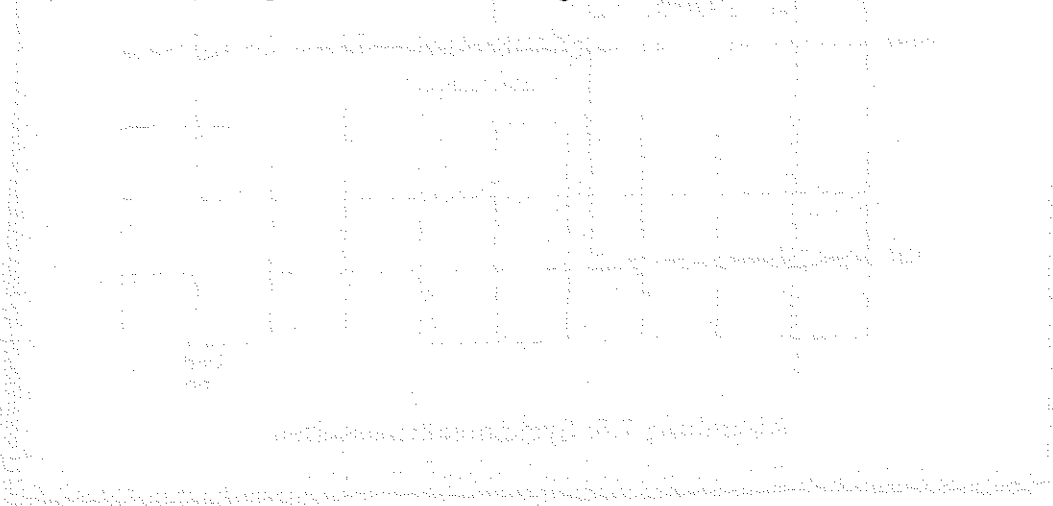
**Zu 3:**

Nachdem das System komplett im 19"-Einbaurahmen mit Abdeckungen versehen ist, werden mehrere Tests unter rauen Umgebungsbedingungen durchgeführt. Hierzu werden verschiedene Elektrogeräte (alter Rasierapparat mit Gleichstrommotor, Fön, Lötkolben mit Zweipunkt-Regler, Bohrmaschine) in unmittelbarer Nähe des Systems und dessen Meßleitungen betrieben. Eine Fehlabschaltung erfolgt nicht.

**Zu 4:**

Die Ermittlung der Abschalt- und Reaktionszeiten erfolgt, indem wir eine Spannungsmeßleitung vom Oktupolmagnet 1 abziehen. Dadurch werden die Fehler  $\Delta U_2$  und MinSM1 provoziert. Der Test liefert eine Aussage über die Zeitdauer vom Erreichen der Abschaltgrenze, bis zur Reaktion des Systems bzw. des Netzgerätes. Eine Aussage über die Zeit, von der Unterbrechung der Kühlung, bis zum Abschalten des Netzgerätes, erfolgt nicht, da durch die größere *Trägheit* des Oktupolmagneten kein Bezug zum Extraktionsseptum möglich ist.

In Abbildung (7.5) sind die Meßspannung 1 (oberes Signal) und der TTL-Pegel der Ausgabekarte (Abschaltsignal an das Netzgerät) zu erkennen. Es werden 20 Messungen durchgeführt. Die auf diese Weise ermittelten Zeiten liegen zwischen 1,3 und 3,4 ms. Bei diesen Zeiten handelt es sich um die Dauer, die das Programm zur Erkennung eines Fehlers benötigt.



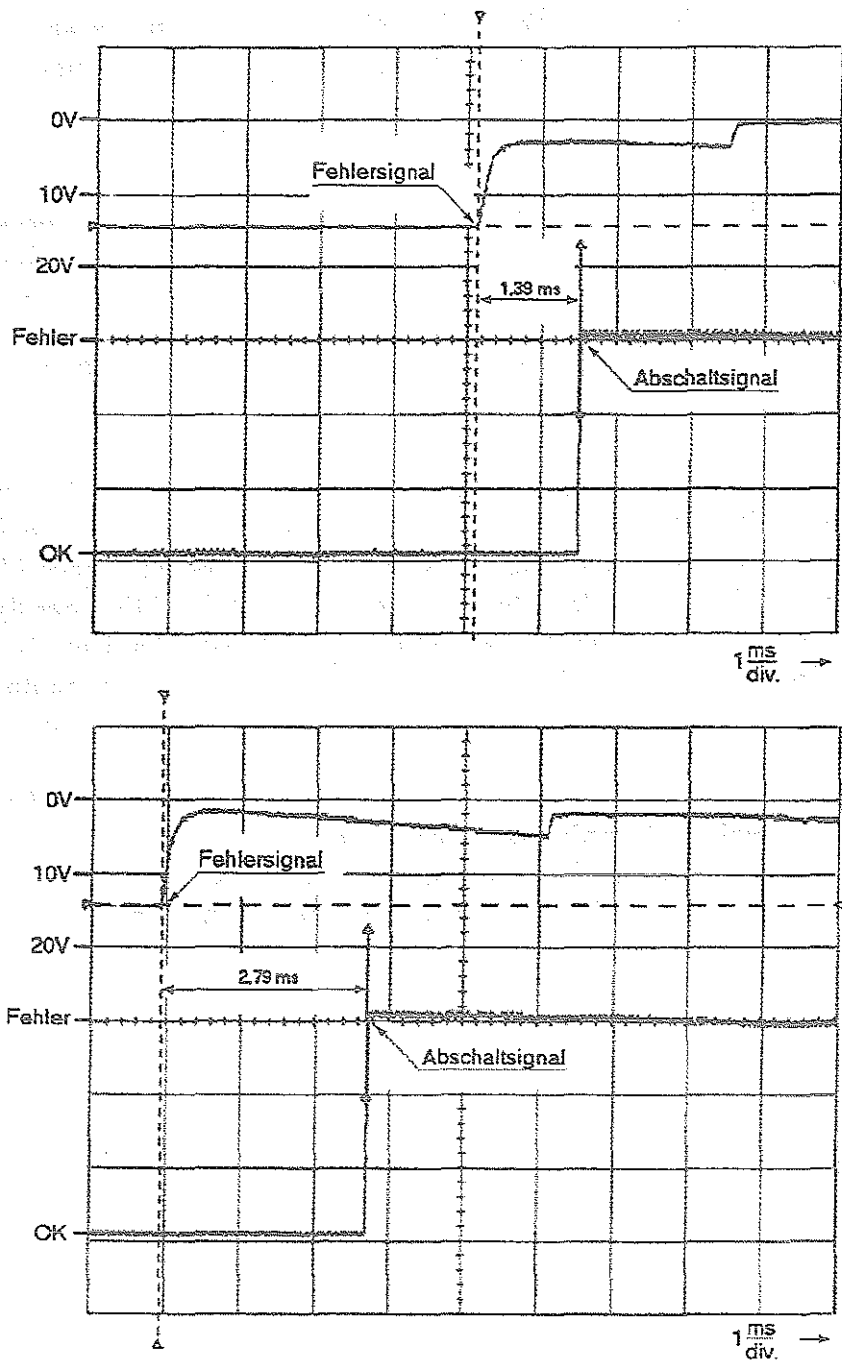
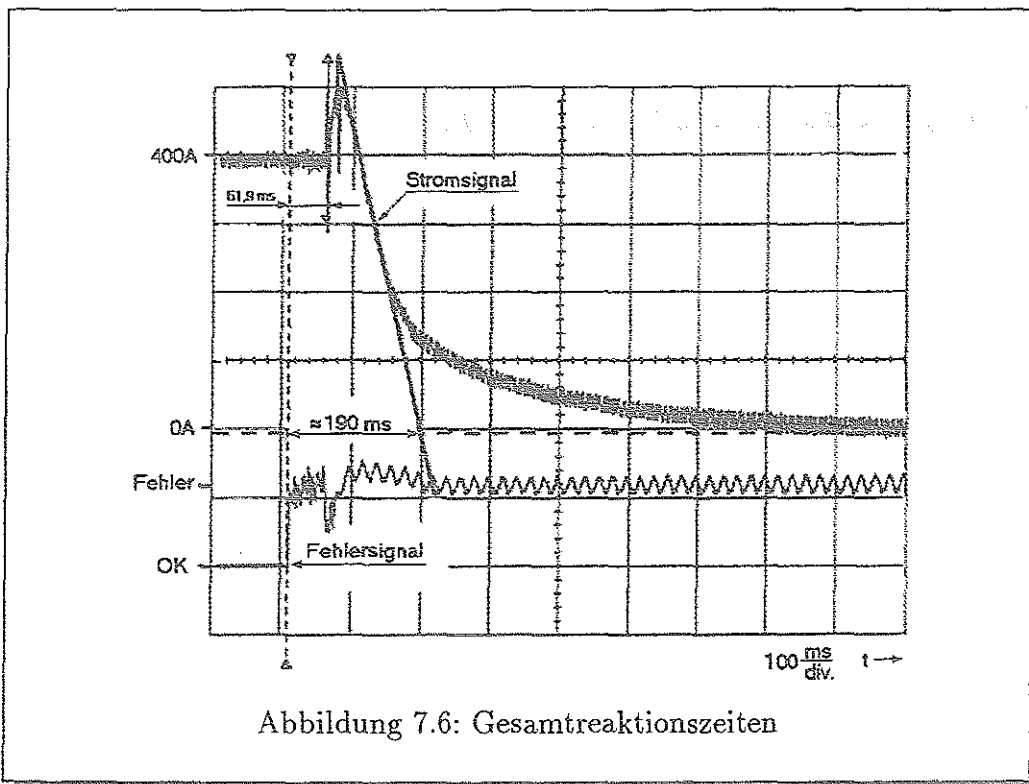


Abbildung 7.5: Systemreaktionszeiten

Um die Zeit vom Auftreten eines Fehlers bis zum Abschalten des Netzgerätes zu messen, wird zum Fehlersignal das Stromsignal aufgenommen (Abb. 7.6). Es ergeben sich Zeiten im Bereich von 50 ms. Diese setzen sich hauptsächlich aus den Relaisschaltzeiten in unserem System (mit ca. 6 – 8 ms) und im Netzgerät zusammen.

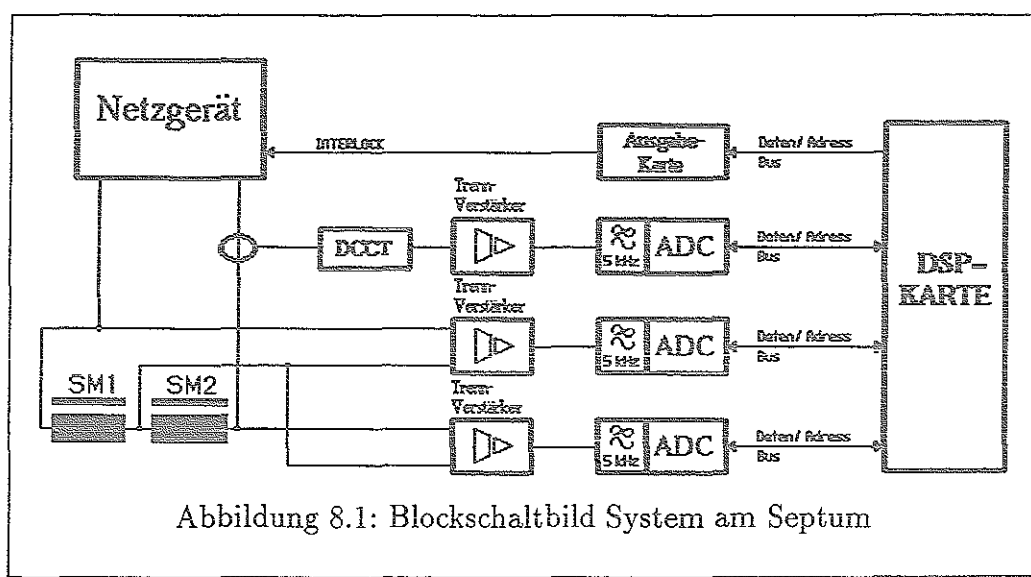


## Kapitel 8

# Inbetriebnahme des Systems

Um unser Temperaturüberwachungssystem in Betrieb zu nehmen, stehen uns in der 21. Kalenderwoche 1994 (Wartungswoche bei COSY) 3 Tage zur Verfügung. Vor Inbetriebnahme sind einige Vorarbeiten zu erledigen:

- Die engverdrillten Spannungsmeßleitungen müssen hergestellt werden.
- Die Meßleitungen, sowie die Interlockleitungen, müssen verlegt und mit Steckern versehen werden.
- Am Extraktionsseptum werden DVM zur Strom und Spannungsmessung angeschlossen.
- Das System wird in ein vorhandenes Rack in der Nähe des Septums montiert und angeschlossen.
- Um das Földi-Netzgerät steuern zu können, wird ein Laptop neben dem Extraktionsseptum aufgestellt, der über LAN mit dem Netzgerät verbunden wird.
- Das Emulatorsystem wird mit dem Temperaturüberwachungssystem verbunden.



Zur Funktionsprüfung werden verschiedene Betriebsströme eingestellt. Nachdem dieser Test fehlerfrei verläuft, wird wieder ein fester Stromwert von 1000 A eingestellt. Da bei einer Unterbrechung des gesamten Kühlwasserdurchflusses das Risiko einer Zerstörung der Wicklungen zu hoch ist, wird nur eine Durchflußänderung einiger Kühlwasserkreisläufe durchgeführt. Mit

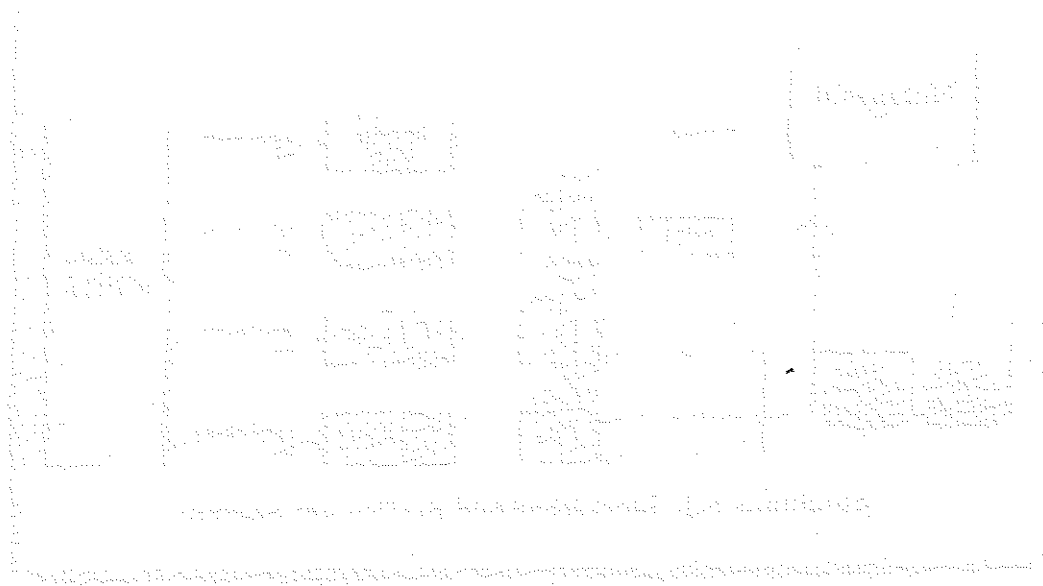
diesem Verfahren werden alle Abschaltkriterien des Systems getestet. Die Abschaltgrenzen werden in 20 A-Schritten überprüft. Dabei werden sowohl Differenzspannungsfehler, als auch Widerstandsfehler, simuliert. Das System arbeitet korrekt.

Die Kühlwasserzufuhr des Septums wird nun so optimiert, daß alle Kühlkreisläufe ausreichend und gleichmäßig durchflossen werden.

Beim Verfahren des Stromes über größere Bereiche wird ein Fehlen des Stromsignals angezeigt ( $\Delta U1$  und  $\Delta U2$ ). Der Grund darin liegt in der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannungssignal während des Stromanstiegs beim Hochfahren des Septums. Eine einfache Anpassung des Strommindestwertes, welcher zur Überprüfung des Stromsignals benutzt wird, reicht aus, diesen Fehler zu beheben.

Nachdem alle Tests erfolgreich verlaufen, wird das DSP-Programm, mit Hilfe eines Eeproms, in die EPROMS übertragen. Nach deren Einbau in die DSP-Karte kann das System ohne Emulator betrieben werden.

Das Temperaturüberwachungssystem ist voll betriebsbereit und kann an die Interlockschleife des Netzgerätes angeschlossen werden.



Das System ist nun betriebsbereit und kann an die Interlockschleife des Netzgerätes angeschlossen werden.

## Kapitel 9

## Schlußbetrachtung

Ziel unserer Arbeit war es, ein Temperaturüberwachungssystem für das magnetische COSY-Extraktionsseptum zu entwickeln und aufzubauen.

Das von uns aufgebaute System arbeitet mit schnellen Strom- Spannungsmessstellen mit A/D-Umsetzung. Eine potentialfreie Messung ist durch Trennverstärker gewährleistet. Mit Hilfe dieser Strom- Spannungsmessung und deren Verarbeitung über einen digitalen Signalprozessor ist es möglich, eine genügend schnelle und genaue Aussage über die Temperaturüberschreitung zu machen. Das geschieht durch eine Online-Berechnung des Widerstands und dessen Vergleich mit Grenzwerten. Die hierbei eingesetzten mathematischen Verfahren zur Filterung und Glättung erlauben eine genaue Auswertung der Meßsignale und bieten einen ausreichenden Schutz gegen Fehlabschaltungen durch Störimpulse.

Die Auswertung des Temperaturgradienten wurde nicht durchgeführt, da nur eine theoretische Betrachtung der zu erwartenden Temperaturanstiegsgeschwindigkeit möglich war. Eine praktische Messung dieser Geschwindigkeit ist nicht möglich, ohne das Septum zu gefährden. Weiterhin ist durch zusätzliche Bestimmung des Temperaturgradienten weder eine Verbesserung des Systems, im Hinblick auf Genauigkeit, noch auf Geschwindigkeit zu erwarten.

Das entwickelte System erzeugt im Fehlerfall innerhalb von wenigen Millisekunden ein Abschaltsignal, das die Interlockschleife des speisenden Netzgerätes unterbricht und dieses damit abschaltet.

Bei Test und Inbetriebnahme zeigt sich, daß das Temperaturüberwachungssystem, auch unter rauen elektrischen Umgebungsbedingungen, zuverlässig arbeitet.

## 9.1 Möglichkeiten der Systemverbesserung

Um das System universell einsetzbar zu machen, sind noch weitere Verbesserungen möglich, die den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden. Zu diesem Zweck sind folgende Probleme zu bearbeiten:

**Das System kann kompakter aufgebaut werden.** Z. B. könnten die drei separaten AD-Wandler durch einen ADC mit mehreren Analogeingängen ersetzt werden. Dabei ist zu beachten, daß alle Signale *gleichzeitig* gesampled werden müssen.

**Komfortablere Anpassung der Systemparameter.** Zur Änderung der Parameter muß zur Zeit ein neues Programm erstellt und in die EPROMS übertragen werden. Durch Einsatz einer Folientastatur, in Verbindung mit einer LCD-Anzeige, kann eine Anpassung des Systems einfacher erfolgen. Es wäre außerdem möglich, weitere Information anzuzeigen.

**Anpassung des Systems an dynamisch betriebene Spulen.** Zu diesem Zweck ist es nötig, die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung zu detektieren, um den ohmschen Widerstand des Meßobjekts bestimmen zu können.

Durch Lösung dieser Probleme, insbesondere des letzten Punktes, könnte das System die Einbringung von Thermoelementen und Thermoschaltern, direkt in die Spulen, unnötig machen.

# Literaturverzeichnis

- [1] K. Kilian, R. Maier, U. Pfister; *COSY Jülich: Ein Beschleuniger für Mittelennergiephysik*; Aus Jahresbericht 1990 Forschungszentrum Jülich GmbH.
- [2] A. Povlsen; *COSY ejection septum magnets - Final design report*; PS/PA/COSY89-1; Juni 1989.
- [3] A. Povlsen; *Technical specifications for COSY extraction septum magnets*; COSY-PL/Spec. 1326; Juni 1990.
- [4] W. Kluthe; Diplomarbeit: *Schnelle Temperaturerfassung am COSY-Extraktionsseptum*; FH Aachen / Jülich; April 1991.
- [5] J. Lissner, E. Ribbernik; *Nullflußstromwandler zur Messung von Gleich- und Wechselströmen*; etz Band 100, Heft 24; 1979
- [6] Fa. Földi; Produktinformation *Precision DC Current Transformers*
- [7] T. Plum; Diplomarbeit: *Entwicklung eines Disruptionsdetektors für die Plasmamaschine TEXTOR*; FH Aachen / Jülich; Interner Bericht KFA-ZEL-IB-500493; Juli 1993.
- [8] U. Eckhardt, H. Eulenberg, F. Janßen, W. Jansen, H. Larue; *Die digitale Verarbeitung analoger Signale in Theorie und Praxis*; Fortbildungsseminar April 1989; KFA-Konferenzen Band3 1990.
- [9] Hewlett Packard; *Getting Started with HP VEE-Engine and HP VEE-Test*; Programmhandbuch.
- [10] Fa. Heinzinger; *TN-Geräte Drehstromausführung - Bedienungsanleitung und Beschreibung*
- [11] Fa. Schlumberger; *Systemvoltmeter 7061 Bedienungsanleitung*; Ausgabe 2; April 1986.

- [12] Fa. Hewlett Packard; *HP 8116A 50MHz Programmable Pulse/Function Generator – Operating, Programming and Servicing Manual*; 1st Edition; Juli 1991.
- [13] J. Abel, H. Larue; *Emulationsprogramm XBugger 640* .
- [14] H. -J. Bartsch; *Taschenbuch mathematischer Formeln*; 7. – 12. Auflage; Juli 1988; Verlag Harri Deutsch.
- [15] Lindner, Brauer, Lehmann; *Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik*; 3. Auflage; 1989; Verlag Harri Deutsch.
- [16] Fa. Analog Devices; *Datenblatt Precision, Wide Bandwidht, 3-Port Isolation Amplifier AD210*;
- [17] Fa. Burr-Brown; *Datenblatt Microprocessor-Compatible ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER ADC674A*; Mai 1988.
- [18] Fa. Burr-Brown; *Datenblatt High Speed Bipolar Monolithic SAMPLE/HOLD AMPLIFIER SHC5320*; Januar 1993.
- [19] Fa. MAXIM; *Datenblatt Low-Cost,  $\mu$ P Supervisory Circuits MAX705 – MAX708/MAX813L*; Ausgabe 2; April 1993.

## Anhang A

### DSP-Karte

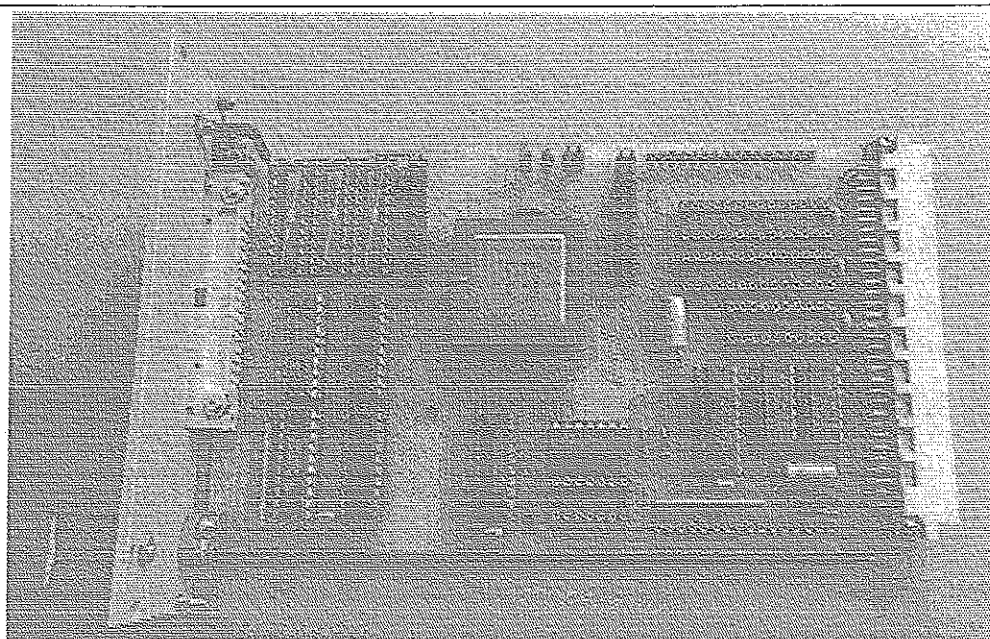
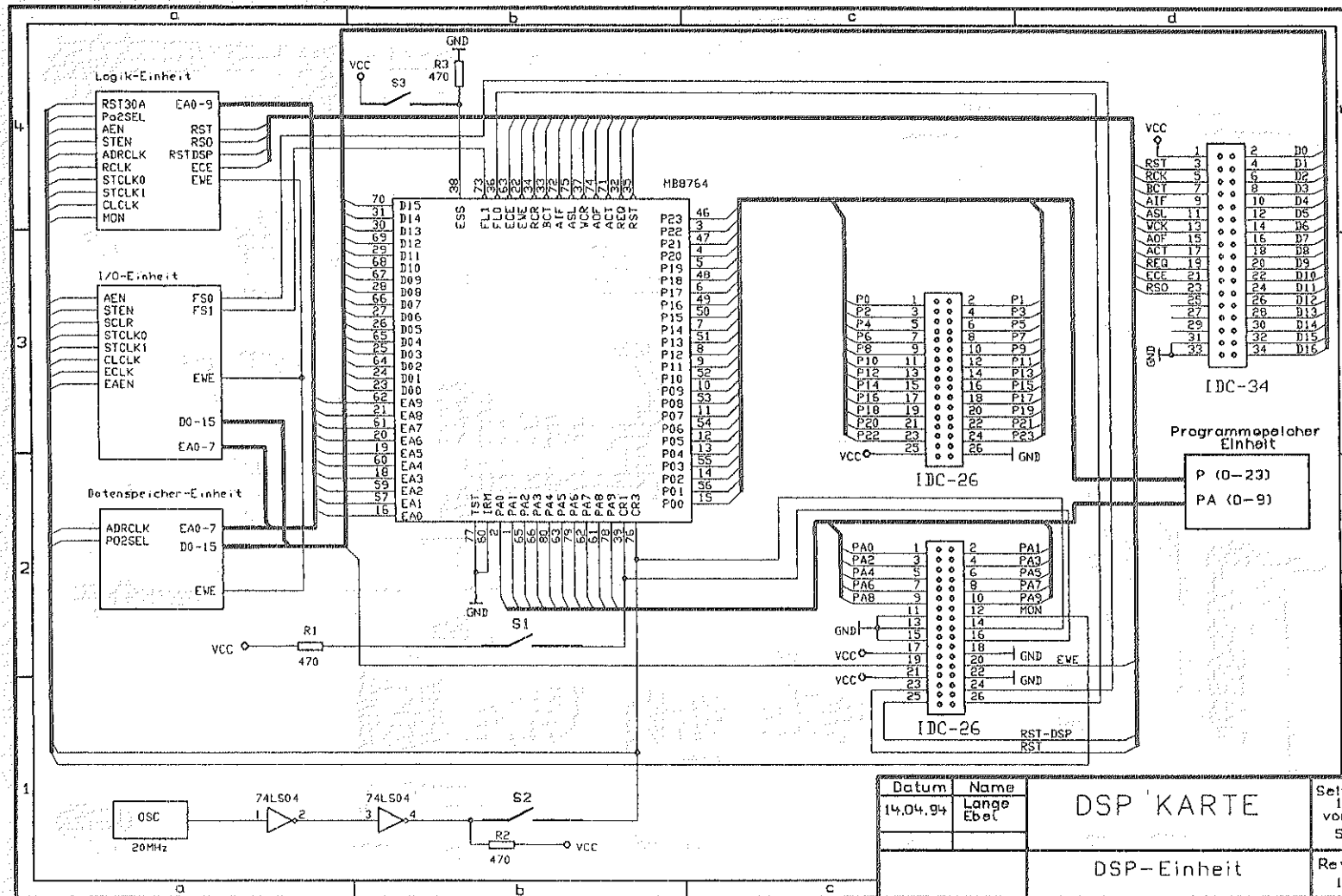
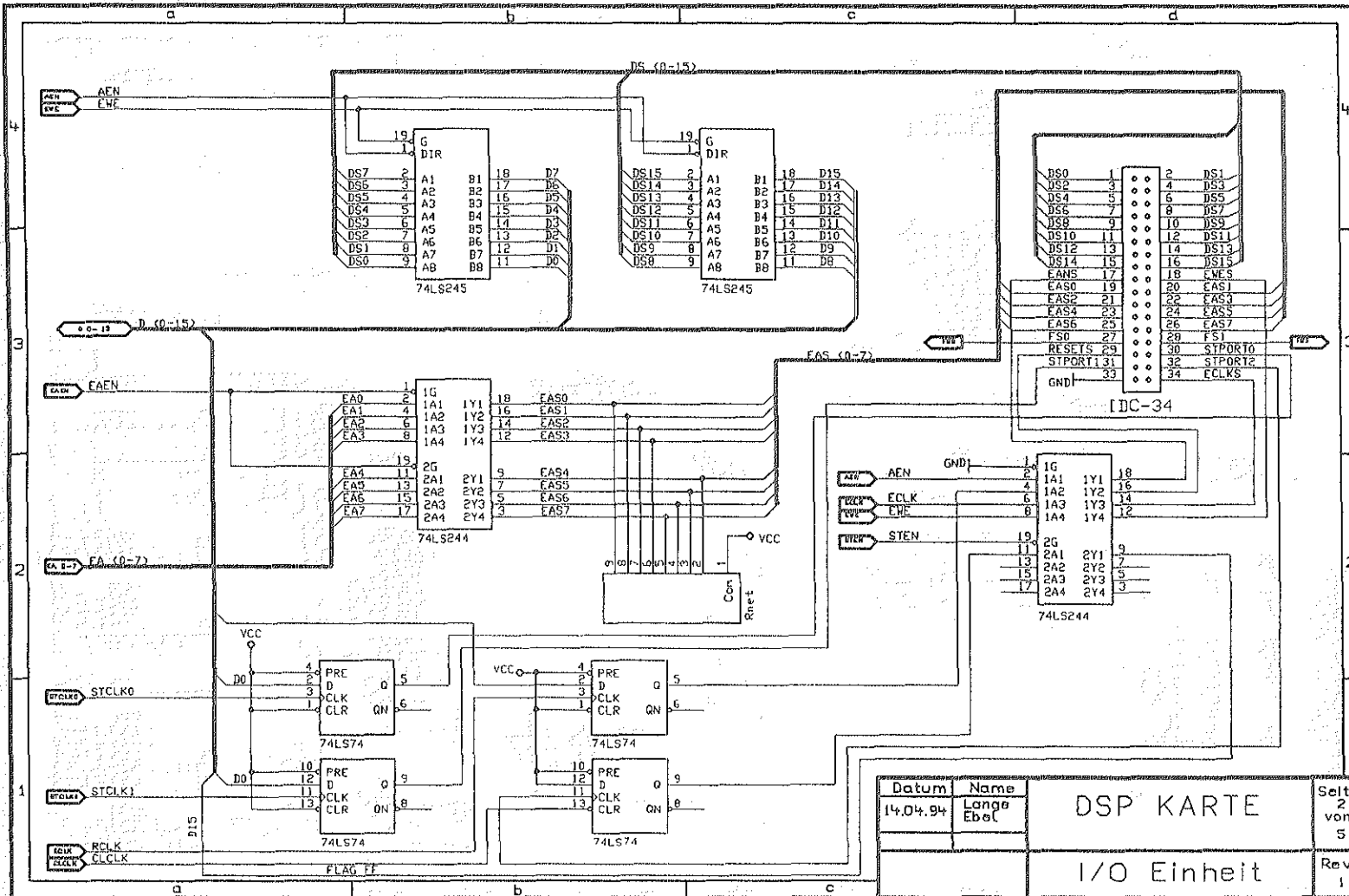


Abbildung A.1: DSP-Karte

# A.1 Schaltplan



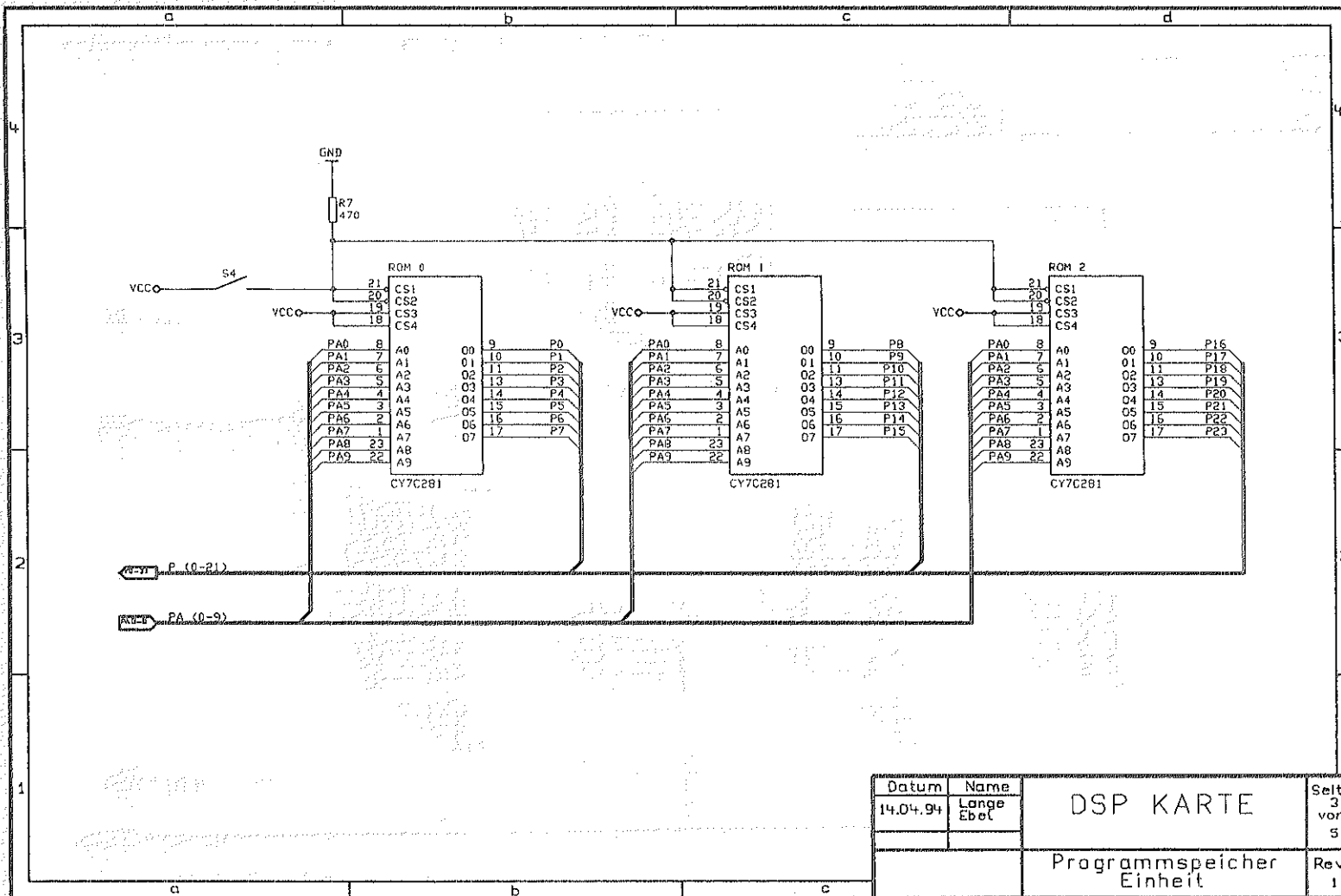


| Datum       | Name          | Seite<br>2<br>von<br>5 |
|-------------|---------------|------------------------|
| 14.04.94    | Lange<br>Ebel |                        |
| DSP KARTe   |               | Rev:<br>1              |
| I/O Einheit |               |                        |

Teil 2

ANHANG A. DSP-KARTE

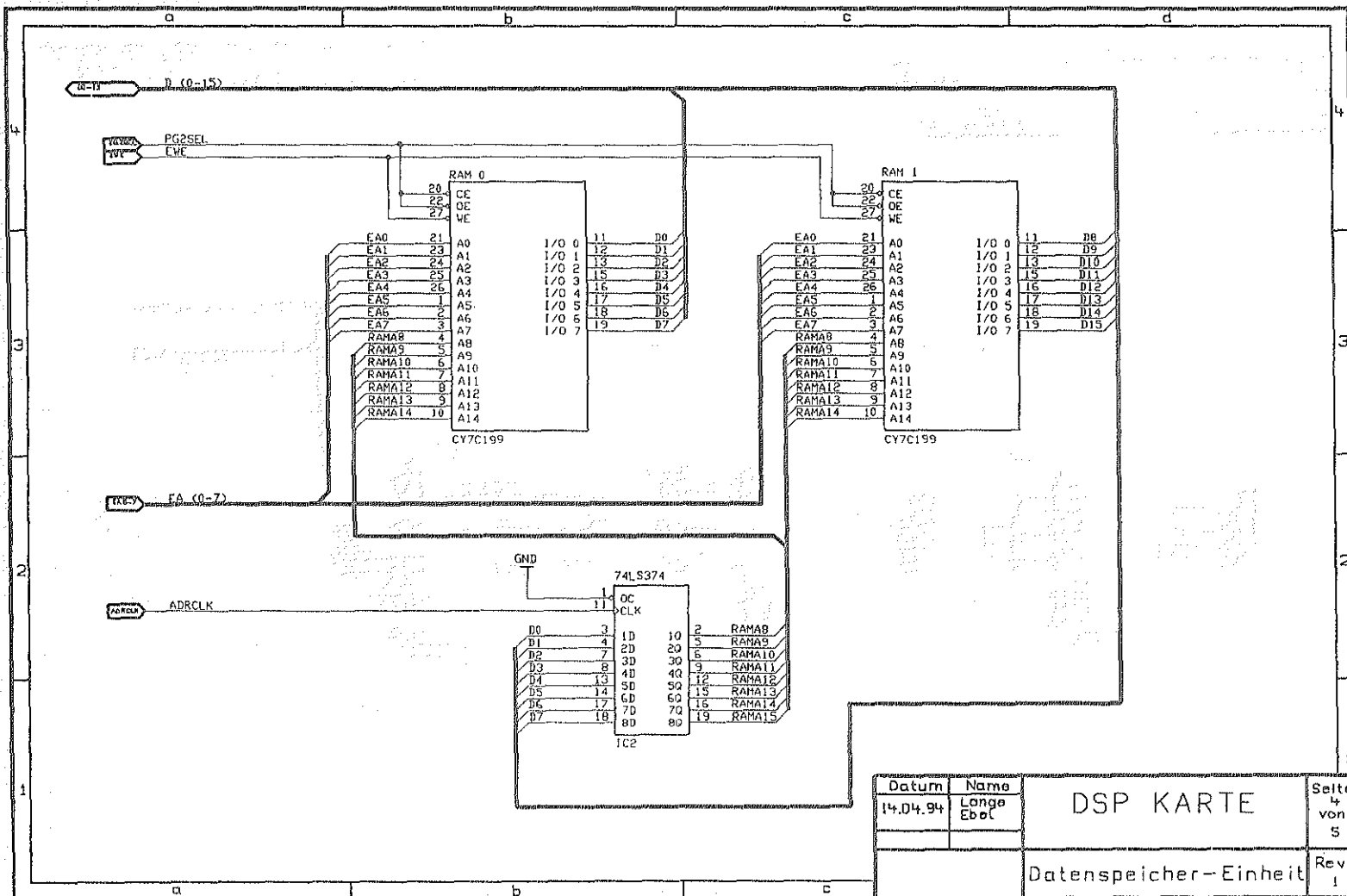
106



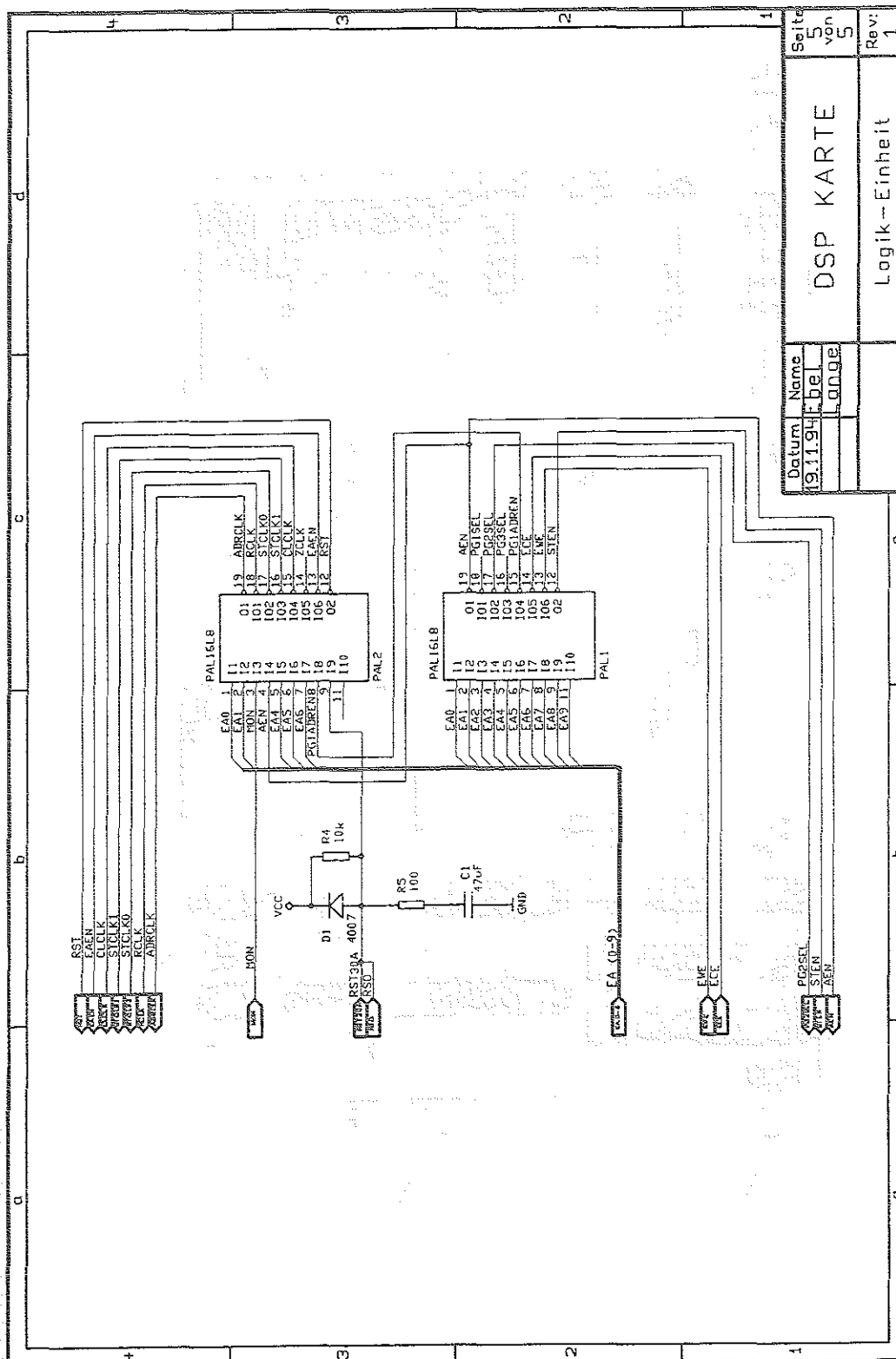
Teil 3

ANHANG A. DSP-KARTE

Teil 4

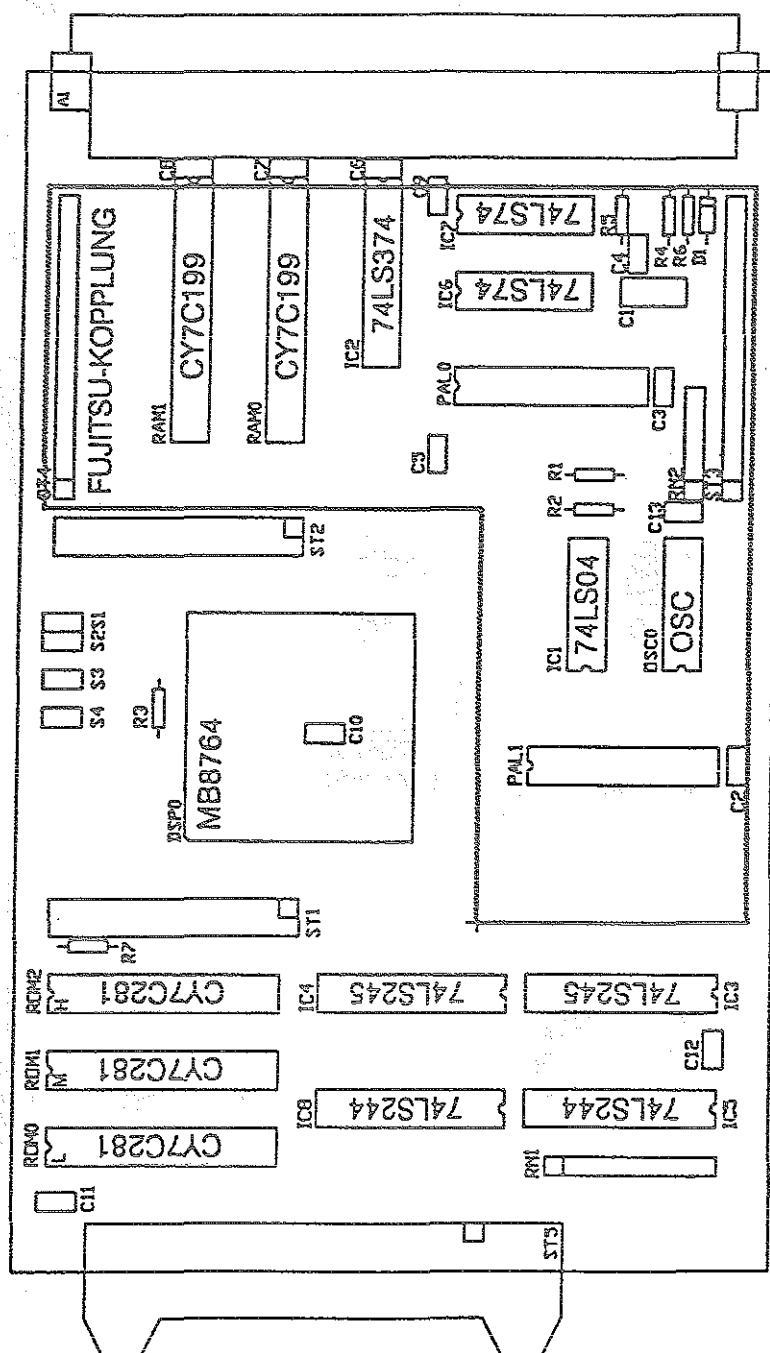


Teil 5



| Datum    | Name          | Seite  |
|----------|---------------|--------|
| 19.11.94 | bel           | 5      |
|          | ange          | 5      |
|          |               | Rev: 1 |
|          | DSP KARTE     |        |
|          | Logik-Einheit |        |

## A.2 Bestückungsplan



## Anhang B

### TV-Karte

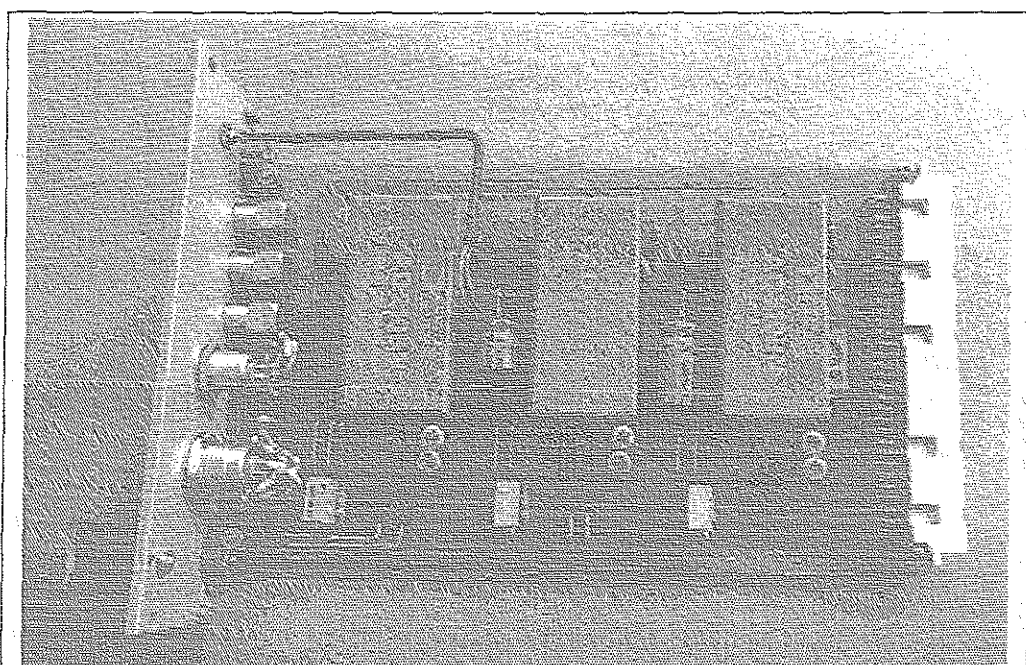
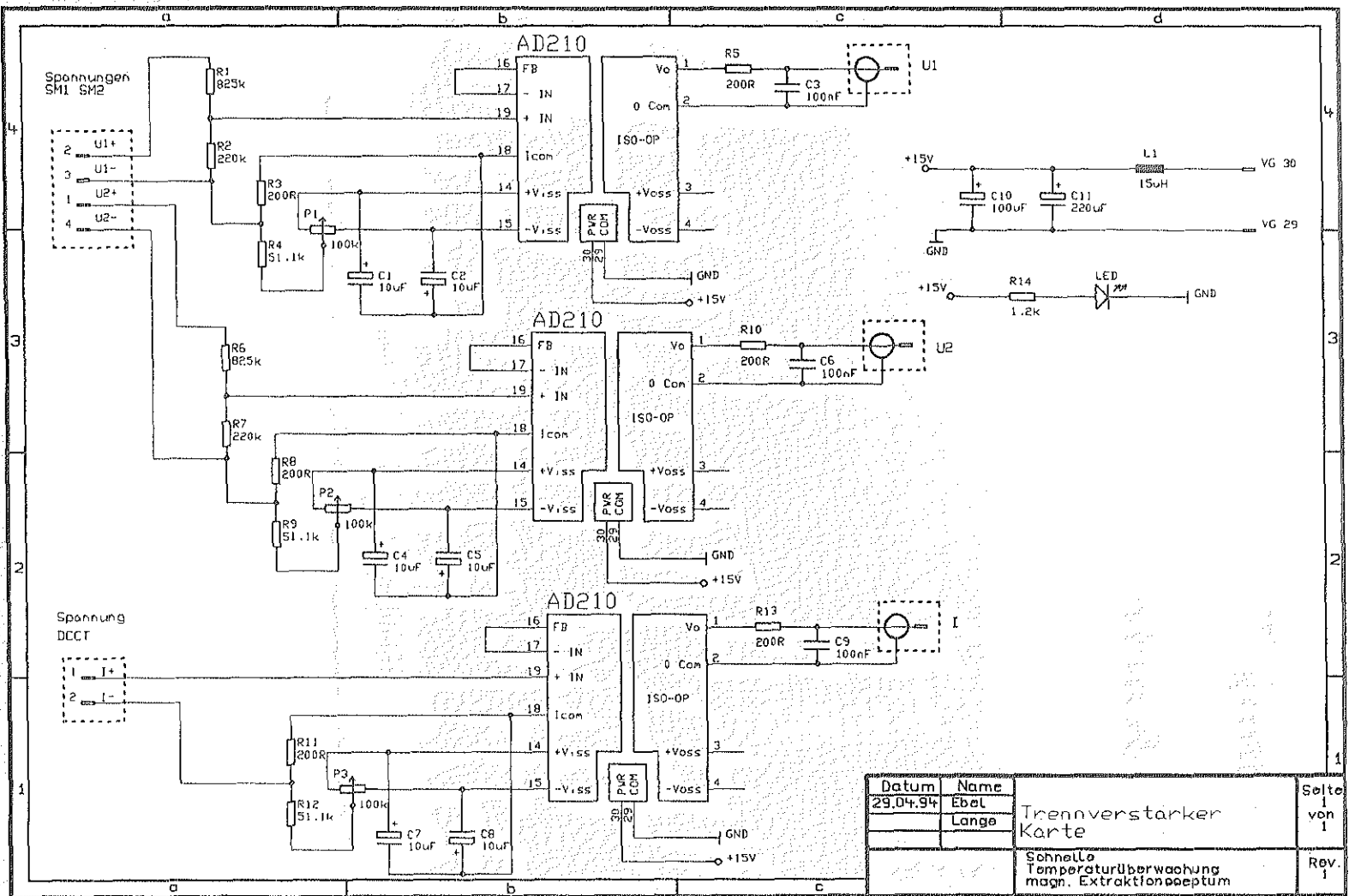
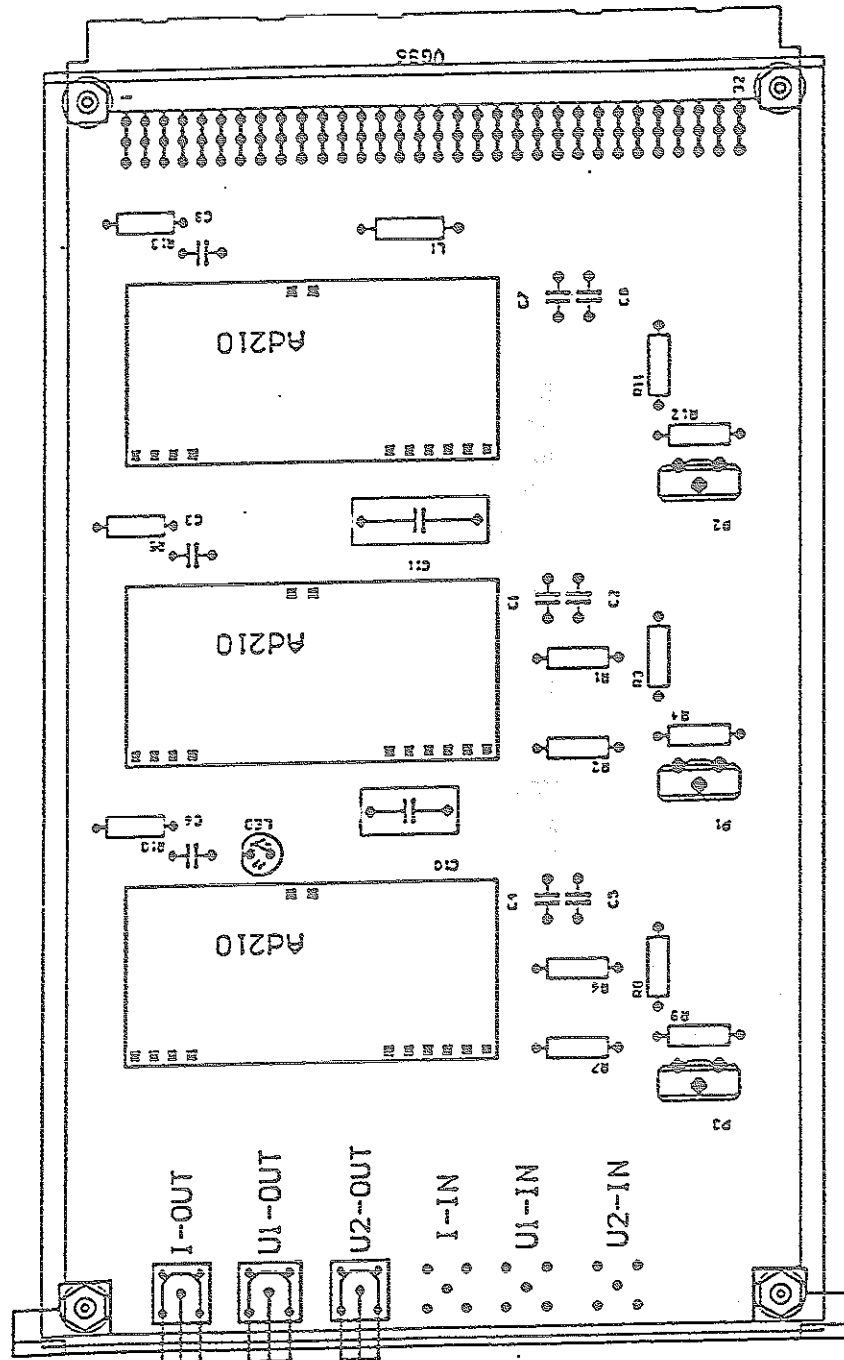


Abbildung B.1: Trennverstärker-Karte

# B.1 Schaltplan



## B.2 Bestückungsplan



### B.3 Stückliste

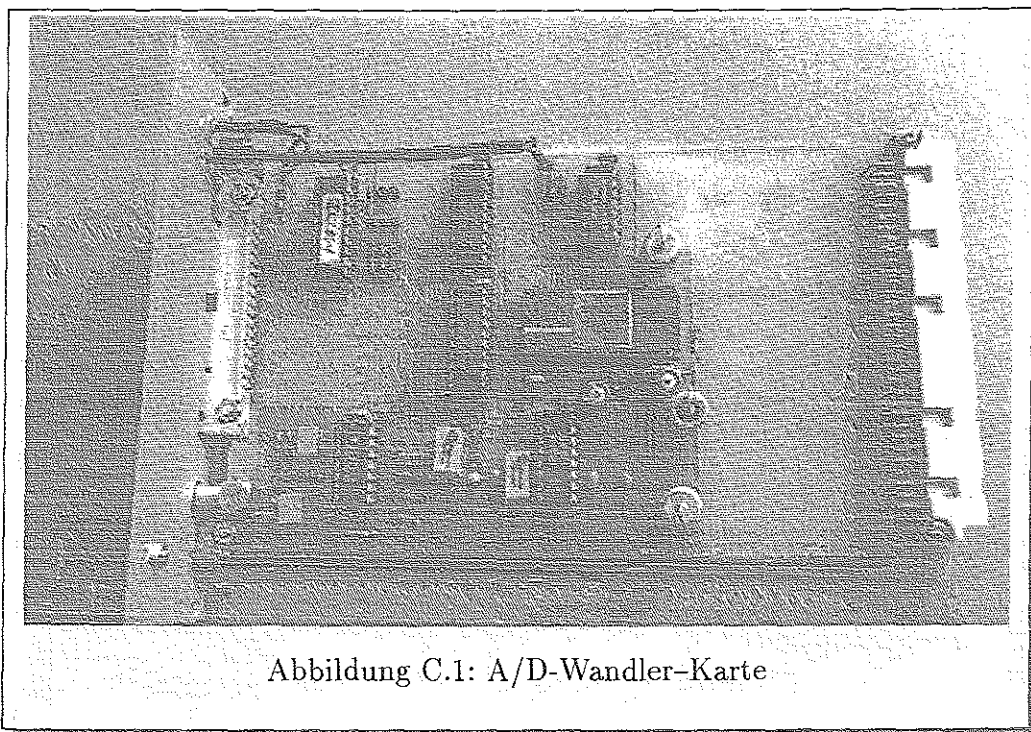
#### Stueckliste

24.04.94 Trennverstaerker-Platine

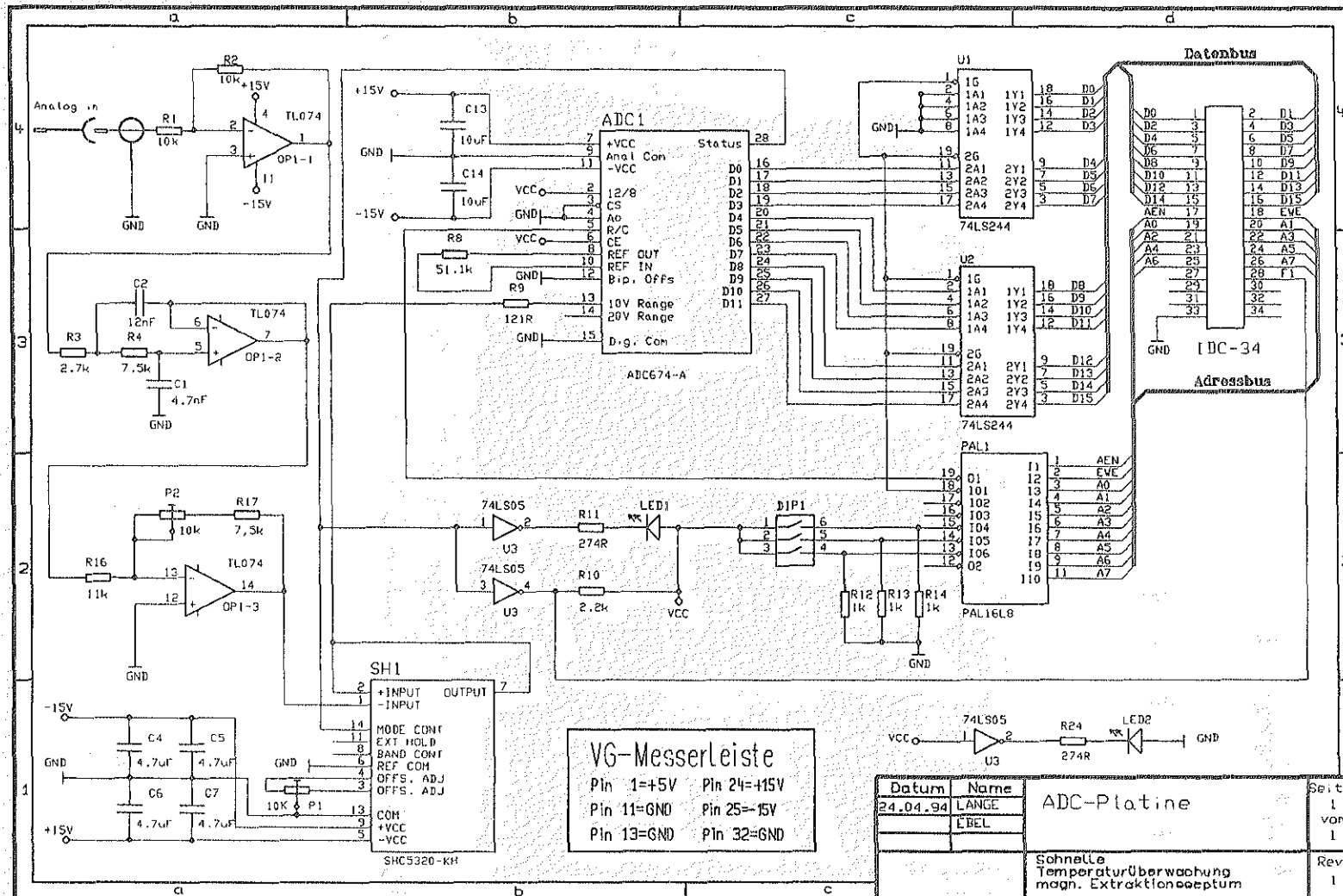
| Beschreibung | Anzahl | Bauteil              |
|--------------|--------|----------------------|
| 220 uF       | 1      | C11                  |
| 100 uF       | 1      | C10                  |
| 100 nF       | 3      | C3,C6                |
| 10 uF        | 6      | C1,C2,C4,C5,C7,C8    |
| 200 R        | 6      | R3,R5,R8,R10,R11,R13 |
| 1.2 k        | 1      | R14                  |
| 51.1k        | 3      | R4,R9,R12            |
| 220 k        | 2      | R2,R7                |
| 825 k        | 2      | R1,R6                |
| 100 k        | 3      | P1,P2,P3             |
| 10 uH        | 1      | L1                   |
| AD210BN      | 3      | ISO-OP               |
| LED          | 1      | LED                  |
| VG96         | 1      | VG1                  |
| LEMO 1-pol.  | 3      | X-U1,X-U2,X-I        |
| LEMO 2-pol.  | 1      | X-I_in               |
| LEMO 4-pol.  | 1      | X-U_in               |

## Anhang C

### ADC-Karte

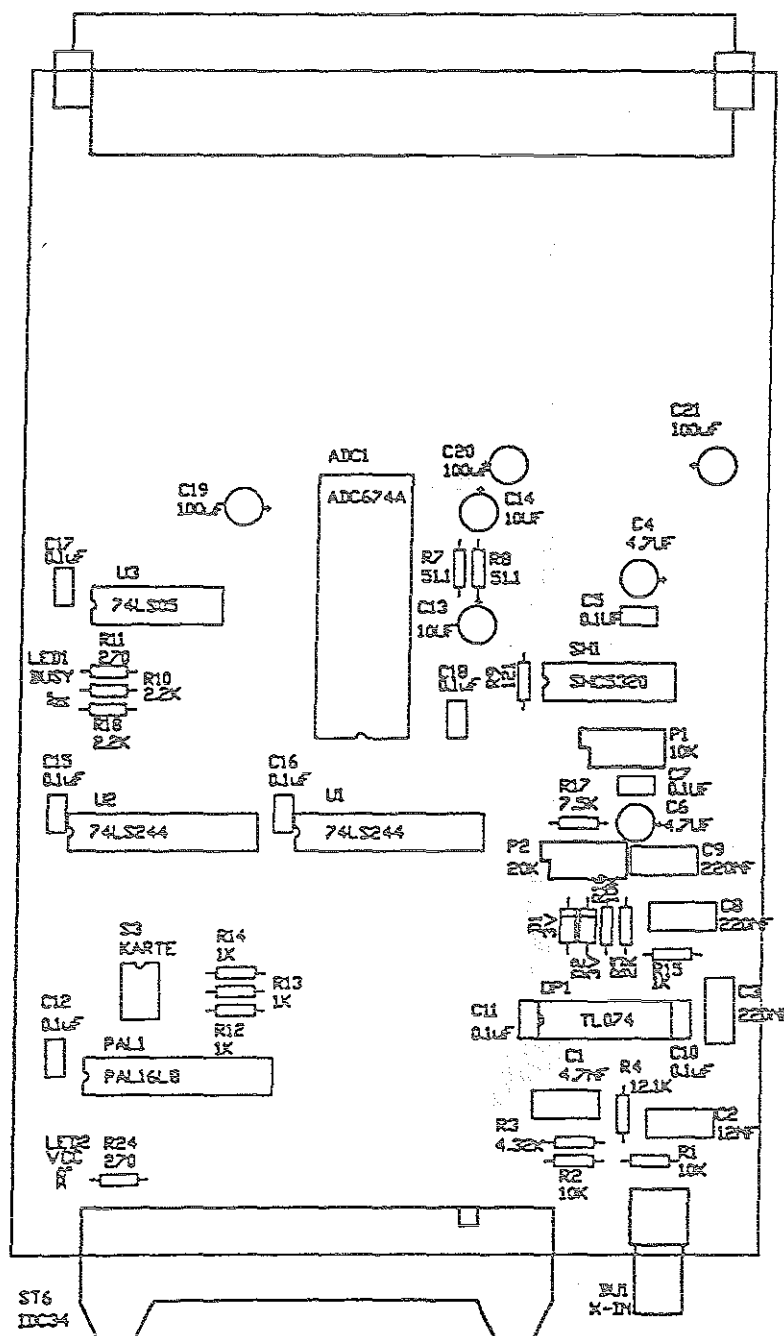


# C.1 Schaltplan



|          |       |                                                           |       |
|----------|-------|-----------------------------------------------------------|-------|
| Datum    | Name  |                                                           | Seite |
| 24.04.94 | LANGE | ADC-Platine                                               | 1     |
|          | LEBEL |                                                           | von   |
|          |       |                                                           | 1     |
|          |       | Schnelle Temperaturüberwachung<br>magn. Extraktionszeptum | Rev.  |
|          |       |                                                           | 1     |

## C.2 Bestückungsplan



### C.3 Stückliste

#### Stueckliste

24.04.94 ADC-Platine

| Beschreibung | Anzahl | Bauteil                             |
|--------------|--------|-------------------------------------|
| 100 uF       | 3      | C19,C20,C21                         |
| 100 nF       | 9      | C5 ,C7 ,C10,C11,C12,C15,C16,C17,C18 |
| 4.7 nF       | 1      | C1                                  |
| 4.7 uF       | 2      | C4 ,C6                              |
| 10 uF        | 2      | C13,C14                             |
| 12 nF        | 1      | C2                                  |
| 4.32k        | 1      | R3                                  |
| 7.5 k        | 1      | R17                                 |
| 11 k         | 4      | R1 ,R2 ,R16                         |
| 1 k          | 4      | R12,R13,R14,R15                     |
| 2.2 k        | 1      | R10                                 |
| 2 k          | 1      | R5                                  |
| 12.1k        | 1      | R4                                  |
| 274 R        | 2      | R11,R24                             |
| 121 R        | 1      | R9                                  |
| 51.1R        | 1      | R8                                  |
| 10 k         | 2      | P1,P2                               |
| 74LS05       | 1      | U3                                  |
| 74LS244      | 2      | U1 ,U2                              |
| ADC674A      | 1      | ADC1                                |
| PAL16L8      | 1      | PAL1                                |
| SHC5320      | 1      | SH1                                 |
| TL074        | 1      | OP1                                 |
| LED          | 2      | LED1,LED2                           |
| VG96         | 1      | VG1                                 |
| IDC34        | 1      | IDC34                               |
| LEMO         | 1      | X-IN1                               |

## C.4 PAL-Programm

;PALASM Design Description

;----- Declaration Segment -----

TITLE  
PATTERN  
REVISION  
AUTHOR  
COMPANY  
DATE 24/04/94

CHIP ADCCOS PAL16L8

;----- PIN Declarations -----

|        |       |                        |
|--------|-------|------------------------|
| PIN 1  | AEN   | COMBINATORIAL ; INPUT  |
| PIN 2  | EWE   | COMBINATORIAL ; INPUT  |
| PIN 3  | A0    | COMBINATORIAL ; INPUT  |
| PIN 4  | A1    | COMBINATORIAL ; INPUT  |
| PIN 5  | A2    | COMBINATORIAL ; INPUT  |
| PIN 6  | A3    | COMBINATORIAL ; INPUT  |
| PIN 7  | A4    | COMBINATORIAL ; INPUT  |
| PIN 8  | A5    | COMBINATORIAL ; INPUT  |
| PIN 9  | A6    | COMBINATORIAL ; INPUT  |
| PIN 11 | A7    | COMBINATORIAL ; INPUT  |
| PIN 13 | DIP0  | COMBINATORIAL ; INPUT  |
| PIN 14 | DIP1  | COMBINATORIAL ; INPUT  |
| PIN 15 | DIP2  | COMBINATORIAL ; INPUT  |
|        |       |                        |
| PIN 16 | ADREN | COMBINATORIAL ; OUTPUT |
| PIN 19 | ADR8  | COMBINATORIAL ; OUTPUT |
| PIN 18 | ADR1  | COMBINATORIAL ; OUTPUT |
|        |       |                        |
| PIN 10 | GND   | ;                      |
| PIN 20 | VCC   | ;                      |

;----- Boolean Equation Segment -----

EQUATIONS

ADREN = /AEN \* /(A5+:DIP0) \* /(A6+:DIP1) \* /(A7+:DIP2)  
 ADR8 = /( /AEN \* /EWE \* /A4\* A3\*/A2\*/A1\*/A0)  
 ADR1 = /(ADREN \* EWE \* /A4\*/A3\*/A2\*/A1\* A0)

;-----

## Anhang D

### Ausgabe-Karte

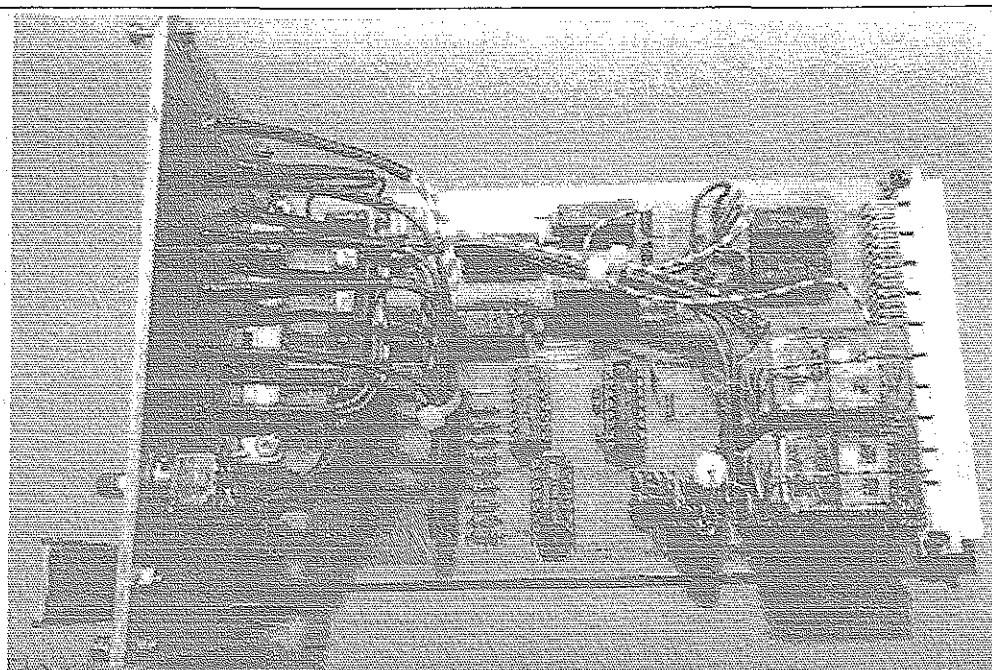
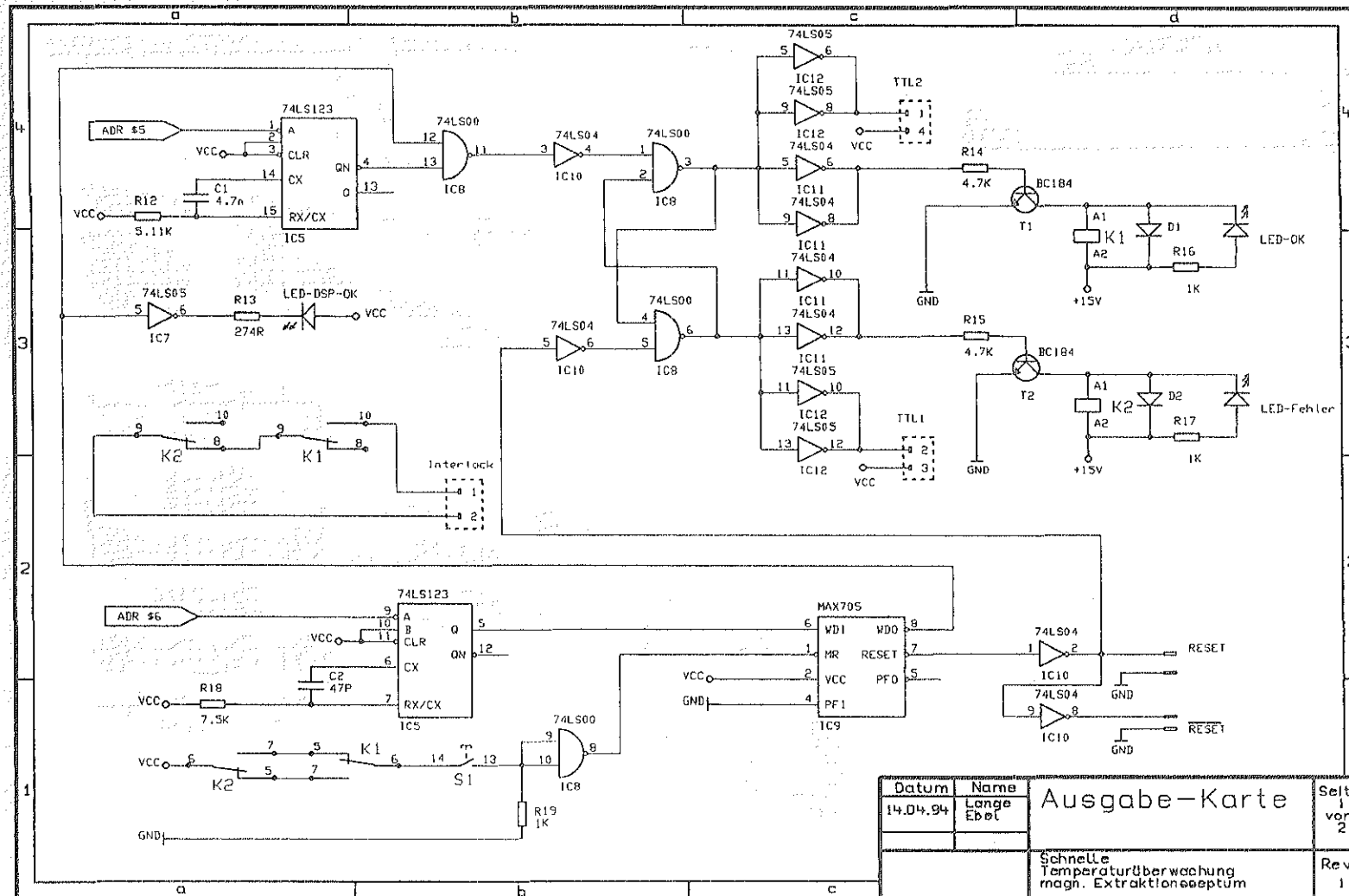
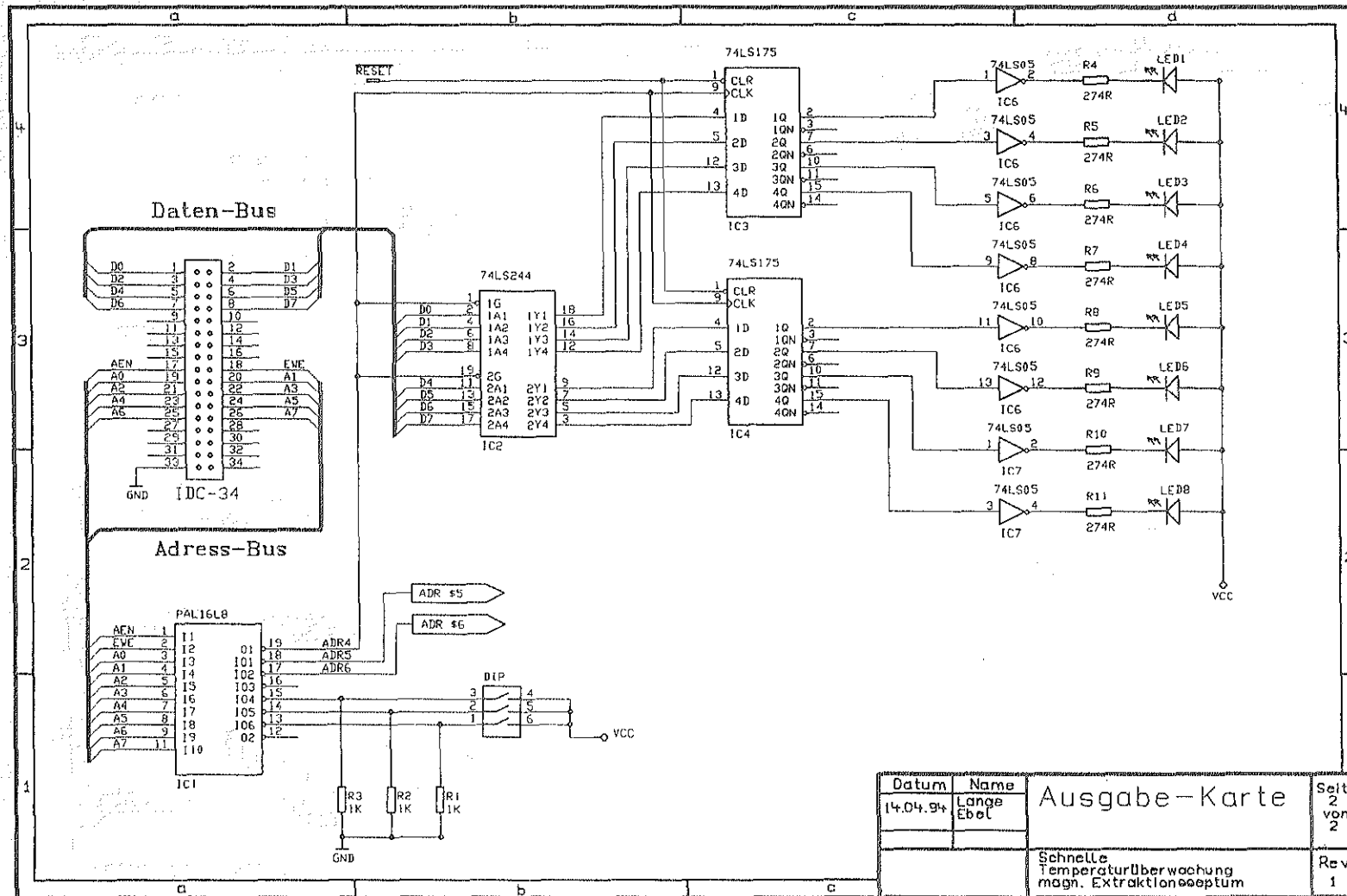


Abbildung D.1: Ausgabe-Karte

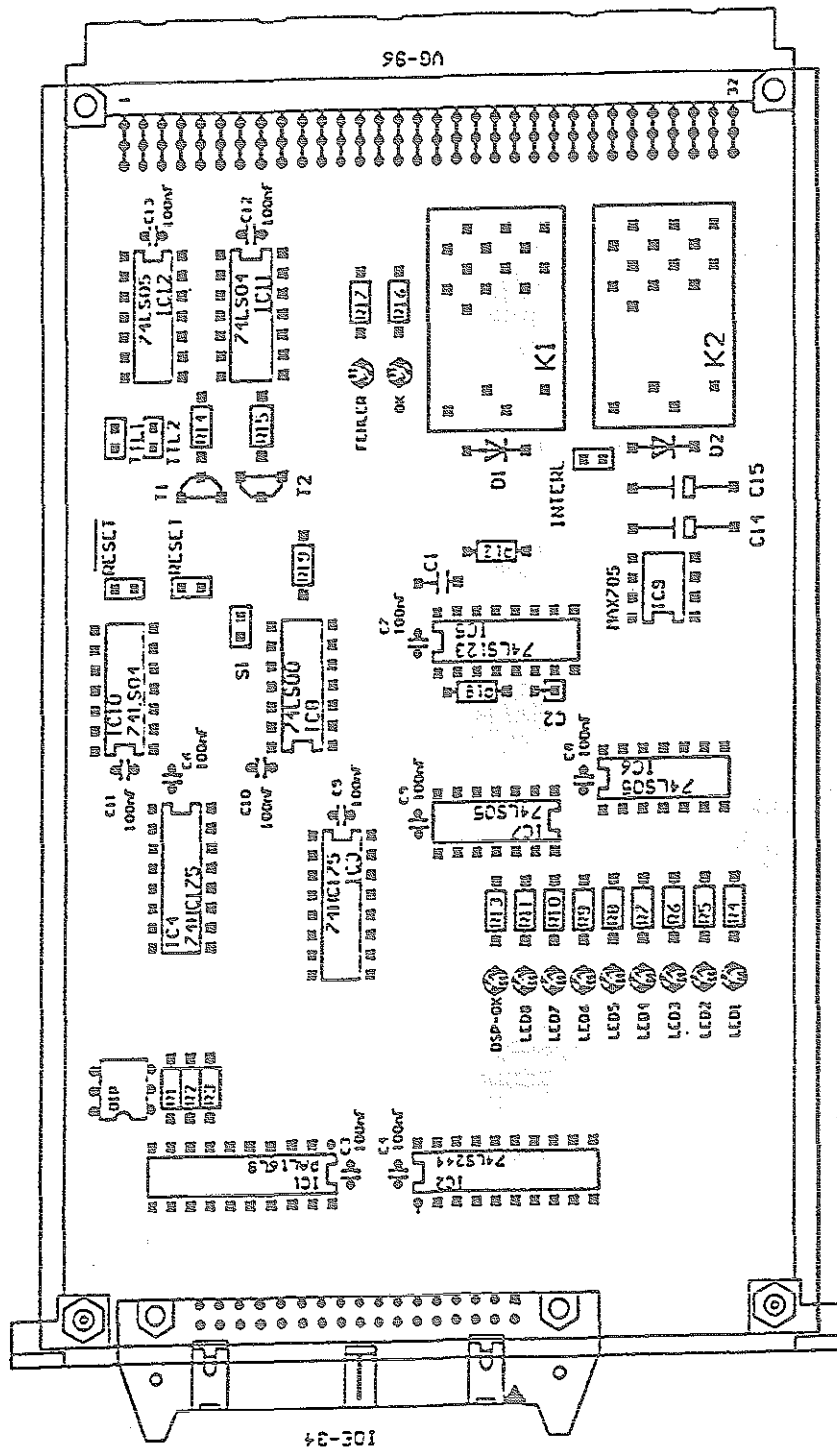
# D.1 Schaltplan



Teil 2



## D.2 Bestückungsplan



### D.3 Stückliste

#### Stueckliste

24.04.94                      Ausgabe-Platine

| Bauteil                     | Beschreibung                       | Anzahl |
|-----------------------------|------------------------------------|--------|
| C1                          | 4.7nF                              | 1      |
| C2                          | 47p                                | 1      |
| C3-C13                      | 100nF                              | 11     |
| C14,C15                     | 220uF                              | 2      |
| D1,D2                       | 1N4007                             | 2      |
| DIP                         | DIP                      DIL-06    | 1      |
| DSP-OK                      | LED                      LED-3S    | 1      |
| FEHLER                      | LED                      LED-3S    | 1      |
| IC1                         | PAL16L8                      DIL20 | 1      |
| IC2                         | 74LS244                      DIL20 | 1      |
| IC3,IC4                     | 74HC175                      DIL16 | 2      |
| IC5                         | 74LS123                      DIL16 | 1      |
| IC6,IC7,IC12                | 74LS05                      DIL14  | 3      |
| IC8                         | 74LS00                      DIL14  | 1      |
| IC9                         | MAX705                      DIL8   | 1      |
| IC10,IC11                   | 74LS04                      DIL14  | 2      |
| IDE-34                      | HD34/90                            | 1      |
| LED1-LED8 LED               | LED-3S                             | 8      |
| OK                      LED | LED-3S                             | 1      |
| R1,R2,R3,R16,R17,R19        | 1k                                 | 6      |
| R4-R11,R13                  | 274R                               | 9      |
| R12                         | 5.1k                               | 1      |
| R14,R15                     | 4.7k                               | 2      |
| R18                         | 7.5k                               | 1      |
| REL-FEHL                    | Kammrelais REL                     | 1      |
| REL-OK                      | Kammrelais REL                     | 1      |
| S1                          | Taster                             | 1      |
| T1,T2                       | BC 184C                            | 2      |
| VG-96                       | VG96M/90                           | 1      |

## D.4 PAL-Programm

;PALASM Design Description

;----- Declaration Segment -----

```
TITLE          PAL-Ausgabeplatine
PATTERN        1
REVISION       1
AUTHOR         Lange/Ebel
COMPANY        IKP
DATE           24/04/94
```

CHIP OUTCOS PAL16L8

;----- PIN Declarations -----

```
PIN 1          AEN          COMBINATORIAL ; INPUT
PIN 2          EWE          COMBINATORIAL ; INPUT
PIN 3          A0           COMBINATORIAL ; INPUT
PIN 4          A1           COMBINATORIAL ; INPUT
PIN 5          A2           COMBINATORIAL ; INPUT
PIN 6          A3           COMBINATORIAL ; INPUT
PIN 7          A4           COMBINATORIAL ; INPUT
PIN 8          A5           COMBINATORIAL ; INPUT
PIN 9          A6           COMBINATORIAL ; INPUT
PIN 11         A7           COMBINATORIAL ; INPUT
PIN 13         DIP0        COMBINATORIAL ; INPUT
PIN 14         DIP1        COMBINATORIAL ; INPUT
PIN 15         DIP2        COMBINATORIAL ; INPUT

PIN 16         ADREN        COMBINATORIAL ; OUTPUT
PIN 19         ADR4         COMBINATORIAL ; OUTPUT
PIN 18         ADR5         COMBINATORIAL ; OUTPUT
PIN 17         ADR6         COMBINATORIAL ; OUTPUT

PIN 10         GND          ;
PIN 20         VCC          ;
```

;----- Boolean Equation Segment -----

EQUATIONS

```
ADREN = /AEN * /(A5+:DIP0) * /(A6+:DIP1) * /(A7+:DIP2)
ADR4  = /(ADREN * /EWE * /A4*/A3* A2*/A1*/A0)
ADR5  = /(ADREN * /EWE * /A4*/A3* A2*/A1* A0)
ADR6  = /(ADREN * /EWE * /A4*/A3* A2* A1*/A0)
```

# Anhang E

## DSP-Programmierung

### E.1 Befehlsliste des MB8764

#### E.1.1 Register

##### Arbeitsregister

|   |                |        |                                    |                                    |
|---|----------------|--------|------------------------------------|------------------------------------|
| D | Akkumulator    | 26 Bit | Ein/Ausgabe                        | $D \Leftrightarrow \text{I-E Bus}$ |
| A | Operationsreg. | 16 Bit | $A \Leftrightarrow \text{I-E Bus}$ | $A \Leftarrow \text{ROM}$          |
| B | Operationsreg. | 16 Bit | $B \Leftarrow \text{I-E Bus}$      | $B \Leftarrow \text{Eingabe}$      |

##### Zwischenregister für asynch. I/O-Mode

|     |                     |        |                            |
|-----|---------------------|--------|----------------------------|
| EO  | Ausgabezwischenreg. | 16 Bit | für externe Ausgabedaten   |
| EA  | Adresszwischenreg.  | 16 Bit | für externe Ausgabeadresse |
| EI  | Eingabezwischenreg. | 16 Bit | für externe Eingabedaten   |
| EIA | Adresszwischenreg.  | 16 Bit | für externe Eingabeadresse |

##### Datenspeicher Intern, Extern

|      |                                                                                                   |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IRAM | internes RAM 256x16 aufgeteilt in ARAM und BRAM [Adr.00h-FFh]                                     |
| ARAM | [1. IRAM-Bereich Adr. 00h-7Fh], ARAM laden in A-Reg. ARAM [Adr.00h-7Fh]                           |
| BRAM | [2. IRAM-Bereich Adr. 80h-FFh], BRAM laden in B-Reg. BRAM [Adr.00h-7Fh]                           |
| ERAM | ext. RAM 4x256x16 [Adr. 00h-3FFh] obere Adr.-Bits über Seitenstrg. PGM Reg. Emulator Adr. EFh-FFh |

**Kontroll- und Adress-Register**

|     |                                                                       |
|-----|-----------------------------------------------------------------------|
| PC  | Programmzähler 10 Bit (960 Programmschritte bei Emulation)            |
| PGM | 2 Bit Register zur Seitenadr. des ERAM                                |
| PGT | 3 Bit Register zur Seitenadr. des Konstantenbereiches im PROM         |
| C0  | Schleifenzähler 8 Bit (00h-FFh) 0 bis 255                             |
| C1  | Schleifenzähler 4 Bit (00h-FFh) 0 bis 15                              |
| X   | Indexregister 7 Bit autom. Adr. für ARAM, ROM (00h-7Fh)               |
| Y   | Indexregister 8 Bit autom. Adr. für BRAM, ERAM (00h-FFh)              |
| XS  | X Register Stack                                                      |
| YS  | Y Register Stack                                                      |
| VS  | <i>virtual shift mode</i> Ein mit <i>SET VS</i> Aus mit <i>RST VS</i> |
| VP  | Virtueller Shift-Mode-Pointer, 4 Bit                                  |
| DMC | Adress-Reg. für RAM, 8 Bit, nur bei asynchr. I/O-Mode                 |
| CLP | Einschalten des Begrenzers, für Übergabe des D-Reg. an internen Bus   |

**Statusregister für D-Register, 1 Bit**

|    |                                                            |
|----|------------------------------------------------------------|
| PL | Wird gesetzt bei pos. D Reg. $D < 0 \Rightarrow PL = 0$    |
| MI | Wird gesetzt bei neg. D Reg. $D \geq 0 \Rightarrow PL = 0$ |
| ZR | Wird gesetzt bei D Reg. = 0 $D = 0 \Rightarrow PL = 0$     |
| OV | Überlaufregister der ALU                                   |

**Flagregister, 1 Bit**

|    |                                                            |
|----|------------------------------------------------------------|
| OF | Register ist gesetzt, wenn Daten im Ausgabezwischenreg. EO |
| IF | Register ist gesetzt, wenn Daten im Eingabezwischenreg. EI |
| F0 | Register ist gesetzt, wenn pos. Flanke an Pin F0 vom DSP   |
| F1 | Register ist gesetzt, wenn pos. Flanke an Pin F1 vom DSP   |

**Register für asynchr. I/O-Mode, 1 Bit**

|     |                                                        |
|-----|--------------------------------------------------------|
| ADM | Setzen mit <i>SET ADM</i> , löschen mit <i>RST ADM</i> |
| DMM | Setzen mit <i>SET DMM</i> , löschen mit <i>RST DMM</i> |

**Register für DSP-Kennung, 3 Bit**

|   |                                                      |
|---|------------------------------------------------------|
| U | Wird bei asynchr. Buskopplung mehrerer DSP's gesetzt |
|---|------------------------------------------------------|

**Interne Register des MB8764**

|            |                                                              |
|------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>PCS</b> | Stackpointer, 10 Bit Rücksprungadresse aus dem Unterprogramm |
| <b>DPE</b> | Adresszwischenregister für ERAM, 8 Bit                       |
| <b>DPA</b> | Adresszwischenregister für ARAM, 7 Bit                       |
| <b>DPB</b> | Adresszwischenregister für BRAM, 8 Bit                       |
| <b>DPR</b> | Adresszwischenregister für PROM, 24 Bit                      |
| <b>TBA</b> | Adresseitenregister                                          |
| <b>TBD</b> | Konstantenzwischenspeicher                                   |
| <b>IR0</b> | Anweisungsregister                                           |
| <b>IR1</b> | Anweisungsregister                                           |

**E.1.2 Transferbefehle****Arithm./log. Operationen in 3 Gruppen für Doppelanweisungen**

|       |                                                                 |
|-------|-----------------------------------------------------------------|
| -0- = | NOP ABS ADD NEG MLT SRA SUB SLA MSM AND MRD ORA SUM DIV RED COM |
| -1- = | NOP ADD MLT SUB MSM MRD SUM RED                                 |
| -2- = | NOP MLT MSM SUM RED                                             |

**Konstante → Register**

|                |                                                                                                                                                     |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>LDI:-2-</b> | Lade A Reg. mit Konstante [#FFFF]HEX;[#65535]DEZ<br>LDI:NOP      #\$4000      ; Kommentar                                                           |
| <b>LVP:NOP</b> | Lade VP Reg. mit Konstante [#F]HEX;[#15]DEZ<br>LVP:NOP      #\$4      ; Kommentar                                                                   |
| <b>MOV:NOP</b> | Lade Konstante in Register [D:B:EO:EA und/oder U]<br>MOV:NOP      #\$4000,D:B...      ; Kommentar<br>MOV in D-Reg. schließt Arithm./Log. Befehl aus |
| <b>MOV:-0-</b> | Lade Konstante in Register [X:Y:C0:DMC:PGM:<br>und/oder PGT]<br>MOV:NOP      #\$4000,X:Y...      ; Kommentar                                        |

**Konstante → Register / RAM → Register**

|                |                                                                                        |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>LIB:-2-</b> | Lade A Reg. mit Konstante und B Reg. mit BRAM<br>LIB:NOP      #\$4000      ; Kommentar |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|

**LIY:-2-** Lade A Reg. mit Konstante und B Reg. mit BRAM  
**LIB:NOP**       $\# \$4000$       ; Kommentar  
 BRAM adressiert durch das Y-Register  
 Der Inhalt des Y-Registers wird um 1 erhöht ( $Y=Y+1$ )

### RAM/ROM → Register

**LTB:-1-** Lade A Reg. mit Inhalt IROM (EROM) Adr.[+(X)] und  
 B Reg. mit Inhalt BRAM (ERAM) Adr.[+(Y)/(E) oder (YE)]  
**LTB:NOP**       $\$7F(X), \$7F(YE)$       ; Kommentar

**LAB:-1-** Lade A Reg. mit Inhalt ARAM Adr.[+(X)] und  
 B Reg. mit Inhalt BRAM (ERAM) Adr.[+(Y)/(E) oder (YE)]  
**LAB:NOP**       $\$7F(X), \$7F(YE)$       ; Kommentar

**MOV:-0-** Lade Inhalt von IRAM oder ERAM unter Adr.[+(Y)/(E)/(YE)]  
 nach Register [**EO:A:B:** und/oder **D**]  
**MOV:NOP**       $\$FF(YE), D:A...$       ; Kommentar

**MOV:-0-** Lade Inhalt von IRAM oder ERAM unter Adr.[+(Y)/(E)/(YE)]  
 nach Register [**X:Y:C0:DMC:PGM:** und/oder **PGT**]  
**MOV:NOP**       $\$FF(YE), X:Y...$       ; Kommentar

### RAM → RAM

**MAB:-1-** Lade Inhalt von ARAM unter Adr.[+(X)] nach BRAM  
 oder ERAM unter Adr.[+(Y)/(E) oder (YE)]  
**MAB:NOP**       $\$7F(X), \$7F(YE)$       ; Kommentar

**MBA:-1-** Lade Inhalt von BRAM unter Adr.[+(Y)/(E)/(YE)]  
 nach ARAM unter Adr.[+(X)]  
**MBA:NOP**       $\$7F(X), \$7F(YE)$       ; Kommentar

### Register → RAM

**MOV:-2-** Lade Inhalt des Reg.[**D,A,EL,X,Y,C0,DMC** oder **PC**]  
 in Reg. **EO** und/oder **A** und/oder **B** und/oder in das  
 RAM unter Adr.[+(Y)/(E) oder (YE)]  
**MOV:NOP**       $\$FF(YE)$       ; Kommentar

**Register → Register**

**MOV:NOP** Lade Inhalt des Reg.[D,A,EL,X,Y,C0,DMC oder PC]  
in das D-Reg. und/oder EO:A:B:RAM

**MOV:NOP** A,D:... ; Kommentar

*MOV in D-Reg. schließt Artihm./Log. Befehl aus*

**MOV:-2** Lade Inhalt des Reg.[D,A,EL,X,Y,C0,DMC oder PC]  
in Reg. X und/oder Y / C0 / DMC / PGM  
und/oder PGT

**MOV:NOP** A,C0... ; Kommentar

**E.1.3 Artihmetisch/logische Operationen**

Vorzeichen 0=(+) 1=(-)  
Dezimalpunkt

|         |   |   |   |   |   |   |      |      |                 |
|---------|---|---|---|---|---|---|------|------|-----------------|
|         |   | ↓ | ↓ |   |   |   |      |      |                 |
| A - Reg |   | 0 | 1 | . | 0 | 0 | 0000 | 0000 |                 |
| B - Reg |   | 1 | 1 | . | 0 | 0 | 0000 | 0000 |                 |
| D - Reg | 0 | 0 | 0 | . | 0 | 0 | 0000 | 0000 | 0000 0000000000 |
| I - Bus |   | 0 | 0 | . | 0 | 0 | 0000 | 0000 | 0000            |

pos. Maximalwert +2 - LSB =7FFF Hex

neg. Maximalwert -2 =8000 Hex

**Bei Multiplikation/Division gilt:**

Die Multiplikation/Division wird mit dem Registerinhalten, die zwei Befehlszyklen vor der arithm./log.-Anweisung gültig sind, ausgeführt.

**Für alle anderen arithm./log.-Anweisungen gilt:**

Die Anweisungen werden mit den Registerinhalten, die einen Befehlszyklus vorher gültig sind, ausgeführt.

**NOP:MLT**  $A * B \Rightarrow D$

**NOP:MSM**  $D + A * B \Rightarrow D$

**NOP:MRD**  $D - A * B \Rightarrow D$

**NOP:DIV**  $D / A \Rightarrow D$  17 Zyklen

**NOP:ADD**  $B + A \Rightarrow D$

**NOP:SUM**  $D + A \Rightarrow D$

**NOP:SUB**  $B - A \Rightarrow D$

**NOP:RED**  $D - A \Rightarrow D$

**NOP:ABS**  $|D| \Rightarrow D$

NOP:NEG -  $D \Rightarrow D$   
 NOP:COM /  $D \Rightarrow D$   
 NOP:SRA  $D / 2 \Rightarrow D$  Reg. D um ein Bit nach rechts  
 NOP:SLA  $D * 2 \Rightarrow D$  Reg. D um ein Bit nach links  
 NOP:AND  $D \& A \Rightarrow D$   
 NOP:ORA  $D \vee A \Rightarrow D$   
 NOP Keine Aktion

#### E.1.4 Sprungbefehle

**JMP:-1-** Unbedingter Sprung nach Adr. oder Label  
 JMP:NOP \$ 100 oder JMP Label (Adr.  $\Rightarrow$  PC)  
  
**JSR:-1-** Sprung zum Unterprogramm auf Adr. oder Label  
 JSR:NOP \$ 100 oder JSR Label (PC  $\Rightarrow$  PCS Adr.  $\Rightarrow$  PC)  
  
**RTS:-1-** Rücksprung aus dem Unterprogramm  
 RTS:NOP (PCS  $\Rightarrow$  PC)

#### Bedingte Sprünge - Jump OnCondition

**JOC:-1-** bei Schleifenzählern (JC0 oder JC1)  
 Sprung nach Adr. oder Label bei Reg. C0 > 1 C0 dekrem. 1  
 bei Reg. C1 > 1 C1 dekrem. 1  
 JOC:NOP \$100,C0 oder Label,C1 X und Y um 1 dekrem.  
 Bei Sprüngen mit C0 oder C1 liegt beim Rücksprung  
 (2 cyc) der Wert von Y als Adresse an EA0-EA7  
  
**JOC:-1-** für D-Register Abfrage  
 Sprung nach Adr. oder Label wenn (D < 0) MI (JMI)  
 (D  $\geq$  0) PL (JPL)  
 JOC:NOP Label,ZR:MI ; (D = 0) ZR (JZR)  
  
**JOC:-1-** für interne Flagregister  
 Sprung nach Adr. oder Label wenn kein Eingabedaten im  
 EI-Reg. IF Ausgabedaten im EO-Reg. OF  
 JOC:NOP Label,OF  
  
**JOC:-1-** für internes Flagregister (JOV)  
 Überlauf ALU > 4.0 D-Register > 2.0

Sprung nach Adr. oder Label bei  $ALU > FFFFFFFF$   
 [D-Reg.  $> FFFF$ ]  
 JOC:NOP Label,OV

**JOC:-1-** für externe Flagregister (**JF0** oder **JF1**)  
 Sprung nach Adr. oder Label, bis pos. Flanke an Pin F0  
 oder F1 des DSP  
 JOC:NOP Label,F0

### E.1.5 Spezielle Anweisungen für die indizierte Adressierung

**AVP:-1-** Addiert eine 4 Bit Konstante zum Inhalt des VP-Registers  
 AVP:NOP #\$7 ;VP = VP + 7

**ADY:-1-**  $Y = Y + YS$

**GXY:-1-**  $X = XS, Y = YS$

**SXY:-1-** Lädt eine 4 Bit Konstante in den Schleifenzähler C1 und  
 gleichzeitig  $XS = X, YS = Y, X = Y = 0$

**MXY:-1-** Addiert eine 7 Bit Konstante a zu X und eine  
 8 Bit Konstante b zu Y  
 MXY:NOP #\$a,\$#b

### E.1.6 Weitere Assembler-Anweisungen

**SET** Der SET-Befehl wird zum Setzen von 1-Bit-Registern benutzt.  
 z. B.: ADM:DMM:CLP:VS

**CLR** Der Clear-Befehl wird zum Löschen von Registern benutzt.  
 z. B.: A:B:D:X:Y:F0:F1:IF:OF:VS:OV:CLP:ADM:DMM:DMC

## Adressanweisung

**EQU** Label mit EQU eine Adresse zuordnen z. B. RAMADR=\$FF  
 RAMADR EQU \$FF  
 MOV RAMADR,A ;Wert IRAM \$FF ⇒ Reg. A  
 MOV RAMADR(e),A ;Wert ERAM \$FF ⇒ Reg. A  
 MOV RAMADR(ye),A ;Wert ERAM \$FF+y ⇒ Reg. A

## Konstante → ROM

**DW** Konstante steht unter Progr.-Adr.[>00] im ROM als 24-Bit-Wort.  
 Die unteren 16-Bit werden mit LTB ins A-Reg. geladen.  
 Code FF0800 ⇒ 24-Bit ⇒ 800 Hex ⇒ A  
 DW #\$800 [Hex] = DW #2048 [Dez] = DW #+0.125 [2er]  
 DW #\$C00 [Hex] = DW #49152 [Dez] = DW #-1 [2er]  
 DW #\$0007

## E.2 DSP-Programm

;Schnelle Uebertemperaturerfassung  
;COSY- magn. Extr. Septum

\*\*\*\*\*  
; Definition der Variablen  
\*\*\*\*\*

STDU1 EQU \$02 ;Ereigniszaehler Differenzspannung U1-U2  
STDU2 EQU \$03 ;Ereigniszaehler Differenzspannung U2-U1  
STW1MI EQU \$04 ;Ereigniszaehler Minimalwiderstand 1  
STW1MA EQU \$05 ;Ereigniszaehler Maximalwiderstand 1  
STW2MI EQU \$06 ;Ereigniszaehler Minimalwiderstand 2  
STW2MA EQU \$07 ;Ereigniszaehler Maximalwiderstand 2  
STW1MM EQU \$08 ;Ereigniszaehler Maximalwiderstand 1 (Kurve)  
STW2MM EQU \$09 ;Ereigniszaehler Maximalwiderstand 2 (Kurve)  
IERRST EQU \$0a ;Ereigniszaehler Stromsignal fehlt

;Speicherplaetze fuer die Butterworth Filter-Koeffizienten

KOF1 EQU \$10 ;Koeffizient1  
KOF2 EQU \$11 ;Koeffizient2  
KOF3 EQU \$12 ;Koeffizient3  
KOF4 EQU \$13 ;Koeffizient4  
KOF5 EQU \$14 ;Koeffizient5

;Speicherplaetze fuer die  
;Spannung 1

SP1 EQU \$15 ;Messwert aus ADC  
SP1V1 EQU \$16 ;1. Zwischenregister  
SP1V2 EQU \$17 ;2. Zwischenregister  
SP10 EQU \$18 ;Ergebnis der Filterung

;Speicherplaetze fuer die  
;Spannung 2

SP2 EQU \$19 ;Messwert aus ADC  
SP2V1 EQU \$1A ;1. Zwischenregister  
SP2V2 EQU \$1B ;2. Zwischenregister  
SP20 EQU \$1C ;Ergebnis der Filterung

;Speicherplaetze fuer den  
;Stromwert

STROM EQU \$1D ;Messwert aus ADC  
STRV1 EQU \$1E ;1. Zwischenregister

```
STRV2 EQU $1F    ;2. Zwischenregister

STR_0 EQU $20    ;Ergebnis der Filterung
STR_B EQU $82    ;Ergebnis der Filterung (B-RAM $02)

;Speicherplaetze fuer den
;Stromwert Stack
STRBA EQU $27    ;1. Speicherplatz des Strom-Stack's
STRBB EQU $28    ;2. Speicherplatz des Strom-Stack's
STRBE EQU $37    ;letzter Speicherplatz des Strom-Stack's

;Speicherplaetze fuer den
;aktuellen Widerstand
WID1 EQU $c9     ;Widerstandswert1
WID1B EQU $49    ;Kopie des 1. Widerstandswertes
WID2 EQU $ca     ;Widerstandswert2
WID2B EQU $4a    ;Kopie des 2. Widerstandswertes

;Hilfsspeicherplaetze
SLZL1 EQU $24    ;Schleifenzaehler
LED EQU $26      ;LED-Flags
BMAXR EQU $03    ;Max. Anzahl Fehler(B-RAM $03)
DMAXR EQU $83    ;Max. Anzahl Fehler(I-RAM $83)

;Speicherplaetze fuer die
;Spannungsdifferenz
SUB1 EQU $80     ;Spannungsdifferenz U1-U2
SUB2 EQU $81     ;Hilfsspeicherplatz Spannungsdifferenz

;Speicherplatz fuer die
;zulaessige Spannungsdifferenzabweichung der Spulen
DIFU EQU $57

;Speicherplaetze fuer die Koeffizienten zur
;Wid. Berechnung bei Gleichgewichtstemperatur
RNUL1 EQU $50    ;R0 Spule1
RNUL2 EQU $51    ;R0 Spule2
DELR1 EQU $52    ;zul. Widerstandserhoehung Spule1
DELR2 EQU $58    ;zul. Widerstandserhoehung Spule2
KEINS EQU $53    ;Konstante Spule1
KZWEI EQU $54    ;Konstante Spule2
RX1X EQU $55     ;Ergebnis der Widerstandsberechnung1
RX2X EQU $56     ;Ergebnis der Widerstandsberechnung2
```

```
;*****
```

```
;Konstanten im EPROM
```

```
;*****
```

```
org      $0000      ;Anfangsadresse Koeffizienten
DW #+0.019789      ;Koeffizient 1
DW #+0.039579      ;Koeffizient 2
DW #+0.019789      ;Koeffizient 3
DW #-0.643662      ;Koeffizient 4
DW #+1.564504      ;Koeffizient 5
```

```
-----
DW #+0.00428      ;Koeffizient (Strom) Adr.$05 (KI)
DW #+0.357143      ;Strom min          Adr.$06 (Imin)
```

```
-----
DW #-0.000640      ;!Spannungsdifferenztafel Adr.$07
DW #-0.000680      ;!
DW #-0.000720      ;!
DW #-0.000720      ;!
DW #-0.000760      ;!
DW #-0.000800      ;!
DW #-0.000840      ;!
DW #-0.000880      ;!
DW #-0.000880      ;!
DW #-0.000920      ;!
DW #-0.000960      ;!
DW #-0.001000      ;!
DW #-0.001000      ;!
DW #-0.001080      ;!
DW #-0.001080      ;!
DW #-0.001120      ;!
DW #-0.001160      ;!
DW #-0.001200      ;!
DW #-0.001240      ;!
DW #-0.001280      ;!
DW #-0.001320      ;!
DW #-0.001360      ;!
DW #-0.001360      ;!
DW #-0.001400      ;!
DW #-0.001440      ;!
DW #-0.001480      ;!
DW #-0.001560      ;!
DW #-0.001600      ;!
DW #-0.001600      ;!
DW #-0.001680      ;!
DW #-0.001720      ;!
```

```

DW #-0.001760 ;!
DW #-0.001800 ;!
DW #-0.001840 ;!
DW #-0.001880 ;!
DW #-0.001920 ;!
DW #-0.002000 ;!
DW #-0.002040 ;!
DW #-0.002080 ;!
DW #-0.002120 ;!
DW #-0.002200 ;!
DW #-0.002240 ;!
DW #-0.002280 ;!
DW #-0.002320 ;!
DW #-0.002400 ;!
DW #-0.002400 ;!
DW #-0.002480 ;!
DW #-0.002560 ;!
DW #-0.002600 ;!
DW #-0.002640 ;!
DW #-0.002720 ;!
DW #-0.002760 ;!
DW #-0.002840 ;!
DW #-0.002920 ;!
DW #-0.002960 ;!
DW #-0.003040 ;!
DW #-0.003120 ;!
DW #-0.003160 ;!
DW #-0.003200 ;!
DW #-0.003280 ;!
DW #-0.003360 ;!
DW #-0.003400 ;!
DW #-0.003480 ;!
DW #-0.003600 ;!
DW #-0.003640 ;!
DW #-0.003720 ;!
DW #-0.003800 ;!
DW #-0.003880 ;!
DW #-0.003920 ;!
DW #-0.004040 ;!
DW #-0.004120 ;!
DW #-0.004200 ;!
DW #-0.004280 ;!
DW #-0.004360 ;!
DW #-0.004480 ;!
DW #-0.004520 ;!
DW #-0.004640 ;!
DW #-0.004720 ;!
DW #-0.004800 ;!

```

```

DW #-0.004880 ;!
DW #-0.005000 ;!
DW #-0.005080 ;!
DW #-0.005160 ;!
DW #-0.005280 ;!
DW #-0.005400 ;!
DW #-0.005520 ;!
DW #-0.005560 ;!
DW #-0.005680 ;!
DW #-0.005800 ;!
DW #-0.005880 ;!
DW #-0.006040 ;!
DW #-0.006120 ;!
DW #-0.006200 ;!
DW #-0.006360 ;!
DW #-0.006480 ;!
DW #-0.006600 ;!
DW #-0.006720 ;!
DW #-0.006840 ;!
DW #-0.007000 ;!
DW #-0.007080 ;!
DW #-0.007240 ;!
DW #-0.007360 ;!
DW #-0.007480 ;!
DW #-0.007600 ;!
DW #-0.007720 ;!
DW #-0.007920 ;!
DW #-0.008040 ;!
DW #-0.008120 ;!
DW #-0.008280 ;!
DW #-0.008480 ;!
DW #-0.008640 ;!
DW #-0.008800 ;!
DW #-0.009000 ;!
DW #-0.009200 ;!
DW #-0.009400 ;!
DW #-0.009600 ;!
;-----
DW #+0.0032155 ;!Max Spannungsdiff. ADR$7b (KU)
;-----
DW #+1.0004759 ;!Wid. Maximalwert 1 ADR$7C 80C
DW #+1.0038790 ;!Wid. Maximalwert 2 ADR$7D 80C

DW #+0.7756000 ;!Wid. Minimalwert 1 ADR$7E 10C
DW #+0.7780170 ;!Wid. Minimalwert 2 ADR$7F 10C

```

```

;*****
;      Programm
;*****

INIT   ORG      $0080          ;Anfangsadr. des Programms
       MOV      #$FF,C0        ;INITIALISIERUNG der
                                ;Register und Flags
       MOV      #$000,PGM      ;
       MOV      #$000,PGT      ;
       CLR      A:B:D:X:Y:f1:VS ;
CLRAM  MOV      D,$00(y)        ;I-RAM loeschen
       JCO      CLRAM

       LTB      $00,$00         ;Filter-
       MOV      A,KOF1          ;Koeffizienten in RAM
       MAB      KOF1,KOF1       ;uebertragen

       LTB      $01,$00
       MOV      A,KOF2
       MAB      KOF2,KOF2

       LTB      $02,$00
       MOV      A,KOF3
       MAB      KOF3,KOF3

       LTB      $03,$00
       MOV      A,KOF4
       MAB      KOF4,KOF4

       LTB      $04,$00
       MOV      A,KOF5
       MAB      KOF5,KOF5

       MOV      a,$08(e)        ;Start ADC

       MOV      #$0028,D        ;Anzahl der zulaessigen
       MOV      D,DMAXR         ;Ueberschreitungen in RAM

       MOV      #+0.81257,D     ;!R0 Spule1
       MOV      D,RNUL1         ;in RAM uebertragen

       MOV      #+0.81481,D     ;!R0 Spule2
       MOV      D,RNUL2         ;in RAM uebertragen

       MOV      #+0.03218,D     ;!Delta R1

```

[illegible]

```

;*****
MOV    $81(e),D    ;auslesen ADC2
NOP:SRA    ;D/2 ->D
LDI:NOP #$7FFF    ;0111 1111 1111 1111 -> A
NOP:AND    ;D UND A -> D
MOV    D,SP2    ;D -> Hauptspeicherplatz SP2

;*****
;ADC3 auslesen (Stromwert)
;Messwert nach rechts schieben und Vorzeichenbit loeschen.
;Ergebnis in D-Register und unter Adresse 'STROM' abspeichern.
;*****
MOV    $A1(e),D    ;auslesen ADC3 Strom
NOP:SRA    ;D/2 ->D
LDI:NOP #$7FFF    ;loeschen des ersten Bits
NOP:AND    ;D UND A -> D
MOV    D,STROM    ;D -> Hauptspeicherplatz Strom
;*****

MOV    a,$08(e)    ;Start ADC
MOV    a,$06(e)    ;Signal an Watchdog
LDI    #$FF00    ;A Reg. mit Bitmaske laden
MOV    A,LED    ;HSPS-LED loeschen

;*****
;Dig. Filter Spannung1
;*****
CLR    A:B:X:Y    ;Register loeschen
LAB    SP1,KOF3    ;Messwert->A, Koeff. 3->B
MOV    SP1V2,D    ;2.Zwischenregister -> D
NOP:MSM    ;A*B+D -> D
MOV    D,SP10    ;D -> Ergebnisregister
LAB    SP1,KOF2    ;Messwert->A, Koeff. 2->B
MOV    SP1V1,D    ;1.Zwischenregister -> D
NOP:MSM    ;A*B+D -> D
LAB    SP10,KOF5    ;Ergebnisreg.->A,Koeff. 5->B
NOP
NOP:MSM    ;A*B+D -> D
LAB    SP1,KOF1    ;Messwert->A,Koeff. 2->B
MOV    D,SP1V2    ;D -> 2.Zwischenregister
NOP:MLT    ;A*B -> D
LAB    SP10,KOF4    ;Ergebnisreg.->A,Koeff. 4->B
NOP
NOP:MSM    ;A*B+D -> D
MOV    D,SP1V1    ;D -> 1.Zwischenregister

;*****
;Dig. Filter Spannung2

```

```
;*****
```

```
CLR      A:B:X:Y      ;Register loeschen
LAB      SP2,KOF3      ;Messwert->A, Koeff. 3->B
MOV      SP2V2,D       ;2.Zwischenregister -> D
NOP:MSM                      ;A*B+D -> D
MOV      D,SP20        ;D -> Ergebnisregister
LAB      SP2,KOF2      ;Messwert->A, Koeff. 2->B
MOV      SP2V1,D       ;1.Zwischenregister -> D
NOP:MSM                      ;A*B+D -> D
LAB      SP20,KOF5      ;Ergebnisreg.->A,Koeff. 5->B
NOP
NOP:MSM                      ;A*B+D -> D
LAB      SP2,KOF1      ;Messwert->A,Koeff. 2->B
MOV      D,SP2V2       ;D -> 2.Zwischenregister
NOP:MLT                      ;A*B -> D
LAB      SP20,KOF4      ;Ergebnisreg.->A,Koeff. 4->B
NOP
NOP:MSM                      ;A*B+D -> D
MOV      D,SP2V1       ;D -> 1.Zwischenregister
```

```
;*****
```

```
;Dig. Filter STROMSIGNAL
```

```
;*****
```

```
CLR      A:B:X:Y      ;Register loeschen
LAB      STROM,KOF3     ;Messwert->A, Koeff. 3->B
MOV      STRV2,D       ;2.Zwischenregister -> D
NOP:MSM                      ;A*B+D -> D
MOV      D,STR_0       ;D -> Ergebnisregister
LAB      STROM,KOF2     ;Messwert->A, Koeff. 2->B
MOV      STRV1,D       ;1.Zwischenregister -> D
NOP:MSM                      ;A*B+D -> D
LAB      STR_0,KOF5     ;Ergebnisreg.->A,Koeff. 5->B
NOP
NOP:MSM                      ;A*B+D -> D
LAB      STROM,KOF1     ;Messwert->A,Koeff. 2->B
MOV      D,STRV2       ;D -> 2.Zwischenregister
NOP:MLT                      ;A*B -> D
LAB      STR_0,KOF4     ;Ergebnisreg.->A,Koeff. 4->B
NOP
NOP:MSM                      ;A*B+D -> D
MOV      D,STRV1       ;D -> 1.Zwischenregister
```

```
;*****
```

```
;Test ob Stromsignal OK
```

```
;*****
```

```
LDI      #+0.120000    ;3V
MOV      SP10,B
NOP:SUB
JMI      TEST1
```

```

        LDI      #+0.107143      ;150A
        MOV      STR_0,B
        NOP:SUB
        JMI      IERROR
TEST1   LDI      #+0.12000      ;3V
        MOV      SP20,B
        NOP:SUB
        JMI      TEST2
        LDI      #+0.107143      ;150A
        MOV      STR_0,B
        NOP:SUB
        JMI      IERROR
;*****
;Widerstandsberechnung1
;*****
TEST2   MOV      SP10,D          ;Spannungs Messwert 1 -> D
        MOV      STR_0,A          ;Strom Messwert -> A
        MOV      A,STR_B          ;Kopie des Stromwertes in B-RAM
        NOP:DIV          ;D/A -> D
        MOV      D,WID1          ;Speicherung in WID1
;*****
;Widerstands-Maximalwert Berechnung1
;*****
        LAB      KEINS,$02
        NOP
        NOP:MLT
        MOV      D,B
        MOV      $82,A
        MOV      #+1.000,D
        NOP:MSM
        MOV      D,A
        MOV      RNUL1,D
        NOP
        NOP:DIV
        MOV      DELR1,A
        NOP:SUM
        MOV      D,RX1X
;*****
;Widerst. max Auswertung1
;*****
        LAB      RX1X,WID1B
        NOP:SUB
        JPL      SUM1X
;*****
;Widerstandsberechnung2
;*****
C1XX    MOV      SP20,D          ;Spannungs Messwert 2 -> D
        MOV      STR_0,A          ;Strom Messwert -> A

```

```

NOP
NOP:DIV                ;D/A -> D
MOV    D,WID2          ;Speicherung
;*****
;Widerstands-Maximalwert Berechnung2
;*****
LAB    KZWEI,$02
NOP
NOP:MLT
MOV    D,B
MOV    $82,A
MOV    #+1.00,D
NOP:MSM
MOV    D,A
MOV    RNUL2,D
NOP
NOP:DIV
MOV    DELR2,A
NOP:SUM
MOV    D,RX2X
;*****
;Widerst. max Auswertung2
;*****
LAB    RX2X,WID2B
NOP:SUB
JPL    SUM2X
;*****
;Widerst. min Auswertung1
;*****
C2XX   LTB    $7E,WID1B
NOP:SUB
JMI    LED_V
;*****
;Widerst. min Auswertung2
;*****
CONT6  LTB    $7F,WID2B
NOP:SUB
JMI    LED_VI
;*****
;Spannungsdifferenzen U1-U2 bilden
;*****
CONT7  MOV    SP10,B
MOV    SP20,A
NOP:SUB
MOV    D,SUB1

```

```

;*****
;Spannungsdifferenzberechnung (zulaessige Abweichung)
;*****
        LTB      $7B,$02
        NOP
        NOP:MLT
        MOV      D,DIFU

;*****
; Test auf Messbereich erreicht
;*****
        LTB      $06,$02          ;Strommindestwert,Stromwert
        NOP:SUB          ; B - A -> D
        JPL      I500          ;wenn pos. Sprung nach I500

;*****
; Loeschen der Ereigniszaehler
;*****
        MOV      #$08,C0          ;Reg. C0 mit 7 laden
        CLR      A:Y          ;A,Y Reg. = 0
        MOV      A,LED          ;Flagregister LED loeschen
CSUMX    MOV      A,STDU1(y)      ;Ereigniszaehler loeschen
        JCO      CSUMX
        JMP      DIFFE          ;Sprung nach DIFFE

;*****
;Tabellenplatz berechnen
;*****
LOOP5    CLR      A:B:X:Y          ;Register loeschen
TABLE    LTB      $06,$02          ;Strommindestwert,Stromwert
        NOP:SUB          ;B - A -> D
        LTB      $05,$02          ;KI,I
        MOV      D,B          ;D -> B
        NOP
        NOP:MLT          ;A * B -> D
        MOV      D,X:Y          ;D -> X,Y

;*****
;Spannungsdifferenzen mit Tabelle vergleichen
;*****
        LTB      $07(X),$00      ;Tabellenwert,SUB1
        NOP:SUB          ;B - A -> D
        MOV      D,SUB2          ;D zwischenspeichern
        NOP:ABS          ;|D|
        MOV      DIFU,A          ;DIFU -> A
        NOP:RED          ;D - A -> D
        JPL      LED_I          ;bed. Sprung LED_I

;*****
;Widerst. max Auswertung1
;*****

```

```

RMAXA   LTB      $7C,WID1B
        NOP:SUB
        JPL      LED_III
;*****
;Widerst. max Auswertung2
;*****
RMAXB   LTB      $7D,WID2B
        NOP:SUB
        JPL      LED_IV
;*****
;Schleifenzaehler pruefen
;*****
DIFFE   MOV      SLZL1,C0
        JCO      LOOP
;*****
;ENDE Messschleife
;*****

;*****
;Stack fuer Stromwerte Schieben
;*****
        MOV      #$10,C0          ;C0 mit 15 laden
        CLR      X,Y
PUSH    MOV      STRBB(Y),A        ;Ringtausch
        MOV      A,STRBA(Y)
        JCO      PUSH
        MOV      STR_0,A          ;Stromwert -> Stackende
        MOV      A,STRBE
;*****
;AUSWERTUNG der Ereigniszaehler
;80 Grad C Abschaltgrenze
;*****
        LAB      STW1MA,BMAXR      ;Max Wid 1
        NOP:SUB
        JPL      MAX2
        LDI      #$0020
        MOV      LED,D
        NOP:ORA
        MOV      D,LED
MAX2     LAB      STW2MA,BMAXR      ;Max Wid 2
        NOP:SUB
        JPL      IRAMP
        LDI      #$0010
        MOV      LED,D
        NOP:ORA

```

```

MOV      D,LED
;*****
; Test auf Strom-Rampe
;*****
IRAMP    LAB      STRBA,$02
NOP:SUB
NOP:ABS
LDI      #$0068          ;8,9 A
NOP:RED
JPL      LEDRAM
;*****
;AUSWERTUNG der Ereigniszaehler
;Gleichgewichtstemperatur + 10 K
;*****
LAB      STW1MM,BMAXR    ;Max Wid 2
NOP:SUB
JPL      MAXX2

LDI      #$0020
MOV      LED,D
NOP:ORA
MOV      D,LED

MAXX2    LAB      STW2MM,BMAXR    ;Max Wid 2
NOP:SUB
JPL      MIN1

LDI      #$0010
MOV      LED,D
NOP:ORA
MOV      D,LED
;*****
;AUSWERTUNG der Ereigniszaehler
;10 Grad C Abschaltgrenze
;*****
MIN1     LAB      STW1MI,BMAXR    ;Min Wid 1
NOP:SUB
JPL      MIN2

LDI      #$0008
MOV      LED,D
NOP:ORA
MOV      D,LED

MIN2     LAB      STW2MI,BMAXR    ;Min Wid 2
NOP:SUB
JPL      DIFF1

```

```

LDI      #$0004
MOV      LED,D
NOP:ORA
MOV      D,LED

;*****
;AUSWERTUNG der Ereigniszaehler
;Differenzspannung
;*****
DIFF1    LAB      STDU1,BMAXR      ;Max U Diff 1
NOP:SUB
JPL      DIFF2

LDI      #$0002
MOV      LED,D
NOP:ORA
MOV      D,LED

DIFF2    LAB      STDU2,BMAXR      ;Max U Diff 2
NOP:SUB
JPL      AUSWER

LDI      #$0001
MOV      LED,D
NOP:ORA
MOV      D,LED

;*****
;AUSWERTUNG des Ereigniszaehlers
;Stromsignalfehler
;*****
AUSWER   LAB      IERRST,BMAXR      ;Max IError
NOP:SUB
JPL      LEDOUT

LDI      #$0003
MOV      LED,D
NOP:ORA
MOV      D,LED

;*****
;Ausgabe und Maskenvergleich
;der LED-Flags
;*****
LEDOUT   MOV      LED,D      ;LED-Flags -> D
LDI      $FF00      ;ober 8 Bit setzen
NOP:ORA      ;logisch ODER
MOV      D,$04(e)      ;Ausgabe an LED's

```

```

LDI    #$003f          ;Fehlermaske
NOP:AND          ;logisch UND
JZR     HLOOP          ;bei 0 Ruecksprung
                        ;zur Hauptschleife

;*****
;Abschaltung
;*****
MOV     a,$05(e)       ;Abschalt-Signal
                        ;an Ausgabekarte
ELOOP   NOP
NOP
MOV     LED,A
MOV     A,$04(e)       ;Ausgabe an LED's
NOP
NOP
MOV     a,$06(e)       ;Signal an Watchdog
NOP
NOP
JMP     ELOOP          ;Endlosschleife
;////////////////////////////////////////
;ENDE des Hauptprogramms
;////////////////////////////////////////

;*****
;Ereigniszaehler STW1MA=STW1MA+1
;*****
LED_III LDI    #$0001
MOV     STW1MA,D
NOP:SUM
MOV     D,STW1MA
JMP     RMAXB

;*****
;Ereigniszaehler STW2MA=STW2MA+1
;*****
LED_IV  LDI    #$0001
MOV     STW2MA,D
NOP:SUM
MOV     D,STW2MA
JMP     DIFFE

;*****
;Ereigniszaehler STW1MI=STW1MI+1
;*****
LED_V   LDI    #$0001
MOV     STW1MI,D

```

```

NOP:SUM
MOV     D,STW1MI
JMP     CONT6
;*****
;Ereigniszaehler STW2MI=STW2MI+1
;*****
LED_VI  LDI     #$0001
MOV     STW2MI,D
NOP:SUM
MOV     D,STW2MI
JMP     CONT7
;*****
;Ereigniszaehler STW1MM=STW1MM+1
;*****
SUM1X   LDI     #$0001
MOV     STW1MM,D
NOP:SUM
MOV     D,STW1MM
JMP     C1XX
;*****
;Ereigniszaehler STW2MM=STW2MM+1
;*****
SUM2X   LDI     #$0001
MOV     STW2MM,D
NOP:SUM
MOV     D,STW2MM
JMP     C2XX
;*****
;Ereigniszaehler fuer die Differenzspannung incrementieren
;*****
LED_I    MOV     SUB2,D
JMI     LED_II           ;Test auf negative Diff.

MOV     STDU1,D
LDI     #$0001
NOP:SUM
MOV     D,STDU1          ;Ereigniszaehler
                        ;STDU1=STDU1+1
JMP     RMAXA            ;Ruecksprung

LED_II   MOV     STDU2,D
LDI     #$0001
NOP:SUM
MOV     D,STDU2          ;Ereigniszaehler
                        ;STDU1=STDU1+1
JMP     RMAXA            ;Ruecksprung
;*****
;Ereigniszaehler IERRST=IERRST+1

```







**Jül-2964**  
**September 1994**  
ISSN 0944-2952