

Technische Universität Wien

Diplomarbeit

Entwicklung und Aufbau einer rechnergesteuerten Strahlmodulation für Elektronenstrahlbearbeitungsanlagen

ausgeführt am Institut für
Industrielle Elektrotechnik und Materialwissenschaften
der Technischen Universität Wien

unter Anleitung von Univ.Doz. Dr. Albert SCHULER
und DI. Bernhard WEBER

durch

Franz Schlögl
Matr.Nr. 91 26 662

Großfeldgasse 10/3/7, A-7350 Oberpullendorf

Oberpullendorf, Juli 2000

Inhaltsverzeichnis

<u>1 Zusammenfassung</u>	4
<u>2 Summation</u>	5
<u>3 Problemstellung</u>	6
<u>4 Der Aufbau von NC Maschinen</u>	8
4.1 <u>Gegebene Voraussetzungen und Randbedingungen</u>	8
4.1.1 <u>Aufbau von Werkzeugmaschinen mit numerischen Steuerungen</u>	8
4.1.2 <u>Aufbau von Elektronenstrahlbearbeitungsanlagen</u>	11
4.2 <u>Anforderungen an eine CNC für Elektronenstrahl- und Laserbearbeitungsanlagen - Leistungsmerkmale des Systems PB-CON</u>	12
4.3 <u>Aufgabe der Strahlmodulation</u>	13
<u>5 Struktur der numerischen Steuerung PB-CON</u>	14
5.1 <u>Übersicht</u>	14
5.2 <u>Beschreibung der Kartenfunktionen</u>	15
5.3 <u>Funktionsbeschreibung der Modulatorkarte</u>	17
5.3.1 <u>Funktionsübersicht der Modulatorkarte</u>	17
5.3.2 <u>Die Funktionsgeneratoren</u>	17
5.3.3 <u>Synchronisierung der Modulatorkarte</u>	19
5.3.4 <u>Der Strahlmodulator</u>	19
<u>6 Baugruppen der Modulatorkarte und deren Realisierung</u>	21
6.1 <u>Übersicht und Zusammenschaltung der Baugruppen</u>	21
6.1.1 <u>Die Achslagenkorrektur</u>	21
6.2 <u>Die Bus-Ankopplung</u>	21
6.3 <u>Beschreibung der PLL</u>	22
6.4 <u>Beschreibung der beiden Controller</u>	23
6.4.1 <u>Fokuscontroller</u>	23
6.4.2 <u>Wedelcontroller</u>	24
6.5 <u>RAM</u>	25
6.6 <u>Beschreibung der Potentialtrennung</u>	26

6.7 Beschreibung der Referenzspannungsquelle	27
6.7.1 Erreichen des notwendigen Stromes mit einem nachgeschalteten OPV mit Emitterfolger	28
6.7.2 Erreichung des notwendigen Stromes mit einem externen Transistor	29
6.8 DAC Beschreibung	31
6.8.1 Beschreibung des DAC AD768	31
6.8.2 DAC arbeitet auf virtuellen Nullpunkt	32
6.9 Beschreibung der Multiplizierschaltung	37
6.9.1 Funktionsweise des verwendeten Analogmultiplizierers	37
6.9.2 Erweiterung des Einquadrantenmultiplizierers auf vier Quadranten	38
6.9.3 Berechnung und Wahl der Widerstandswerte	43
6.9.4 Einstellen der Multiplizierschaltung	45
6.10 Leitungstreiber	47
6.10.1 Allgemeines und Anforderungen an den Leitungstreiber	47
6.10.2 Symmetrische Signalübertragung	48
6.10.3 Ausgangstreiber wie auf FUPI-Verstärker	49
6.10.4 Ausgangstreiber mit invertierender und nichtinvertierender OPV-Schaltung	50
6.10.5 Verwendete Ausgangsschaltung	50
6.11 MACH5 interne Register und Steuerfunktionen	51
7 Machprogramme	55
7.1.1 Source-Code Fokuscontroller	55
7.1.2 Source-Code Wedelcontroller	61
8 Zukunftsaussichten	68
8.1 Neue Anforderungen	68
8.2 Mögliche Realisierungen	68
8.2.1 Realisierung auf der Modulatorkarte mit größerem MACH	68
9 Index	69
9.1 Abbildungsverzeichnis	69
9.2 Literaturverzeichnis	71
9.3 Datenhandbücher/Datenblätter	71
10 Anhang	72

1 Zusammenfassung

Aufgabe dieser Diplomarbeit war die Entwicklung einer rechnergesteuerten Strahlmodulation für Elektronenstrahlbearbeitungsanlagen. Die Strahlmodulation besteht aus der Fokusmodulation und der Strahlwedelung. Die Frequenz der Signale soll im Bereich von unter 1Hz bis über 60 kHz einstellbar sein.

In Kapitel 3, NC Maschinen, wird der Aufbau von Werkzeugmaschinen und im speziellen der Aufbau von Elektronenstrahlbearbeitungsmaschinen besprochen. Weiter wird der Zweck der Fokusmodulation und der Strahlwedelung beschrieben.

Die Struktur der numerischen Steuerung PB-CON wird in Kapitel 4 erklärt. Es werden kurz die Funktionen der Karten der numerischen Steuerung beschrieben. Die Funktion der Modulatorkarte wird in einem Unterkapitel ausführlich erläutert.

In Kapitel 5 ist die Realisierung der Modulatorkarte beschrieben. Dabei wird zuerst ein grober Überblick über die Baugruppen der Platine gegeben. Danach werden die Realisierung der Baugruppen und die verwendeten Bauteile besprochen. Die Realisierungsmöglichkeiten die zur Auswahl standen werden kurz diskutiert.

Die Programme für die MACH-Bausteine sind in Kapitel 6 zu finden. Durch ausführliche Kommentare sind die MACH Programme leicht zu verstehen. Das Programm für den Test und die Inbetriebnahme der Modulatorkarte ist im Testprogramm EBMTEST enthalten.

Im Verlauf der Testphase kam es zu einer Reihe von Verbesserungsvorschlägen und Wünschen für eine Funktionserweiterung. Diese erweiterten Aufgaben und mögliche Realisierungen werden im Abschnitt 8 kurz erläutert.

Abschnitt 9 enthält die Literaturliste.

Im Anhang sind die Schaltpläne der Modulatorkarte und eine Abbildung der Platine enthalten.

2 Summation

The job of these thesis was the development of a computer controlled beam modulation for electronic beam machines. The beam modulation consist of the focus modulation and the beam oscillation. The frequency of the signals should be controllable in the range of under 1 Hz to over 60 kHz.

In chapter 3, NC (numeric control) machines, the structure of machine tools and especially the structure of electronic beam machines is explained and the intension of the focus modulation and the beam oscillation is characterized.

Chapter 4 explains the structure of the numerical control PB-CON. The jobs of all printed circuit boards are described in a short way. A detailed description of the functions of the modulator is found in a subchapter.

Chapter 5 describes the realisation of the modulator. First of all the functions of the assembly groups are resumed. Afterwards the realisation of the assembly groups is explained. The different possibilities of the realisation are discussed.

In chapter 6 you can find the programs of the MACH components. MACH programs can be understood easily by the detailed comments in the programs. The test software EBMTEST contains the software for the test and operation of the modulator.

During the test a lot of possible improvements and wishes for the enlargement of the functions were deposited. These possible realisations and additional tasks are explained in chapter 8.

Chapter 9 consists of a list of the graphs and the bibliography.

The appendix contains the schematics and a picture of the modulator.

3 Problemstellung

In der industriellen Fertigungstechnik werden seit Jahrzehnten Elektronenstrahlen (EB = electron beam) mit hoher Leistung (3 kW bis 100 kW) zur Materialbearbeitung (Schweißen, Bohren) eingesetzt. Am Institut für industrielle Elektrotechnik und Materialwissenschaften (früher Allgemeine Elektrotechnik) der TU Wien kam von 1970 bis 2000 eine EB-Schweiß- und Bohranlage für zahlreiche Forschungs- und Fertigungsaufgaben zum Einsatz.

Weil sich die Anforderungen, die bei der Elektronenstrahlbearbeitung an die numerischen Steuerungen (NC numerical control) gestellt werden, wesentlich von NCs für konventionelle Werkzeugmaschinen unterscheiden, wurden am Institut mehrere Generationen von numerischen Steuerungen entwickelt. In die neueste numerische Steuerung PB_Control wurde die gesammelte Erfahrung und die Anforderungen der Firma pro-beam aus München eingebracht. Die neue Steuerung erhöht wesentlich die Arbeitsgeschwindigkeit, die erzielbare Bearbeitungsgenauigkeit und hat einen wesentlich größeren Funktionsumfang.

Bei der Elektronenstrahlbearbeitung wird der Elektronenstrahl zusätzlich zur Bewegung entlang der Bearbeitungsbahn periodisch abgelenkt (Strahlwedelung) und die Fokusslage des Elektronenstrahles verändert (Fokusmodulation). Zusätzlich wird die Strahlablenkung zum Ausgleich von Abweichungen der Werkstückbewegungen verwendet. Beim Bohren von sehr kleinen Löchern macht das Werkstück eine lineare Bewegung und der Elektronenstrahl wird von Bohrloch zu Bohrloch geführt. Während der Bohrzeit muss der Strahl entsprechend der linearen Werkstückbewegung mitgeführt werden. Bei hohen Bohrfrequenzen wird der Elektronenstrahl von Interfacekarten unabhängig von der Maschinenregelung gesteuert. Bei Bohrfrequenzen von über 60kHz und einer Reglerfrequenz von 10kHz ist die Regelung nicht in der Lage den Strahl in der Regelschleife zu steuern. Die periodische Ablenkung des Strahles und der Fokusslage wird von einem Interface übernommen.

Die Aufgabe dieser Diplomarbeit war die Entwicklung und der Aufbau einer rechnergesteuerten Strahlmodulation für Elektronenstrahlbearbeitungsanlagen. Die Strahlmodulation steuert die Strahlwedelung und die Fokusmodulation. Die rechnergesteuerte Strahlmodulation ist auf der Modulatorkarte realisiert.

Die Modulatorkarte hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Generierung von drei Funktionen im Frequenzbereich von unter 1Hz bis über 60 kHz.
- Zwei Funktionen sind zueinander synchron und bilden eine zweidimensionale Figur, die sogenannte Wedelfigur.
- Die Wedelfigur wird in die Richtung des Richtungsvektors gedreht und die Strahlposition addiert.
- Die Funktionen werden durch Stützpunkte definiert.
- Alle Funktionen werden von der NC über den Maschinenbus gesteuert.
- Die Ausgangsamplituden sollen unabhängig voneinander von 0 bis $\pm 10V$ ($\pm 20V$ symmetrisch) steuerbar sein.
- Zum Wedelsignal soll die Strahlposition addiert werden.
- Bei der Addition von Wedelfigur und Strahlposition kann der $\pm 10V$ Bereich überschritten werden. Diese Übersteuerung des Ausganges soll durch LED angezeigt werden. Eine Begrenzung der Ausgangsamplitude ist nicht notwendig.
- Der Maschinenbus und die Ausgangssignale müssen galvanisch getrennt sein.

4 Der Aufbau von NC Maschinen

4.1 Gegebene Voraussetzungen und Randbedingungen

4.1.1 Aufbau von Werkzeugmaschinen mit numerischen Steuerungen

Werkzeugmaschinen sind Fertigungseinrichtungen, die aus geeigneten Rohmaterialien bestimmte Produkte herstellen. Bekannte Typen sind Bohr-, Dreh- und Fräsmaschinen, Bearbeitungszentren (hier sind kombinierte Bohr-, Dreh- und Fräsarbeiten mit einer Maschine möglich), Schleifmaschinen, Nibbelmaschinen, Schmiedemaschinen, Rohr- und Blechbiegemaschinen usw. Weitere Anwendungen sind Schweißanlagen, Brennschneidanlagen, Laser-Cutter und Elektronenstrahlbearbeitungsmaschinen.

Die Aufgabe der NC ist es, die Werkzeugmaschine aufgrund eines eingegebenen Programms (NC-Programm) so zu steuern, dass das gewünschte Endprodukt entsteht. Die Stelleingänge der Werkzeugmaschinen sind üblicherweise die elektrischen Anschlüsse für die Soll Drehzahl der einzelnen Antriebsstufen (kontinuierliche Stellgrößen) sowie für diverse Ventile (Kühlmittel) und für Klemmvorrichtungen der Werkzeuge und Werkstücke.

Die Werkzeugmaschine meldet der NC die aktuelle Position der bewegten Teile, bei komplexeren Anlagen noch zusätzliche Sensorinformationen (z.B. Druck auf das Werkzeug, Ergebnisse von automatischen Messungen) und den Status von Endschaltern und Lichtschranken. Die Schnittstellen zwischen Werkzeugmaschine und NC sind durchwegs genormt. Um eine leichtere und übersichtlichere Verdrahtung zu gewährleisten, sowie zur Unterbringung von Schützen und Antrieben existiert zwischen der NC und Maschine immer ein Schaltschrank (Anpassschrank) - siehe Abbildung 4.1.

Definition der Achsen

Achsen im Sinn der NC-Technik sind zunächst Bewegungsrichtungen für das Werkstück oder das Werkzeug, mit denen simultan mit definierter Geschwindigkeit gefahren werden kann. In Erweiterung dieses Begriffes sind Achsen generelle Stellgrößen, die simultan und kontinuierlich verstellt werden können. Abbildung 3.2 zeigt eine Elektronenstrahl-Bearbeitungsanlage, die neben den 5 mechanischen Achsen noch die „elektronischen Achsen“ *Strahlableitung*, *Fokushöhe* und *Strahlstromstärke* aufweist.

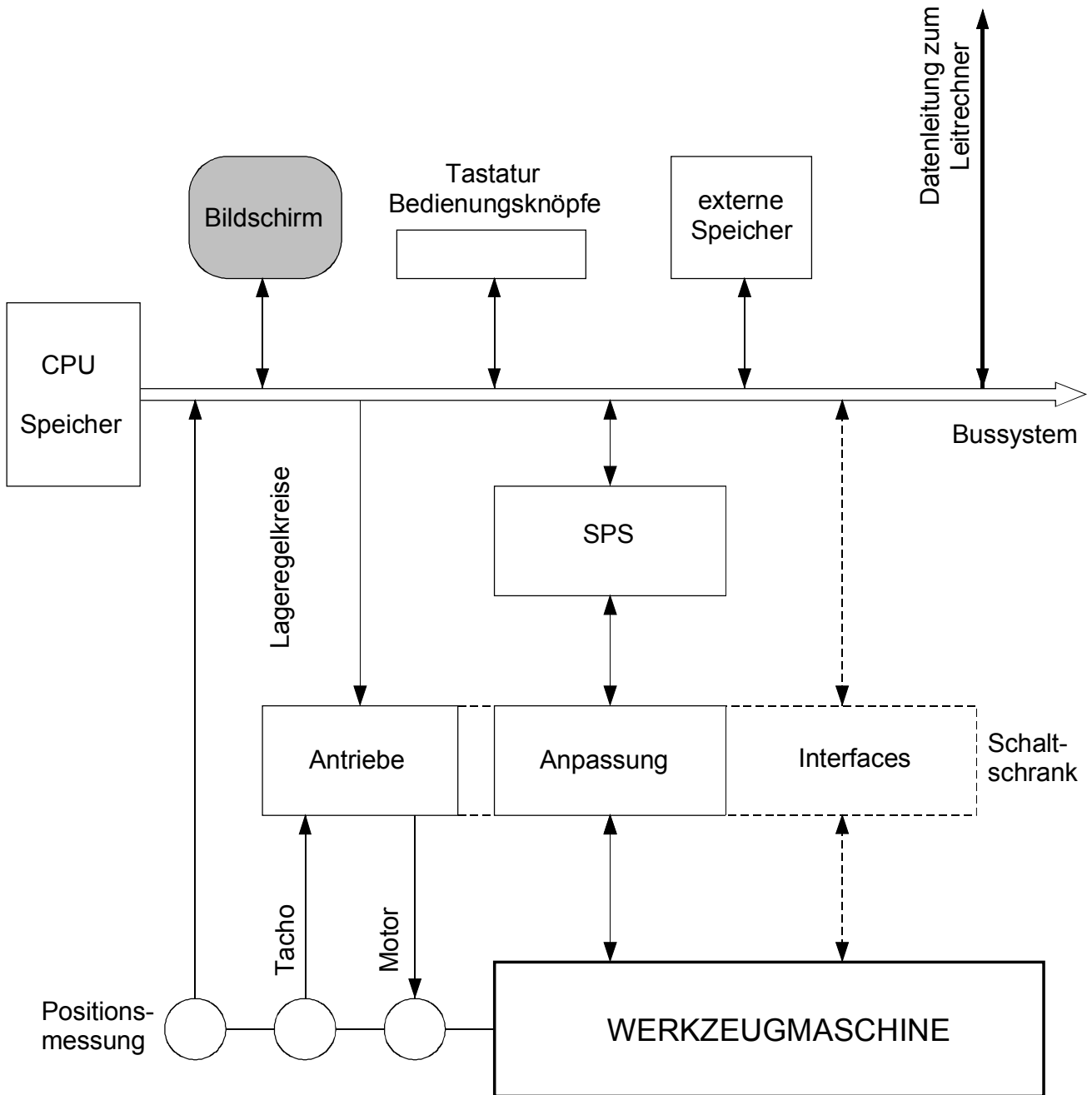


Abbildung 4.1 Die wesentlichen Funktionsgruppen einer numerischen Steuerung.

Je nach Leistungsfähigkeit und Preis einer NC gibt es eine Anzahl von Zusatzfunktionen:

Programmierbare Arbeitsfeldbegrenzung

Sie verhindert das unbeabsichtigte Verfahren in unerwünschte Bereiche. Da die Absolutposition der Bewegungseinrichtung der NC ständig bekannt ist, kann das Programm abgebrochen werden, bevor über einen Endschalter hinausgefahren wird, bzw. bevor es zu einer Kollision kommt.

- **Programmierbare Vorschubbegrenzung**

verhindert zu hohe Vorschubgeschwindigkeiten bei einer fehlerhaften Eingabe der Vorschubgeschwindigkeit.

- **Nullpunktverschiebung**

Die Maßangaben im NC-Programm beziehen sich immer auf den Koordinatenursprung des Werkstückes. Die Nullpunktverschiebung berücksichtigt dann den Unterschied zwischen Nullpunkt der Maschine und Aufspannort des Werkstückes.

- **Achsen tauschen**

ermöglicht ein um 90° verschwenktes Einspannen des Werkstückes

- **Werkzeug-Korrekturen**

berücksichtigen unterschiedliche Werkzeugausführungen, insbesondere verschiedene Bohrerlängen, Fräserdurchmesser und Schneidradien von Drehmessern.

- **Maßstabfehler Kompensation (Spindelsteigungsfehler-Kompensation)**

Ungenauigkeiten des Positionsmeßsystems werden einmal (oder in größeren Zeitabständen) mit einem Laserinterferrometer ausgemessen und in der NC abgespeichert. Diese Ungenauigkeiten werden von der NC berücksichtigt und beim Verfahren zu- oder abgerechnet.

- **Lose-Kompensation**

Ein Totgang in den Getrieben der Antriebsmechanik wird bei Bewegungsumkehr ausgeglichen.

- **Hinweise für den Bediener**

Die Bedientafeln sind heute durchwegs mit Bildschirmen ausgerüstet. Neben den dort aufscheinenden Kontroll- und Fehlermeldungen kann jede notwendige Anweisung an den Bediener programmiert werden.

4.1.2 Aufbau von Elektronenstrahlbearbeitungsanlagen

Abbildung 4.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Elektronenstrahlbearbeitungsanlage. Dieser entspricht der am Institut für allgemeine Elektrotechnik und Elektronik vorhandenen Anlage. Moderne Anlagen unterscheiden sich durch modernere Komponenten (z.B. Hochspannungsnetzteil, Vakuumpumpe,...), bzw. durch funktionelle Erweiterungen, die durch zusätzliche Komponenten realisiert werden. Beispiele hierfür sind:

- Schleusenkonstruktionen, die einen Werkstückwechsel erlauben, ohne jedes Mal eine gänzliche Evakuierung der Arbeitskammer zu erfordern (Zeitersparnis abhängig von der Kammergröße und der Vakuumpumpe)
- Palettenkonstruktionen, die eine gemeinsame Aufspannung und Bearbeitung von Werkstücken ermöglichen

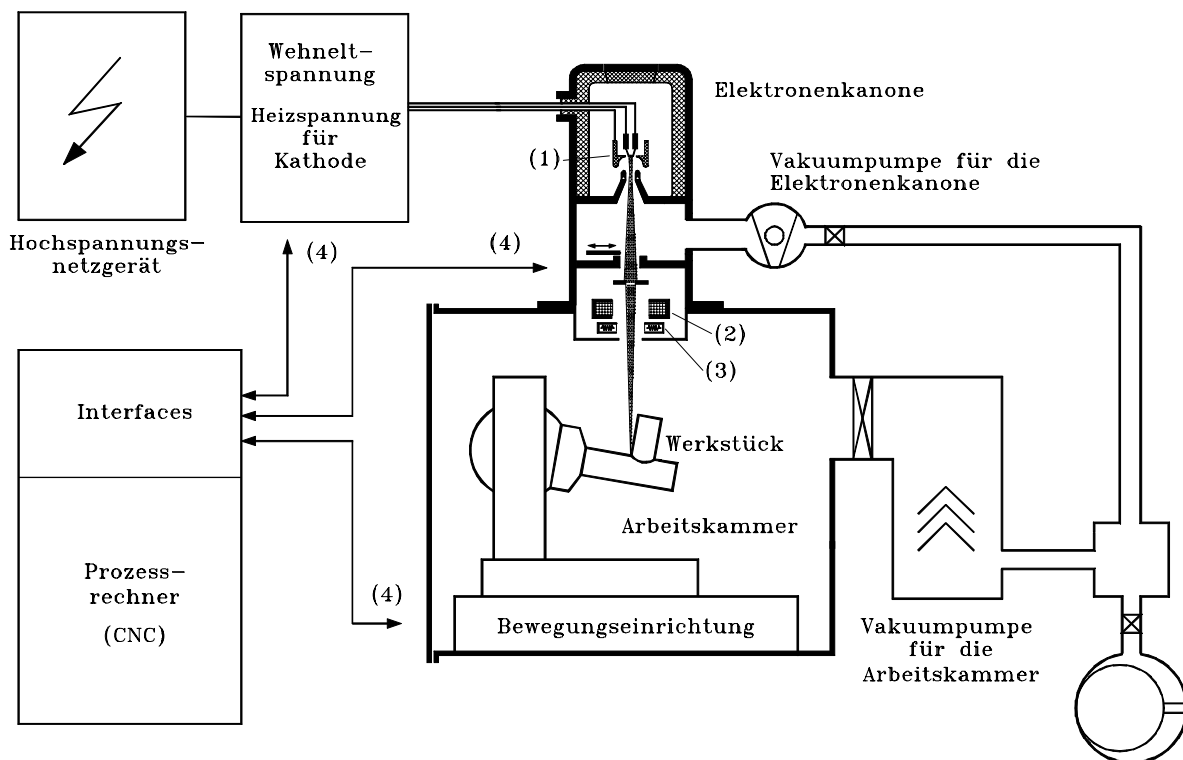


Abbildung 4.2 Die typischen Komponenten einer Elektronenstrahl-Schweißanlage:

- (1) Strahlquelle mit Kathode, Wehneltelektrode und Anode
- (2) Magnetlinse zur Fokussierung des Strahles
- (3) Ablenkspulen
- (4) Steuerleitungen zwischen Anlage und CNC

4.2 Anforderungen an eine CNC für Elektronenstrahl- und Laserbearbeitungsanlagen - Leistungsmerkmale des Systems PB-CON

Die besonderen Anforderungen an Numerische Steuerungen (NC) von Elektronenstrahlperforations- und Schweißanlagen, die alle Ansprüche dieser Produktionsprozesse erfüllen, lauten:

- Bis zu 6 simultane mechanische Bewegungsachsen.
- Schließen des Positionsregelkreises innerhalb 100 μ s.
- Satzwechselzeit unter 10 μ s.
- Programmierbare Strahlableitung.
- Kompensation des Schleppfehlers durch Korrekturableitung des Strahles.
- Strahlwedelung mit frei programmierbaren Funktionen bis 60 kHz.
- Fokussoszillation > 60 kHz
- Automatische Fugenerkennung durch Auswertung von Rückstreuelektronen.
- Automatische Unterbrechung eines Programms aufgrund bestimmter Ereignisse und Weiterlauf nach Durchführung eines anderen NC-Programms.
- Manuelle Unterbrechung eines Programms und Weiterlauf nach manuellem Verfahren der Bewegungseinrichtung.
- Pulsfrequenzen beim Perforieren bis 60 kHz.
- Programmierbare Ansteuerung von Schrittmotoren.
- Bedienung über PC mit Windows-Oberfläche und über ein Bedienpult.

Die Numerische Steuerung ist als Parallelrechnersystem realisiert.

4.3 Aufgabe der Strahlmodulation

Bei der Elektronenstrahlbearbeitung wird der Bahnbewegung eine periodische Ablenkung überlagert. Die Form der periodischen Überlagerung besteht häufig aus einem Kreis. Eine frei programmierbare Ablenkfunktion gibt aber die Möglichkeit die Materialbearbeitung günstig zu beeinflussen. Die Ablenkfunktion besteht aus zwei Signalen, die gemeinsam die sogenannte Wedelfigur bilden. Durch die Strahlwedelung wird zum Beispiel beim Schweißen die Lunkerbildung und die Form der Schweißnaht beeinflusst.

Die Fokoszillation verändert den Abstand des Fokus vom Werkstück. Dadurch wird die Strahlform in Z-Richtung verändert. Beim Bohren wird z.B. der Fokus während des Bohrvorganges aus dem Werkstück herausgezogen und damit die Wand des Bohrloches beeinflusst.

Die Strahlablenkung wird auch zum Ausgleich der Werkstückbewegung verwendet. Dazu wird zur Wedelfigur die Strahlposition addiert. Beim Bohren von kleinen Löchern wird das Werkstück kontinuierlich bewegt und der Strahl wird dem Bohrloch nachgeführt. Der Strahl „hüpft“ von Loch zu Loch. Durch die Angestrebten hohen Bohrfrequenzen (bis zu 60 kHz) kann die CPU den Strahl nicht direkt steuern. Die Pulserkarte schaltet den Strahl ein und legt auf ein IRQ-Leitung des Maschinenbusses ein Synchronisationssignal. Die Modulatorkarte synchronisiert sich im Synchronen Betriebsmodus auf eine IRQ-Leitung. Die verwendete IRQ-Leitung kann im Syncregister ausgewählt werden. Um den Strahl bei konstanter Werkstückgeschwindigkeit an der gleichen Werkstückposition zu halten gibt die Modulatorkarte als Wedelfigur einen Sägezahn aus, der mit der Pulserkarte synchronisiert ist.

5 Struktur der numerischen Steuerung PB-CON

5.1 Übersicht

Die „Mensch-Maschine-Kommunikation“ erfolgt bei der Numerischen Steuerung *PB-CON* (für Elektronenstrahl- und Laser-Materialbearbeitung) sowohl über den Host-PC (Konsole) als auch über ein Bedienpult. Zusätzlich gibt es ein „Maschinenpult“ mit Handrädern zum Verfahren der mechanischen Achsen und DC-Ablenkung des Strahles, sowie mit Schaltern und Potentiometern zur Einstellung der Maschinendaten im Handbetrieb.

Über das Bedienpult laufen jene Informationen und Aktionen, die für den Bediener der Maschine unmittelbar an der Maschine von Bedeutung sind. Das Bedienpult ist auf einem Schwenkarm so montiert, dass es von allen wichtigen Stellen an der Maschine erreichbar ist. Das Bedienpult hat eine 4-zeilige LCD-Display (mit 40 Zeichen/Zeile), 16 Funktionstasten, 4 Richtungstasten, mehrere Sondertasten und ein numerisches Eingabefeld, das zu weiteren Richtungstasten umfunktioniert wurde. Prinzipiell könnten alle NC-gesteuerten Funktionen der Maschine vom Bedienpult aus gesteuert werden. Für einige wichtige Bedienfunktionen (z.B. Strahl Ein/Aus) sollten aber zusätzliche Bedienelemente extern montiert sein.

Die Konsole ist ein PC mit mindestens 15"-Bildschirm und steht auf einem Tisch neben der Maschine. Der Bildschirm ist von allen wichtigen Stellen der Maschine sichtbar, aber aus mehr oder weniger großer Entfernung.

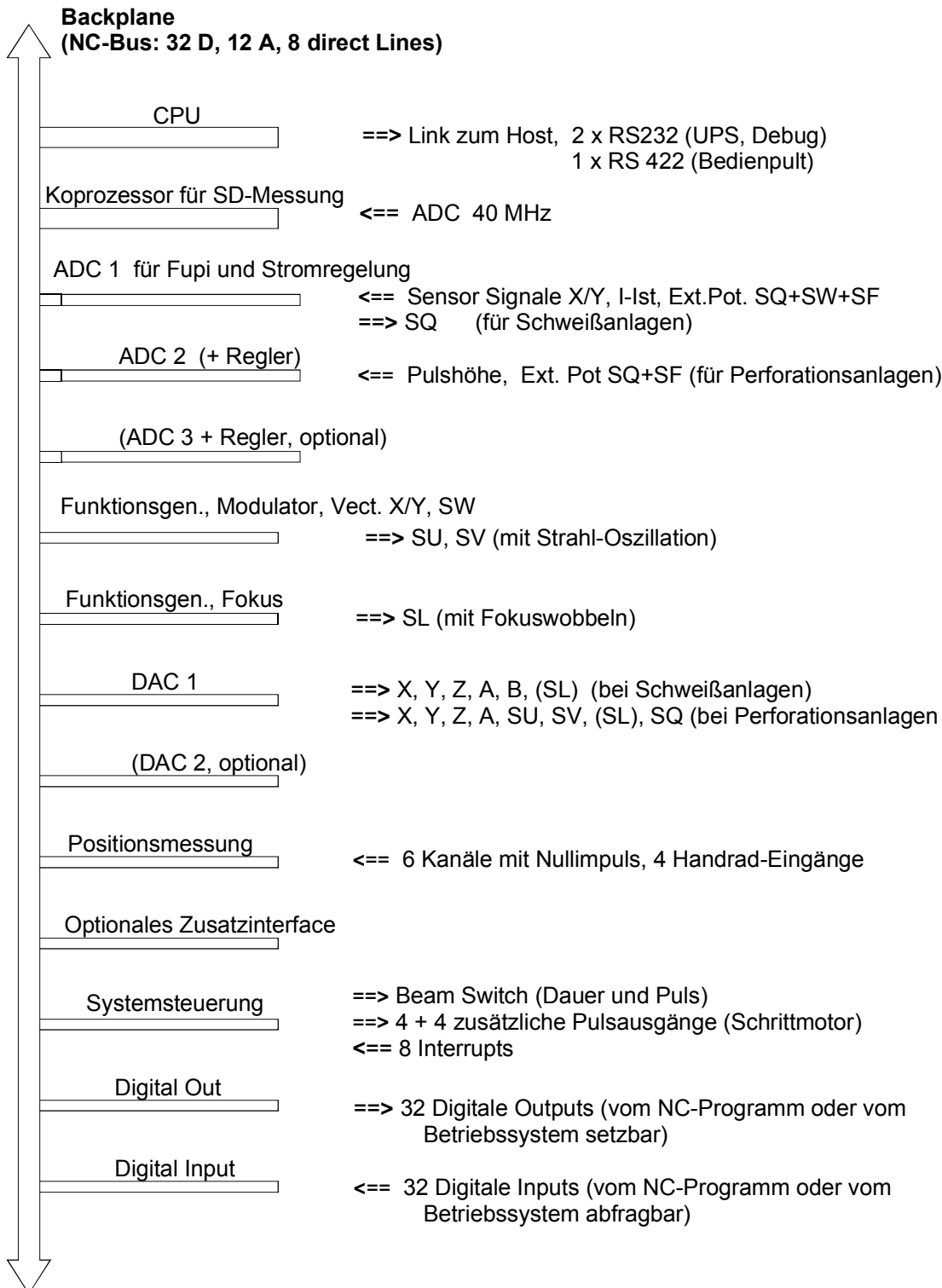
Es gibt Darstellungen bzw. Aktionen, die nur am Bedienpult, nur an der Konsole oder an beiden Geräten möglich sind. An der Konsole erfolgt das Erstellen und Editieren eines Programms und die Auswahl eines bestimmten Programms für die Durchführung. Der Informationsumfang ist am Bildschirm naturgemäß wesentlich umfangreicher als auf dem Display des Bedienpultes.

Über das Bedienpult erfolgt das manuelle Verfahren der Bewegungseinrichtungen, der eigentliche Start sowie eine Unterbrechung eines Programms, die Auswahl verschiedener Optionen für den Programmablauf und für Strahlfunktionen, die Beeinflussung einiger Betriebsparameter (Vorschubgeschwindigkeit, Strahlstrom, Linsenstrom, Wedelamplitude) und ein Teach-In.

5.2 Beschreibung der Kartenfunktionen

Es kommen folgende Karten zur Anwendung:

Elektronenstrahl-Perforations- und Schweißanlage. Am NC-Bus angeschlossene Einheiten und Interfaces



Kurze Beschreibung der Kartenfunktionen:

- **NC-Bus - Backplane**

Nicht VME-kompatibles Bussystem, das 2 CPU-Karten und 16 Interface-Karten Platz bietet.

- **CPU-Karte**

Power-PC 604e als Realtimeprozessor, Transputer ST20450 als Kommunikationsprozessor, Linkverbindung zum Host-PC, RS232 für USV, RS232 Debugschnittstelle für Power-PC, RS422 für Bedienpult

- **Interface für Stromdichtemessung**

schneller ADC mit hoher Auflösung (geplant 40MHz mit 12 Bit Auflösung),

- **ADC-Karte**

7 analoge Eingänge mit 250kSPS, 2 analoge Ausgänge mit 30MSPS, 8 Potentiometereingänge, Transputer ST20450 mit 4MB - 32MB DRAM zur Signalvorverarbeitung und Bildung von digitalen Reglern.

- **DAC-Karte**

12 analoge Ausgänge mit 16MSPS zur Ansteuerung von Servomotoren

- **Positionserfassung**

6 Eingänge Positionsmessung, 6 Ausgänge zu einer Einheit für Positionsanzeige, 4 Eingänge Handräder

- **Interrupts und Pulse**

2 x 8 Interrupteingänge, 2 Ausgänge für Beam-Switch, 4 Ausgänge für Schrittmotor (Puls und Richtung)

- **Digital-Input-Karte**

32 digitale, 24V-Inputs, wird durch den CAN-Bus ersetzt

- **Digital-Output-Karte**

32 digitale kurzschlussfeste 24V-Outputs

5.3 Funktionsbeschreibung der Modulatorkarte

5.3.1 Funktionsübersicht der Modulatorkarte

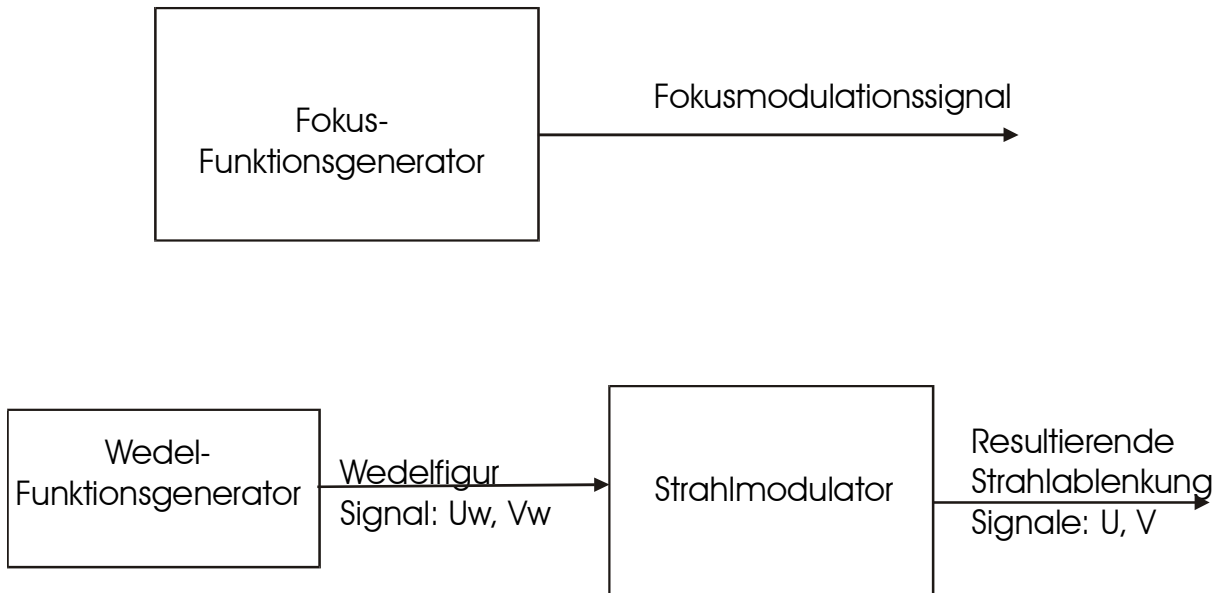


Abbildung 5.1 Blockschaltbild der einzelnen Funktionsblöcke

5.3.2 Die Funktionsgeneratoren

Der Fokus Funktionsgenerator erzeugt das Fokusmodulationssignal. Das Fokusmodulationssignal kann mit 1024 Stützpunkten frei programmiert werden. Die Frequenz der Stützpunktausgabe wird durch Teilen des vierfachen Maschinenbusclock $4 * f_{Mabusclk}$ erzeugt. Die Frequenz des Maschinenbusclock beträgt $66\text{MHz}/4$. Die Einstellbaren Frequenzen ergeben sich zu

$$f_{\text{Stützpunkt}} = \frac{4 * f_{Mabusclk}}{N+1} = \frac{66\text{MHz}}{N+1}.$$

N 16 Bit Zahl von 0 bis 65535

Damit ergeben sich Ausgabefrequenzen der Stützpunkte von 1.007 kHz bis 66MHz. Über die Potentialtrennung kann aber nur mit 22MHz Daten übertragen werden. Deswegen werden bei Frequenzen über 22MHz oder wenn zusätzlich ein anderer ADC geschrieben wird, einzelne Stützpunkte ausgelassen. Sobald die Potentialtrennung wieder eine Datenübertragung zulässt wird

der aktuelle Stützpunkt übertragen. Wenn im Figurspeicher eine Periode des Signals gespeichert ist, dann ergibt sich die Signalfrequenz zu

$$f_{\text{Signal}} = \frac{4 * f_{\text{Mabusclk}}}{1024 * (N + 1)} = \frac{66\text{MHz}}{1024 * (N + 1)}$$

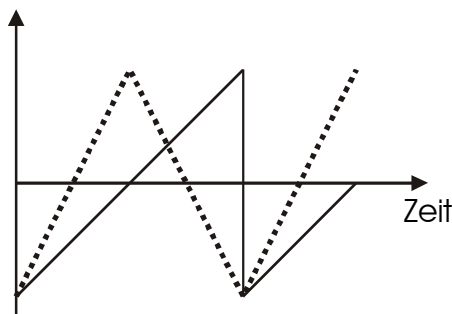
f_{Signal} Frequenz des Ausgangssignals

f_{Mabusclk} Frequenz des Maschinenbusses

Daraus resultiert ein Frequenzbereich von 64,453kHz bis 0,9835 Hz. Wenn höhere Frequenzen notwendig sind, dann kann in den Signalspeicher mehrere Perioden des gewünschten Signals programmiert werden. Dadurch ergibt sich die mehrfache Signalfrequenz. Im kontinuierlichen Betriebsmodus werden die Funktionen fortlaufend ausgegeben. Mit jedem Schreiben der Funktionsnummer beginnt die Ausgabe der Funktion beim ersten Stützpunkt. Die Funktion wird im Schreibmodus durch Schreiben der einzelnen Stützpunkte auf die RAM-Adresse in das RAM gespeichert. Eine Funktion wird in das RAM gespeichert, indem auf den Schreibmodus umgeschaltet wird die Funktionsnummer gewählt (schreiben der Funktionsnummer) und die 1024 Stützpunkte auf die Adresse RAMschreiben geschrieben werden (Fokus: 1011 binär, Wedel: 0101 binär).

Der Wedel Funktionsgenerator ist ähnlich aufgebaut wie der Fokus Funktionsgenerator. Beim Wedelfunktionsgenerator werden zwei Signale gleichzeitig ausgegeben. Die beiden Signale ergeben gemeinsam eine zweidimensionale Figur, die sogenannte Wedelfigur. In Abbildung 5.2 wird als Beispiel ein Pfeil gezeigt, der sich aus einem Sägezahn- und einem Dreiecksignal zusammensetzt.

Wedelsignale U_w , V_w



V_w : ———
 U_w : ······

Aus den Signalen entstehende Wedelfigur

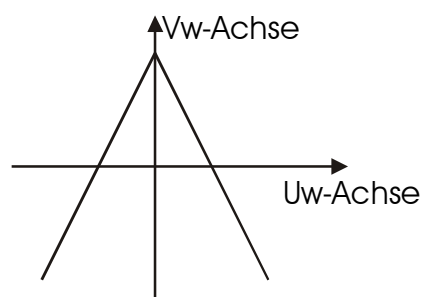


Abbildung 5.2 Beispiel für eine Wedelfigur

5.3.3 Synchronisierung der Modulatorkarte

Beim synchronen Betrieb wird die Ausgabe der Fokusszillation und die Strahlwedelung mit einer IRQ-Leitung synchronisiert. Nach jeder Triggerung wird einmal die Wedelfigur und eine Periode der Fokusszillation mit den eingestellten Frequenzen ausgegeben. Bis zur nächsten Triggerung bleiben die Funktionsgeneratoren auf den letzten Stützpunkten stehen. Nach dem Erkennen der Triggerung wird eine eingestellte Zeit von $N \cdot 16/66\text{MHz}$ gewartet, bis mit der Ausgabe der Funktionen (Fokusszillation und Strahlwedelung) begonnen wird. Die Verzögerungszeit (N) wird im Syncregister mit Bit 3...9 eingestellt. Die Verzögerungszeit kann von 0 bis $30,8\mu\text{s}$ in $242,4\text{ns}$ Schritten eingestellt werden. Die IRQ-Leitung wird im Sync-Register mit Bit 1, 2 und 3 ausgewählt. Wenn eine neuerliche Triggerung erfolgt, bevor die Verzögerungszeit vorbei ist, wird die Verzögerungszeit neu gestartet und die Signalausgabe wird nicht gestartet. Wenn die Funktionsausgabe noch nicht beim letzten Stützpunkt angekommen ist, wenn die Funktionsausgabe neuerlich gestartet wird, dann wird sofort beim ersten Stützpunkt wieder begonnen. Von dem Abtasten der IRQ-Leitung bis zur Ausgabe des Signals am DAC vergehen

$$T_{\text{Verzögerung}} = \frac{9 + N \cdot 16}{66\text{MHz}} + 27\text{ns} + 10\text{ns} \Rightarrow 173,4 \dots 31,0\mu\text{s}.$$

5.3.4 Der Strahlmodulator

Die Wedelfigur soll immer in die Richtung der Bearbeitungsrichtung ausgerichtet werden. Zusätzlich wird zur Wedelfigur die Strahlablenkung addiert. Die Figurdrehung und die Addition der Strahlposition sind die Aufgaben des Strahlmodulators. Die Figurdrehung wird entsprechend der Drehmatrix

$$\begin{pmatrix} SU \\ SV \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} U_w \\ V_w \end{pmatrix}$$

Durchgeführt. An den Strahlmodulator wird jedoch nicht der Winkel α sondern ein Richtungsvektor übergeben. In [KAI97] wird der Richtungsvektor als INC X und INC Y bezeichnet und von einer DAC-Karte als Analogsignal zur Verfügung gestellt. Der Richtungsvektor zeigt in die Richtung, der V_w -Achse. In Abbildung 5.3 ist ein Beispiel für die Figurdrehung dargestellt.

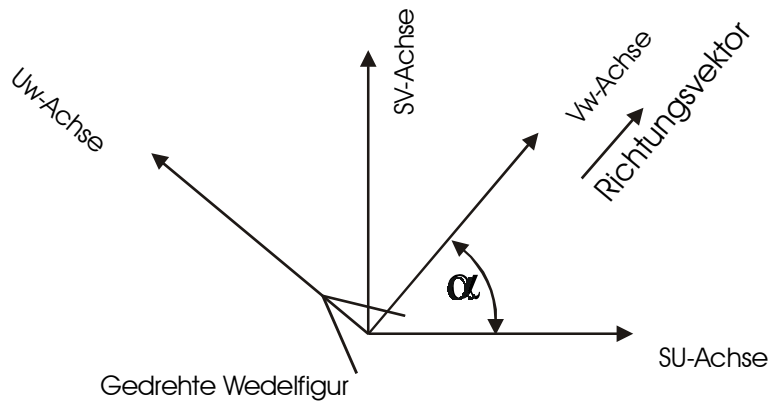


Abbildung 5.3 Drehung der Wedelfigur

Wenn der Betrag des Richtungsvektors ungleich eins ist, dann wird zusätzlich zur Drehung die Amplitude verändert. Zur gedrehten Wedelfigur wird die in den Positions-DAC geschriebene Strahlposition addiert. Das Ergebnis der Addition von Wedelfigur und Strahlposition kann den Nennbereich überschreiten. Deswegen wird die Amplitude des Ausgangsignals überwacht und Überschreitungen mit insgesamt vier LED angezeigt. Die Amplitude der Ausgangssignale wird jedoch nicht begrenzt.

6 Baugruppen der Modulatorkarte und deren Realisierung

6.1 Übersicht und Zusammenschaltung der Baugruppen

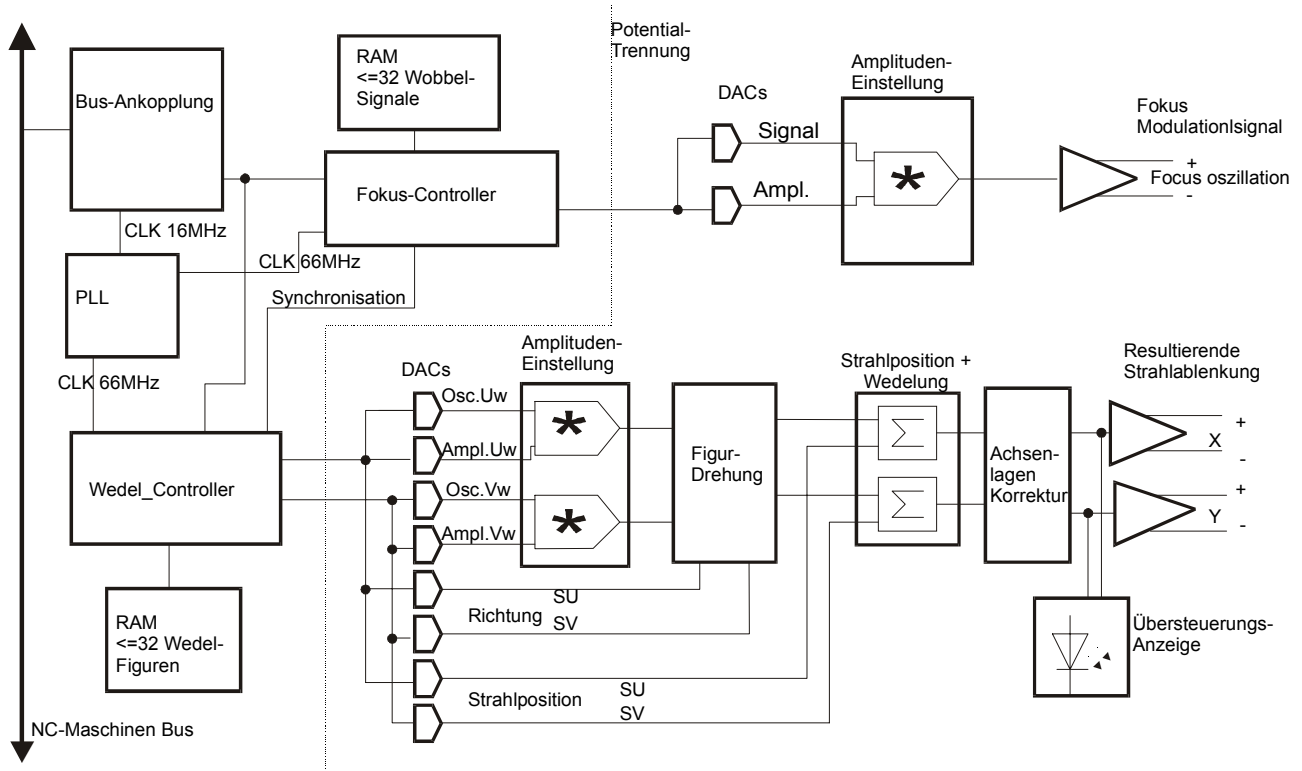


Abbildung 6.1 Blockschaltbild der Modulatorkarte

6.1.1 Die Achslagenkorrektur

Die Achslagenkorrektur ist eine um den Winkel von 0° linearisierte Figurdrehung. Der Winkel wird durch Einstellen von Potentiometer eingestellt. Die Achslagenkorrektur wird von der Software übernommen. Die Software kann mit wesentlich größerer Genauigkeit die Achslage korrigieren. Die Achslagenkorrektur wird nicht verwendet (RW151 und RW152 nicht bestückt), deswegen wird sie auch nicht näher beschrieben. Die Achslagenkorrektur auf der Modulatorkarte würde das Einstellen der Modulatorkarte erschweren.

6.2 Die Bus-Ankopplung

Die Bus-Ankopplung stellt die Verbindung zwischen Maschinenbus und Modulatorkarte her. Jede Signal-Leitung des Maschinenbusses soll gleich belastet werden. Deshalb werden alle Signale, bevor sie auf der Karte verwendet werden, von einem Latch übernommen oder von einem Treiber

getrieben. Da die Daten- und Adressleitungen nur sehr kurz gültig sind, werden sie für die Weiterverarbeitung zwischengespeichert. Die nicht synchron zum Maschinenbus gesteuerten IRQ-Leitungen werden durch ein Latch mit dem Clock des Fokuscontrollers synchronisiert. An den Maschinenbus werden die in Abbildung 6.2 dargestellten Timinganforderungen gestellt. Um die sichere Daten- und Adressübernahme zu gewährleisten, müssen die Daten und die Adressen eine Setupzeit von mindestens 1ns und eine Holdzeit von größer 6,5ns haben. Die IRQ Leitungen müssen keine Bedingung bezüglich Zeitverlauf einhalten. Kurze Störungen beim Abtastzeitpunkt können aber als Triggersignal interpretiert werden. Um die Verzögerung möglichst gering zu halten wird das IRQ-Signal nicht gefiltert.

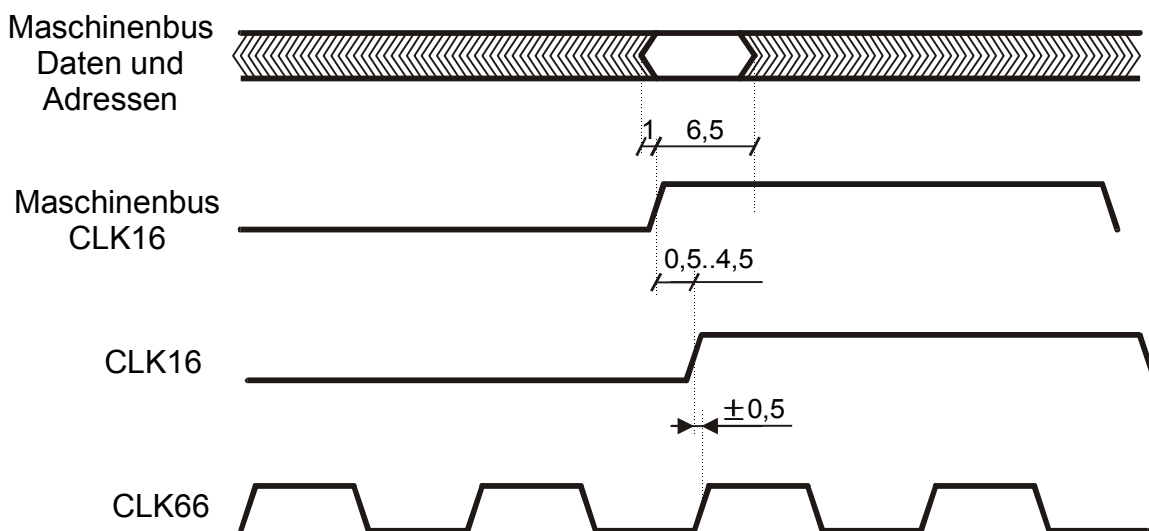


Abbildung 6.2 Anforderung an das Timing des Maschinenbus

Der Maschinenbus ist ein synchroner Bus mit 16MHz, 32 Bit Datenbreite und 12 Bit Adressbreite. Davon werden die oberen 5 Bits als Kartenadresse verwendet.

6.3 Beschreibung der PLL

Mit dem PLL-Baustein CY7B991 werden die auf der Modulatorkarte verwendeten Taktsignale erzeugt. Als Referenz dient die steigende Flanke des Maschinenbusclock. Der Maschinenbusclock wird zum Schutz der PLL von einem ABT Treiber gepuffert. Durch den Puffer ist auch die gleichmäßige Belastung des Maschinenbusses gewährleistet. Beim Einschalten darf der Bustakt erst angelegt werden, wenn die Versorgungsspannung 4,3V überschritten hat. Wenn diese Bedingung verletzt wird, dann kann es passieren, dass der VCO bei seiner maximalen Frequenz arbeitet, die von den Ausgangstreibern nicht mehr ausgegeben werden kann. In diesem Zustand versucht PLL

die Frequenz zu erhöhen, obwohl die Frequenz schon viel zu hoch ist. Das Tastverhältnis des Maschinenbusclock ist unkritisch. Es ist nur wichtig, dass keine Spikes auftreten und die High- bzw. Lowphase > 5ns ist. Die PLL benötigt maximal 0,5ms bis auf die Referenzfrequenz synchronisiert ist. Deswegen sollte der Maschinenbusclock mindestens 0,5ms anliegen, bevor auf die Karte ein Schreizugriff durchgeführt wird.

6.4 Beschreibung der beiden Controller

Die beiden Controller sind jeweils in einem Mach 5 realisiert. Die Controller steuern alle digital realisierten Funktionen. In den Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4 sind die Blockschaltbilder der beiden Controller dargestellt. Die MACH-Programme sind im Kapitel 6 enthalten.

6.4.1 Fokuscontroller

Blockschaltbild Fokus-Controller

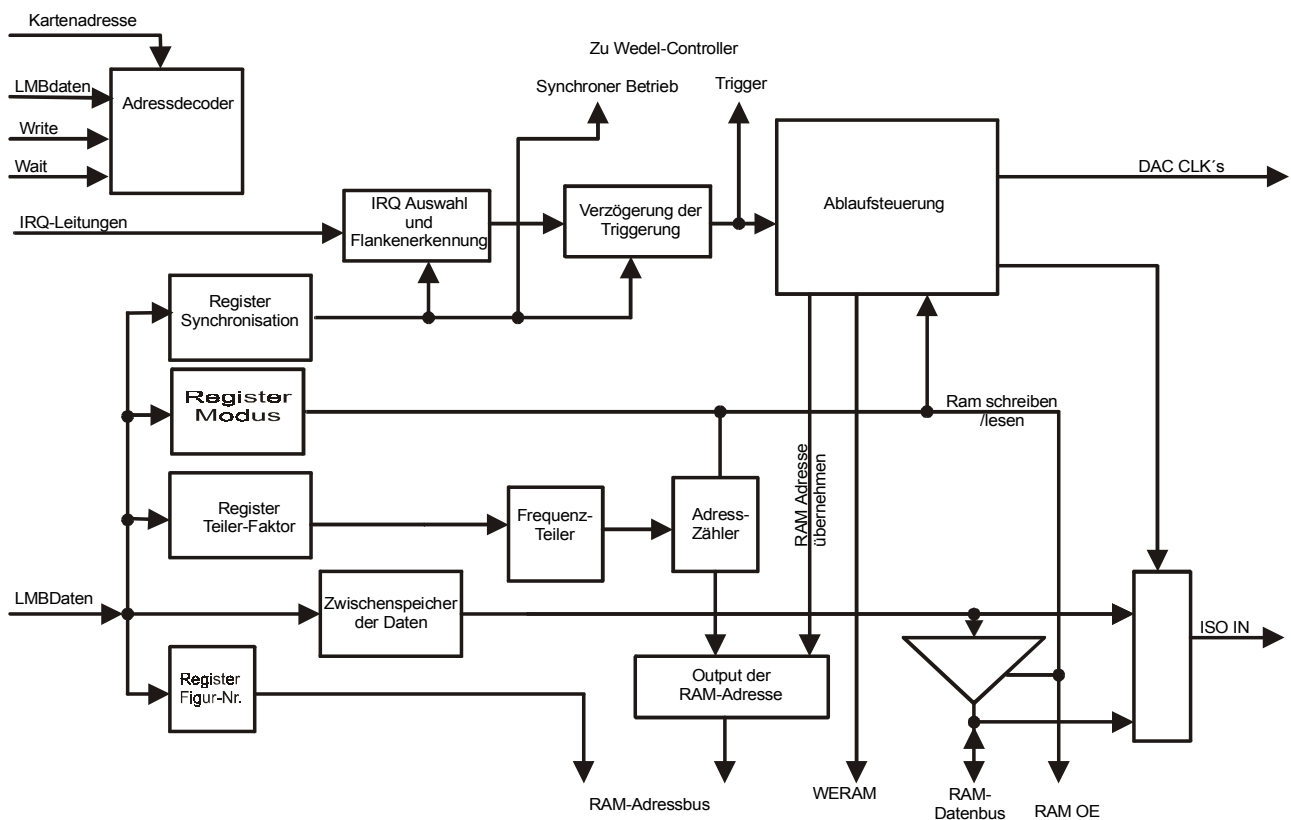


Abbildung 6.3 Blockschaltbild des Fokus-Controllers

6.4.2 Wedelcontroller

Blockschaltbild Wedel-Controller

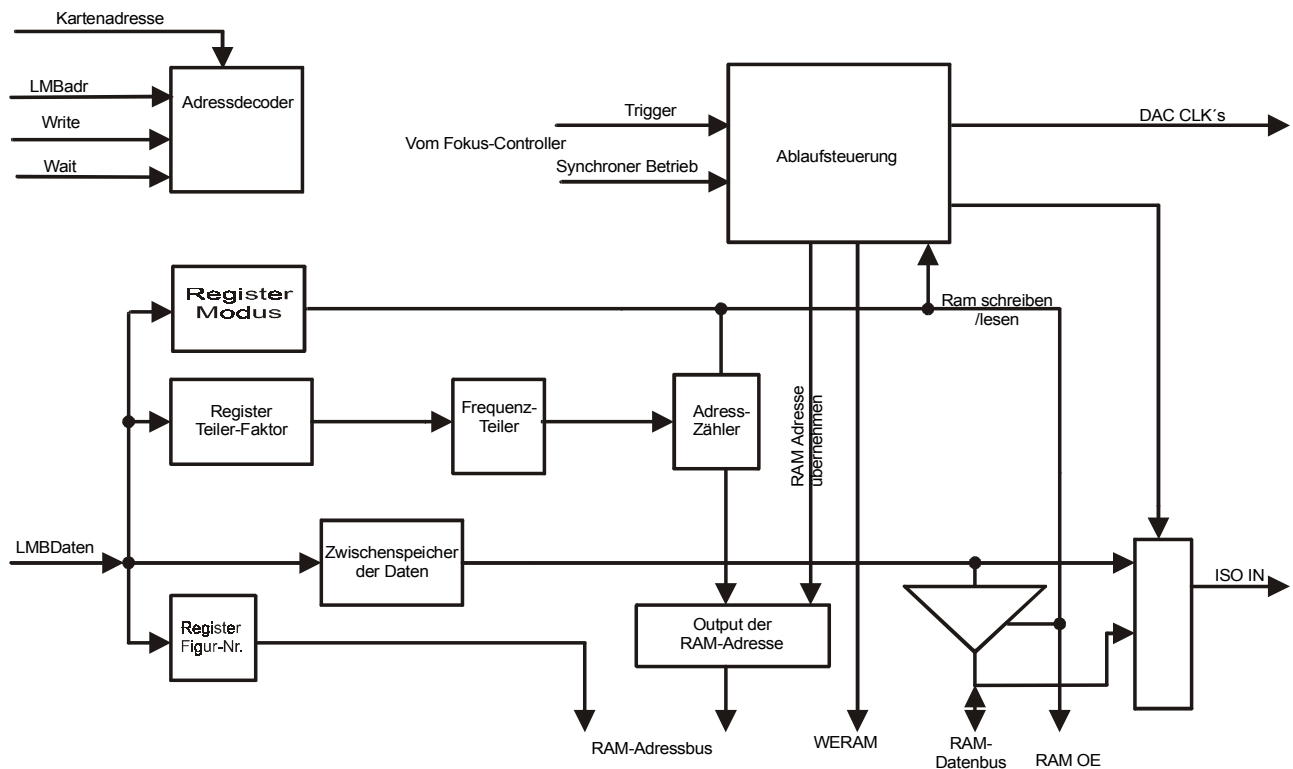


Abbildung 6.4 Blockschaltbild des Wedel-Controllers

Im Wedelcontroller sind weniger Funktionen realisiert. Ein Teil der Funktionen werden vom Fokuscontroller zur Verfügung gestellt. Diese Aufteilung war notwendig, weil der Wedelcontroller aufgrund der doppelt so breiten Datenbusse schwierig in das Mach zu programmieren ist. Dadurch geht die Möglichkeit, die Modulatorkarte Fokusoszillation mit voller Funktionsfähigkeit der Strahlwedelung zu verwenden verloren.

6.5 RAM

Als Speicher für die Funktionsdaten wird ein statisches RAM verwendet. Es muss eine Zugriffszeit von höchstens 15ns haben.

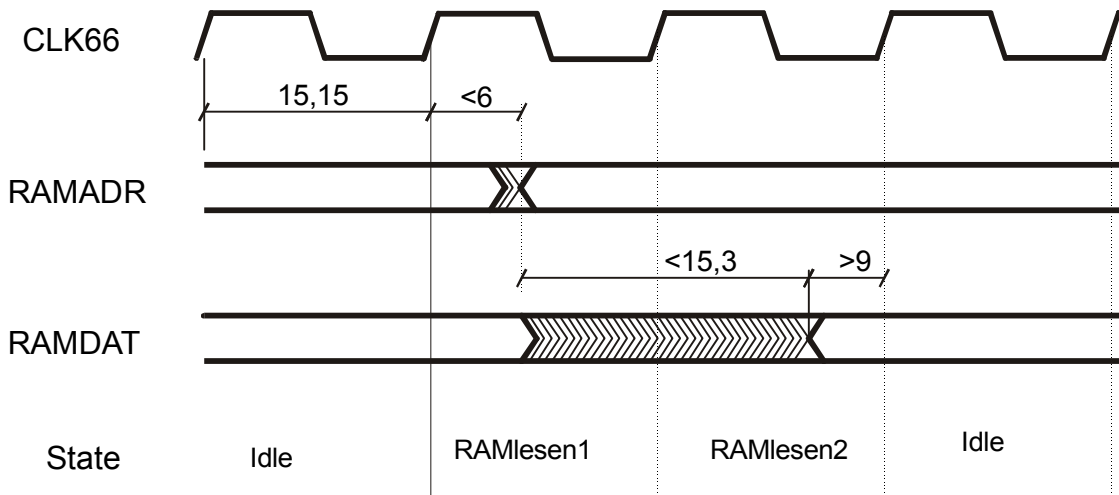


Abbildung 6.5: Timingdiagramm des Lesezugriffs auf das RAM

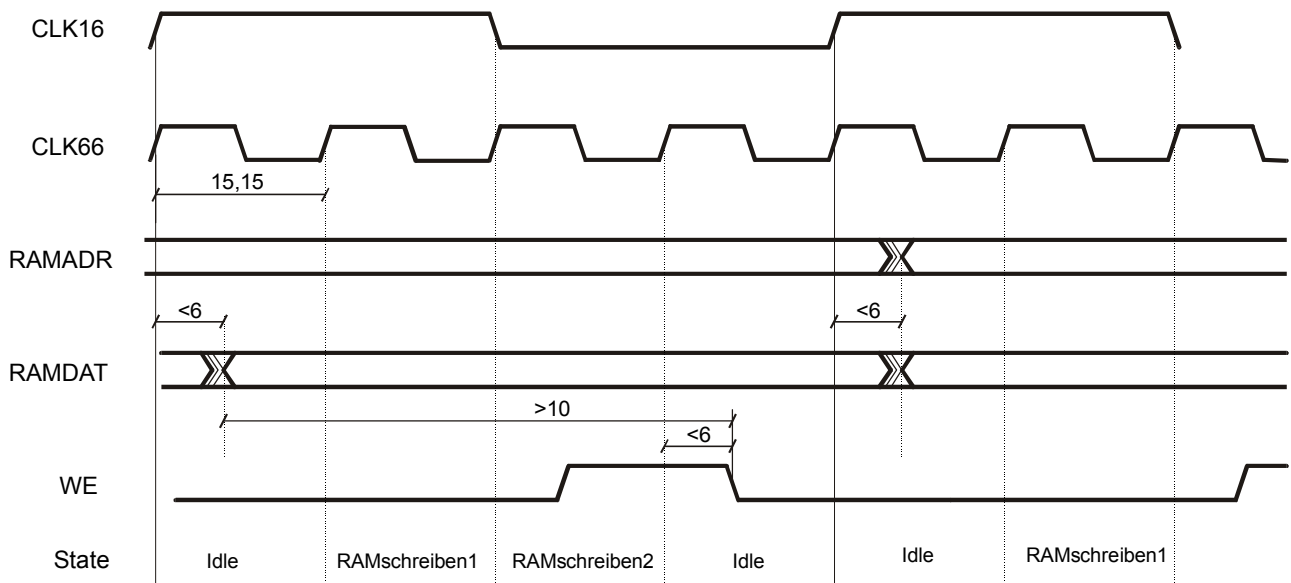


Abbildung 6.6 Timingdiagramme des Schreibzugriffs auf das RAM

6.6 Beschreibung der Potentialtrennung

Es wurde ein Konzept überlegt, bei dem die Potentialtrennung direkt am Maschinenbus erfolgt. Der Nachteil ist aber der große Anteil an Digitaltechnik an der Analogversorgung. Um die Störungen an der Analogversorgung möglichst gering zu halten wurde dieses Konzept verworfen. Für die angestrebte Geschwindigkeit von 22MHz und 16 Bit bzw. 32 Bit Daten ist eine parallele Übertragung der Daten notwendig. Mit den Digitalen Kopplern von Burr-Brown lässt sich die Datenübertragung zu den DACs ohne Logik auf der Analogseite realisieren. Der ISO150 verwendet zur Datenübertragung zwei klein Kondensatoren, über die das digitale Signal differenziell übertragen wird. Eine Informationsübertragung findet daher nur bei einer Signaländerung statt. Nach dem Einschalten oder dem Umschalten der Übertragungsrichtung ist der Ausgang high. Damit nach dem Reset die Signalübertragung sofort funktioniert werden die Eingangssignale bei Reset auf high gelegt. Für den ISO150 sind leider keine genauen Spezifikationen über die Laufzeitunterschiede bei gleichen Bedingungen (Ausgangsbelastung Umgebungstemperatur und Versorgungsspannung) vorhanden. Bei der Auslegung der Datenübertragung wurde eine Verzögerung von 25 bis 35 ns angenommen. Mit dieser Annahme ergibt sich das in Abbildung 6.7 dargestellte Timing.

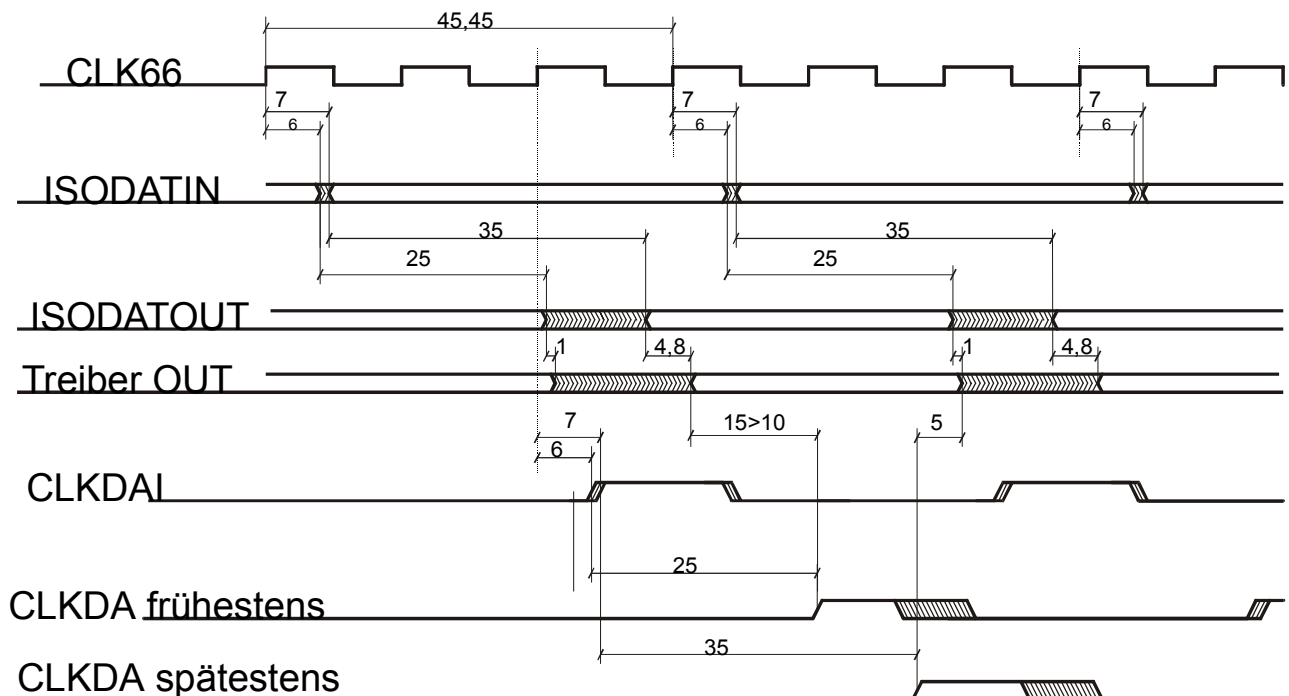


Abbildung 6.7 Timingdiagramm der Datenübertragung von MACH zu DAC

Weil sich die CLK Impulse überschneiden würden, sind die beiden Extremfälle getrennt dargestellt (frühestens / spätestens). Bei den Kontrollmessungen hat sich ergeben, dass die Laufzeitunterschiede sehr klein (< 2 ns) sind und damit die Annahmen gerechtfertigt sind.

6.7 Beschreibung der Referenzspannungsquelle

Die Referenzspannungsquelle liefert den Strom für die DAC-Referenzströme, versorgt die Offset-Potentiometer und die Widerstände die an die Referenzspannung angeschlossen sind. Die Referenzstromquelle wird mit Gleichstrom belastet, deswegen treten abgesehen von Störungen keine Wechselströme auf. Als Referenzspannungsquelle wurde der IC LT1027CN ausgewählt.

Der LT1027CN hat folgende wesentliche Daten:

Sehr gering Drift < 3 ppm/ $^{\circ}$ C

Genauigkeit: $\pm 0.5\%$

Ausgangsstrom: -10 mA... $+15$ mA

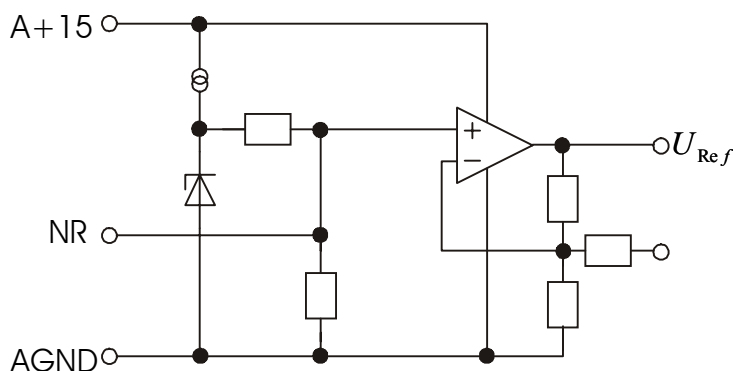


Abbildung 6.8 Blockschaltbild des LT1027

Noisereduction (NR) Pin: Ein Kondensator mit kleinem Parallelwiderstand kann das Rauschen der Referenzspannungsquelle wesentlich verringern. Der NR-Pin ist ein Ausgang der internen Referenzspannung, die auf 5V verstärkt wird. Durch den NR-Pin kann aber nicht nur das Rauschen verringert werden! Es können auch Störungen eingekoppelt werden. Wenn die Möglichkeit zur Rauschunterdrückung nicht verwendet wird, dann wird im Datenblatt empfohlen, den NR-Pin am Gehäuse abzuwickeln um das Einkoppeln von Störungen möglichst zu vermeiden. Um Störungen zu vermeiden, ist um den NR-Pin ein Abschirmring, der von einem Widerstandsteiler auf 4,4V

gehalten wird, anzuordnen. Entsprechend den Empfehlungen im Datenblatt wird der NR-Pin mit einem Folienkondensator mit $1\mu\text{F}$ gegen AGND beschaltet. Die Möglichkeit, die Referenzspannung abzugleichen, wird nicht verwendet. Die Referenzspannung wird von der 15V Analogversorgung A+15 versorgt.

Auf der Modulatorkarte wird die Referenzspannungsquelle mit folgenden Strömen belastet.

$$10 \text{ DAC: } 10 \cdot 5\text{mA} = 50\text{mA} \pm 1,5\%$$

$$19 \text{ Potentiometer mit } 10\text{k}\Omega \Rightarrow 19 \cdot 0,5\text{mA} = 9,5\text{mA} \pm 10\%$$

$$\text{Die Widerstände an } U_{\text{Ref}} = 3,4\text{mA} \pm 1,5\%$$

$$\text{Gesamtstrom: } \leq 62,9\text{mA}$$

Die Schaltung soll aber auch ohne Belastung funktionieren, um die Platine schrittweise in Betrieb nehmen zu können.

Der LT1027 ist nicht in der Lage den notwendigen Strom zu liefern. Es gibt mehrere Möglichkeiten den notwendigen Strom zur Verfügung zu stellen. Der LTC1027 ist nur mit positivem Ausgangsstrom stabil. Bei den Schaltungen zur Erhöhung des Ausgangsstromes ist darauf zu achten, dass der LTC1027 einen positiven Ausgangsstrom hat.

6.7.1 Erreichen des notwendigen Stromes mit einem nachgeschalteten OPV mit Emitterfolger

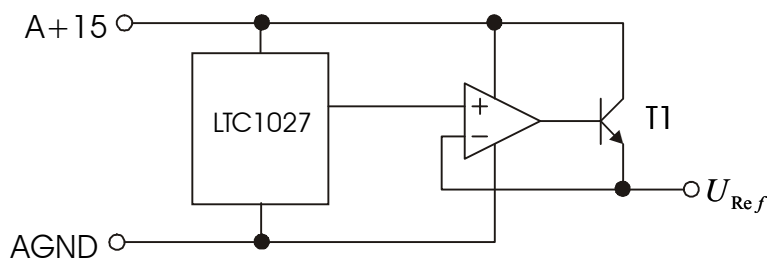


Abbildung 6.9 Erzeugung des notwendigen Stromes mit OPV und Emitterfolger

Der Eingangsoffsetfehler des OPVs addiert sich zum Fehler der Referenzspannungsquelle und verdoppelt bis verdreifacht dadurch den Fehler der Referenzspannungsquelle. Ein weiterer Nachteil ist der relativ hohe Bauteilaufwand. Es gibt auch Referenzspannungsquellen, die eine OPV für Stromerhöhung integriert haben. Wie man in Abbildung 6.9 sieht, müsste man beim LTC1027 nur den OPV-Ausgang und die Rückkopplung extern zugänglich machen.

6.7.2 Erreichung des notwendigen Stromes mit einem externen Transistor

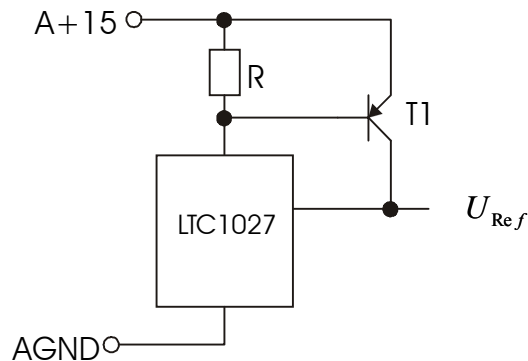


Abbildung 6.10 Schaltplan der externen Stromverstärkung mit einem Transistor

Der notwendige Strom wird von einem externen Transistor, der vom Versorgungsstrom des LT1027 angesteuert wird, geliefert. Die Schaltung in Abbildung 6.10, die dem Datenblatt entnommen wurde erwies sich als instabil. Die Schaltung erzeugt einen Sägezahn. Die Dimensionierung des Widerstandes stellt ein großes Problem dar, weil die Basis-Emitterspannung stark Temperaturabhängig ist. Als Lösung erwies sich die Einstellung der Stromverstärkung mit zwei Widerständen wie in Abbildung 6.11 dargestellt. Der Widerstand R3 im Kollektorkreis des Transistors dient zur Verringerung der Verlustleistung im Transistor.

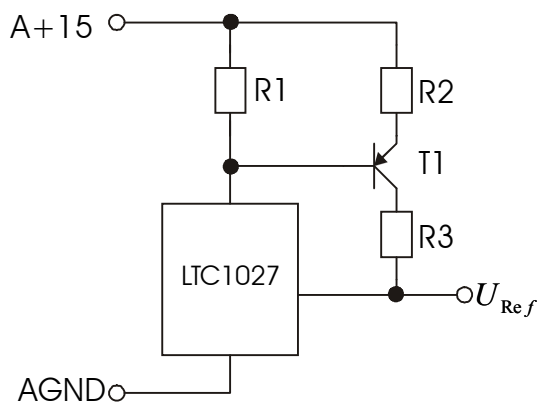


Abbildung 6.11 Verwendete Referenzspannungsquellenbeschaltung

6.7.2.1 Dimensionierung der Widerstände

Ohne Belastung soll durch den Transistor kein Strom fließen: $R_1 \leq \frac{0,4V}{2mA}$

2mA ist der Ruhestrom des LTC1027

0,4V die Basis-Emitterspannung, unter der kein nennenswerter Strom fließt

Um den notwendigen Strom treiben zu können muß bei maximalem Ausgangsstrom des LTC1027 (15mA) der Transistor $\geq 47\text{mA}$ liefern. $R_2 \leq \frac{R_1 * 15\text{mA} - 0,7\text{V}}{47\text{mA}}$

Damit der Transistor bei maximalem Strom nicht gesättigt wird muss $R_3 \leq \frac{8\text{V}}{47\text{mA}}$ sein.

Gewählte Widerstandswerte: $R_1 = 150\Omega$ $R_2 = 33\Omega$ $R_3 = 100\Omega$

Maximal auftretende Verlustleistungen: R_1 : 33,75 mW, R_2 : 45,2mW, R_3 : 137mW

Transistor: 0,423mW

Zur Überprüfung der Stabilität habe ich die Referenzspannungsquelle zusätzlich mit einem rechteckförmigen Strom belastet und die Reaktion der Referenzspannung gemessen. Der Rechteckstrom wurde mit einem 100Ω Widerstand und einem Funktionsgenerator erzeugt. In der Abbildung 6.12 sind die Referenzspannung und die Ausgangsspannung des Funktionsgenerators abgebildet.

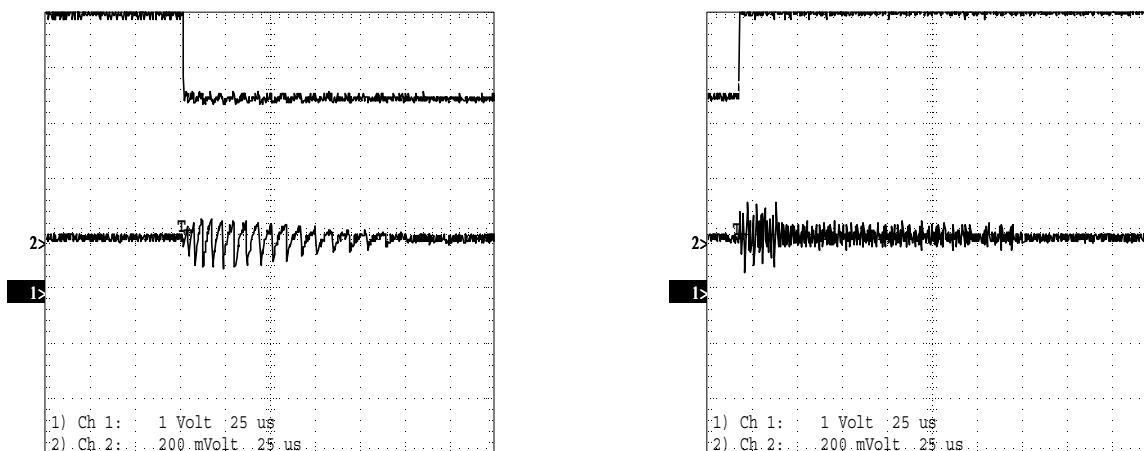


Abbildung 6.12 Die Referenzspannung bei rechteckförmiger Strombelastung

Auf der Modulatorkarte wird die Referenzspannung mit einem konstanten Strom belastet. Die dynamischen Eigenschaften spielen deswegen eine untergeordnete Rolle.

6.8 DAC Beschreibung

In der NC wird einheitlich der gleiche DAC verwendet. Der AD768 von Analog Devices wurde von DI Bernhard Weber und DI Martin Hefler ausgewählt. Dieser DAC wurde aufgrund der ausreichenden Genauigkeit, Geschwindigkeit und des niedrigen Preises gewählt.

6.8.1 Beschreibung des DAC AD768

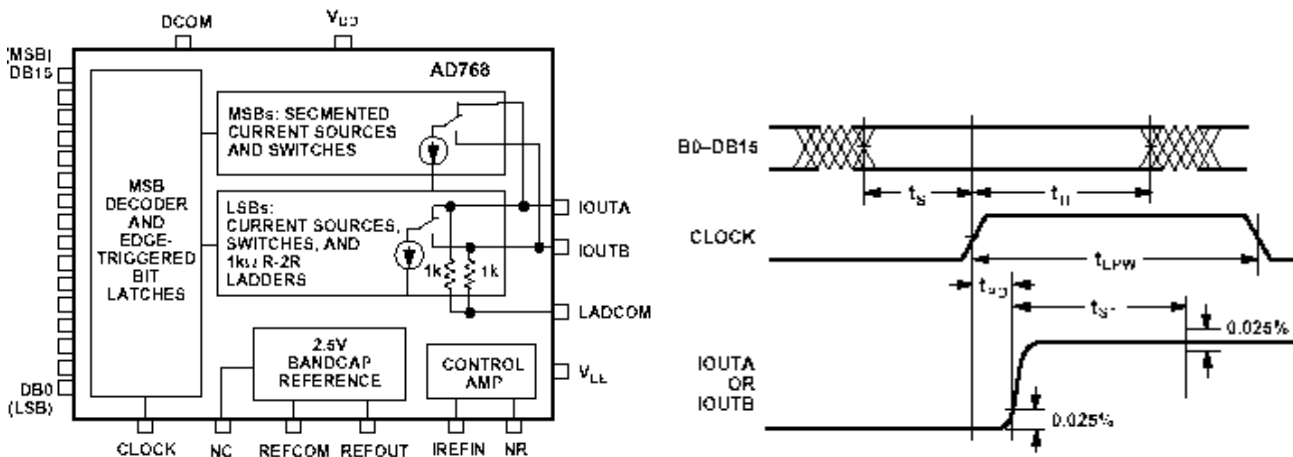


Abbildung 6.13 Blockschaltbild des DAC AD768 und sein Zeitverhalten

Der AD768 ist ein DAC mit differenziellen Stromausgängen. Der Ausgangswiderstand beträgt $1\text{ k}\Omega \pm 20\%$. Die Ausgangsspannung darf zwischen $-1,2\text{V}$ und $+5\text{V}$ liegen. Die digitalen Eingänge sind flankengetriggerte Latches. Auf dem Chip ist eine Referenzspannungsquelle mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ und eine Temperaturdrift von $\leq 30\text{ppm}/^\circ\text{C}$ integriert. Wegen der relativ großen Toleranz und Drift der Referenzspannungsquelle wird sie in der Schaltung nicht verwendet. Die verwendete Referenzspannungsquelle hat einen Fehler von $\leq 0,5\%$ und eine Temperaturdrift von $\leq 3\text{ppm}/^\circ\text{C}$. Durch den NR-Pin (Noise Reduction) kann die Bandbreite des Referenzstromverstärkers begrenzt werden und dadurch das Rauschen reduziert. Die Toleranzen des DACs machen einen Abgleich mit 2 Potentiometern notwendig, jeweils ein Potentiometer für den Offset und die Verstärkung. Der AD768 hat eine integrale Nichtlinearität (INL) von $\leq 8\text{ LSB}$ (Least Significant Bit). Die INL ist als die maximale Abweichung von der Ideallinie zwischen Null und maximalem Ausgang definiert. Bei den DACs, die Signale in die Multiplizierschaltung liefern wird der DAC-Ausgang mit der Multiplizierschaltung eingestellt. Der Ausgangsstrom der vier höchstwertigen Bits wird durch vier Stromquellen mit den Strömen $I_{\text{ref}} \cdot 2$, I_{ref} , $I_{\text{ref}}/2$ und $I_{\text{ref}}/4$ erzeugt, die 12 niederwertigen Bits

haben jeweils eine Stromquelle mit $I_{ref}/8$. Die Stromquellen werden zwischen IOUTA (Bit = 0) und IOUTB (Bit = 1) umgeschaltet. Die 12 Stromquellen mit $I_{ref}/8$ liefern den Strom über ein R2R-Netzwerk an den Ausgang. Das R2R-Netzwerk gewichtet die Ströme entsprechend ihrer Wertigkeit. Durch diese Aufteilung der Stromrealisierung erreicht man einen relativ geringen Stromverbrauch, vermeidet ab sehr kleine Ströme $I_{ref}/3278$ ca. 150 nA. Für die Erzeugung der Ausgangsströme ist der Widerstandswert des Widerstandsnetzwerkes nicht wichtig. Er bildet jedoch den Ausgangswiderstand, der mit seiner Toleranz ($\pm 20\%$ beim AD768) die Verstärkung nachfolgende Schaltung beeinflussen kann. In den folgenden Unterkapiteln wird die Ausgangsbeschaltung kurz diskutiert und beschrieben.

6.8.2 DAC arbeitet auf virtuellen Nullpunkt

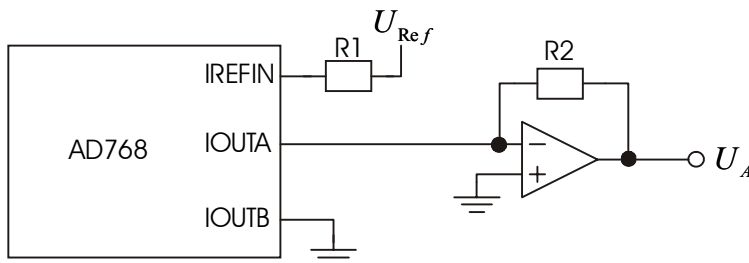


Abbildung 6.14 DAC-Ausgang mit OPV beschaltet

Dadurch, dass der OPV den DAC-Ausgang auf 0V hält, hat die Toleranz des DAC-Ausgangswiderstandes keinen Einfluss auf die Verstärkung der Schaltung. Der DAC-Ausgangswiderstand hat nur Einfluss auf die Verstärkung der OPV-Eingangsoffsetspannung. Bei einer Ausgangsspannung von 0V bis 2V und einem Ausgangsstrom von max 20 mA liegt die Verstärkung der OPV-Offsetspannung zwischen 1,125 und 1,083. Der Offsetfehler des DAC ist $\leq \pm 0.2\%$ des FSR (Full Scale Range), das entspricht bei einem 2V Ausgang ± 4 mV. Die maximale Eingangsoffsetspannung des OPV ist 2mV damit ergibt sich eine maximale Gesamtoffsetspannung von $\pm 6,25$ mV.

Der Verstärkungsfehler ergibt sich als Produkt des DAC-Verstärkungsfehlers und der Widerstandstoleranz. Bei einer Widerstandstoleranz von $\pm 1\%$ ergibt sich ein gesamter Verstärkungsfehler von $\pm 2.01\%$. Ein wesentlicher Nachteil dieser Schaltung ist, dass bei schnellen Änderungen des Ausgangsstromes die Ausgangsspannung zuerst eine Spannungsspitze in die entgegengesetzte Richtung macht.

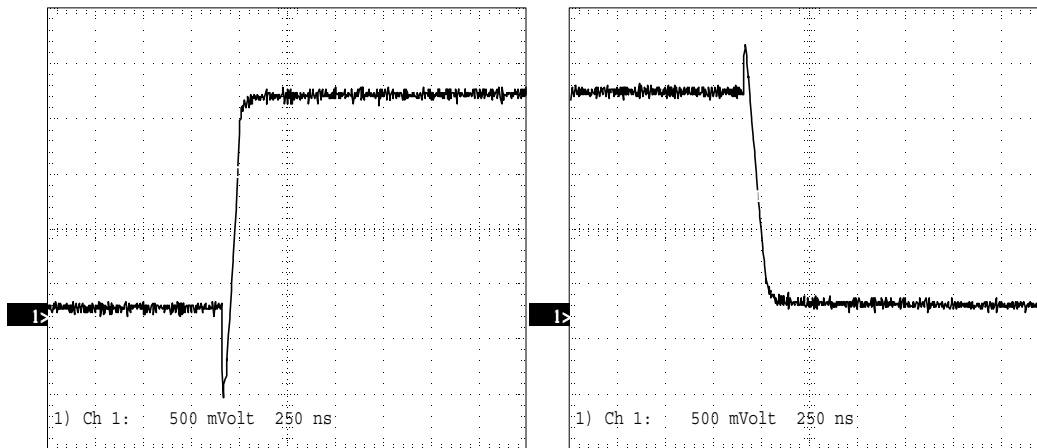


Abbildung 6.15 Ausgang der DAC-Schaltung nach Abbildung 6.14, wenn ein Rechtecksignal ausgegeben wird

Für diesen Fehler ist der Ausgangswiderstand des OPV verantwortlich. Diese Fehler könnte man mit einem sehr schnellen OPV vermeiden. Die meisten schnellen OPVs haben aber große Eingangsströme und eine große Offsetspannung, wodurch große Gleichspannungsfehler entstehen würden.

Den Ausgangswiderstand des OPV könnte man mit einem nachgeschalteten Emitterfolger verringern. Um den notwendigen niedrigen Ausgangswiderstand zu erreichen wäre aber ein Ruhestrom von ca. 25 mA notwendig und damit ein Gesamtstrom von max 45mA. Bei Verwendung der $\pm 15V$ Versorgung ergibt das eine maximale Transistorverlustleistung von ca. 0,6W und zusätzlich 0,37W im Emitterwiderstand. Das Problem lässt sich auch durch eine RC Beschaltung des DAC Ausgangs lösen. Der Nachteil dieser Lösung besteht in einem unvermeidlichen Überschwingen des Ausgangs.

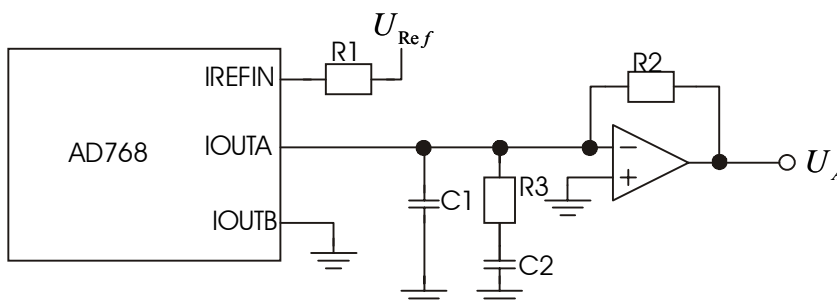


Abbildung 6.16 DAC-Ausgang mit RC Kombination

Bei schnellen Änderungen des Ausgangsstromes nimmt der Kondensator C1 einen Teil des Stromes auf. Der Abbau dieser Ladung verursacht das Überschwingen. Durch einen kleinen Widerstand R3

kann das Überschwingen verringert werden. Mit der Verringerung des Widerstandes R3 sinkt aber auch die Grenzfrequenz. Die Grenzfrequenz kann nicht durch Parallelschalten eines Kondensators zu R2 eingestellt werden. Ein Kondensator parallel zu R2 würde Instabilität verursachen. Der Kondensator in Serie zum Widerstand R3 verhindert eine große Verstärkung der OPV-Offsetspannung.

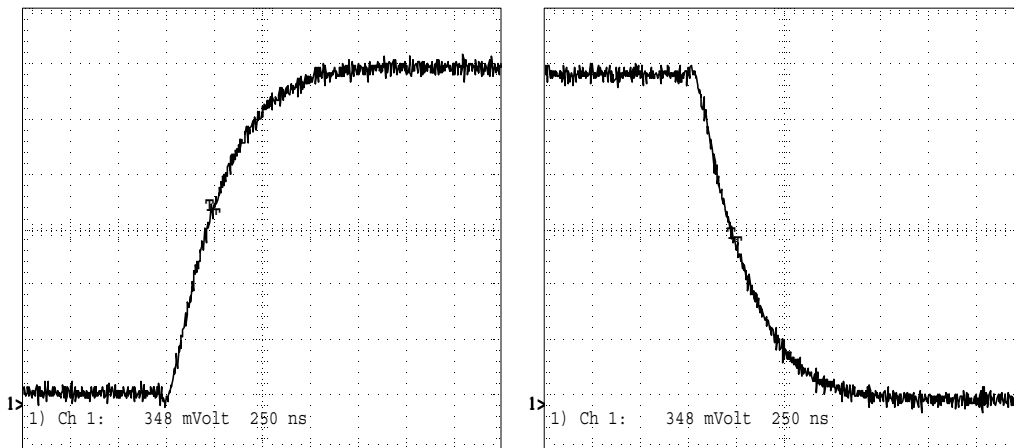


Abbildung 6.17 Ausgangssignal mit RC Beschaltung

Eine Lösung für dieses Problem wäre ein Splitbandverstärker nach Abbildung 6.17. Ein langsamer OPV mit geringem Eingangsstrom und geringem Offsetfehler sorgt für gute Gleichspannungsgenauigkeit. Der zweite OPV liefert den Ausgangsstrom mit der notwendigen Geschwindigkeit. Den DC-Eingangsstrom für den Schnellen OPV liefert OPV1. Den Offsetfehler von OPV2 gleicht OPV1 aus.

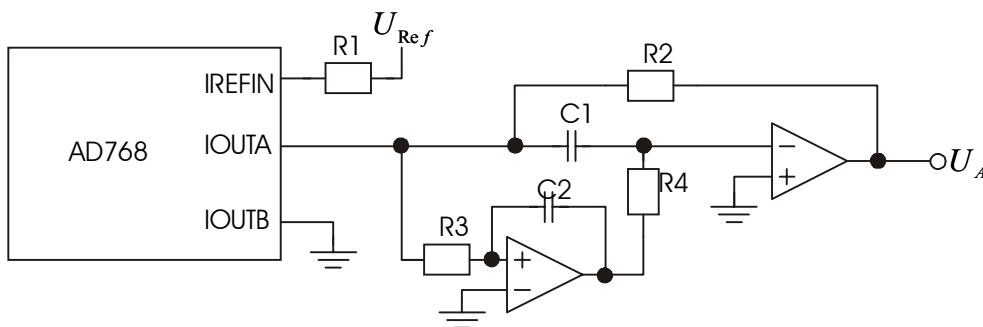


Abbildung 6.18 DAC-Ausgang mit Splitbandverstärker

6.8.2.1 DAC arbeitet direkt auf Lastwiderstand.

Wenn der Lastwiderstand auf AGND gelegt wird, dann sind nur negative Spannungen möglich und die Ausgangsspannung ist auf max 1,2V begrenzt. Wird der Lastwiderstand auf eine Referenzspannung gelegt, dann sind auch bipolare Ausgangsspannungen möglich. Die Referenzspannungsquelle wird jedoch sehr stark mit einem schwankenden Strom belastet.

Da der Ausgangswiderstand des DACs parallel zum Lastwiderstand liegt, erhöht sich die Toleranz des Gesamtwiderstandes. Bei 50Ω Lastwiderstand mit 1% Toleranz ergibt sich eine Toleranz des Gesamtwiderstandes 1.9 %. Daraus ergibt sich eine Verstärkungstoleranz der Gesamtschaltung von 2.9 %. Diese Schaltung hat zwar den Vorteil, daß sie sehr einfach ist hat jedoch eine höhere Verstärkungstoleranz und den Nachteil, daß die nachfolgenden Stufen die Spannung durch Belastung verändern können. Die Grenzfrequenz kann einfach durch einen Kondensator parallel zu R2 eingestellt werden.

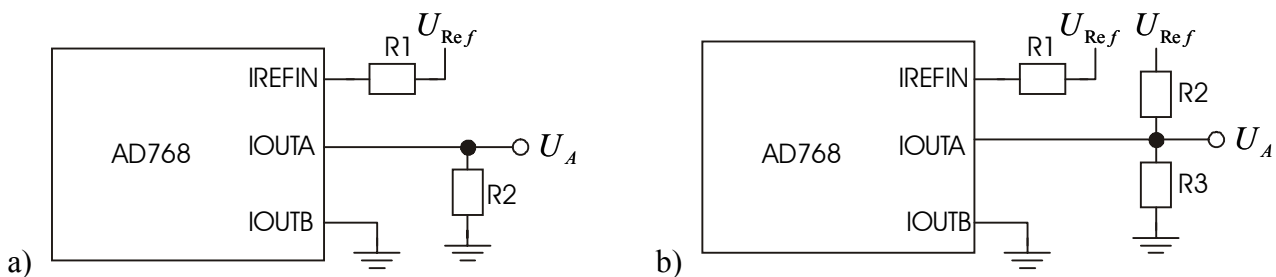


Abbildung 6.19 DAC arbeitet auf Lastwiderstand

6.8.2.2 Verwendete DAC-Ausgangsbeschaltung

DAC arbeitet auf kleinem Widerstand und die Spannung wird durch invertierende OPV-Schaltung verstärkt. Die Toleranz eines Lastwiderstandes mit $10 \Omega \pm 1\%$ erhöht sich auf $\pm 1.2\%$, aber es treten keine dynamischen Probleme auf. Die Grenzfrequenz des Ausgangs lässt sich leicht und genau einstellen. Die Schaltung hat einen gesamten Verstärkungsfehler

$$\text{DAC: } \pm 1,0\%$$

$$I_{\text{Ref}}(R_{\text{Ref}} U_{\text{Ref}}): \pm 1,0\%$$

$$R_{\text{Last}}: \pm 1,2\%$$

$$R_{\text{verstärkung}} \pm 2,0\%$$

$$\text{gesamter Verstärkungsfehler } : \pm 5,7\%$$

$$\text{Offsetfehler: } \pm(11 \cdot 1,5\text{mV} + 0,002 \cdot 198\text{mV}) = \pm 16,9\text{mV}$$

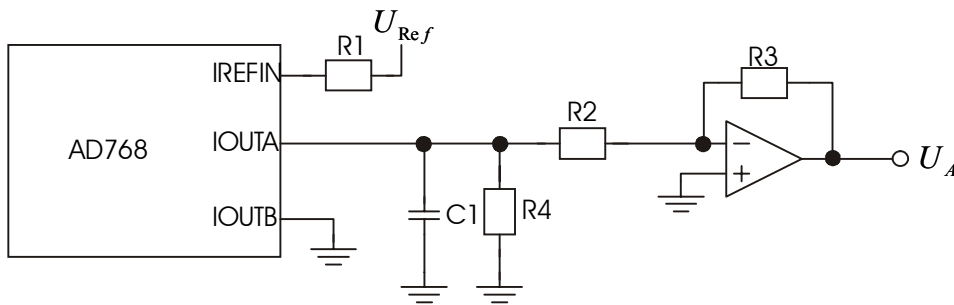


Abbildung 6.20 Verwendete DAC-Ausgangsbeschaltung

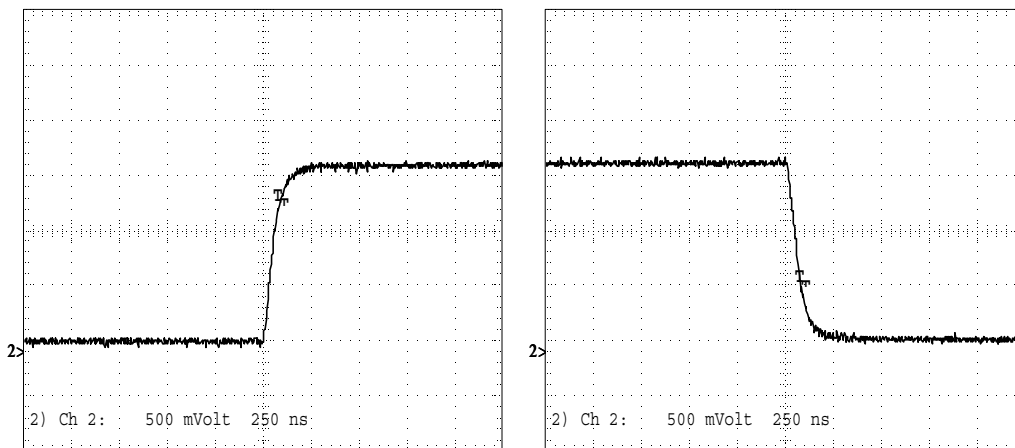


Abbildung 6.21 Ausgangssignal ohne Bandbegrenzenden Kondensator C1

Alle DAC Ausgänge haben die gleiche Beschaltung. Die DAC Schaltungen haben folgende

Ausgangsspannung (nach ersten OPV): $U_A = \frac{N}{2^{16}} * 1,98V * (1 \pm 0,057) \pm 16,9mV$

Wenn der Spannungsbereich von $-17mV$ bis $2,08V$ verlassen wird, dann ist ein Fehler in der Schaltung.

6.9 Beschreibung der Multiplizierschaltung

6.9.1 Funktionsweise des verwendeten Analogmultiplizierers

Der verwendete Analogmultiplizierer führt die Multiplikation auf eine Addition und Subtraktion von Logarithmen und eine e-Funktion zurück.

$$\frac{X * Y}{Z} = \exp(\ln x + \ln y - \ln z)$$

X,Y,Z :Eingangssignale (Strom)

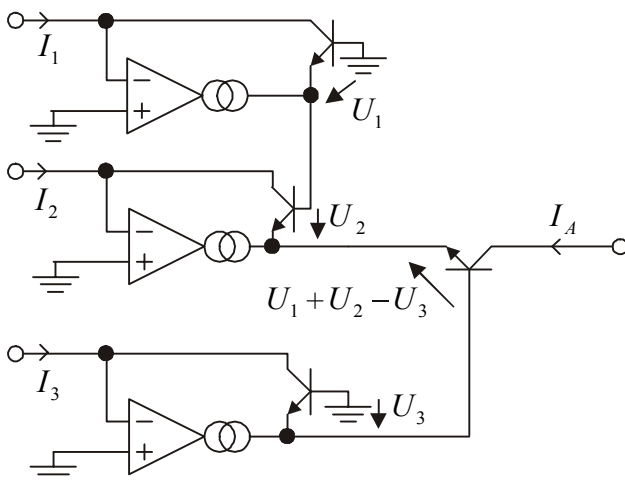
Diese Funktion kann man mit drei Logarithmierern, einem Entlogarithmiere und einer Addier-Subtrahier-Schaltung bilden. Die Addier-Subtrahier-Schaltung kann man durch Zusammenschaltung der Logarithmierer-Ausgänge realisieren. Der Divisionseingang Z wird bei einer reinen Multiplikation zur Kompensation von Temperatur Bauteilparametern und zur Skalierung des Ausgangs verwendet. Als Logarithmierer und Entlogarithmierer wird eine Transistorkennlinie

$$I_C = I_S * \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_t}\right)$$

$$U_{BE} = U_t * \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right)$$

I_C : Kollektorstrom U_{BE} : Basis-Emitterspannung I_S : Sperrstrom U_t : Thermospannung

verwendet.



$$U_1 = U_t * \ln\left(\frac{I_1}{I_S}\right)$$

$$U_2 = U_t * \ln\left(\frac{I_2}{I_S}\right)$$

$$U_3 = U_t * \ln\left(\frac{I_3}{I_S}\right)$$

$$U_1 + U_2 + U_3 = U_t * \ln\left(\frac{I_A}{I_S}\right) = U_t * \ln\left(\frac{I_1 * I_2}{I_3 * I_S}\right)$$

$$I_A = \frac{I_1 * I_2}{I_3}$$

Abbildung 6.22 Blockschaltbild des RCA4200 und die Zusammenhänge der einzelnen Ströme

In Abbildung 6.22 ist das Blockschaltbild des Analogmultiplizierers RCA4200 von Raytheon dargestellt. Die nicht invertierenden Eingänge der Operationsverstärker bei I_1 und I_2 , die im Blockschaltbild auf Masse gelegt sind, sind aus dem Bauteil herausgeführt und können zum Einstellen der entsprechenden Offsetspannung verwendet werden. In den Formeln wurde vorausgesetzt, dass alle vier Transistoren gleich sind, die gleiche Temperatur haben und die Transistorkennlinie keine linearen Terme (durch Anschlusswiderstände Bahnwiderstände) hat. Nur unter diesen Voraussetzungen kürzen sich alle Transistorparameter und die Temperatur. Die Gleichheit der Transistorparameter und die gleiche Temperatur wird durch die Integration auf einen Chip erreicht. Raytheon setzt eine, nicht genauer beschriebene, Schaltungstechnik ein, mit der die linearen Terme in der Transistorkennlinie kompensiert werden. Durch die Kompensation der linearen Terme wird die Linearität wesentlich verbessert. Durch die Beschränkung des Eingangs- des Ausgangsstromes auf Ströme größer null ist die Multiplikation auf einen Quadranten beschränkt. Der lineare Bereich des Halbleiters schränkt den Eingangsstrom weiter stark ein (50uA...250uA für Linearität besser 0,1%). Für die Einstellung der Amplitude sind jedoch zwei und für die Figurdrehung sind vier Quadranten-Multiplikationen notwendig. Es ist aber möglich mit einem Einquadrantenmultiplizierer eine Vierquadrantenmultiplikation durchzuführen.

6.9.2 Erweiterung des Einquadrantenmultiplizierers auf vier Quadranten

Um auch negative Eingangssignale verarbeiten zu können muss man dem Eingangssignal einen Offset addieren. Die dadurch entstehenden unerwünschten Terme im Ergebnis kann man durch eine lineare Schaltung subtrahieren.

$$(I_1 + I_{10}) * (I_2 + I_{20}) = I_1 * I_2 + I_1 * I_{10} + I_2 * I_{10} + I_{10} * I_{20}$$

I_1, I_2 Eingangsströme

I_{10}, I_{20} addierter Offset

$I_1 * I_2 =$ erwünschter Term

$I_1 * I_{10} + I_2 * I_{10} + I_{10} * I_{20} =$ unerwünschte Terme

Mit der Schaltung in Abbildung 6.23 kann die Spannung am Eingang an die optimalen Eingangsströme angepasst werden (R1...R3, R5, R6). Außerdem können die unerwünschten Produktterme kompensiert werden (R4, R7, R8).

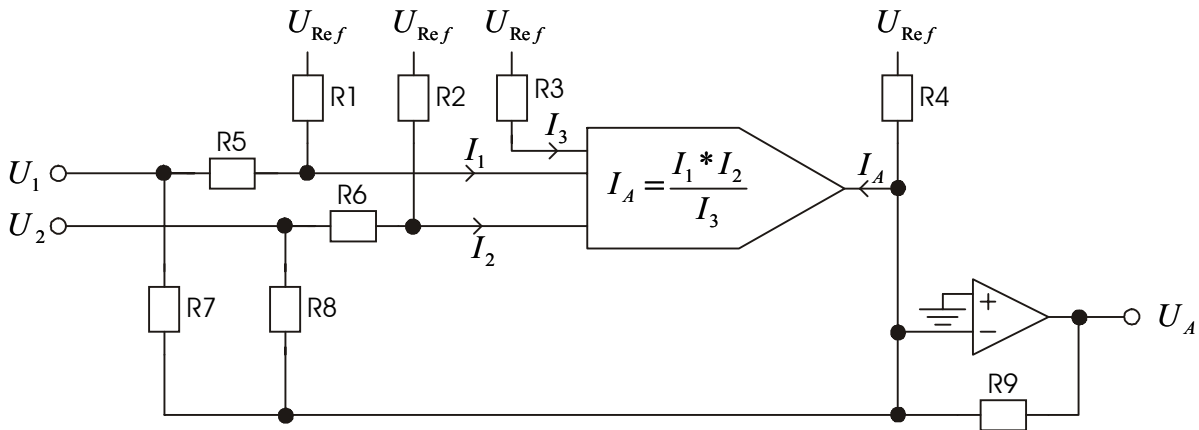


Abbildung 6.23 Realisierung einer Vierquadrantenmultiplikation mit einem Einquadrantenmultiplizierer

Die Schaltung in Abbildung 6.23 hat folgende Übertragungsfunktion

$$U_A = \frac{U_1 * U_2 * R9 * R3}{R5 * R6} + U_{Ref} * \left(\frac{R9 * R3}{R5 * R6} + \frac{R9}{R4} \right) + U_1 * \left(\frac{R9 * R3}{R5 * R2} - \frac{R9}{R7} \right) + U_2 * \left(\frac{R9 * R3}{R5 * R2} - \frac{R9}{R8} \right)$$

Die Schaltung im Abbildung 6.23 soll zur Erklärung der Funktionsweise dienen. Deswegen wurde alles weggelassen, was für die Funktionsweise nicht unbedingt notwendig ist. Die einzelnen Widerstände haben folgende Funktion:

R1, R2: addieren Offset

R3 : stellt den Divisionsstrom ein

R4: Kompensiert den DC-Anteil im Ausgang

R5, R6: bilden aus der Eingangsspannung den Eingangsstrom für den Multiplizierer

R7,R8: kompensieren die unerwünschten Terme X_0*Y bzw. Y_0*X

R9: wandelt den Ausgangsstrom in die Ausgangsspannung um

Es gibt auch Analogmultiplizierer, die ohne externe Beschaltung in vier Quadranten arbeiten können. Wegen der hohen Linearität von besser 0.1% und des geringen Preises habe ich mich für den RC4200A von Raytheon entschieden. Bei dieser Entscheidung wurde der Aufwand für die Bestückung und Lagerhaltung der vielen Widerstände unterschätzt. Ein wesentliches Problem dieser Schaltung ist, dass die Kompensation der unerwünschten Terme X_0*Y bzw. Y_0*X ohne Verzögerung durch den Multiplizierer am Ausgang ankommt. Durch die unterschiedlichen Laufzeiten der Signalanteile kommt es zu wesentlichen Fehlern bei der Multiplikation. Der Fehler macht sich besonders stark bei kleinem Multiplikationsergebnis bemerkbar ($0*X$). In Abbildung 6.24. Ist die Multiplikation eines Rechtecksignals mit Null dargestellt.

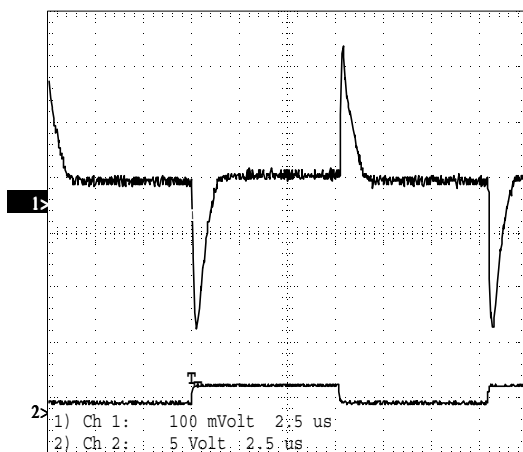


Abbildung 6.24 Multiplikationsfehler durch unterschiedliche Laufzeiten

Mit einem Tiefpass kann man die fehlenden Verzögerungen annähernd ausgleichen. Bei der Wahl der Zeitkonstante steht man vor dem Problem, dass die Geschwindigkeit des Multiplizierers vom jeweiligen Arbeitspunkt abhängig ist und das Übertragungsverhalten kein reiner Tiefpass erster Ordnung ist. Dieses Problem ist in Abbildung 6.25 zu erkennen. Die steigende und die fallende Flanke des Rechtecksignals haben eine andere Verzögerung durch den Multiplizierer. Bei der steigenden Flanke ist der Signalanteil durch den Multiplizierer langsamer als über dem Tiefpass und der Fehler ist ein Puls mit ca. 100mV Amplitude. Bei der fallenden Flanke ist der Signalanteil durch den Tiefpass schneller. Der daraus resultierende Fehler ist ein Puls mit 50mV.

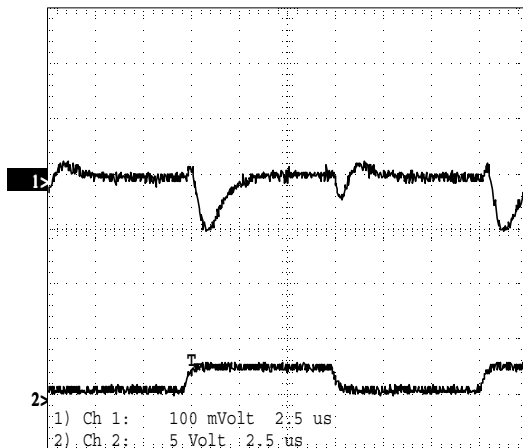


Abbildung 6.25 Multiplikation eines Rechtecks mit Null mit Tiefpass im Kompensationszweig

Ich habe die Zeitkonstante so gewählt, daß der Fehler bei kleinen Ausgangssignalen am kleinsten ist. Experimentell habe ich eine optimale Zeitkonstante von ca. 109ns ermittelt. Durch die Tiefpässe, in den externen Signalwegen, wird die Multiplizierschaltung schneller. In Abbildung 6.26 wird ein Rechtecksignal mit und ohne Tiefpass im externen Signalweg dargestellt.

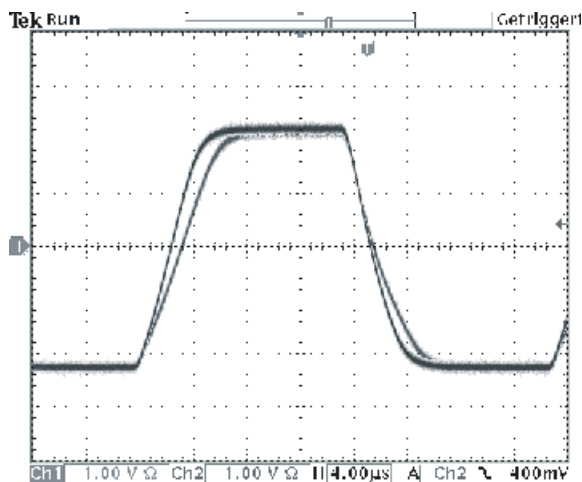


Abbildung 6.26 Geschwindigkeitsvergleich der Multiplizierschaltungen mit und ohne Tiefpass

Um die gesamte Multiplizierschaltung zu erhalten, fehlen noch die Einstellmöglichkeiten für den Offsetabgleich und die Verstärkung. Mit der Multiplizierschaltung wird auch die Amplitude und der Offset der Eingangssignale abgeglichen. Die Multiplizierschaltung wurde so konzipiert, dass beim Einstellen möglichst wenige Iterationen notwendig sind.

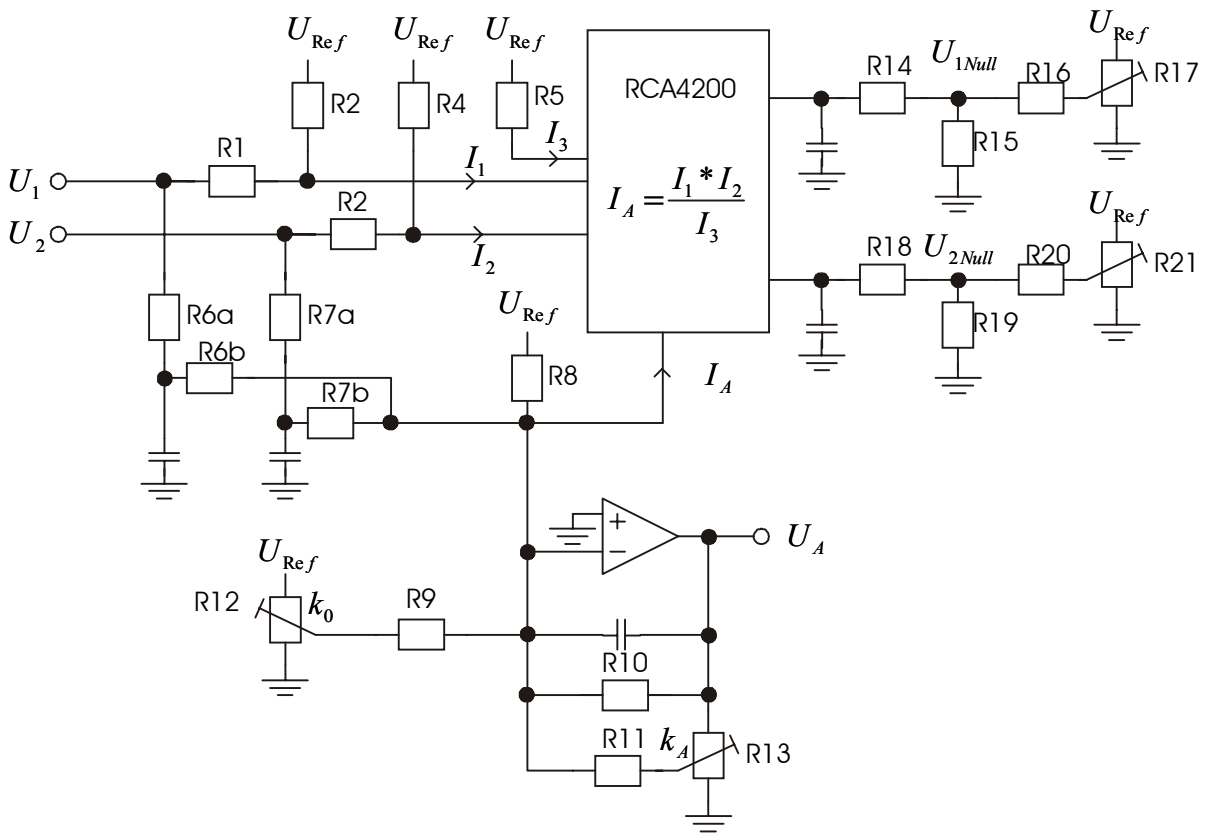


Abbildung 6.27 Multiplizierschaltung mit Tiefpässen und Einstellmöglichkeiten

Übertragungsfunktion der Multiplizierschaltung in Abbildung 6.27:

$$U_A = \frac{R_{11} * R_{10}}{R_{11} + k_A R_{10}} * \left(\frac{\left(\frac{U_1 - U_{1Null}}{R_1} + \frac{U_{Ref} - U_{1Null}}{R_2} \right) * \left(\frac{U_2 - U_{2Null}}{R_3} + \frac{U_{Ref} - U_{2Null}}{R_4} \right)}{\frac{U_{Ref}}{R_5}} - \frac{U_1}{R_6} - \frac{U_2}{R_7} - \frac{U_{Ref}}{R_8} - \frac{U_{Ref} * k_0}{R_9} \right)$$

Gewünschte Übertragungsfunktion:

$$U_A = K * (U_1 - U_{1Nullpunkt} + U_{1Toleranz}) * (U_2 - U_{2Nullpunkt} + U_{2Toleranz})$$

6.9.3 Berechnung und Wahl der Widerstandswerte

Die Schaltung ist so aufgebaut, dass alle Potentiometer als Spannungsteiler wirken. Wenn die Potentiometer wesentlich niederohmiger sind als die angeschlossenen Widerstände, dann hat der Widerstandswert der Potentiometer nur einen geringen Einfluss auf die Funktion der Schaltung. Damit die Potentiometer die Schaltung nicht zu stark belasten (Referenzspannungsquelle und OPV Ausgang) und nicht verschiedene Potentiometer verwendet werden, wurde als Kompromiss 10kΩ für alle Potentiometer gewählt.

Nebenbedingungen für die Dimensionierung der Widerstände:

Die Eingangsströme des Multiplizierers I_1 , I_2 , I_3 sollen zwischen 50μA und 250μA liegen. Bei Eingangsströmen unter 50μA wäre zur Erhaltung der Stabilität eine zusätzliche R-C Beschaltung des Einganges notwendig und die Grenzfrequenz würde sehr stark sinken. Bei Eingangsströmen über 250μA verringert sich die Linearität sehr stark.

Die Eingänge zur Offsettingstellung dürfen den Bereich von ± 100mV nicht verlassen. Durch die verwendete Schaltung (Spannungsteiler R16-R15 und R20-R19) wird der Bereich auf 0V bis 100mV eingeschränkt.

Dimensionierung der einzelnen Widerstände

Folgende Spannungsbezeichnungen werden in der Berechnung benutzt:

U_{1Min} , U_{2Min} Minimum der Eingangsspannungen

U_{1Max} , U_{2Max} Maximum der Eingangsspannungen

$U_{1Toleranz}$, $U_{2Toleranz}$ Offsetspannungsfehler der Eingangsspannung die durch die Multipliziererschaltung ausgeglichen werden soll.

U_{AMin} , U_{AMax} Minimum und Maximum der Ausgangsspannung

Die errechneten Widerstandswerte sind meist nicht erhältlich. Deswegen werden möglichst passende Werte gewählt und kontrolliert, ob sich die Schaltung auf die gewünschte Übertragungsfunktion einstellen lässt.

$$R1 = \frac{U_{1Max} - U_{1Min}}{200\mu A} \qquad R3 = \frac{U_{2Max} - U_{2Min}}{200\mu A}$$

$$R_2 = \frac{U_{Ref} - U_{1Null}}{50\mu A - \frac{U_{1Min} - U_{1Null}}{R_1}} \quad R_4 = \frac{U_{Ref} - U_{2Null}}{50\mu A - \frac{U_{2Min} - U_{2Null}}{R_2}}$$

Die beiden Offseteinstellspannungen U_{1Null} und U_{2Null} werden mit 50mV in Bereichsmittle angenommen.

$R_5 = \frac{U_{Ref}}{I_3}$ Die Wahl von I_3 bietet für die Optimierung und die Wahl der Widerstände R6, R7 und R8 eine große Variationsmöglichkeit. Im Datenblatt gibt es keine Information für die Wahl von I_3 im Bereich von 50μA bis 250μA.

Die Gleichungen für R6 und R7 wurden nicht analytisch gelöst. Die Dimensionierung der beiden Widerstände folgt aus den Bedingungen $U1*0 = 0$ bzw. $U2*0 = 0$. Der Multipliziererausgangsstrom wird als Funktion von $U1$ $U2$ $R1..R5$ dargestellt $I_A(U1, U2)$. Die Offseteinstellspannungen werden in der Bereichsmittle angenommen (50mV). Die Widerstandswerte sind die gewählten.

$$R_6 = \frac{U_{1Max} - U_{1Min}}{I_A(U_{1Max}, U_{2Nullpunkt}) - I_A(U_{1Min}, U_{2Nullpunkt})}$$

$$R_7 = \frac{U_{2Max} - U_{2Min}}{I_A(U_{1Nullpunkt}, U_{2Max}) - I_A(U_{1Nullpunkt}, U_{2Min})}$$

Mit dem Multipliziererausgang sollen auch die nachfolgenden Stufen einstellbar sein. Deshalb soll am Ausgang der Offset um ± 12 mV und die Amplitude um $\pm 2\%$ einstellbar sein. Um auch die Amplitudenfehler der Eingangssignale ausgleichen zu können ist ein Einstellbereich der Amplitude von $\pm 11\%$ notwendig.

$$R_{10} \geq 1,11 * \frac{U_{AMax} - U_{AMin}}{I_A(U_{1Max}, U_{2Max}) - I_A(U_{1Min}, U_{2Max}) - \frac{U_{1Max} - U_{1Min}}{R_6}}$$

$$R_{10} \parallel R_{11} \leq 0,89 * \frac{U_{AMax} - U_{AMin}}{I_A(U_{1Max}, U_{2Max}) - I_A(U_{1Min}, U_{2Max}) - \frac{U_{1Max} - U_{1Min}}{R_6}}$$

$$R_{10} * 0,89 * \frac{U_{AMax} - U_{AMin}}{I_A(U_{1Max}, U_{2Max}) - I_A(U_{1Min}, U_{2Max})} - \frac{U_{1Max} - U_{1Min}}{R_6}$$

$$R_{11} \leq \frac{R_{10} - 0,89 * \frac{U_{AMax} - U_{AMin}}{I_A(U_{1Max}, U_{2Max}) - I_A(U_{1Min}, U_{2Max})} - \frac{U_{1Max} - U_{1Min}}{R_6}}{R_6}$$

Bei der Berechnung für die Widerstände R8 und R9 muß zwischen der Funktionserzeugung und der Figurdrehung unterschieden werden. Bei der Figurdrehung wird der Offset des Multipliziererausganges nicht eingestellt. Die Widerstände R9 und R12 sind bei der Figurdrehung nicht vorhanden.

$$\text{R8 bei der Figurdrehung: } R_8 = \frac{U_{Ref}}{I_A(U_{1Nullpunkt}, U_{2Nullpunkt}) - \frac{U_{1Nullpunkt}}{R_6} - \frac{U_{2Nullpunkt}}{R_7}}$$

$$\text{R8 bei der Signalerzeugung: } R_8 \geq 1,1 * \frac{U_{Ref}}{I_A(U_{1Nullpunkt}, U_{2Nullpunkt}) - \frac{U_{1Nullpunkt}}{R_6} - \frac{U_{2Nullpunkt}}{R_7}}$$

$$R_8 * 0,9 * \frac{U_{Ref}}{I_A(U_{1Nullpunkt}, U_{2Nullpunkt}) - \frac{U_{1Nullpunkt}}{R_6} - \frac{U_{2Nullpunkt}}{R_7}}$$

$$R_9 \leq \frac{R_{80} - 0,9 * \frac{U_{Ref}}{I_A(U_{1Nullpunkt}, U_{2Nullpunkt}) - \frac{U_{1Nullpunkt}}{R_6} - \frac{U_{2Nullpunkt}}{R_7}}{R_6}$$

Für die Dimensionierung der Widerstände habe ich Mathcad 7.0 verwendet. Die Mathcad –Sheets sind im Anhang enthalten. Ich habe Widerstandswerte gefunden, bei denen auch im Worst Case die Schaltung eingestellt werden kann.

6.9.4 Einstellen der Multiplizierschaltung

Beim Einstellen der Multiplizierschaltung sind keine Iterationen notwendig. Durch die Einstellung der Multiplizierschaltung werden die Toleranzen der Eingangsspannungen und der nachfolgenden Schaltung eingestellt. Durch die Nichtlinearität der Multiplizierschaltung (<0.1%) ist die Einstellung geringfügig vom Arbeitspunkt abhängig. Im Folgenden wird die Einstellung des Offsets bei maximaler Amplitude und der Verstärkung in einem maximalen Punkt beschrieben. Die

Bezeichnung der Widerstände und der Spannungen beziehen sich auf Abbildung 6.27 (Multipliziererschaltung gesamt).

Zuerst werden die Offset-Spannungen der beiden Eingänge eingestellt. Dazu wird an einem Eingang U1 ein Rechtecksignal angelegt und am anderem Eingang U2 die Spannung, die als null interpretiert wird. Ein Oszilloskop wird an den Ausgang und an dem Rechteck am Eingang angeschlossen. Das Rechtecksignal am Eingang wird als Triggerquelle verwendet. Mit R21 wird so abgeglichen, dass am Ausgang der Multipliziererschaltung kein Rechtecksignal vorhanden ist. Die Störungen bei den steilen Flanken des Eingangssignals können nicht abgeglichen werden. Im zweiten Schritt wird am Eingang U2 ein Rechtecksignal angelegt und am Eingang U1 die Spannung, die als null interpretiert wird. Mit R17 wird so abgeglichen, dass am Ausgang kein Rechtecksignal vorhanden ist.

Die Einstellung der Verstärkung und des Ausgangsoffsets wird wegen der höheren Genauigkeit mit einem Multimeter abgeglichen. Bei den Multiplizierern für die Figurdrehung wird der Offset der Ausgangsspannung mit dem Offset der Strahlposition eingestellt. Zum Abgleich des Offsets bei der Signalerzeugung wird an beide Eingänge die Null-Spannung angelegt und der Ausgang auf Null abgeglichen. Für den Abgleich der Verstärkung werden an die Eingänge die maximalen Spannungen angelegt, so dass der Ausgang maximal wird. Mit R13 wird auf die gewünschte Ausgangsspannung abgeglichen. Durch das Einstellen der Verstärkung wird auch die Verstärkung des Offsetfehlers verändert. Durch den Abgleich der Offsetspannung, der vor der Verstärkungseinstellung durchgeführt wird. Wird beim Einstellen der Verstärkung nur die Verstärkung der OPV-Offsetspannung verändert. Deswegen wird der Offset durch die Verstärkungseinstellung um $\max(2\text{mV} \cdot 0,25) = 0,5\text{mV}$ verändert.

6.9.4.1 Multipliziererschaltung für die Figurdrehung

Die Multiplizierer für die Figurdrehung haben keine Potentiometer (R12, R9) für den Offsetabgleich des Ausganges. Beim Einstellen der Verstärkung R13 wird auch die Verstärkung des Offsets verstellt. Dadurch ist es nicht möglich die Verstärkung durch Einstellen eines Punktes abzugleichen. Es muß der Spannungshub zwischen zwei Punkten eingestellt und die Änderung der Ausgangsoffsetspannung berücksichtigt werden. Die Verstärkung wird über die Ausgangstreiber eingestellt und damit die Toleranz der Ausgangsstufe mit abgeglichen. Bei zwei aufeinander folgenden Messungen wird bei der zweiten Messung die Spannung auf

$$U_{soll} = U_2 * \frac{\Delta U_{soll}}{|U_2 - U_1|}$$

U_1 Spannung bei der ersten Messung

U_2 Spannung bei der zweiten Messung

ΔU_{soll} soll Spannungshub zwischen den beiden Messungen

eingestellt werden. Die Ausgangsspannung wird an den Ausgängen gemessen, die verwendet werden. Bei asymmetrischem Ausgang wird zwischen Ausgang und Masse $\Delta U_{soll} = 20V$, bei Symmetrischem Ausgang zwischen den beiden Ausgängen $\Delta U_{soll} = 40V$ gemessen. Für das Einstellen der Verstärkung sind cirka 2 Iterationen notwendig.

6.10 Leitungstreiber

6.10.1 Allgemeines und Anforderungen an den Leitungstreiber

Der Leitungstreiber ist die Schnittstelle der Modulatorkarte zur Maschine. Die Ausgangssignale werden auf die erforderliche Amplitude verstärkt und am Stecker ausgegeben. Als Ausgangsstecker ist ein 9poliger Submin D Stecker vorgesehen. Beim Anschluss der Leitung ist bei Verwendung von geschirmten Leitungen auf möglichst kurzen Anschluss des Schirmes zu achten. Die Ausgangssignale der Modulatorkarte sind auf Frequenzen kleiner 200kHz beschränkt. Die Wellenlängen der Nutzsignale sind daher größer 1500m, die sich in Kabeln durch die Permittivität auf mehrere hundert Meter reduzieren kann. Selbst in Kabeln mit großer Permittivität sind die zu erwartenden Leitungslängen von einigen zehn Metern sehr klein in Relation zur Wellenlänge. Reflexionen brauchen daher nicht berücksichtigt zu werden und Abschlußwiderstände mit der Wellenimpedanz sind nicht notwendig. An den Leitungstreiber werden folgende Anforderungen gestellt:

Symmetrischer Ausgang mit einer Amplitude von $\pm 20V$

Elektrostatische Entladungen sollen die Ausgangsstufe nicht zerstören

Falsches Anschließen z.B. an die Versorgung soll nur geringe Zerstörungen in der Steuerung verursachen

Der Eingangswiderstand der nachfolgenden Verstärker soll die Signale nicht beeinflussen

6.10.2 Symmetrische Signalübertragung

Die Symmetrierung ist eine einfache, billige und effiziente Entstörmaßnahme. Symmetrierung ist aber nur dann voll wirksam, wenn konsequent alle Teile des Stromkreises symmetrisch ausgeführt sind. Die große Unempfindlichkeit der symmetrischen Signalübertragung beruht auf der Tatsache, dass auf zwei nahe beieinander gelegenen Signalleitungen die gleichen Störungen auftreten und daher die Differenz der beiden Signale nicht durch die Störungen beeinflusst wird. Die induzierten Störspannungen können durch Verdrillen der beiden Signalleitungen in beiden Signalleitungen gleich groß und möglichst klein gehalten werden. Wenn die verdrillte Leitung geschirmt geführt wird, dann wird durch die induktive Kopplung die induzierte Spannung in beiden Signalleitungen gleich groß (der Schirm und die Signalleitungen haben ein gemeinsames Magnetfeld). Durch den Schirm, der beim Leitungstreiber angeschlossen werden muss, werden die kapazitiven Ströme, die auf die Signalleitungen wirken stark reduziert. Weil bei den auftretenden Ausgangsfrequenzen und den erwarteten Leitungslängen die Wellenerscheinungen keine Bedeutung haben ist der Abschluß der Leitungen mit dem Wellenwiderstand nicht notwendig.

6.10.3 Ausgangstreiber wie auf FUPI-Verstärker

Auf dem Verstärker für die Verstärkung von Sekundärelektronen für den FUPI (Fugenpilot) wird folgende Schaltung verwendet.

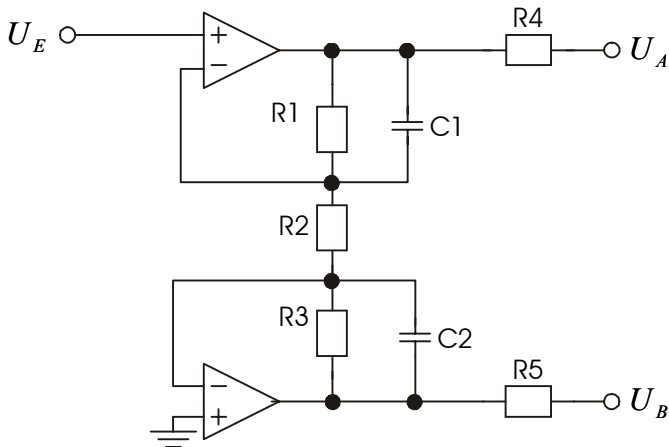


Abbildung 6.28 Schaltplan des Ausgangstreivers wie auf Fupi-Verstärker

Die Schaltung hat bei Idealisierung der OPVs folgendes Übertragungsverhalten:

$$U_A = U_E * \left(1 + \frac{R_1}{R_2 * (j\omega C_1 * R_1 + 1)} \right)$$

$$U_B = U_E * \frac{R_3}{R_2 * (j\omega C_2 * R_3 + 1)}$$

Die Symmetrie der Ausgangssignale $U_A = -U_B$ ist nur ohne die Kondensatoren C1, C2 gegeben, wenn die Widerstände folgende Bedingungen erfüllen.

$$R_1 = (V-1) * R_2$$

$$R_3 = V * R_2$$

$$V = \frac{U_A \text{ bzw. } U_B}{U_E} : \text{Verstärkung der Schaltung}$$

Die Schaltung hat den Nachteil, dass durch einen eingekoppelten Strom auf U_A die Ausgangsspannung U_B beeinflusst werden kann. Ein solcher Störstrom kann durch gute Schirmung der Signalleitung U_A verhindert werden. Insbesondere muss der Schirm am Stecker des Verstärkers möglichst über kurze Drähte oder direkt angelötet werden.

6.10.4 Ausgangstreiber mit invertierender und nichtinvertierender OPV-Schaltung

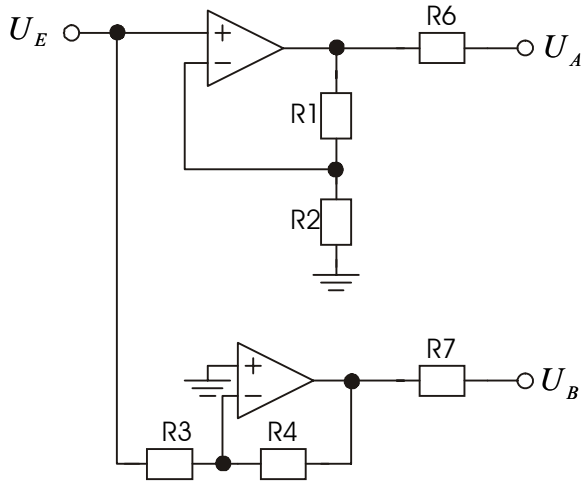


Abbildung 6.29 Schaltplan des Ausgangstreibers mit invertierender und nichtinvertierender OPV-Schaltung

Dynamisch sind die beiden Ausgänge nicht exakt identisch, weil die Schleifenverstärkung die dynamischen Eigenschaften stark beeinflusst. Die Rückkopplung der OPVs beträgt $1/V$ bzw. $1/(V+1)$; V ist die Verstärkung der Schaltung. Bei zu großer Rückkopplung (kleiner Verstärkung) ist der in der Steuerung meist verwendete OPV AD71X mit kapazitiver Last (Leitungen) instabil. Der geringe Aufwand ist jedoch ein Vorteil dieser Schaltung.

6.10.5 Verwendete Ausgangsschaltung

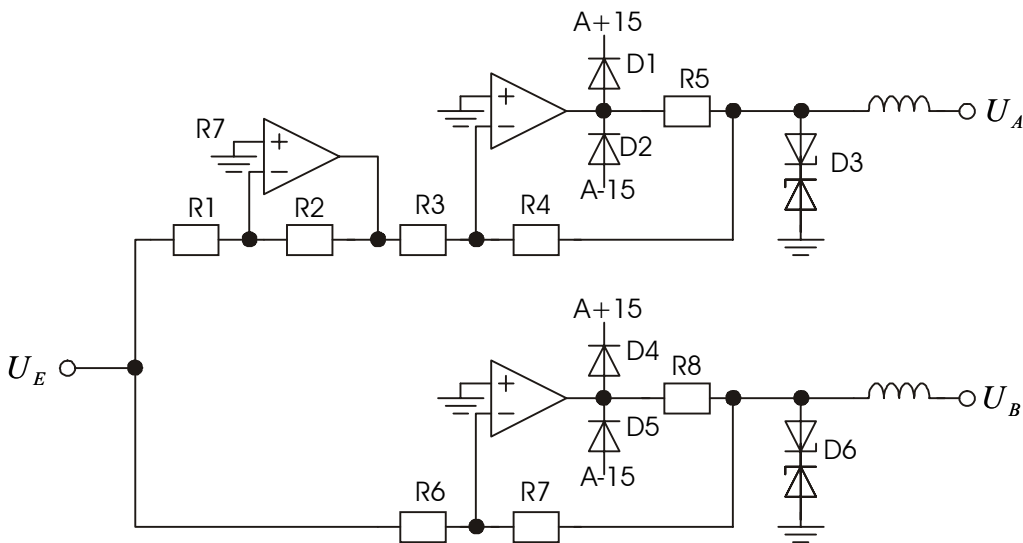


Abbildung 5.27: Schaltplan des verwendeten Leitungstreibers

Um den geforderten Ausgangssignalpegel zu erreichen muss der Belastungswiderstand zwischen Ausgang und AGND größer 300Ω sein. Bei Abschluss zwischen den beiden Ausgängen muß der Widerstand größer $>600\Omega$ sein. Der tatsächliche Belastungswiderstand sollte aber größer (ca. $1k\Omega$) sein. Bei zu hoher Belastung steht kein Strom für den Ausgleich von Störungen zur Verfügung und die Slewrate sinkt. Die Ausgangsschaltung ist gegen elektrostatische Entladungen mit einer bidirektionalen Transzorbdiode abgesichert (D3, D6). Die Transzorb Diode ist eine Z-Diode für hohe Pulsbelastungen.

6.11 MACH5 interne Register und Steuerfunktionen

Das MACH5-256 ist ein Mitglied der MACH-5 Familie von „complex programmable logical device“ (CPLD) Bauteilen. Diese zeichnen sich durch ihre hohe Geschwindigkeit (7,5 ns Pin to Pin), hohe Gatterdichte und vorhersagbare Gatterlaufzeiten aus. Die Programmierung des Bauteiles erfolgt über einen Jag-Bus. Es kann daher auch ‘Onboard’ im bestückten Zustand eine neue Programmversion in den Bauteil programmiert werden. Dadurch lassen sich die Entwicklungsprozesse, die oft mehrere Programmversionen benötigen, sehr einfach gestalten. Zur Programmerstellung wurde die Software von AMD - MACH XL 5.3 verwendet.

Der Aufbau des Bauteiles sieht folgendermaßen aus:

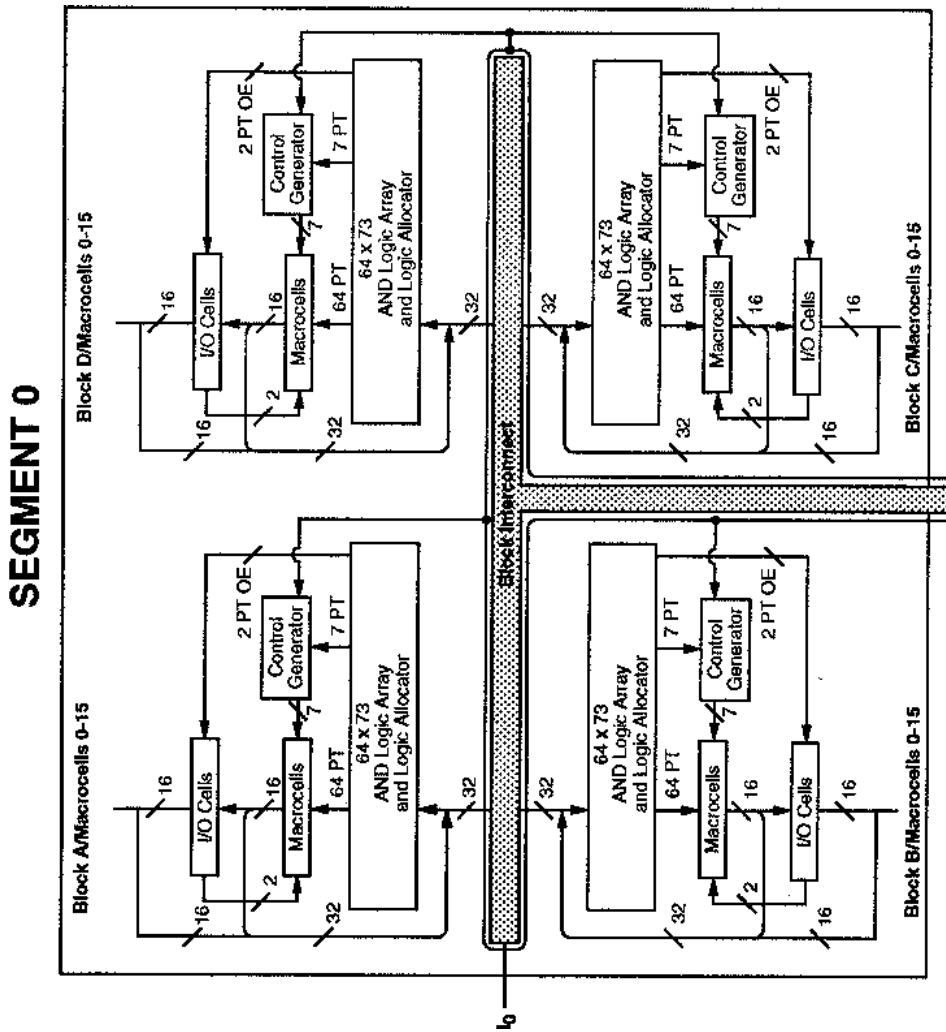


Abbildung 6.28: Blockschaltbild M256

Ein MACH5-256-Baustein besitzt 4 solcher Segmente, die über einen „Segment Interconnect“ verbunden sind, und sich wiederum in 4 Blöcke gliedern. Diese sind über einen ‘Block Interconnect’ miteinander verbunden.

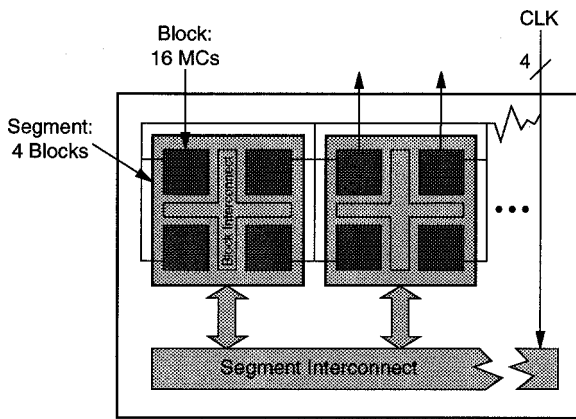
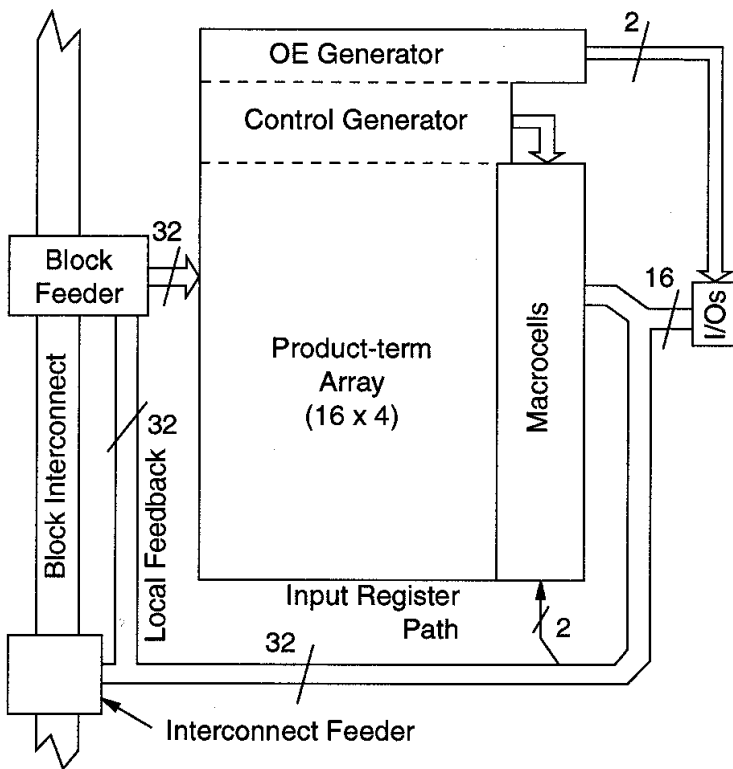


Abbildung 6.29 Segment Interconnect

Jeder dieser 4 Blöcke gliedert sich wiederum in 4 PAL-Blöcke, die in etwa herkömmlichen PAL-Bausteinen entsprechen. Sie unterscheiden sich nur durch die Funktion der Makrozellen.



20706A.2

Abbildung 6.30 Blockstruktur MACH5-256

Die größte Einschränkung bei diesen Bausteinen besteht meist in der beschränkten Anzahl von Leitungen zwischen den einzelnen Blöcken bzw. Segmenten. Zur Programmierung siehe Abschnitt 6.

Die beiden MACH-Bausteine werden über den Jag-Bus programmiert. Wird nur ein Mach bestückt, dann ist zum Schließen der Programmierschleife anstelle des Machs ein niederohmiger Widerstand W95 bzw. W96 zu bestücken. Um Fehlbestückungen zu vermeiden sind die beiden Widerstände unter dem Mach angeordnet, den sie ersetzen. Wenn der Wedelteil ohne Fokusszillation betrieben werden soll, dann ist die Synchronisation über die IRQ-Leitungen nicht möglich und es muss das Machprogramm von Mod1 mit pi-File von Mod2 verwendet werden. Der Treiberbaustein U1 sorgt für sicheren Datenempfang von der parallelen Schnittstelle des Programmier-PC. Der Treiberbaustein U6 treibt das Signal das zur parallelen Schnittstelle geht. Durch U1 und U6 werden die beiden Machs vor Zerstörung über den Jag-Bus geschützt. Siehe Abschnitt 10 - Schaltung - Seite 5/19.

7 Machprogramme

Das Machprogramm für den Fokuscontroller UF17 und den Wedelcontroller UW46 wurde mit MACH XL 5.3 von AMD erstellt. Dabei traten weder Engpässe bei der Anzahl der verfügbaren IO-Pins noch bei der Anzahl der möglichen internen Verbindungen auf. Es war jedoch nicht ganz einfach die Timinganforderungen zu erfüllen. Die Adressdecodierung arbeitet deshalb asynchron und das Ergebnis ist nur im dritten Viertel des Maschinenbuszyklusses gültig. Selbst kleine Unterschreitungen der Setup bzw. Holdzeiten verursachten sporadische Fehler, die mit der Erwärmung häufiger wurden.

7.1.1 Source-Code Fokuscontroller

```
#TITLE 'Fokusmodulation';
#Engineer 'Schlögl Franz';
#PROJECT 'PB-CON';

INPUT clk66,clk16, /Reset;
INPUT Kartenadresse[5..1];           "Adresse, die mit Dipswitch eingestellt ist
INPUT /LmbAdr[11..0];               "entspricht Adresse 11..8
INPUT /LmbDat[15..0];
INPUT /Write, /Wait;
INPUT /IRQ[0..7];
*****

OUTPUT WSync                        "Synchronisation der Strahlwedelung mit IRQ bei Sync-
    CLOCKED_BY clk66                "Modus
    RESET_BY Reset;

OUTPUT /FweRam
    CLOCKED_BY clk66
    RESET_BY Reset;

OUTPUT Modus[0..1]                  "Bits in dem der ausgewählte Modus gespeichert ist
    CLOCKED_BY clk66                "BIT 0: Lesen/schreiben= /OE RAM
    RESET_BY Reset;                "Bit 1: Synchron/ Dauer

OUTPUT /FoeRAM                      "Output enable des RAM
    CLOCKED_BY clk66
    RESET_BY Reset;
    FoeRAM = /MODUS[0];

OUTPUT FClkDacAI                    "DAC Amplitude der Modulation
    CLOCKED_BY clk66
    PRESET_BY Reset;

OUTPUT FClkDacMI                    "DAC Modulations-Figur
    CLOCKED_BY clk66
    PRESET_BY Reset;

OUTPUT FRamAdr[9..0]               "RAM-Adresse 0..9
    CLOCKED_BY clk66
    RESET_BY Reset
    DEFAULT_TO LAST_VALUE;

OUTPUT FFigNr[4..0]                 "ausgewählte Figur; entspricht RAM-Adresse[14..10]
    CLOCKED_BY clk66
    RESET_BY Reset;

OUTPUT FIsoIn[15..0]               "Daten, die an ISO150 ausgegeben werden
    CLOCKED_BY clk66
    RESET_BY Reset
    DEFAULT_TO LAST_VALUE;

BIPUT FRamDaten[15..0]             "Daten-Bus des RAM
    ENABLED_BY Modus[0];
```

```

*****
===== Anfang der D-FF (Outputs sind Testpins)=====

OUTPUT clk16delayed
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

*****Anfang der BITS, mit denen die State-Machine Daten weitergibt****

OUTPUT DacAschreiben
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

OUTPUT Ramschreiben
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

OUTPUT Ramlesen
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

D_FLOP FreqZ[15..0]
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;
                                     "FreqZ = Zählervariable mit der clk66 durch Teiler
                                     "geteilt wird

OUTPUT Reload
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;
                                     "Frequenz-Zähler wird mit Teiler geladen
                                     "wird auch zur synchronisation der RAM leseadresse
                                     "verwendet

D_FLOP AdrZ[9..0]
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;
                                     "Adress-Zähler zählt die RAM Adress-Bits 9..0

D_FLOP IncRamRadr
  CLOCKED_BY clk66
  DEFAULT_TO 0;

D_FLOP IncAdrZ
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;
                                     "Adresszähler um 1 erhöhen

OUTPUT PinIncAdrZ
  CLOCKED_BY clk66;
                                     "Testpin, getrennt von D-FF

  PinIncAdrZ = IncAdrZ;

OUTPUT Clear
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;
                                     "Setzt: Adress-Zähler = 0
                                     "Ram lesen = 1
                                     "FreqZ = Teiler

D_FLOP Teiler[15..0]
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;
                                     "Frequenz = 66MHz/(Teiler+1)

D_FLOP RamWdat[15..0]
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;
                                     "Daten die in RAM geschrieben werden

D_FLOP LmbDatInt[15..0]
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;
                                     "Lokale-Maschinen-Bus-Daten-Intern (in Mach
                                     "zwischen gespeichert)
                                     "Zwischenspeicher der lokalen Maschinenbusdaten

OUTPUT ZielIsoIn[1..0]
  CLOCKED_BY clk66
  PRESET_BY Reset;
                                     "ziel der Daten die beim ISO angelegt werden

OUTPUT ZielIso[1..0]
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;
                                     "Ziel der Daten die vom ISO übertragen werden
                                     "verzögertes ZielIsoIn

```



```

D_FLOP Sync[0..9]                "0..2  IRQ-Leitung Auswahl, 3..9 Delay
  CLOCKED_BY clk66                "2..9  Delay (um n*250ns)
  RESET_BY Reset;

D_FLOP IRQS                       "Selektierte IRQ Leitung
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

D_FLOP IRQD                       "Verzögerte IRQDelayed
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

D_FLOP Trigger                   "Flanke von IRQ detektiert
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

D_FLOP FTrigger                  "Verzögerte Trigger um Sync[7..3] 16/66MHz
  CLOCKED_BY clk66                "Figur-Trigger Beginn einer neuen Figurausgabe
  RESET_BY Reset;

D_FLOP FTeiler16[0..3]          "Frequenz-Vorteiler für Verzögerte Figurausgabe
  CLOCKED_BY clk66                "mit Trigger synchronisiert
  RESET_BY Reset;

D_FLOP clk1                      "CLK66 /16, für 1Periode high
  CLOCKED_BY clk66                "mit Trigger über FTeiler synchronisiert
  RESET_BY Reset;

D_FLOP DZaehler[6..0]           "Verzögerung der Figurausgabe bei Sync.-Betrieb
  CLOCKED_BY clk66                "zählt clk1 (immer nur bei Delay gültig,
  RESET_BY Reset;                "mit Trigger synchronisiert)

D_FLOP Delay                     "Verzögerung des Figurstartes läuft
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

"D_FLOP FigE                     "Figurausgabe ist am Ende einer Figur angelangt
"  CLOCKED_BY clk66               "Letzte Figurpunkt wird noch ausgegeben
"  RESET_BY Reset;
"*****

" ****Anfang der Adressdecoder- Nodes*****

NODE Karteal;                    "Karte1 adressiert = 1 wenn Bit 11..5 = Kartenadresse

OUTPUT Kartea                    "Karte adressiert =1 wenn Bit 11..5 = Kartenadresse und
  CLOCKED_BY clk66                "Adresse ausgewertet * Write */Wait
  RESET_BY Reset;

OUTPUT FignWr                    "Figurnummer adressiert
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

OUTPUT ModuWr                    "Modus-Register adressiert
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

OUTPUT TeilWr                    "Teiler adressiert
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

OUTPUT DacAWr                    "DAC Amplitude (der Modulation) adressiert
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

OUTPUT RamWr                     "Ram schreiben
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

OUTPUT SyncWr                   "Sync = IRQ Auswahl und Delay
  CLOCKED_BY clk66
  Reset_BY Reset;

"  Knoten, mit denen die State-Machine mitteilt, das Daten abegearbeitet werden

VIRTUAL NODE DacAreset

  DEFAULT_TO 0;
VIRTUAL NODE RamWreset
  DEFAULT_TO 0;

```

```

VIRTUAL NODE RamRreset
  DEFAULT_TO 0;

VIRTUAL NODE IncRamWadr
  DEFAULT_TO 0;

OUTPUT MaxF                                     "wird nur zu Kontrollzwecken ausgegeben
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

***** E N D E der Definitionen *****

*****          Synchroner Betrieb          *****
*****          Synchronisation auf IRQ      *****

IRQS = (IRQ[0]*(Sync[0..2]=0)) +                "Auswahl der IRQ-Leitung
      (IRQ[1]*(Sync[0..2]=1)) +
      (IRQ[2]*(Sync[0..2]=2)) +
      (IRQ[3]*(Sync[0..2]=3)) +
      (IRQ[4]*(Sync[0..2]=4)) +
      (IRQ[5]*(Sync[0..2]=5)) +
      (IRQ[6]*(Sync[0..2]=6)) +
      (IRQ[7]*(Sync[0..2]=7));

IRQD = IRQS;                                    "Flankenerkennung
Trigger = /IRQD*IRQS*Modus[1];

IF Trigger THEN                                "Synchronisierung mit Trigger
  FTeiler16 = 0FH;
ELSE FTeiler16 = FTeiler16-.1;
END IF;
clk1=(FTeiler16 = 0);                          "clk1 = clk66/16 ;1 Periode lang 1

IF Trigger THEN                                "Delay-Zaehler bei Trigger starten
  DZaehler = Sync[9..3];                       "läuft frei weiter
ELSIF clk1 THEN                                "wird während der Verzögerung erneut
  DZaehler = DZaehler-.1;                     "getriggert, dann wird die Verzögerung
ELSE                                           "neu gestartet
  DZaehler = DZaehler;
END IF;

IF Trigger THEN                                "so lange Delay = 1 DZaehler relevant
  Delay = 1;
ELSIF FTrigger THEN
  Delay = 0;
ELSE
  Delay = Delay;
END IF;
FTrigger = (Delay*(DZaehler = 0));

WSync = FTrigger;                             "Synchronisation des Wedel-Controllers

*****          Adress-Decoder          *****
*****          *****          *****

clk16delayed = clk16;                          "zur Synchronisierung mit Maschinenbus
Karteal = (LmbAdr[11..7] = Kartenadresse) ;
Kartea = (clk16*clk16delayed * Write * /Wait*Karteal);
                                                "Die Adressauswertung ist im 3.Viertel des
                                                "Maschinenbuszyklus gültig

***** Zuordnung der Adressen zu den Registern, Bit 6, 5, 4 = Dont care ****
*****

FigNwr = (LmbAdr[3..0] = 1000B);               "Figurnummer
Moduwr = (LmbAdr[3..0] = 1001B);               "Modusauswahl
Teilwr = (LmbAdr[3..0] = 1010B);               "Teiler schreiben
Ramwr = (LmbAdr[3..0] = 1011B);               "Figur in RAM schreiben
DacAwr = (LmbAdr[3..0] = 1100B);               "DAC-A schreiben Amplitude der Modulation
Syncwr = (LmbAdr[3..0] = 1101B);               "Sync-Register schreiben
*****

*****          Register Schreiben          *****

```

```

IF (fignwr * Kartea) THEN
  FFigNr[4..0] = LmbDat[4..0];
ELSE
  FFigNr = FFigNr;
END IF;

IF (moduwr * Kartea) THEN
  Modus[1..0] = LmbDat[1..0];
ELSE
  Modus = Modus;
END IF;

IF (Teilwr * Kartea) Then
  Teiler[15..0] = LmbDat[15..0];
ELSE
  Teiler =Teiler;
END IF;

IF (SyncWr * Kartea) Then
  Sync[9..0] = LmbDat[9..0];
ELSE
  Sync = Sync;
END IF;

***** Zwischenspeicherung der MB-Daten *****
*****
IF /clk16 * /clk16delayed THEN
  LmbDatInt = LmbDat;           "Die Daten werden im letzten
Else LmbDatInt = LmbDatInt;    "Viertel des Maschinen-Bus-Zyklus,
END IF;                        "zwischengespeichert

FRamDaten[15..0] = RamWdat[15..0]; "Daten-Bus-Ausgang des Mach sind immer die
                                "Schreibdaten die Daten werden nur bei
                                "Modus[0] =1 vom Mach ausgegeben

***** Verzögerung der DAC-Clocksignale *****
IF Reset THEN
  ZielIso = 11B;
  ELSE ZielIso = ZielIsoIn;    "der CLK-Impuls wird 2Perioden nach
END IF;                        "dem Ausgeben der Daten ausgegeben

FClkDacAI = zieliso[1];
FClkDacMI = zieliso[0];

*****Adress-Zähler*****
PHYSICAL NODE AdrZH;           "Modus[1]: 0=Dauer 1=getriggert
AdrZH = (AdrZ[2..9] = 0FFH);
IncAdrZ = IncRamWadr +
          IncRamRadr * /Modus[1] +
          IncRamRadr * Modus[1] * /(((AdrZ[1] = 1) * AdrZH) *
          (IncAdrZ +AdrZ[0]));

Clear = (FigNWr * Kartea)+FTrigger; "Zur Synchronisierung der Figur

IF Clear THEN
  AdrZ = 0;
ELSE
  IF IncAdrZ THEN
    AdrZ = AdrZ .+. 1;
  ELSE
    AdrZ = AdrZ;
  END IF;
END IF;

***** Frequenz-Teiler*****
PHYSICAL NODE FreqZL;
FreqZL = (FreqZ[15..2] = 0);
Reload = ((FreqZ[1] = 0) * FreqZL * (FreqZ[0] = 1) + Clear);

"Reload = ((FreqZ[15..1] = 0) + Clear);

IF Reload THEN

```

```

    FreqZ = Teiler;
  ELSE FreqZ = FreqZ .-. 1;
END IF;

MaxF = (Teiler = 0);
IncRamRadr = (Reload + MaxF) * /Modus[0];
"***** Handschake mit Statemachine *****"
"*****"
IF (DacAwr * Kartea) THEN
  DacAschreiben = 1;
ELSIF DacAreset THEN
  DacAschreiben = 0;
ELSE DacAschreiben = DacAschreiben;
END IF;

IF (RamWr * Kartea * Modus[0]) THEN
  Ramschreiben = 1;
ELSIF RamWreset THEN
  Ramschreiben = 0;
ELSE Ramschreiben = Ramschreiben;
END IF;

IF (IncAdrZ * /Modus[0] + Clear) THEN
  Ramlesen = 1;
ELSIF RamRreset THEN
  Ramlesen = 0;
ELSE Ramlesen = Ramlesen;
END IF;

"*****State-Machine *****"

STATE_MACHINE Steuerung
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

STATE idle:
  FweRam = 0;
  ZielIsoIn = 0;
  FRamAdr[9..0] = AdrZ[9..0];

  IF Ramschreiben THEN
    GOTO Ramschreiben1;

  ELSIF DacAschreiben THEN
    GOTO DacAschreiben1;

  ELSIF Ramlesen THEN
    GOTO Ramlesen1;

  ELSE GOTO idle;

END IF;

"-----"

STATE Ramschreiben1:
  FweRam = 1;
  ZielIsoIn = 0;
  RamWreset = 1;
GOTO Ramschreiben2;

"STATE Ramschreiben2:
  FweRam = 0;
  ZielIsoIn = 0;
  IncRamWadr = 1;
GOTO idle;

"-----"

STATE DacAschreiben1:
  FweRam = 0;
  ZielIsoIn = 0;
  DacAreset = 1;
GOTO DacAschreiben2;

STATE DacAschreiben2:
  FweRam = 0;

```

```

    ZielIsoIn = 010B;
    FisoIn = LmbDatInt;
GOTO idle;

"-----
STATE Ramlesen1:
    FweRam = 0;
    RamRreset = 1;
    ZielIsoIn = 0B;
GOTO Ramlesen2;

STATE Ramlesen2:
    FweRam = 0;
    ZielIsoIn = 001B;
    FisoIn = FRamDaten;
GOTO idle;

ELSE
    GOTO idle;

END Steuerung;

"=====Testpins=====
OUTPUT Testpin1;
Testpin1 = FreqZ[0];

OUTPUT Testpin2;
Testpin2 = FreqZ[1];          "

OUTPUT Testpin3;
Testpin3 = AdrZ[0];

OUTPUT Testpin4;
Testpin4 = AdrZ[1];
"=====

```

7.1.2 Source-Code Wedelcontroller

```

#TITLE 'Wedelung';          "Version 2
#Engineer 'Schlögl';

INPUT clk66, clk16, /Reset;
INPUT Kartenadresse[5..1];          "Adresse, die mit Dipswitch eingestellt wird
INPUT /LmbAdr[11..0];
INPUT /LmbDat[31..0];
INPUT /Write, /Wait;
INPUT SModus;
INPUT Sync;
"****

BIPUT WRamDaten[31..0]          "Daten-Bus des RAM
    ENABLED_BY Modus;

OUTPUT /WweRam
    CLOCKED_BY clk66
    RESET_BY Reset;

OUTPUT /WoeRam;
" CLOCKED_BY clk66
" RESET_BY Reset;

OUTPUT WClkDacEI          "DAC Einstellung der Strahlposition
    CLOCKED_BY clk66
    PRESET_BY Reset;

OUTPUT WClkDacAI          "DAC Amplitude der Modulation
    CLOCKED_BY clk66
    PRESET_BY Reset;

OUTPUT WClkDacWI          "DAC Wedel-Figur
    CLOCKED_BY clk66
    PRESET_BY Reset;

```

```

OUTPUT WclkDacRI                                "DAC Richtung
  CLOCKED_BY clk66
  PRESET_BY Reset;

OUTPUT WRamAdr[9..0]
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT WFigNr[4..0]                             "ausgewählte Figur; entspricht RAM-
Adresse[14..10]
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT WIsoIn[31..0]                            "Daten, die an ISO150 ausgegeben werden
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset
  DEFAULT_TO LAST_VALUE;

*****

D_FLOP clk16delayed
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

OUTPUT DacEschreiben                            "Anfang der BITS, mit denen die State-Machine Daten
  CLOCKED_BY clk66;                                "weitergibt

OUTPUT DacAschreiben
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT DacRschreiben
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT Ramschreiben
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT Ramlesen
  CLOCKED_BY clk66;

                                                "Ende

D_FLOP FreqZ[14..0]
  CLOCKED_BY clk66;                                "FreqZ = Zählervariable mit der clk66 durch Teiler
                                                "geteilt wird

D_FLOP FigE
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT Reload
  CLOCKED_BY clk66;                                "Frequenz-Zähler wird mit Teiler geladen

D_FLOP AdrZ[9..0]
  CLOCKED_BY clk66;                                "Adress-Zähler zählt die Adress-Bits 9..0

OUTPUT IncAdrZ
  CLOCKED_BY clk66;

D_FLOP Clear
  CLOCKED_BY clk66;                                "Setzt: Adres-Zähler = 0, Ram lesen = 1, FreqZ = Teiler

D_FLOP Modus
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;                                "Bit in dem der ausgewählte Modus 0 gespeichert ist
                                                "Ramschreiben /lesen

D_FLOP Teiler[14..0]
  CLOCKED_BY clk66;                                "Frequenz = 66MHz/Teiler

D_FLOP RamWdat[31..0]
  CLOCKED_BY clk66;                                "Daten die in RAM geschrieben werden

D_FLOP LmbDatInt[31..0]
  CLOCKED_BY clk66;                                "Lokale-Maschinen-Bus-Daten-Intern
                                                "Zwischenspeicher der lokalen Maschinenbusdaten

OUTPUT ZielIsoIn[3..0]
  CLOCKED_BY clk66                                "Ziel der Daten die beim ISO angelegt werden

```

```

PRESET_BY Reset;

D_FLOP ZielIso[3..0]                "Ziel der Daten die vom ISO übertragen werden;
verzögertes ZielIsoIn
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

" ****Anfang der Adressdecoder- Nodes****

NODE Karteal;                       "Karte1 adressiert 1 wenn Bit 11..5 = Kartenadresse und
Bit 4,3 = 0
"   CLOCKED_BY clk66
"   RESET_BY Reset;

OUTPUT Kartea                       "= Karte adressiert 1 wenn Bit 11..5 = Kartenadresse und
Bit 4,3 = 0                          "und Adressauswertung gültig
  CLOCKED_BY clk66;

D_FLOP StateB[0..3]
  CLOCKED_BY clk66
  RESET_BY Reset;

OUTPUT FignWr                       "Figurnummer adressiert
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT ModuWr                       "Modus-Register adressiert
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT TeilWr                       "Teiler adressiert
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT DacEWr                       "DACE Einstellung adressiert
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT DacAWr                       "DACE Amplitude adressiert
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT DacRWr                       "DACR Richtung adressiert
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT RamWr                         "Ram schreiben
  CLOCKED_BY clk66;

OUTPUT MaxF                         "Halbe Frequenz
  CLOCKED_BY clk66;

D_FLOP FHalbe                       "Halbe Frequenz
  CLOCKED_BY clk66;

VIRTUAL NODE DacEreset               "Knoten, mit denen die State-Machine mitteilt, das Daten
abgearbeitet werden
  DEFAULT_TO 0;
VIRTUAL NODE DacAreset
  DEFAULT_TO 0;
VIRTUAL NODE RamWreset
  DEFAULT_TO 0;
VIRTUAL NODE RamRreset
  DEFAULT_TO 0;

VIRTUAL NODE IncRamWadr
  DEFAULT_TO 0;

D_FLOP IncRamRadr
  CLOCKED_BY clk66
  DEFAULT_TO 0;

VIRTUAL NODE DacRreset
  DEFAULT_TO 0;

"***** E N D E der Definitionen *****

Karteal = (LmbAdr[11..7] = Kartenadresse) ;
Kartea = (clk16*clk16delayed * Write * /Wait*Karteal);
clk16delayed = clk16;

```

```

**** Zuordnung der Adressen zu den Registern, Bit 6, 5, 4 = 0

FigNwr = (LmbAdr[3..0] = 0000B);           "Figurnummer
Moduwr = (LmbAdr[3..0] = 0001B);           "Modusauswahl
Teilwr = (LmbAdr[3..0] = 0010B);           "Teiler schreiben
DacEwr = (LmbAdr[3..0] = 0011B);           "DAC-E schreiben Einstellung
DacAwr = (LmbAdr[3..0] = 0100B);           "DAC-A schreiben Amplitude der modulation
Ramwr = (LmbAdr[3..0] = 0101B);           "Figur in RAM schreiben
DacRwr = (LmbAdr[3..0] = 0110B);           "DAC-R schreiben Strahlrichtung

IF (fignwr * Kartea) THEN
  WFigNr[4..0] = LmbDat[4..0];
ELSE
  WFigNr = WFigNr;
END IF;

IF (moduwr * Kartea) THEN
  Modus = LmbDat[0];
ELSE
  Modus = Modus;
END IF;

IF (Teilwr * Kartea) Then
  Teiler[14..0] = LmbDat[14..0];
ELSE
  Teiler =Teiler;
END IF;

IF (DacEwr * Kartea) THEN
  DacEschreiben = 1;
ELSIF DacEreset THEN
  DacEschreiben = 0;
ELSE DacEschreiben = DacEschreiben;
END IF;

IF (DacAwr * Kartea) THEN
  DacAschreiben = 1;
ELSIF DacAreset THEN
  DacAschreiben = 0;
ELSE DacAschreiben = DacAschreiben;
END IF;

IF (DacRwr * Kartea) THEN
  DacRschreiben = 1;
ELSIF DacRreset THEN
  DacRschreiben = 0;
ELSE DacRschreiben = DacRschreiben;
END IF;

IF (RamWr * Kartea) THEN
  Ramschreiben = 1;
ELSIF RamWreset THEN
  Ramschreiben = 0;
ELSE Ramschreiben = Ramschreiben;
END IF;

IF (IncAdrZ * /Modus + Clear) THEN
  Ramlesen = 1;
ELSIF RamRreset THEN
  Ramlesen = 0;
ELSE Ramlesen = Ramlesen;
END IF;

Clear = ((FigNwr * Kartea) + Sync);

IF /clk16 * /clk16delayed THEN
  LmbDatInt = LmbDat;           "Die Daten werden in im letzten viertel des Maschinen-
Else LmbDatInt = LmbDatInt;     " Bus-Zyklus, zwischengespeichert
END IF;
WRamDaten[31..0] = RamWdat[31..0]; "Daten-Bus-Ausgang des Mach sind immer die Schreibdaten
                                   "die Daten werden nur bei OE vom Mach ausgegeben

*****Verzögerung der DAC-Clocksignale*****
IF Reset THEN                   " nach Reset erhalten alle DAC einen CLK-Impuls
  ZielIso = 1111B;              "damit der ISO150 initialisiert ist

```



```

    Else ZielIso = ZielIsoIn;
END IF;
WClkDacWI = zieliso[0];
WClkDacAI = zieliso[1];
WClkDacEI = zieliso[2];
WClkDacRI = Zieliso[3];

```

*****Adress-Zähler*****

```

PHYSICAL NODE AdrZH;
AdrZH = (AdrZ[2..9] = 0FFH);
IncAdrZ = IncRamWadr +
    IncRamRadr * /SModus +
    IncRamRadr * SModus * (((AdrZ[1] = 1) * AdrZH) * (IncAdrZ +AdrZ[0]));

```

```

IF Clear THEN
    AdrZ = 0;
ELSIF IncAdrZ THEN
    AdrZ = AdrZ .+. 1;
ELSE AdrZ = AdrZ;
END IF;

```

***** Frequenz-Teiler*****

```

PHYSICAL NODE FreqZL;
FreqZL = (FreqZ[14..2] = 0);
Reload = ((FreqZ[1] = 0) * FreqZL * (FreqZ[0] = 1) + Clear);
IF Reload THEN
    FreqZ = Teiler;
ELSE FreqZ = FreqZ .-. 1;
END IF;

```

```

MaxF = (Teiler = 0);
FHalbe = (Teiler = 1);
"IF FHalbe THEN
"    IncRamRadr = /IncRamRadr;
" ELSE
IncRamRadr = (Reload + MaxF) * /Modus;
"END IF;

```

WoeRam = /modus;

*****State-Machine *****

```

STATE_MACHINE Steuerung
    STATE_BITS StateB;
STATE idle [0011b]:
    WweRam = 0;
    ZielIsoIn = 0;
    WRamAdr[9..0] = AdrZ[9..0b];
    RamWdat = .X.;

    IF Ramschreiben * modus THEN
        GOTO Ramschreiben1;

    ELSIF DacEschreiben THEN
        GOTO DacEschreiben1;

    ELSIF DacRschreiben THEN
        GOTO DacRschreiben1;

    ELSIF DacAschreiben THEN
        GOTO DacAschreiben1;

    ELSIF Ramlesen THEN
        GOTO Ramlesen1;

    ELSE GOTO idle;

END IF;

```

```
"-----
STATE Ramschreiben1 [0111b]:
  WweRam = 1;
  ZielIsoIn = 0;
  RamWreset = 1;
  GOTO Ramschreiben2;

STATE Ramschreiben2 [1111b]:
  WweRam = 1;
  ZielIsoIn = 0;
  IncRamWadr = 1;
  RamWdat = RamWdat;
  GOTO idle;
"-----
STATE DacEschreiben1 [0100b]:
  WweRam = 0;
  ZielIsoIn = 0;
  RamWdat = .X.;
  DacEreset = 1;
  GOTO DacEschreiben2;

STATE DacEschreiben2 [0101b]:
  WweRam = 0;
  ZielIsoIn = 0100B;
  WisoIn = LmbDatInt;
  RamWdat = .X.;
  GOTO idle;
"-----
STATE DacAschreiben1 [0000b]:
  WweRam = 0;
  ZielIsoIn = 0;
  RamWdat = .X.;
  DacAreset = 1;
  GOTO DacAschreiben2;

STATE DacAschreiben2 [0001b]:
  WweRam = 0;
  ZielIsoIn = 0010B;
  WisoIn = LmbDatInt;
  RamWdat = .X.;
  GOTO idle;
"-----
STATE DacRschreiben1 [1100b]:
  WweRam = 0;
  ZielIsoIn = 0;
  RamWdat = .X.;
  DacRreset = 1;
  GOTO DacRschreiben2;

STATE DacRschreiben2 [1101b]:
  WweRam = 0;
  ZielIsoIn = 1000B;
  WisoIn = LmbDatInt;
  RamWdat = .X.;
  GOTO idle;
"-----
STATE Ramlesen1 [1000b]:
  WweRam = 0;
  ZielIsoIn = 0;
  RamWdat = .X.;
  RamRreset = 1;
  WRamAdr = WRamAdr;
  GOTO Ramlesen2;

STATE Ramlesen2 [1010b]:
  WweRam = 0;
  ZielIsoIn = 0001B;
  WisoIn = WRamDaten;
  RamWdat = .X.;
  WRamAdr = WRamAdr;
  GOTO idle;
```

```
ELSE  
  WweRam = .X.;  
  ZielIsoIn = .X.;  
  WIsoIn = .X.;  
  RamWdat = .X.;  
  WRamAdr = .X.;  
  GOTO idle;
```

```
END Steuerung;
```

8 Zukunftsaussichten

Obwohl bei der Entwicklung und Planung des Gesamtsystems bereits viele Anforderungen der Industrie verwirklicht wurden, konnten einerseits aus Kostengründen, andererseits aus Zeitgründen, nicht alle Wünsche erfüllt werden. Zusätzlich wurden neue Forderungen seitens der Industrie gestellt. Eine wesentliche Forderung ist der Wunsch den Einstellvorgang zu Vereinfachen. Durch eine digitale Realisierung der Multiplikationen und Additionen würde sich der Einstellaufwand auf das Einstellen von drei DAC-Ausgängen, mit je zwei Potentiometer, reduzieren.

8.1 Neue Anforderungen

Als zusätzliche Aufgabe für die Modulatorkarte wurde der Wunsch nach Aufspaltung der Wedelfigur gestellt. Dabei soll die Wedelfigur in bis zu drei Teilen Aufgespaltet werden. Die drei Figurteile sollen in einem programmierbaren Abstand zueinander entlang der Bearbeitungsbahn geführt werden. Jede Teilfigur soll ihre eigene Richtung, Position und Figurfrequenz haben.

8.2 Mögliche Realisierungen

8.2.1 Realisierung auf der Modulatorkarte mit größerem MACH

Die CPU schreibt in die Modulatorkarte die aktuellen Positionen der Teilfiguren. Die Modulatorkarte gibt eine Figur aus und schaltet am Figurende auf die nächste Teilfigur mit der entsprechenden Frequenz, Figuramplitude, Position und Richtung um. Beim Umschalten dauert es $4 \cdot (45,5 \text{ ns})$ bis auf die neue Teilfigur gewechselt wird. Diese Beschränkung stellt aber nur bei sehr hohen Figurfrequenzen ein Beschränkung dar. Bei dieser Realisierung braucht auf die bestehende Modulatorkarte nur ein größeres MACHs aufgelötet zu werden und ein neues MACH-Programme entwickelt werden.

9 Index

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1 Die wesentlichen Funktionsgruppen einer numerischen Steuerung	9
Abbildung 5.1 Blockschaltbild der einzelnen Funktionsblöcke	17
Abbildung 5.2 Beispiel für eine Wedelfigur	18
Abbildung 5.3 Drehung der Wedelfigur	20
Abbildung 6.1 Blockschaltbild der Modulatorkarte	21
Abbildung 6.2 Anforderung an das Timing des Maschinenbus	22
Abbildung 6.3 Blockschaltbild des Fokus-Controllers	23
Abbildung 6.4 Blockschaltbild des Wedel-Controllers	24
Abbildung 6.5: Timingdiagramm des Lesezugriffs auf das RAM	25
Abbildung 6.6 Timingdiagramme des Schreibzugriffs auf das RAM	25
Abbildung 6.7 Timingdiagramm der Datenübertragung von MACH zu DAC	26
Abbildung 6.8 Blockschaltbild des LT1027	27
Abbildung 6.9 Erzeugung des notwendigen Stromes mit OPV und Emitterfolger	28
Abbildung 6.10 Schaltplan der externen Stromverstärkung mit einem Transistor	29
Abbildung 6.11 Verwendete Referenzspannungsquellenbeschaltung	29
Abbildung 6.12 Die Referenzspannung bei rechteckförmiger Strombelastung	30
Abbildung 6.13 Blockschaltbild des DAC AD768 und sein Zeitverhalten	31
Abbildung 6.14 DAC-Ausgang mit OPV beschaltet	32
Abbildung 6.15 Ausgang der DAC-Schaltung nach Abbildung 6.14, wenn ein Rechtecksignal ausgegeben wird	33
Abbildung 6.16 DAC-Ausgang mit RC Kombination	33
Abbildung 6.17 Ausgangssignal mit RC Beschaltung	34
Abbildung 6.18 DAC-Ausgang mit Splittbandverstärker	34
Abbildung 6.19 DAC arbeitet auf Lastwiderstand	35
Abbildung 6.20 Verwendete DAC-Ausgangsbeschaltung	36
Abbildung 6.21 Ausgangssignal ohne Bandbegrenzenden Kondensator C1	36
Abbildung 6.22 Blockschaltbild des RCA4200 und die Zusammenhänge der einzelnen Ströme	37

<u>Abbildung 6.23 Realisierung einer Vierquadrantenmultiplikation mit einem Einquadrantenmultiplizierer</u>	39
<u>Abbildung 6.24 Multiplikationsfehler durch unterschiedliche Laufzeiten</u>	40
<u>Abbildung 6.25 Multiplikation eines Rechtecks mit Null mit Tiefpass im Kompensationszweig</u>	41
<u>Abbildung 6.26 Geschwindigkeitsvergleich der Multipliziererschaltungen mit und ohne Tiefpass</u>	41
<u>Abbildung 6.27 Multipliziererschaltung mit Tiefpässen und Einstellmöglichkeiten</u>	42
<u>Abbildung 6.28 Schaltplan des Ausgangstreibers wie auf Fupi-Verstärker</u>	49
<u>Abbildung 6.29 Schaltplan des Ausgangstreibers mit invertierender und nichtinvertierender OPV-Schaltung</u>	50

9.2 Literaturverzeichnis

[KAI90] Diplomarbeit: Programmierbarer Funktionsgenerator F. Kaiser 1990

[TIE90] **TIETZE**, U. und Ch. **SCHENK** (⁸1986): *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Achte, überarbeitete Auflage, Berlin u. a.: Springer

9.3 Datenhandbücher/Datenblätter

AMD, The MACH5-256, [Datenblatt], 1996

AMD, MACH XL User's Guide, 1994

AMP - Connectors. [Datenhandbuch], 6/91

Bus Interface Products 1991 Data Book, Advanced Micro Devices, 1990

Cypress Data Book, Memories DataCom, FCT Logic, PC Products, 1995

Texas Instruments TTL Advanced Low-Power Schottky, Advanced Schottky Data Book, Volumes 1, 1989

Texas Instruments TTL Advanced Low-Power Schottky, Advanced Schottky Data Book, Volumes 2, 1989

Texas Instruments Advanced BiCMOS ABT Bus Interface Logic, Data Book, 1994

10 Anhang

Schaltplan der Platine