

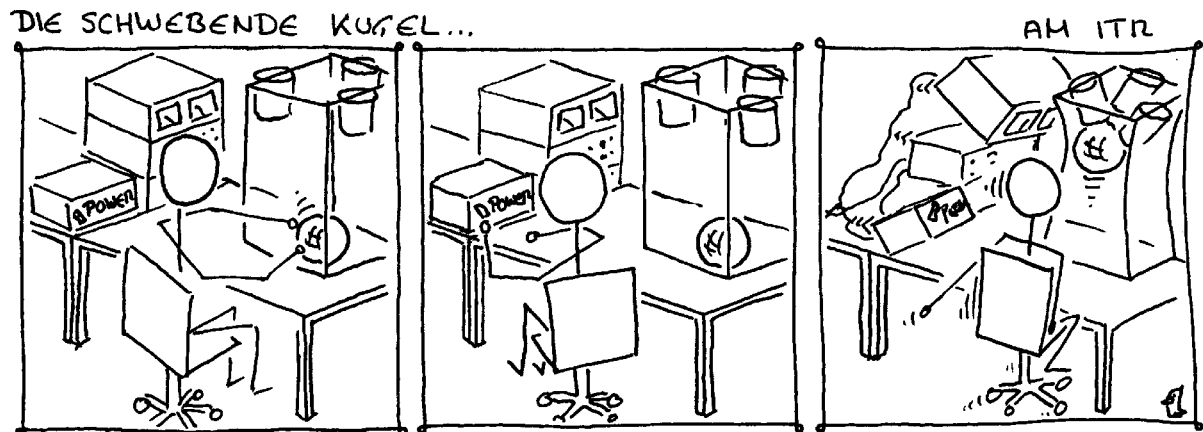
Dokumentation zu unserer Arbeit

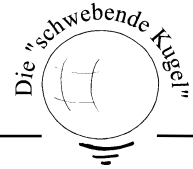
# Die "schwebende Kugel"

Eine Blechkugel soll mit Elektromagneten  
in der Schwebe gehalten werden.

Bruno Kamm und Peter Märki

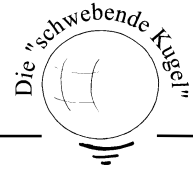
Diplomarbeit  
Interkantonales Technikum  
Rapperswil  
20. Dezember 1996





## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ÜBERBLICK ZUR ARBEIT "SCHWEBENDE KUGEL" .....</b>	<b>4</b>
1.1	EINLEITUNG .....	4
1.2	GRUPPE .....	6
1.3	AUFTEILUNG DER ARBEIT .....	6
1.4	KONVENTIONEN .....	7
<b>2</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG ZUR 1. SEMESTERARBEIT .....</b>	<b>8</b>
2.1	GRUNDLAGEN .....	8
2.2	SPULE .....	8
2.3	SPULENANSTEUERUNG .....	8
2.4	ENTWICKLUNG DER POSITIONSERFASSUNG .....	8
<b>3</b>	<b>ÜBERBLICK ZUR 1. SEMESTERARBEIT .....</b>	<b>9</b>
3.1	EINLEITUNG .....	9
3.2	ZEITPLAN .....	10
<b>4</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG ZUR 2. SEMESTERARBEIT .....</b>	<b>11</b>
4.1	SPULE .....	11
4.2	SPULENANSTEUERUNG .....	11
4.3	POSITIONSERFASSUNG .....	11
4.4	EVALUATION EINER REGLERUMGEBUNG .....	11
<b>5</b>	<b>ÜBERBLICK ZUR 2. SEMESTERARBEIT .....</b>	<b>12</b>
5.1	EINLEITUNG .....	12
5.2	ZEITPLAN .....	13
<b>6</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG ZUR DIPLOMARBEIT .....</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>ÜBERBLICK ZUR DIPLOMARBEIT .....</b>	<b>16</b>
7.1	EINLEITUNG .....	16
7.2	ZEITPLAN .....	17
<b>8</b>	<b>DIE SPULE .....</b>	<b>18</b>
8.1	EINLEITUNG .....	18
8.2	SPULENAUFBAU .....	19
8.3	BERECHNUNG DER SPULE .....	21
8.4	HERSTELLUNG DER ERSTEN SPULE .....	22
8.5	MESSUNGEN AN DER ERSTEN SPULE .....	23
8.6	HERSTELLUNG DER ZWEITEN UND DRITTEN SPULE .....	26
8.7	B-FELDMESSUNG UND US-SENDER .....	28
<b>9</b>	<b>SPULENANSTEUERUNG .....</b>	<b>31</b>
9.1	EINLEITUNG .....	32
9.2	MECHANIK .....	32
9.3	STARKSTROMAUFBAU .....	33
<b>10</b>	<b>MECHANISCHER AUFBAU .....</b>	<b>34</b>
10.1	GESTELL .....	34
10.2	SPULENAUFHÄNGUNG .....	34
<b>11</b>	<b>KUGEL .....</b>	<b>35</b>
11.1	ALLGEMEINES .....	35
11.2	DIE IKEA-LÖSUNG .....	36



11.3	DIE FUNDGRUBEN-LÖSUNG .....	36
11.4	DIE MOND-LÖSUNG .....	36
<b>12</b>	<b>ELEKTRONIK BOX.....</b>	<b>37</b>
<b>13</b>	<b>POSITIONSBESTIMMUNG.....</b>	<b>38</b>
13.1	MESSPRINZIP .....	38
13.2	PROBLEME MIT DER US-POSITIONSBESTIMMUNG .....	38
13.3	REALISIERUNG .....	41
13.4	STÖREINFLÜSSE .....	42
13.5	SENDEPULS .....	43
13.6	SENDEEINHEIT.....	45
13.7	US-TRANSDUCER.....	46
13.8	AKUSTISCHER AUFBAU.....	48
13.9	BANDPASSFILTER.....	49
13.10	GLEICHRICHTUNG .....	50
13.11	ZEIT→SPANNUNGSWANDLER .....	51
13.12	BERECHNUNG DER KUGELPOSITION.....	52
<b>14</b>	<b>REGELSTRECKE .....</b>	<b>55</b>
14.1	EINFÜHRUNG.....	55
14.2	B-FELDREGELUNG .....	55
14.3	ÜBERBLICK ZUR REGELSTRECKE .....	57
14.4	B-FELDBERECHNUNG.....	57
<b>15</b>	<b>REGELUNG.....</b>	<b>62</b>
15.1	LINEARISIERUNG AN EINEM ORT .....	62
15.2	KLASSISCHER REGLER .....	64
15.3	ZUSTANDSREGLER .....	64
<b>16</b>	<b>SCHLUSSWORT.....</b>	<b>66</b>
<b>17</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>67</b>

## 1 Überblick zur Arbeit "schwebende Kugel"

### 1.1 Einleitung

Im Rahmen unserer beiden Semesterarbeiten, sowie der Diplomarbeit wollen wir eine Blechkugel im Magnetfeld schweben lassen. Die Kugel soll 3-dimensional positioniert werden können. Nach Möglichkeit soll sie sich drehen.

Der Anstoss dazu kommt von Herrn G. Brügger. Er möchte für das Technorama in Winterthur ein Modell der Weltkugel haben, welche die Erdbahn beschreibt und wie die Erde rotiert.

Den Aufbau haben wir folgendermassen realisiert:

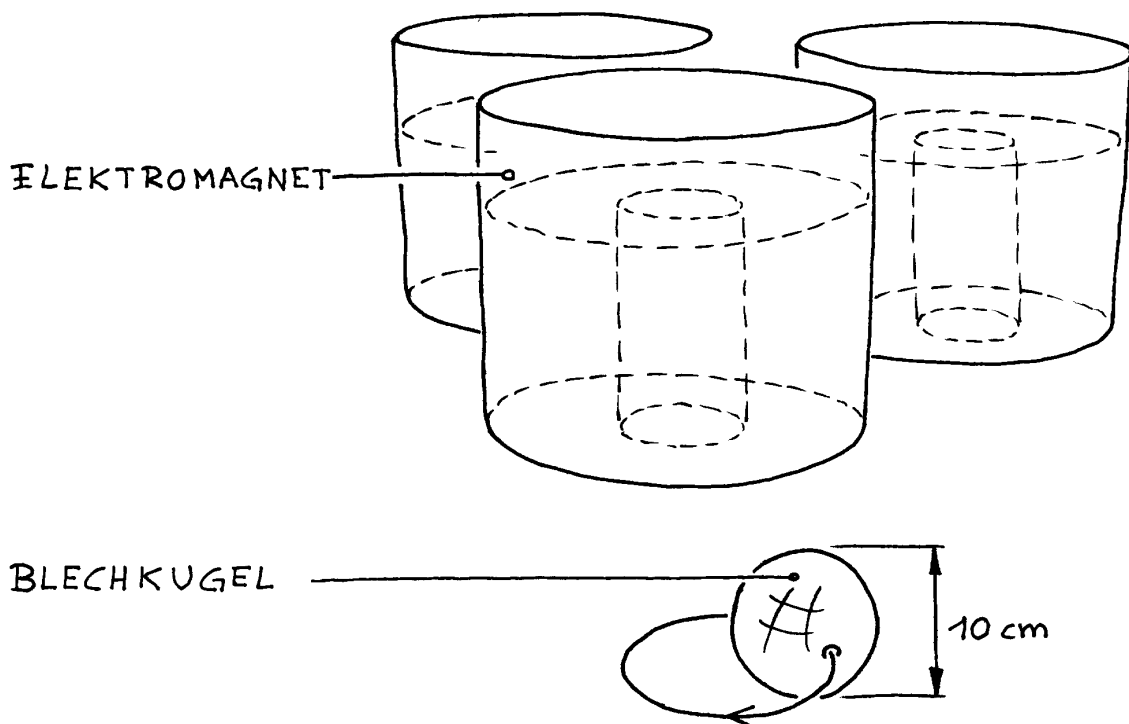


Bild 1.1: Anordnung und Aufbau unserer Magnete

Mit unseren Magneten können wir die Kugel im unten dargestellten Bereich halten.

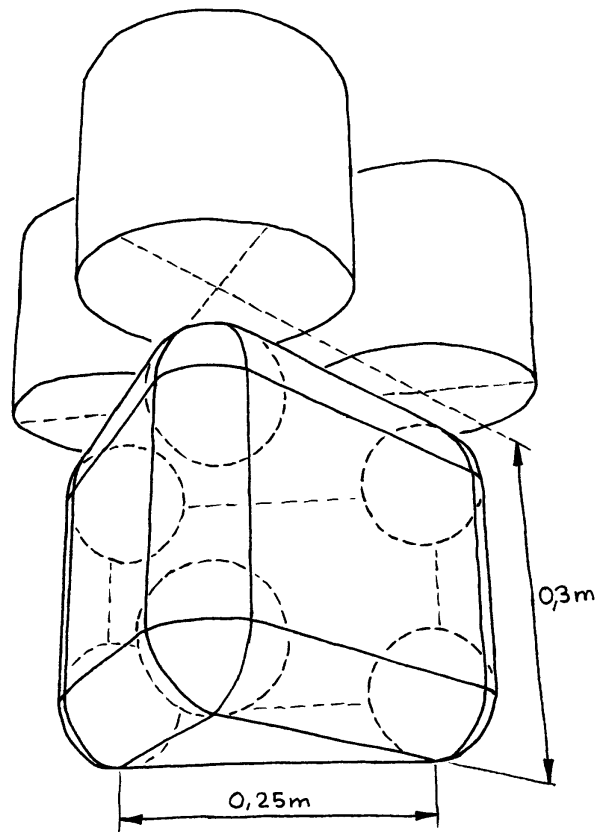
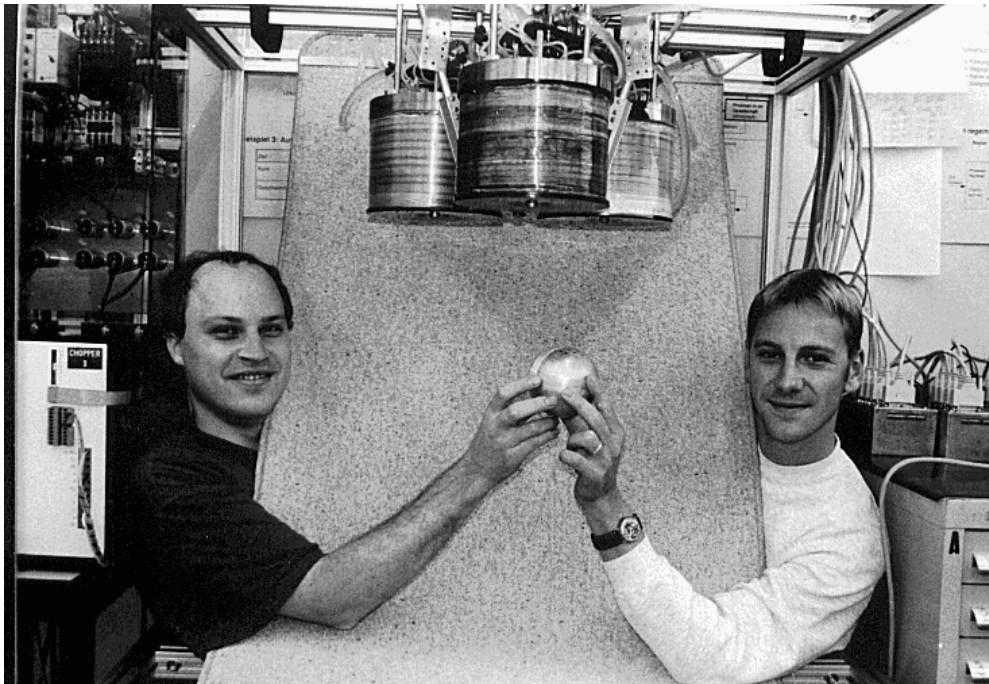


Bild 1.2: Möglicher Haltebereich

## 1.2 Gruppe

Die Arbeit wird von Bruno Kamm und Peter Märki aus der Klasse E93c ausgeführt.  
Betreut werden sie dabei durch den Lehrbeauftragten Georg Brügger.



Peter Märki

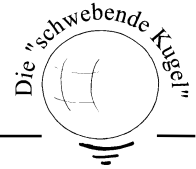
Bruno Kamm

## 1.3 Aufteilung der Arbeit

Die Arbeiten gliedern sich wie folgt:

Erste Semesterarbeit:                      Vertiefungsfach Elektronik

- Erarbeiten eines möglichen Konzeptes
- Berechnung der Magnetfelder
- Optimieren der Magnetgeometrie
- Planung und Fertigung der ersten Spule
- Planung und Fertigstellung des mechanischen Aufbaus
- Entwickeln der Positionserfassung
- Evaluation einer Spulenansteuerung
- Planung und Fertigung des Starkstromaufbaus



Zweite Semesterarbeit:      Vertiefungsfach Digitale Signalverarbeitung

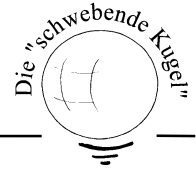
- Evaluation einer geeigneten Reglerumgebung
- Inbetriebnahme der Spulenansteuerung für eine Spule
- Fertigung einiger Teile für die Positionserfassung
- Austesten und Messen der einzelnen Systeme
- Fertigung und Optimierung der restlichen Spulen
- Vervollständigen des mechanischen Aufbaus und der Elektrik

Diplomarbeit:      Vertiefungsfach Digitale  
Signalverarbeitung

- Fertigstellen der Spulenansteuerung
- Positionsbestimmung
- Schnittstelle zu RealITR
- Ausmessen der Regelstrecke
- Reglerkonzept entwerfen

## **1.4 Konventionen**

Verweise auf den Anhang, das Literaturverzeichnis oder andere Kapitel sind in eckigen Klammern gehalten. Zur Verdeutlichung benützen wir Kursivschrift. Die magnetische Flussdichte bezeichnen wir mit "B-Feld". Mathematica, Matlab und Simulink Files sind im Anhang nur stückweise enthalten. Bei Interesse können die Files mit dem entsprechenden Programm vollständig angeschaut werden. Alle Dateien sind auf einer CD verfügbar.



## **2 Aufgabenstellung zur 1. Semesterarbeit**

Die erste Semesterarbeit bildet das Fundament für das Gesamtprojekt "schwebende Kugel". Die Aufgabe besteht darin, die Realisierbarkeit der Diplomarbeit zu untersuchen. Die Ergebnisse der ersten Semesterarbeit ermöglichen eine *reale* Aufgabenstellung für die zweite Semester- und die abschliessende Diplomarbeit.

### **2.1 Grundlagen**

Entwickeln eines Systems, mit welchem eine Blechkugel magnetisch in der Schwebelage gehalten werden kann.

### **2.2 Spule**

In der ersten Phase der Arbeit steht die Entwicklung und Herstellung einer Spule im Vordergrund.

Für die Realisierung des Gesamtprojekts ist ein mechanischer Aufbau zu fertigen.

### **2.3 Spulenansteuerung**

Die Ansteuerung der Spule (Starkstromteil) ist zu entwickeln und so weit wie möglich zu fertigen.

### **2.4 Entwicklung der Positionserfassung**

Im Laufe der ersten Semesterarbeit gilt es, ein Prinzip zur Positionserfassung zu entwickeln. Es muss ein Konzept für die Realisierung erarbeitet werden, welches die Basis für die Fertigung in der zweiten Semesterarbeit bildet.



### 3 Überblick zur 1. Semesterarbeit

#### 3.1 Einleitung

Am Anfang stand die Entwicklung des Systems, welche die Blechkugel magnetisch in der Schwebe hält.

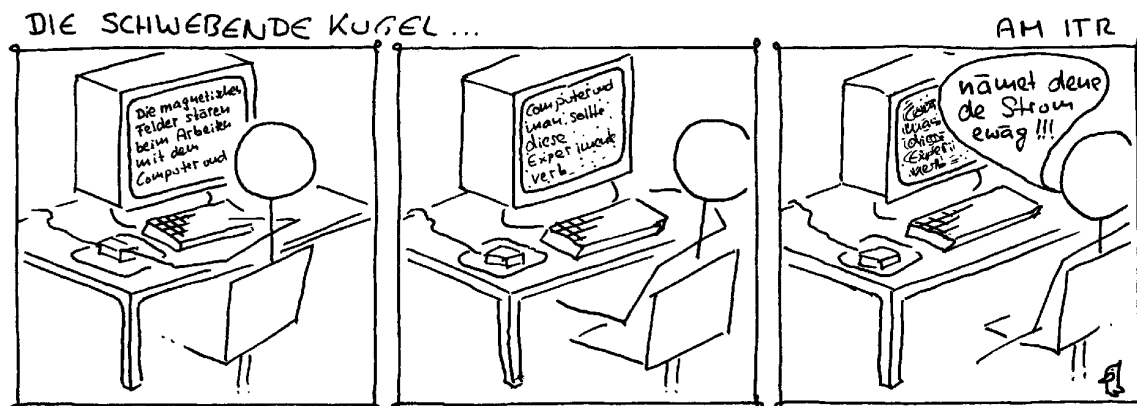
Verschiedenste Anordnungen dachten wir durch, wobei sich dann die im Kapitel 1 beschriebene Anordnung herauskristallisierte. Die Spule haben wir anhand von Feldberechnungen, sowie einer optimierten Spulengeometrie gefertigt.

Den mechanischen Aufbau gestalteten wir möglichst flexibel, damit immer wieder vorkommende Änderungen schnell und problemlos vollzogen werden können.

Des weiteren evaluierten wir einen Leistungsverstärker. Damit waren wir in der Lage die Spulenansteuerung zu entwickeln und zu fertigen.

Für die Positionsbestimmung haben wir ein Konzept aufgestellt und einige Schaltungsteile bereits gefertigt.

Schon lange Zeit vor Beginn der ersten Semesterarbeit hat Peter Märki Gespräche mit Herrn Brügger geführt. Viele Abklärungen, Anfragen und Berechnungen haben wir schon im voraus gemacht. Erst als wir von der Machbarkeit überzeugt waren, sagten wir Herrn Brügger zu.



Diese vorangegangenen Arbeiten sind im folgenden Zeitplan nicht enthalten. Sie umfassen rund 100 Arbeitsstunden.

### 3.2 Zeitplan

Mit einem Ist-Zeitplan wollen wir dem Leser zeigen, wie sich unsere erste Semesterarbeit abgespielt hat.

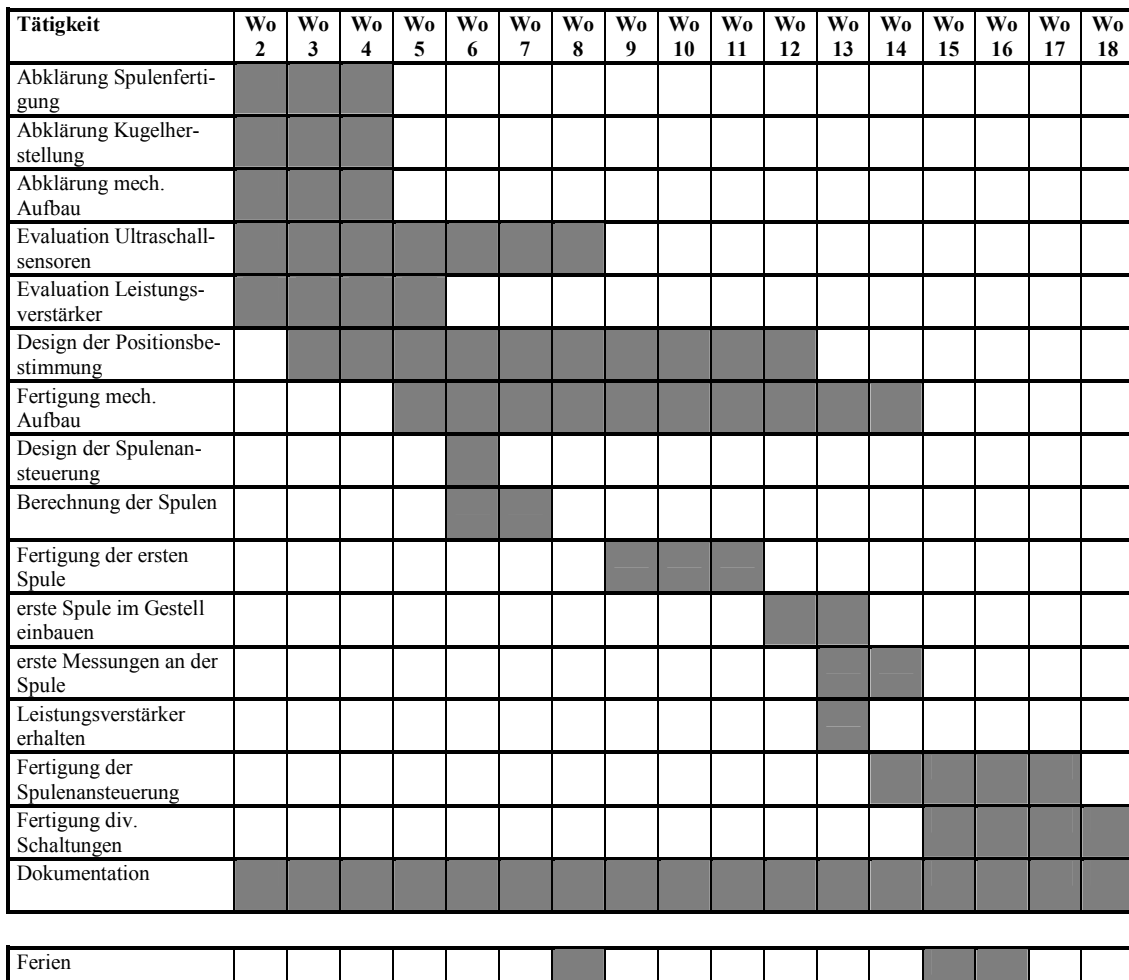


Diagramm 3.1: Zeitplan 1. Semesterarbeit

## **4 Aufgabenstellung zur 2. Semesterarbeit**

Die zweite Semesterarbeit baut auf dem Fundament der ersten Semesterarbeit auf. Im Vordergrund steht die Entwicklung und Fertigung der unten beschriebenen Teile. Da vieles noch nicht voraussagbar ist, kann auch für diesen zweiten Teil *keine* detaillierte Aufgabenstellung ausgearbeitet werden.

### **4.1 Spule**

Mit der ersten Spule ist eine Temperaturmessung und eine Kraftmessung durchzuführen. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen gilt es, das Spulendesign zu kontrollieren und nötigenfalls den Aufbau für die zweite und dritte Spule zu optimieren. Die zweite und dritte Spule sind zu fertigen und auszutesten.

### **4.2 Spulenansteuerung**

Die Ansteuerung für eine Spule ist in Betrieb zu nehmen und auszutesten. Es soll abgeklärt werden, ob es möglich ist, die Hysterese der Spule auszuregeln. Für die zweite und dritte Spule soll die Ansteuerung vorbereitet werden.

### **4.3 Positionserfassung**

Das während der ersten Semesterarbeit ausgearbeitete Konzept zur Positionserfassung soll so weit als möglich realisiert werden.

### **4.4 Evaluation einer Reglerumgebung**

Im Laufe dieser Semesterarbeit ist eine geeignete Reglerumgebung zu evaluieren.

## **5 Überblick zur 2. Semesterarbeit**

### **5.1 Einleitung**

Zu Beginn der zweiten Semesterarbeit nahmen wir eine Spulenansteuerung in Betrieb. Daraufhin waren wir in der Lage, weitere Versuche mit der ersten Spule durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Versuche flossen dann in die Optimierung der zweiten und dritten Spule ein. Die Fertigung der beiden Spulen beanspruchte viel Zeit, denn entgegen unseren Erwartungen hatten wir viele mechanische Teile selber zu fertigen.

Ein anderer Schwerpunkt lag bei der Entwicklung und Fertigung der Ultraschall-Empfangseinrichtung (US-Mikrophone). Für die Vorspannung der US-Mikrophone und US-Sender bauten wir ein Hochspannungsmodul.

Für die Regelung des B-Feldes entwickelten wir eine Messeinrichtung mit Hallsensor. Die für den Betrieb des Hallsensors notwendige Ansteuerung, sowie den Messignalverstärker realisierten wir wegen der starken Störfelder in unmittelbarer Nähe der Sensoren.

Die 4-Q-DC-Chopper (Leistungsverstärker) mussten wir modifizieren. Der Grund liegt in der zu grossen Phasendrehung der im Chopper eingebauten Filter, was zu Instabilität unserer Regelung führen kann.

Die ganze Elektronik haben wir in den sogenannten Elektronik Boxen untergebracht. Sie erlauben uns ein flexibles Arbeiten. Die Konstruktion haben wir so gewählt, dass die elektronischen Schaltungen sehr einfach zugänglich sind. Die Verbindung der Kisten untereinander und mit ihrer Umgebung haben wir mit Standardkabeln vorgenommen.

Bei der Evaluation einer geeigneten digitalen Reglerumgebung haben wir uns für das interaktive Echtzeitsystem RealITR unter Matlab/Simulink entschieden. Es bietet die Möglichkeit, unsere Strecke in die Simulationsumgebung von Simulink einzubinden. Damit sind wir dann in der Lage, die Modellbildung und die Regelung mit Simulink vorzunehmen.

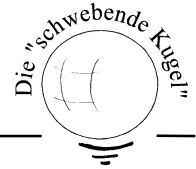
Ein weiteres grosses Problem stellte sich uns, als wir die beiden anderen Chopper bestellen wollten. Die Firma, welche uns die Chopper liefern sollte, trat unerwartet von unserer schriftlichen Abmachung zurück. Diese hält fest, dass wir von dieser Firma drei Chopper bis zum Ende unserer Diplomarbeit mieten können. Der Grund für den Rücktritt liegt darin, dass die Firma diesen Typ aus ihrem Verkaufsangebot gestrichen hat und der Lieferant erst noch den Preis massiv erhöht hat. Schlussendlich haben wir uns darauf geeinigt, dass wir die drei Chopper zu einem reduzierten Preis kaufen können. An dieser Stelle möchten wir Herrn Brügger und Herrn Quednau recht herzlich für ihr Engagement in dieser Angelegenheit danken.

## 5.2 Zeitplan

Es handelt sich wiederum um einen Ist-Zeitplan, welcher Aufschluss über unsere Tätigkeiten während der zweiten Semesterarbeit geben soll.

Tätigkeit	Wo 20	Wo 21	Wo 22	Wo 23	Wo 24	Wo 25	Wo 26	Wo 27	Wo 28	Wo 29	Wo 30	Wo 31	Wo 32	Wo 33	Wo 34	Wo 35	Wo 36	Wo 37	Wo 38
Spulen- steuerung																			
Kraftmessung mit Spule 1																			
Temperatur- messungen																			
Elektronik Boxen																			
US-Mikrophone																			
US-Sender																			
B-Feld- Messaufbau																			
Kühlung für Spulen 2&3																			
Spulen 2&3 fertigen																			
Spulen 2&3 anschiessen																			
Reglerumge- bung evaluieren																			
Dokumen-tation																			
Ferien																			

Diagramm 5.1: Zeitplan 2. Semesterarbeit



## **6 Aufgabenstellung zur Diplomarbeit**

### **Diplomarbeit WS 1996**

Thema der Diplomarbeit: Die schwebende Kugel

Studenten: Hr. B. Kamm und Hr. P. Märki

Betreuer: Hr. G. Brügger

Beginn der Diplomarbeit: 4. November 1996

Abgabe der schriftlichen Arbeit: 20. Dezember 1996

### **Gedanken zur schwebenden Kugel**

Am Anfang stand die Idee der Simulation der Erdbewegung im freien Raum.

Dieses in Aufwand und Realisierungsmöglichkeit absolut offene Projekt wurde von den Herren B. Kamm und P. Märki in den zwei vorangegangenen Semesterarbeiten mit viel Enthusiasmus und grosser fachlicher Kompetenz angegangen. Dank ihrem riesigen Einsatz und ihrer effizienten Arbeitsweise schafften sie es, das Projekt so weit voranzutreiben, dass an ein Schweben der Kugel in der Diplomarbeit gedacht werden kann.

Für die Diplomarbeit bestehen damit folgende Einrichtungen:

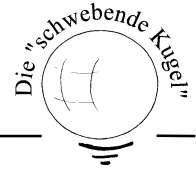
- drei Spulen mit Gestell
- Spulenansteuerung mit vorerst einem Chopper
- Einrichtung für die Regelung des B-Feldes
- US-Sender und US-Mikrophone
- Konzept für das weitere Vorgehen

### **Aufgabenstellung zur Diplomarbeit**

In der Diplomarbeit soll das Ziel, eine Kugel im Raum frei bewegen zu können, verfolgt werden.

Folgende Arbeiten stehen damit an:

- Spulenansteuerung fertigstellen, sobald die noch fehlenden Chopper ein- treffen
- Aufbau der Positionserfassung
- Schnittstelle zu RealITR definieren und erstellen
- Regeln der Kugelposition

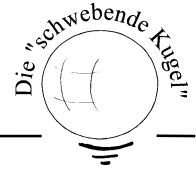


Der Aufwand für die anstehenden Arbeiten lässt sich schwer abschätzen. Vermutlich ist die vollständige Umsetzung der Arbeiten nicht möglich. Die Fertigstellung der Hardware ist anzustreben.

### **Bericht**

Der Bericht soll einen Einblick in die geleisteten Arbeiten geben. Er soll ansprechend sein und sich nicht in Details verlieren. Ein Anhang soll mechanische Pläne und Schemas enthalten, sowie einen Einblick in die wesentlichen Messungen geben. Die umfangreichen Unterlagen, Programme und Messdaten sollen greifbar sein.

G. Brügger



## **7 Überblick zur Diplomarbeit**

### **7.1 Einleitung**

Zu Beginn der Diplomarbeit zügelten wir unsere Einrichtung ins Regelungstechnik-Labor.

Da die letzten beiden Chopper endlich geliefert wurden, konnten wir die Spulenansteuerung ganz fertigstellen. Die drei Spulen konnten nun erstmals zusammen angesteuert werden. Nach einigen Kraftmessungen bestimmten wir die optimalen Spulenabstände. Zwischen den Spulen brachten wir Verstreben an, weil die nun auftretenden Kräfte sehr gross sind.

Wir haben unsere Einrichtung mit dem RealITR verbunden und waren damit in der Lage, unser System vom Computer aus zu steuern. Mit diesem Aufbau konnten wir nun akustische Messungen durchführen und diverse Schaltungsteile für die Positionserfassung entwickeln und fertigen. Wir konnten den akustischen Aufbau so weit optimieren, dass die Kugel im gewünschten Bereich erfasst werden kann. Zur Bestimmung der Kugelposition aus den Echolaufzeiten entwickelten wir Algorithmen.

Wir charakterisierten den Zusammenhang zwischen der Kraft auf die Kugel, dem B-Feld und dem Ort der Kugel. Dazu fertigten wir eine Messeinrichtung und führten viele Messungen durch.

Bei einem Experiment liessen wir die Kugel an einem Ort unterhalb einer Spule schweben.

Es ist also durchaus möglich, die Kugel im Haltebereich der Spulen zu bewegen. Aus Zeitgründen konnten wir dies jedoch nicht mehr realisieren. Es war sehr hart für uns, unser Projekt an dieser Stelle abbrechen zu müssen.



## 7.2 Zeitplan

Es handelt sich wiederum um einen Ist-Zeitplan, welcher Aufschluss über unsere Tätigkeiten während der Diplomarbeit geben soll.

Tätigkeit	Wo 45	Wo 46	Wo 47	Wo 48	Wo 49	Wo 50	Wo 51
Zügeln der ganzen Einrichtung							
Fertigstellen der Spulenansteuerung							
Ausrichten der Spulen							
ReallTR mit Einrichtung verbinden							
Akustische Messungen							
Aufbau der Positionsbestimmung							
Charakterisierung des Systems							
Erstes Schweben der Kugel							
Dokumentation erstellen							

Diagramm 7.1: Zeitplan Diplomarbeit

## 8 Die Spule

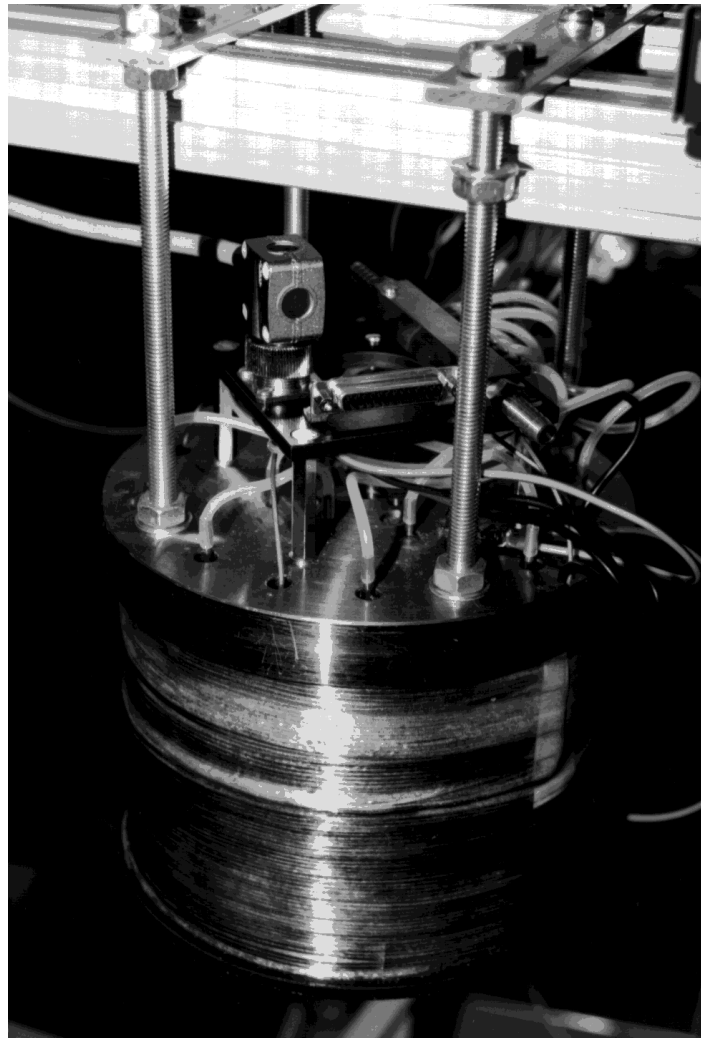


Bild 8.1: Spule 1 vor erster Inbetriebnahme

### 8.1 Einleitung

An dieser Stelle möchten wir Herrn E. Schneider unseren Dank aussprechen. Er ist uns bei den Feldberechnungen beratend zur Seite gestanden und hat uns in das Programm FLD11 zur Berechnung achsensymmetrischer Felder eingeführt.

Des weiteren danken wir Herrn K. Haudenschild für die Fertigung der mechanischen Teile, sowie Herrn Feurer für das Wickeln der ersten Spule. Vielen Dank!

## 8.2 Spulenaufbau

Für die Realisierung unserer Arbeit stand die Abschätzung der magnetischen Kraft eines Spulenaufbaus im Zentrum.

Einen möglichst guten Aufbau zu finden war demzufolge das erste Problem, das sich uns stellte. Begonnen haben wir unsere Überlegungen mit einer Luftspulenanordnung, welche wir mit Hilfe von Mathematica auch simulierten [Anhang A1].

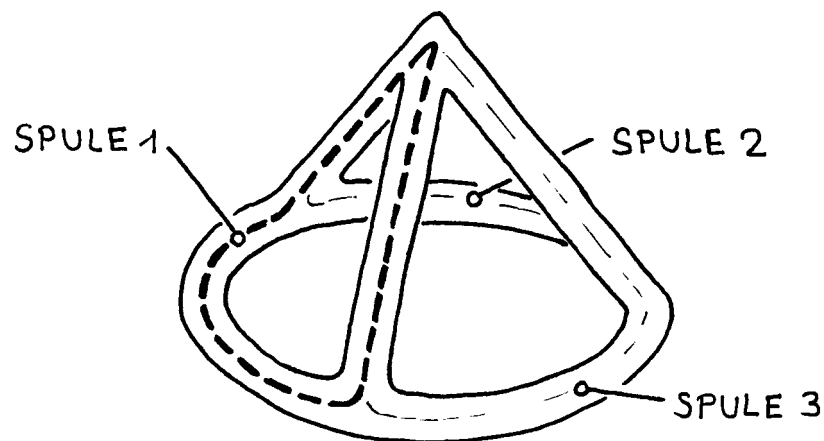


Bild 8.2: Aufbau der Luftspulenanordnung

Leider mussten wir feststellen, dass sich das Feld zu stark um die Leiterstücke konzentriert und so der Strom für die benötigte Kraft viel zu gross würde.

Nach diesem Ergebnis gingen wir daran, diverse Literatur zu durchstöbern, welche sich mit ähnlichen Problemen befasst. Interessant schien uns dann der Aufbau eines magnetischen Lastenhebers, welcher gemäss Literatur Bleche aus 1m Entfernung anheben kann.

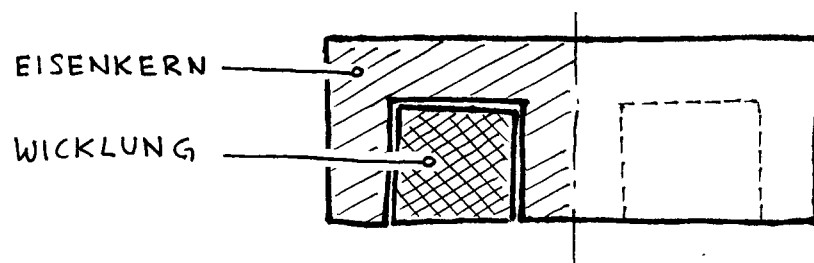


Bild 8.3: Querschnitt durch einen magnetischen Lastenheber

Dieser Aufbau ist nicht geeignet, weil sich die Kugel damit nicht positionieren lässt.

Nach dem Vergleich mit vielen Varianten kristallisierte sich ein Aufbau mit drei Spulen heraus.

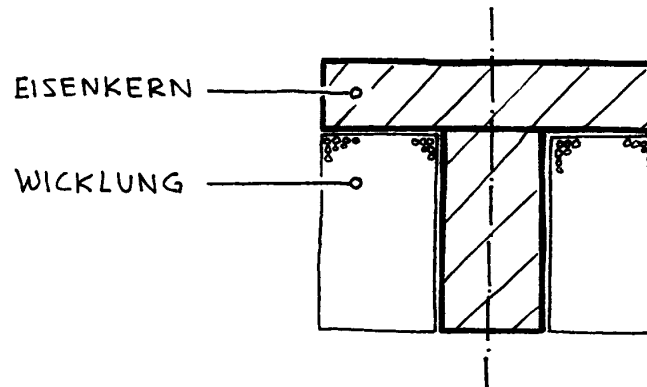


Bild 8.4: Eine der drei Spulen

Die Simulation zeigt, dass wir uns auf dem richtigen Weg befinden [Anhang A2].

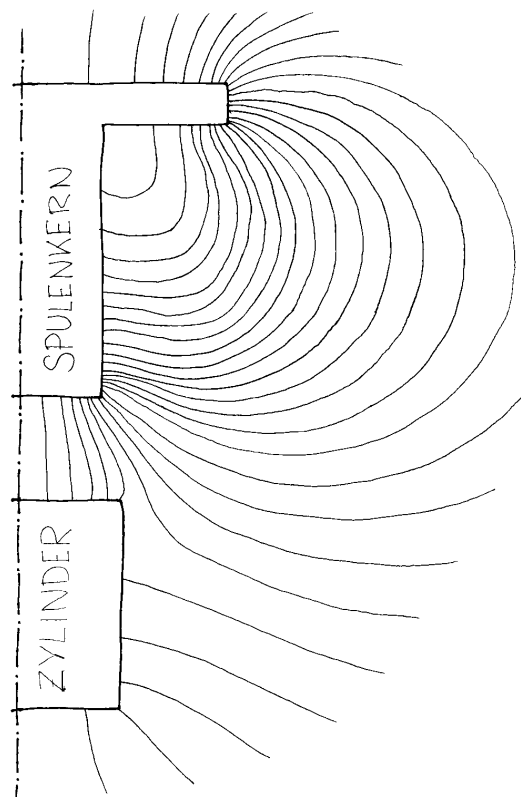


Bild 8.5: Beispiel eines simulierten Feldlinienbildes

### 8.3 Berechnung der Spule

Nachdem wir eine geeignete Geometrie gefunden hatten, galt es jetzt, die Spule anhand der Simulationsergebnisse zu dimensionieren.

Die Dimensionierung ist extrem schwierig, da sich viele Parameter nur grob schätzen lassen. Der Drahtdurchmesser, wie auch die Verlustleistung der Spule, wurden anhand der Simulationsergebnisse bestimmt [Anhang A3].

Die hohe Verlustleistung und die schlechte radiale Wärmeleitfähigkeit der Wicklung veranlassten uns, eine Wärmesimulation vorzunehmen. Zu diesem Zweck stellten wir ein Wärmeersatzmodell auf. Die ersten Ergebnisse der Wärmesimulation zeigten klar auf, dass die Spule gekühlt werden muss [Anhang A4]. Die Kühlung mussten wir zweiteilig ausführen.

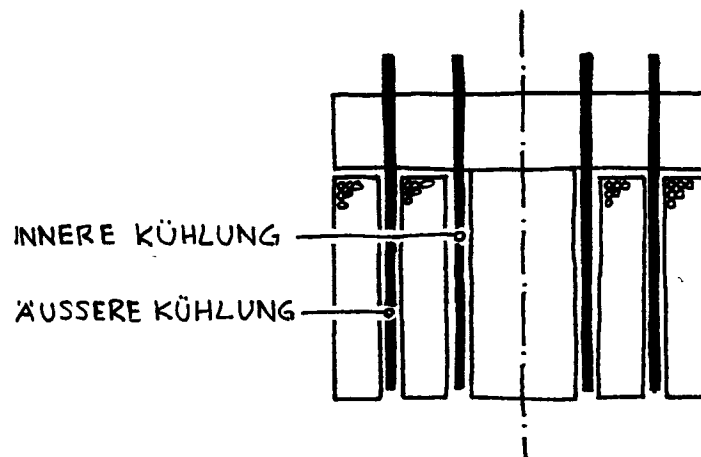


Bild 8.6: Anordnung der zweiteiligen Kühlung

Als Kühlmedium verwenden wir Leitungswasser.

#### 8.4 Herstellung der ersten Spule

Alle mechanischen Teile hat Herr Haudenschild gefertigt [Anhang A5]. Gewickelt wurde die Spule bei der Firma Feurer und Mooser AG in Schmerikon, wobei wir hier tatkräftig zur Seite standen. Unsere umfangreichen Vorbereitungen wurden mit einer problemlosen Herstellung der Spule belohnt.

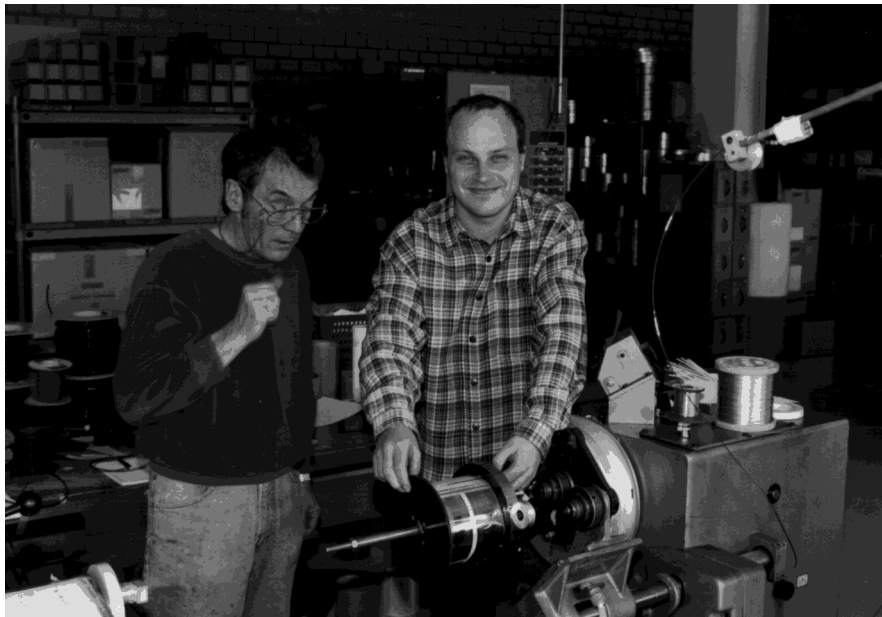


Bild 8.7: Herr Feurer und Herr Märki beim Wickeln der ersten Spule

Die Spule enthält fünf Temperatursensoren vom Typ KTY10. Sie ermöglichen uns die Wärmesimulation zu überprüfen und die Spule vor Überhitzung zu schützen [Anhang A6].

## 8.5 Messungen an der ersten Spule

Erste Versuche mit einer Blechkugel zeigten, dass wir den Aufbau und die Grösse der Spule, sowie den Spulenfluss richtig gewählt hatten. Die auftretenden Kräfte sind sehr eindrücklich.

### Kühlung

Obwohl das Wärmeableitvermögen der Kühlung nicht ganz die erhofften Resultate brachte, waren wir mit der Kühlung zufrieden [Anhang A7].

Da wir durch Messungen an der ersten Spule einige Wärmeparameter genauer bestimmen konnten, war es uns möglich, die Kühlung für die nächsten Spulen noch zu optimieren.

Vorallem die äussere Kühlung haben wir verbessert. Wir achteten dabei auf einen möglichst einfachen Aufbau im Bezug auf die Herstellung. Besonders wichtig war der Übergangswiderstand von der Kühlung zur Spulenwicklung. Dieser spielt eine entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit der Kühlung [Anhang A8].

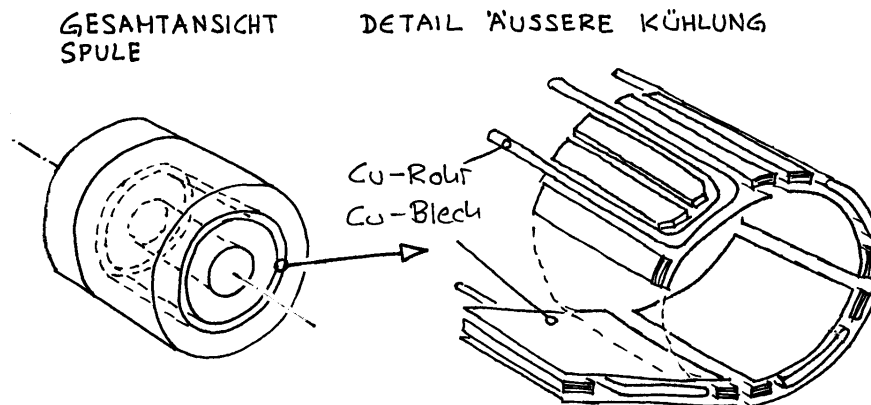


Bild 8.8: Prinzip der äusseren Kühlung für die zweite und dritte Spule

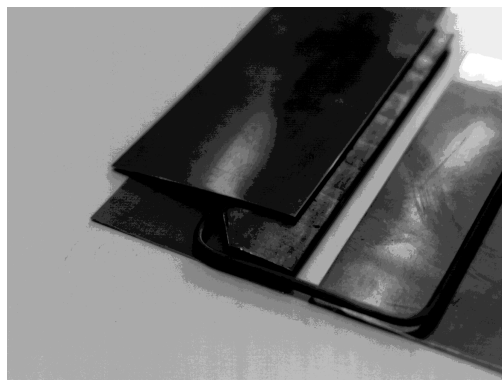


Bild 8.9: Kupferteile für die äussere Kühlung

### Kraftmessung

Für die Bestimmung der Kraftvektoren auf eine Testkugel musste eine einfache und möglichst sensitive Einrichtung gefunden werden. Nach längerem Suchen einer derartigen Einrichtung hiess es, eine solche selbst zu entwickeln. Verschiedene Konzepte wurden dabei durchgedacht, bis wir eine geeignete Lösung gefunden hatten: ein Piezo-Kraftsensor. Damit lassen sich dynamische Kräfte messen.

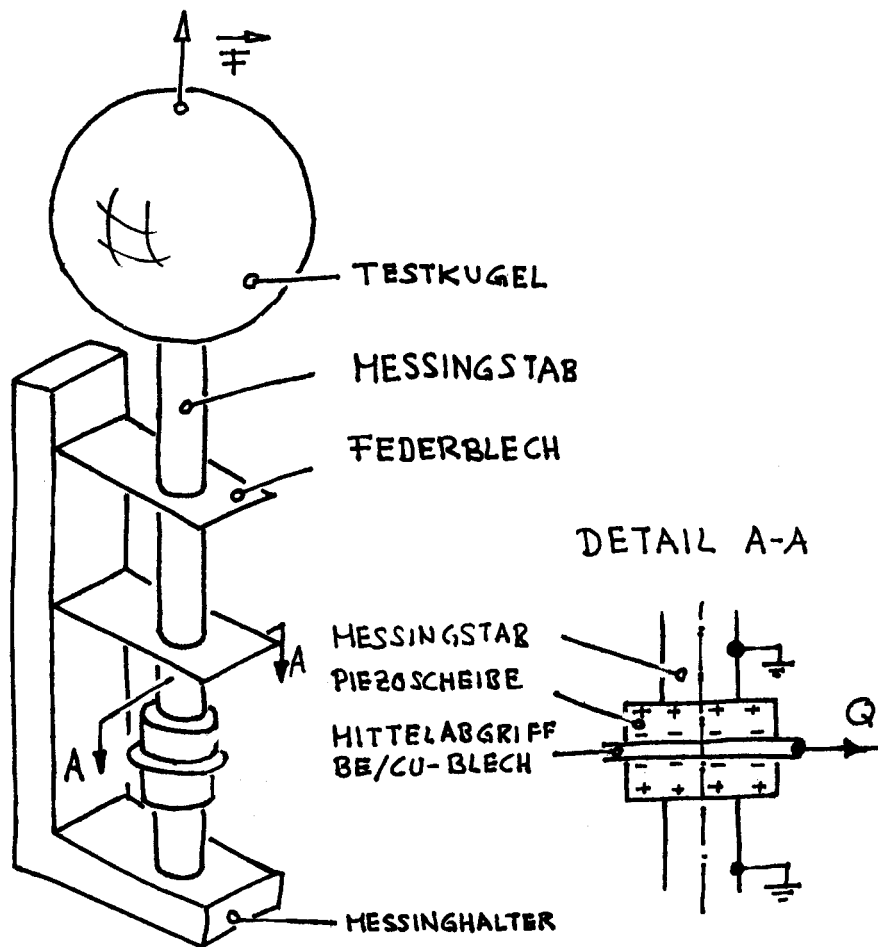


Bild 8.10: Sensorik für die Kraftmessung

Die Federscheiben wurden so angeordnet, dass nur die Kraft in einer Richtung gemessen wird.



Das von den Piezo-Keramikscheiben gelieferte Signal wird mit einem Verstärker (Ladungsverstärker) für die Messung aufbereitet.

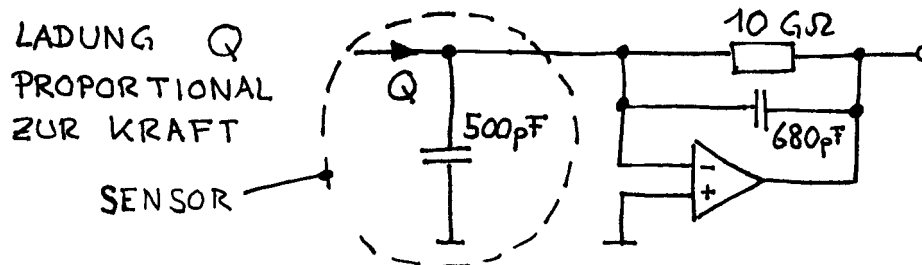


Bild 8.11: Verstärkerschaltung für die Kraftmessung

Den Messingträger montierten wir drehbar, damit wir die Kraftvektoren in sämtliche Richtungen bestimmen konnten.  
Der Zusammenhang zwischen Kraft und Strom durch die Spule ist wie erwartet ungewohnt:

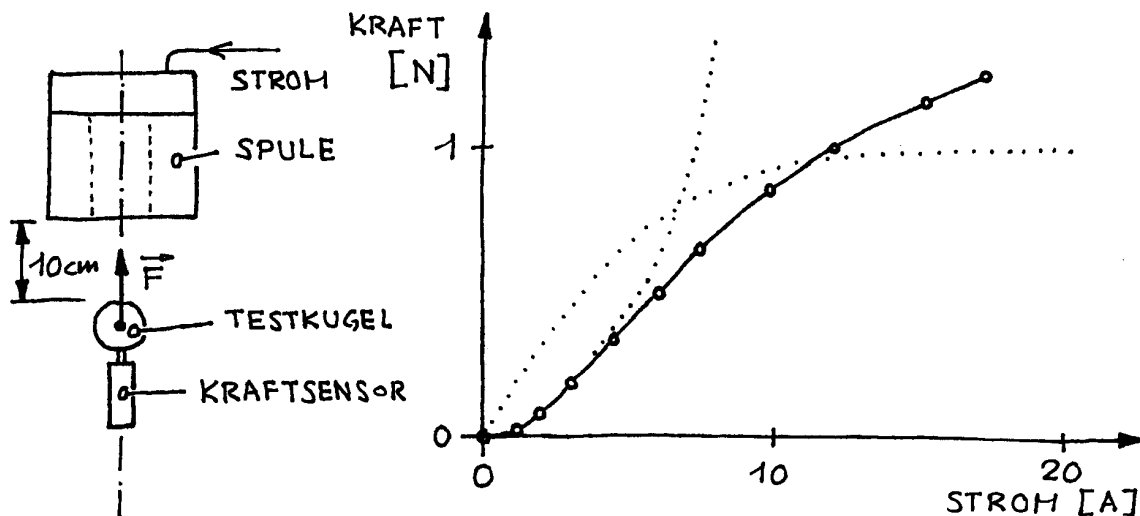


Bild 8.12:  $F=f(I)$  der ersten Spule

Ohne die Hysterese des Eisens hätte man eine quadratische Kennlinie.

Die gesamte Messanordnung und die Resultate sind im Anhang ersichtlich [Anhang A9].

## 8.6 Herstellung der zweiten und dritten Spule

Der Weg bis zur Fertigstellung der beiden Spulen war steinig. Beispielsweise war während dieser Zeit die mechanische Abteilung am ITR überlastet, so dass wir viele Teile selbst fertigten.

Es hatte auch sehr interessante und lehrreiche Abschnitte auf diesem Weg. Wie zum Beispiel das Wickeln der Spulen, welches wir mit der Wickelmaschine im Hause vornahmen. Sie ist zwar nicht für unsere Spulenabmessungen, insbesondere nicht für unseren Drahtdurchmesser ausgelegt, doch war sie gerade noch in der Lage die Spule zu drehen.

Wir änderten nicht nur die äussere Kühlung, sondern auch den Aufbau der Temperatursensoren [Anhang A10].

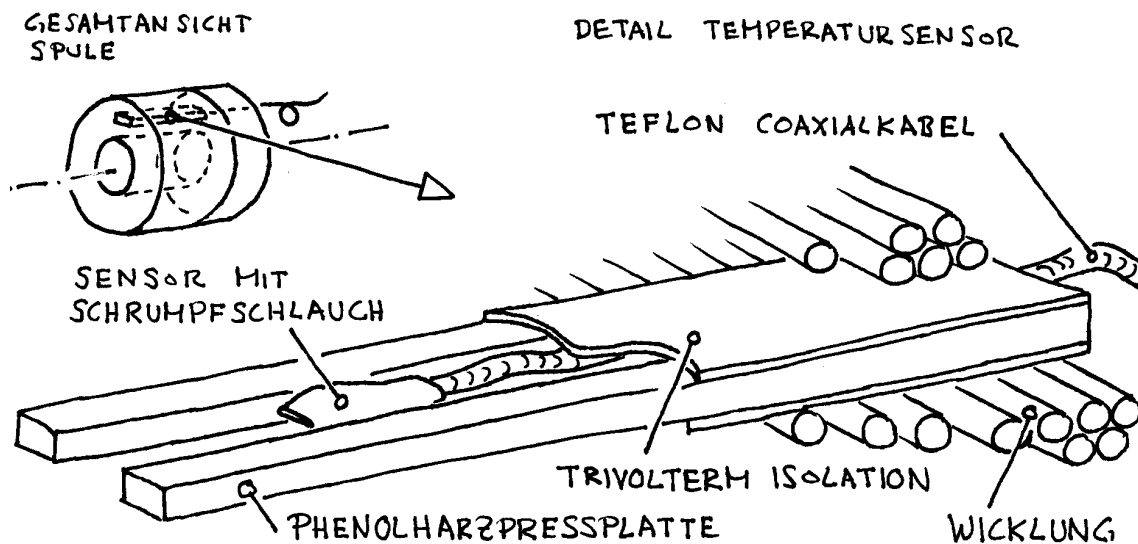


Bild 8.13: Aufbau der Temperatursensoren für die zweite und dritte Spule

Zudem verwendeten wir eine dünnere Isolationsfolie, um die thermische Leitfähigkeit in radialer Richtung zu verbessern.

Ein ganz neues Problem stellte sich für uns beim Vergiessen der Spulen. Dieses Vergiessen ist unerlässlich im Hinblick auf die thermische Leitfähigkeit. Zum einen mussten wir eine bessere Vergussmasse finden und zum anderen diese in die Spule bringen. Bei der Vergussmasse entschieden wir uns für Silikon-Kautschuk, was für unsere Anwendung genau das richtige war. Denn Silikon-Kautschuk hat einen guten thermischen Leitwert und beste elektrische Eigenschaften. Durch Evakuieren der ganzen Spule brachten wir die Masse in die Spule.

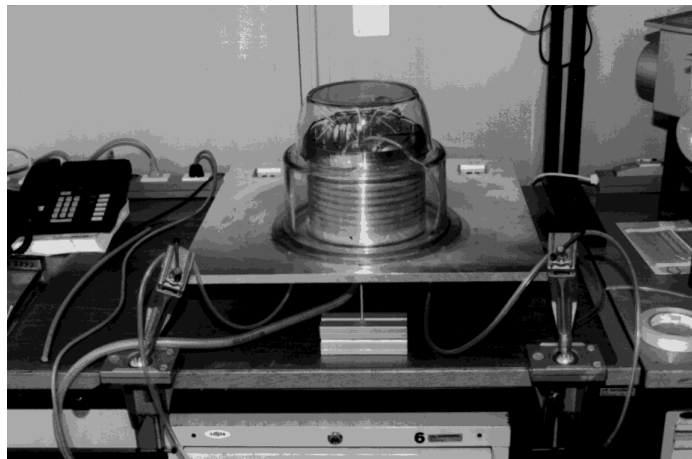


Bild 8.14: Aufbau der "Spulengießung"

Das Wärmeverhalten der zweiten und dritten Spule haben wir ebenfalls ausgemessen. Wir stellten fest, dass die optimierte Kühlung noch bessere Resultate liefert als die der ersten Spule [Anhang A11].

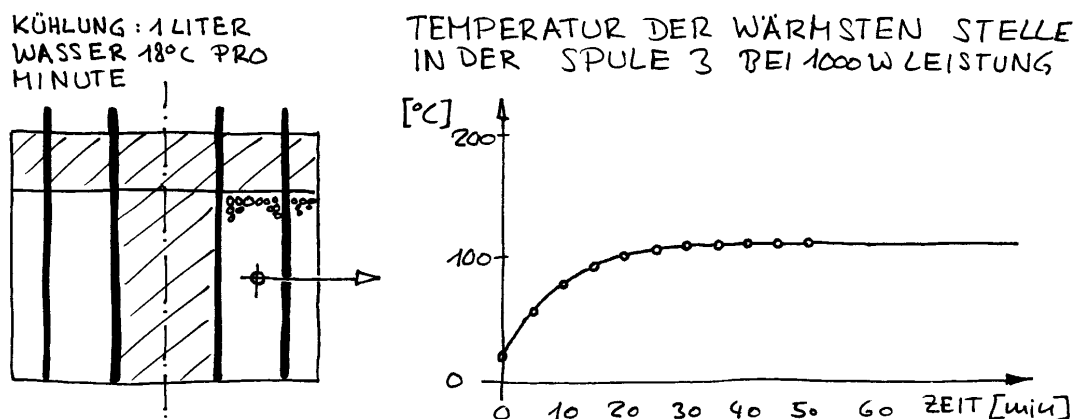


Bild 8.15: Wärmeverhalten der Spule III

## 8.7 B-Feldmessung und US-Sender

Die Messung der Induktion ermöglicht uns das Regeln des magnetischen Feldes. Hierfür musste eine geeignete Konstruktion gefunden werden, welche möglichst einfach herzustellen ist und sich einfach montieren und demontieren lässt.

Ebenfalls sollte dieser Aufbau die Unterbringung des US-Senders erlauben, was wir dann auch realisierten [Anhang A12].

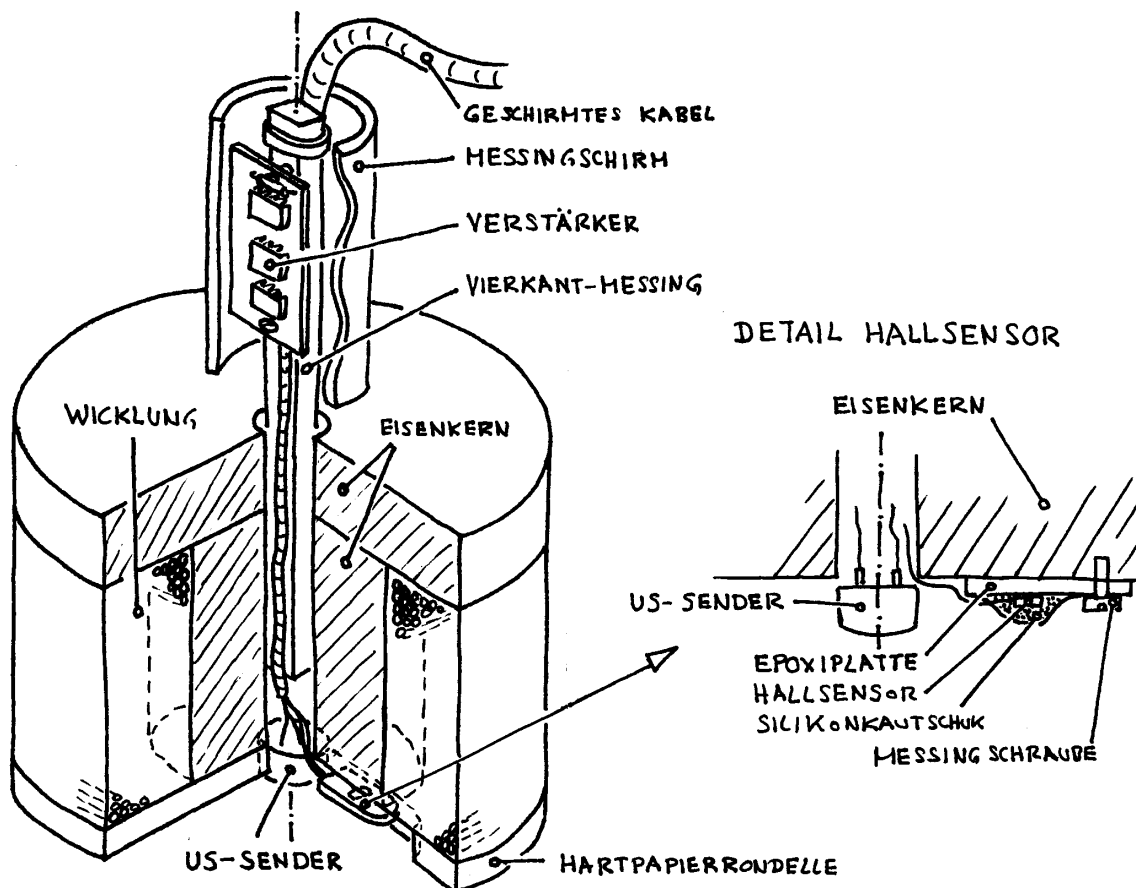


Bild 8.16: Aufbau für B-Feldmessung und US-Sender

Die starken Wechselfelder zwangen uns, unmittelbar nach den Hallsensoren Vorverstärker und Leistungstreiber einzubauen.

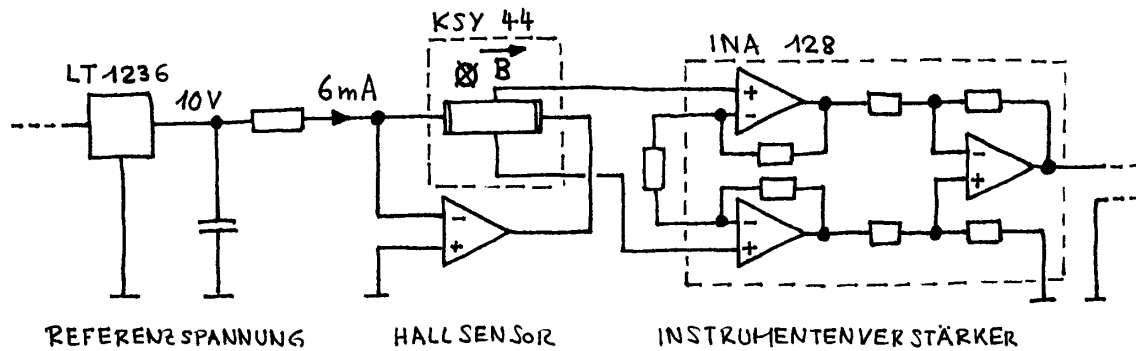


Bild 8.17: Schaltung zur B-Feldmessung

In der Folge benutzten wir den Aufbau zur Messung des B-Feldes für die Kontrolle unseres Spulendesigns. Zu diesem Zweck ermittelten wir die Grösse des axialen B-Feldes an verschiedenen Orten im Kerninnern und unterhalb der Spule [Anhang A13].

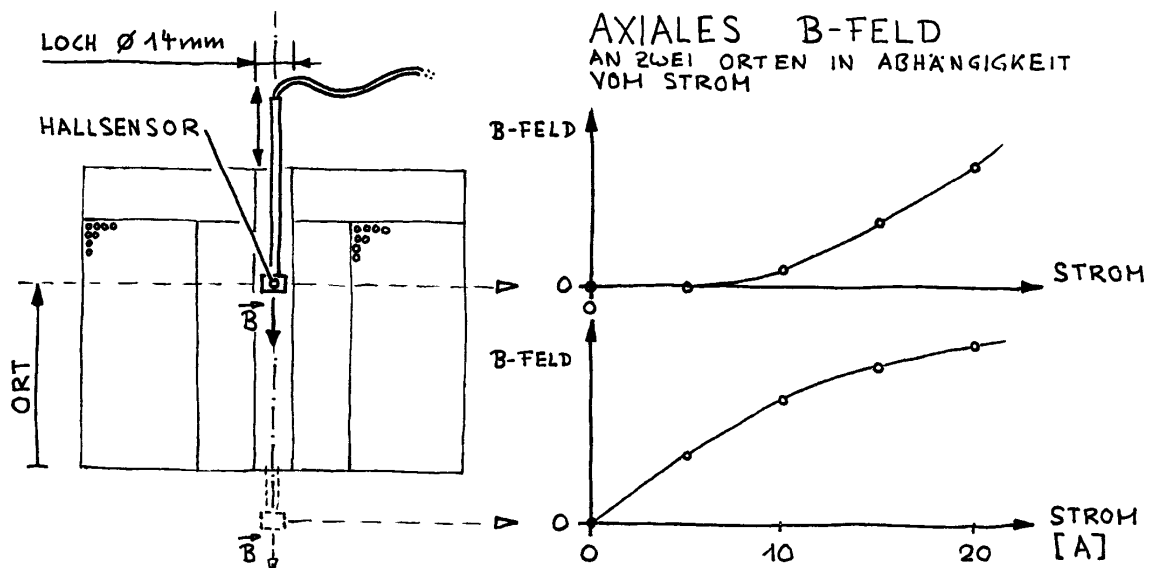


Bild 8.18: Illustration zur B-Feldmessung

Die Messung zeigt, dass unsere Abschätzungen gut waren. Der Feldverlust im Kerninneren ist gut verkraftbar. Einen kleineren Feldverlust hätte man mit einem dickeren Kern erreichen können. Dies hätte jedoch wieder grössere elektrische Verluste zur Folge.

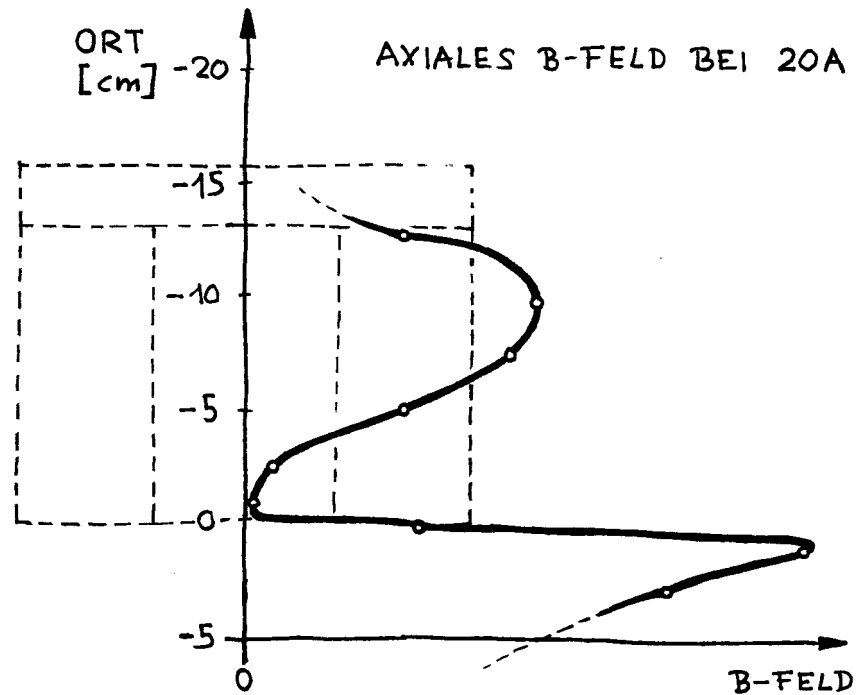
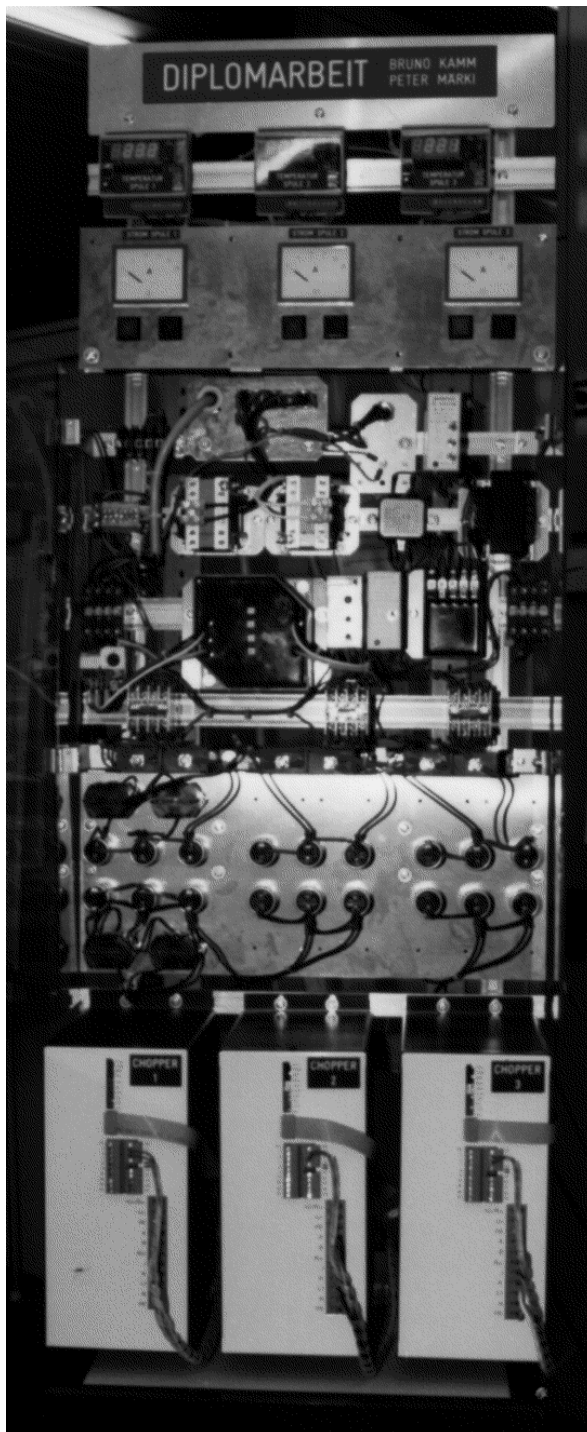


Bild 8.19: B-Feldmessung bei 20A

## 9 Spulenansteuerung



Thermometer

Messgeräte

Kabelanschlüsse

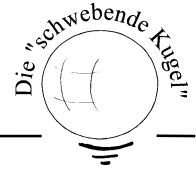
Netzfilter und div. Relais

Überspannungsableiter

Ausgangsfilterbank

4-Q-DC-Chopper

Bild 9.1: Starkstromaufbau



## 9.1 Einleitung

Die Spulenansteuerung haben wir mit einer H-Brückenschaltung realisiert. Die Evaluation des eingesetzten 4-Q-DC-Choppers von Lenze dauerte lange (15 Firmen haben wir angeschrieben). Die Hersteller von Motorenansteuerungen der benötigten Leistungsklasse setzen im Allgemeinen nicht mehr auf Gleichstrommotoren. Sie stellen statt dessen Frequenzumrichter für bürstenlose Motoren her.

Der gewählte Chopper weist eine hohe Taktfrequenz auf, damit der entstehende Lärm erträglich bleibt.

Natürlich gäbe es auch geeignete Leistungsverstärker für den Laborbedarf, doch übersteigt deren Preis unsere Möglichkeiten.

## 9.2 Mechanik

Für eine maximale Flexibilität haben wir die Spulenansteuerung auf einen Laborwagen gebaut. Alle gefährlichen Teile sind mit einer Acrylglasplatte vor Berührung geschützt. Wir haben zudem darauf geachtet, dass die Ansteuerung übersichtlich ist.

Aus diesem Grunde mussten diverse Aluminiumplatten und -profile angefertigt werden [Anhang B1].



### 9.3 Starkstromaufbau

Mit der erforderlichen Leistung von rund 9kW ist ein Aufbau nicht mehr einfach zu realisieren.

Um unsere Studienkollegen nicht zu beeinträchtigen, setzten wir Netzfilter ein, welche das Netz vom Chopper abkoppeln. Damit die Spulen nicht unnötig erwärmt werden, brauchten wir Filter, welche den Wechselstromanteil der Chopperausgangsspannung von der Spule fernhalten. Zudem helfen die Filter die Störstrahlung zu verringern. Um die Spulen vor Überhitzung zu schützen, bauten wir eine unabhängige Schutzschaltung.

Zudem ist das schnelle Ausschalten der Spulen ziemlich schwierig, muss doch viel Energie aus dem Magnetfeld herausgezogen werden. Schliesst man die Spulen bei einem Notstop einfach kurz, so dauert es einige 100ms bis das Feld abgebaut ist. Um den Feldabbau bei einem Notstop zu beschleunigen, haben wir eine Schaltung mit Varistoren entwickelt, welche die Energie der Spulen aufnimmt.

Selbstverständlich haben wir die Chopper auch noch mit Sicherungen vor Überlast geschützt. Damit unsere Sicherheit gewährleistet wird, haben wir einen „fliegenden“ Hauptschalter mit Notastaste realisiert.

Wir haben aus Kosten- und Umweltschutzgründen möglichst viele Occasionsbauteile eingesetzt [Anhang B2].

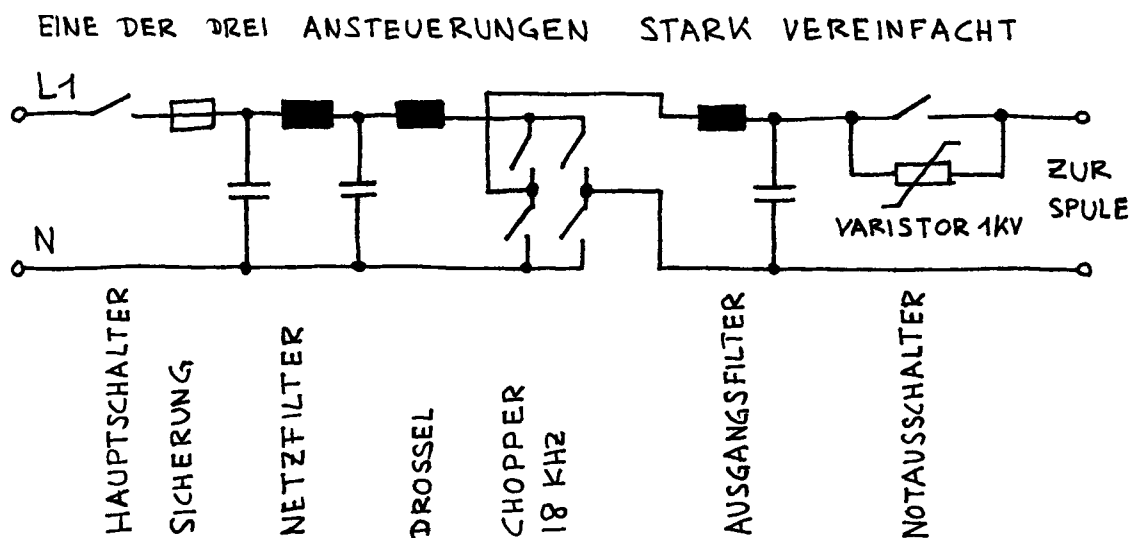


Bild 9.2: Ansteuerungsprinzip für eine Spule

## 10 Mechanischer Aufbau

### 10.1 Gestell

Nach reiflicher Überlegung kamen wir zum Schluss, das Profil-Verbindungs-System (PVS) von der Firma KANYA in Dürnten zu verwenden. Das PVS erlaubt eine einfache und schnelle Montage, sowie eine hohe Flexibilität [Anhang C1].

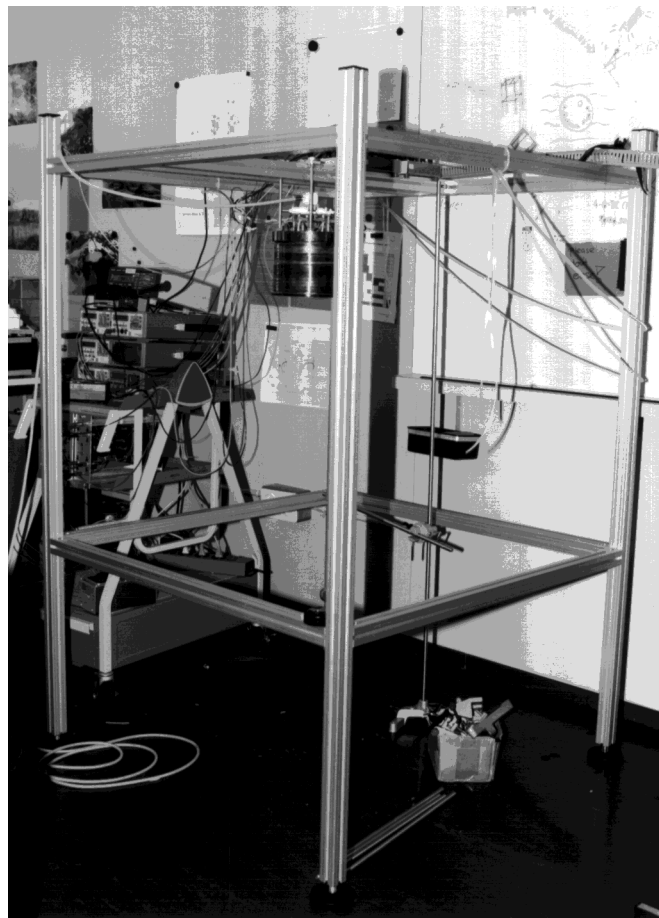
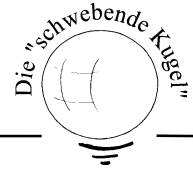


Bild 10.1: Mechanischer Aufbau

### 10.2 Spulenaufhängung

Die Spulenaufhängung gestaltete sich sehr einfach, weil die Spule zu diesem Zweck vorbereitete Gewinde hat. Wir brauchten lediglich massive Gewindestangen zu montieren und diese mittels einer Aluminiumplatte am Grundgestell zu befestigen [Anhang C2].



## 11 Kugel

### 11.1 Allgemeines

Wir wollen die Kugel in einem grossen Abstand zu den Spulen schweben lassen. Dabei spielt das Verhältnis von Kugelvolumen zu Kugelmasse eine entscheidende Rolle, es soll möglichst gross sein. Die Blechstärke kann bei der Herstellung einer Hohlkugel nicht beliebig klein gemacht werden. Daher muss die Kugel gross sein, damit das magnetische Feld möglichst gut genutzt wird.

Es gibt verschiedene Herstellungsverfahren, wobei beim Tiefziehen die dünnsten Bleche verwendet werden können.

Bei der Herstellung der Hohlkugel mit dem Tiefziehverfahren ergeben sich hohe Ansprüche an das Blech:

- Dehnung von  $\pi/2$  (es werden zwei Kugelhälften hergestellt)
- magnetisch gut leitend

Sinnvoll sind gewöhnliche Eisenbleche, welche nicht legiert sein dürfen, da sie sonst ihre guten magnetischen Eigenschaften verlieren.

Wir haben diverse Telefongespräche geführt und viele Anfragen gemacht (33 schriftl. Anfragen an Firmen weltweit). Doch fanden wir niemanden, der uns eine solche Kugel herstellen wollte.

Des weiteren haben wir noch andere Verfahren zur Kugelherstellung geprüft und auch ausprobiert. Erwähnenswert ist der vernickelte Unihockeyball. Wir haben ihn zuerst mit einer Schicht Leitsilber versehen. Anschliessend brachten wir mittels Elektrolyse die Nickelschicht auf. Der Kunststoffball kann dann herausgewaschen werden. Nickel hat keine besonders gute magnetische Eigenschaften. Dafür ist die Kugel sehr leicht. Die Fertigung hat aber grundsätzlich zwei Probleme: die Nickelschicht muss ziemlich dick sein, damit sie nicht in die magnetische Sättigung kommt und die Haftung der Nickel- und der Leitsilberschicht auf der Kunststoffoberfläche ist gering. Mit vielen Tricks und Kniffs würde man wohl diese Probleme beheben können. Wir entschieden uns dann aber, wegen der vielen Probleme von diesem Verfahren wegzukommen und andere Verfahren weiter zu verfolgen.

## 11.2 Die IKEA-Lösung

Die "IKEA-Lösung", was soll das bedeuten?

IKEA-Lösung darum, weil wir aus zwei Lampenschirmen eine für unsere Zwecke brauchbare Kugel fertigten. Die Kugel ist zwar schwer, doch für die ersten Versuche genügt sie durchaus.

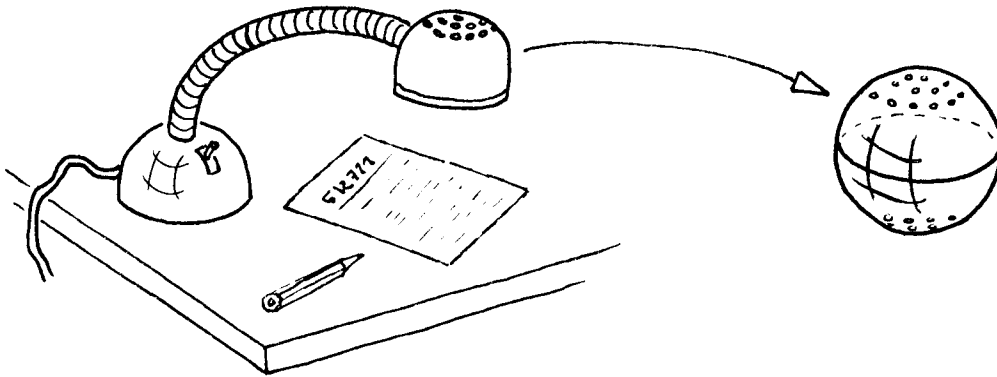


Bild 11.1: Die "IKEA-Lösung"

## 11.3 Die Fundgruben-Lösung

Während eines halben Jahres inserierten wir unter anderem auch in der Fundgrube. Dabei meldete sich ein Herr Zimmermann, der sich bereit erklärte eine Kugel mit der gewünschten Blechstärke von 0.2mm nach dem Tiefziehverfahren herzustellen. Dazu stellte er extra eine Negativform und einen Stempel her. Leider schaffte er es nicht, das Blech ohne Faltenbildung in die Form zu pressen. Das hergestellte Muster ist somit optisch nicht sehr attraktiv. Für die kostenlos geleistete Arbeit danken wir ihm vielmals.

## 11.4 Die Mond-Lösung

Eine für unsere Anwendung gut geeignete Blechkugel fand Peters Mutter in der Brockenstube. Es handelt sich hierbei um eine Mondkugel. Sie ist optisch sehr attraktiv, aber leider etwas zu gross.

## 12 Elektronik Box

Die elektronischen Baugruppen bauten wir in Aluminiumgehäuse. Damit war sichergestellt, dass die Schaltungen sich gegenseitig nicht stören und von aussen nicht gestört werden. Die Kisten verbinden wir mit 25poligen Sub-D-Kabeln. Mit einem Sub-D-Adapter sind wir in der Lage, alle Leitungen leicht abzugreifen.

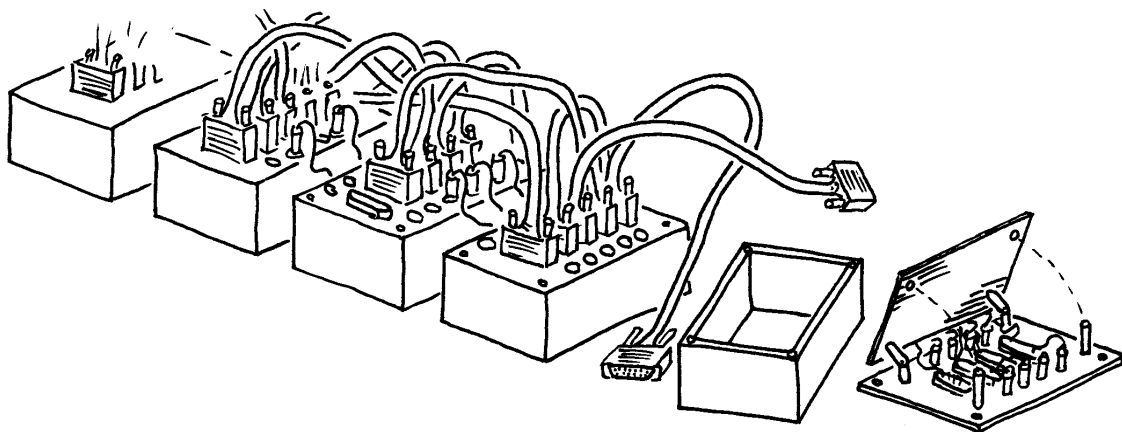
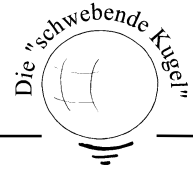


Bild 12.1: Prinzip des modularen Aufbaus

Da vieles noch nicht klar ist, ist es wichtig, dass alle Baugruppen gut zugänglich sind und leicht voneinander getrennt werden können.



## **13 Positionsbestimmung**

### **13.1 Messprinzip**

Wir müssen die Position der Kugel räumlich erfassen. Dazu sind folgende Prinzipien naheliegend:

- optisch, mit zwei Kameras
  - hier liegt das Problem in der Geschwindigkeit
- optisch, mit Lichtschranken
  - es bräuchte extrem viele Lichtschranken
- magnetisch, mit mehreren Hallsensoren
  - Die Verformung des Magnetfeldes durch die Kugel ist extrem gering. Zudem hätte man mit der Hysterese der Metallteile zu kämpfen. Für Systeme, bei denen die Kugel einem Magneten sehr nahe ist, ist dieses Prinzip aber sehr elegant.
- mit Laserlaufzeitmessung
  - Kosten ...
- mechanisch
  - nicht spannend ...
- mit Ultraschall (US)
  - Hier ist denkbar, dass die Kugel Schall aussendet oder nur als Reflektor dient. Beide Varianten sind schwierig.

Entschieden haben wir uns für die Variante Ultraschall mit der Kugel als Reflektor. Dabei werden die Laufzeiten von US-Signalen gemessen. Sie hat den Vorteil, dass die Informationsmenge von vornherein relativ klein ist. Zudem ist diese Methode nicht empfindlich im Bezug auf die Kugeloberfläche.

### **13.2 Probleme mit der US-Positionsbestimmung**

Um die räumliche Position zu bestimmen, braucht es im Minimum einen Sender und drei Empfänger (abgesehen von der Fledermaus, die mit weniger auskommt). Denkbar wäre ein Sender in der Mitte der drei Spulen und unter jeder Spule ein Empfänger. Doch so einfach ist es auch wieder nicht. Die dafür benötigten US-Transducer hätten folgenden Steckbrief:

- empfindlich
- breite Richtcharakteristik
- breitbandig

Doch liessen sich solche aus naheliegenden Gründen nicht finden:

- Schallwellen werden an den Begrenzungen der Transducer wie an einer Lochblende gebeugt. Ist die Wellenlänge im Vergleich zur Öffnung klein, so entstehen gemeine Nebenkeulen. Die Kugel muss sich immer innerhalb der Hauptkeule befinden.
- Wird die Schallöffnung klein gemacht, so verlieren die Transducer an Empfindlichkeit.
- Bei breitbandigen Transducern ist die Wellenlänge klein.

Alles kann man nicht haben. Trotz diesen physikalischen Einschränkungen wäre ein für unsere Zwecke geeigneter Transducer denkbar. Doch gibt es niemanden, der ihn herstellt (über 20 Anfragen an Firmen weltweit).

Wir haben uns daher entschieden, drei Sender und vier Empfänger zu verwenden. Damit haben wir die Anforderungen an die Richtcharakteristik entschärft. Es ergibt sich gezwungenermassen redundante Information, was aber nicht weiter stört.

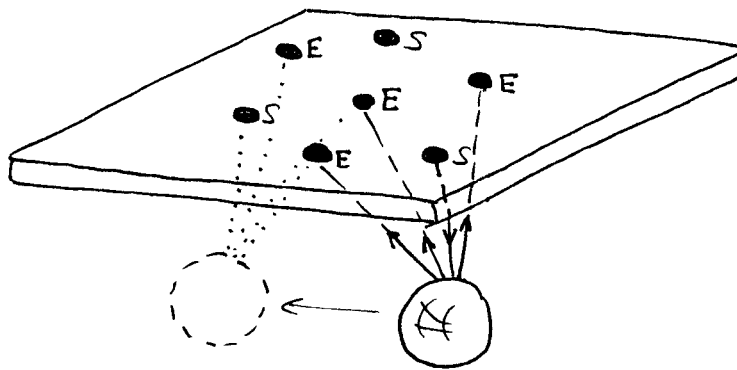


Bild 13.1: Anordnung von Sender (S) und Empfänger (E)

Gelöst ist das Problem damit aber noch lange nicht. Kämpfen wir doch noch mit Störschall, diversen Echos, direkter Kopplung und starken Magnetfeldern. Zuerst beabsichtigten wir mit Rauschen und Kreuzkorrelation zu arbeiten. Doch der Rechenaufwand wäre enorm.

Um diesen Aufwand zu umgehen, entschlossen wir uns Pulse zu verwenden. Dazu haben wir die Übertragungscharakteristik der akustischen Strecke gemessen. Mit Matlab berechneten wir anschliessend jenes Signal, welches nach dem Durchlaufen dieser Strecke gut mit einem Schwellwertdetektor erfasst werden kann.

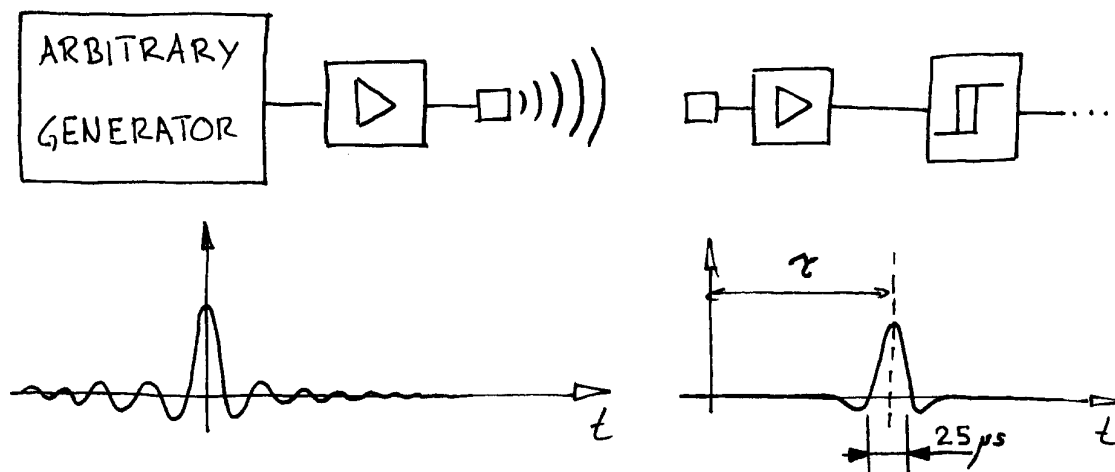


Bild 13.2: Prinzip der Laufzeiterfassung mit kurzen Pulsen

Die Laufzeit liess sich sehr sauber und einfach bestimmen. Das Problem bei der Verwendung von kurzen Pulsen besteht darin, dass die akustische Übertragungscharakteristik bekannt sein muss. Denn je nach Ort der Kugel variiert diese beachtlich. Der Sendepuls müsste jeder Kugelposition angepasst werden. Dies wäre durchaus mit adaptiven Filtern oder Tabellen lösbar. Der Aufwand ist aber wiederum sehr gross.

Wir haben uns daher für die im Folgenden beschriebene Methode mit längeren Pulsen entschieden.



### 13.3 Realisierung

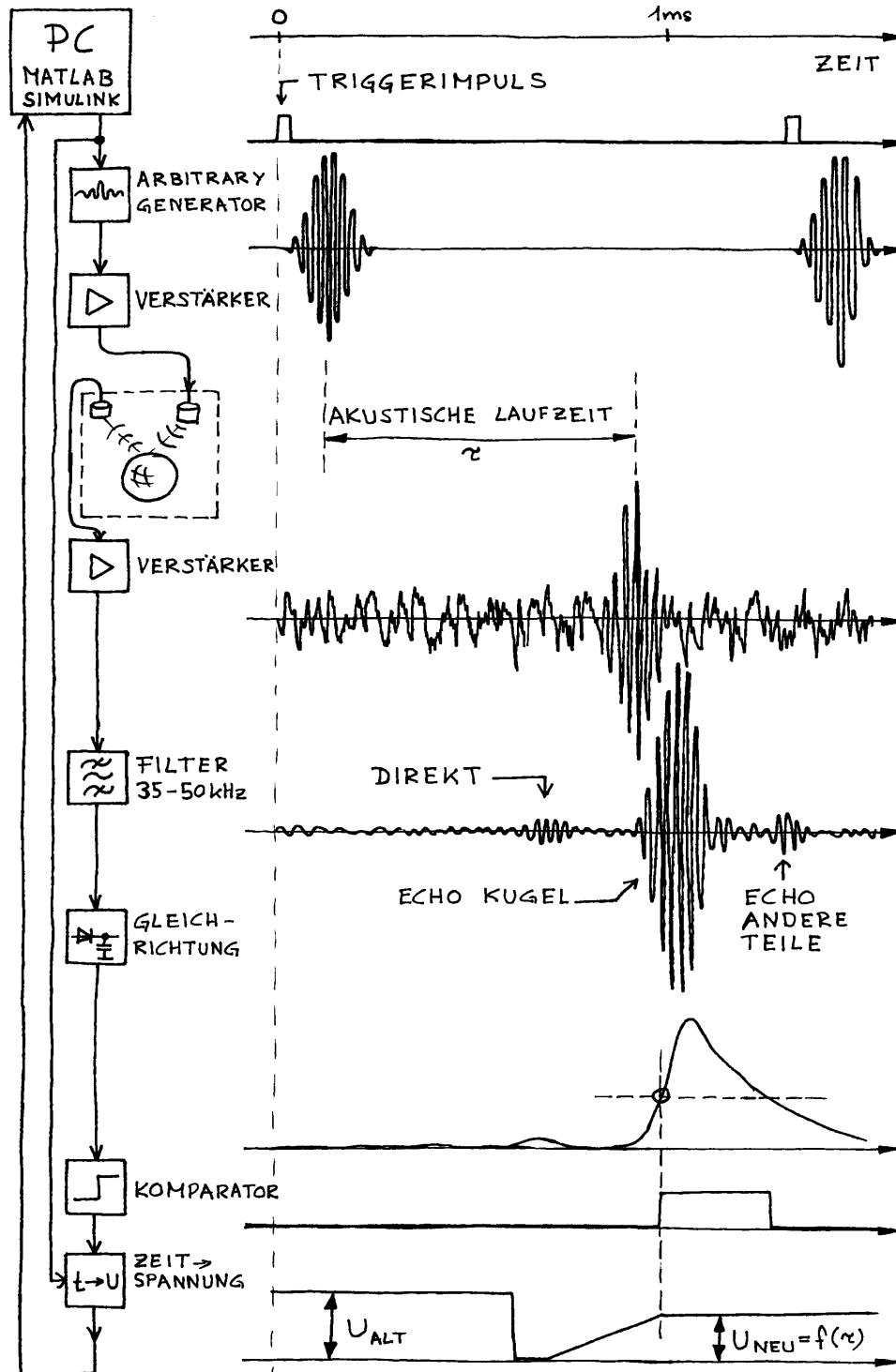


Bild 13.3: Überblick über das System zur Bestimmung einer Laufzeit

Bei der Arbeit mit Pulsen stellt sich das Problem, dass die US-Transducer nur eine endliche Spannung ertragen. Als Sendepuls verwenden wir einen mit einem Hanning<sup>2</sup>-Fenster gewichteten Sinus. Die Empfangssignale werden bandbegrenzt, gleichgerichtet, gefiltert und schliesslich einem Schwellwertdetektor zugeführt.

Um die akustische Laufzeit mit dem Computer einfach erfassen zu können, bilden wir eine von der Laufzeit abhängige Spannung. Als Schnittstelle von unserem System zum PC mit dem Programm Matlab/Simulink setzen wir das RealITR ein. Das RealITR liefert bei jedem Abtasten der analogen Signale einen Triggerimpuls. Dieser Triggerimpuls löst einen Messzyklus aus.

Anhand der berechneten Position wird jeweils entschieden, welcher US-Sender und welche US-Mikrophone für den nächsten Messzyklus verwendet werden.

### 13.4 Störeinflüsse

Die US-Transducer befinden sich unmittelbar bei den Spulen. Wir haben deshalb beim mechanischen und elektrischen Aufbau stets darauf geachtet, Vorkehrungen gegen akustische und elektrische Einkopplungen zu treffen. Die Messung dieser Einkopplungen zeigte, dass sich unser Aufwand gelohnt hat.

Die Störungen durch die Chopper können trotzdem nicht vernachlässigt werden.

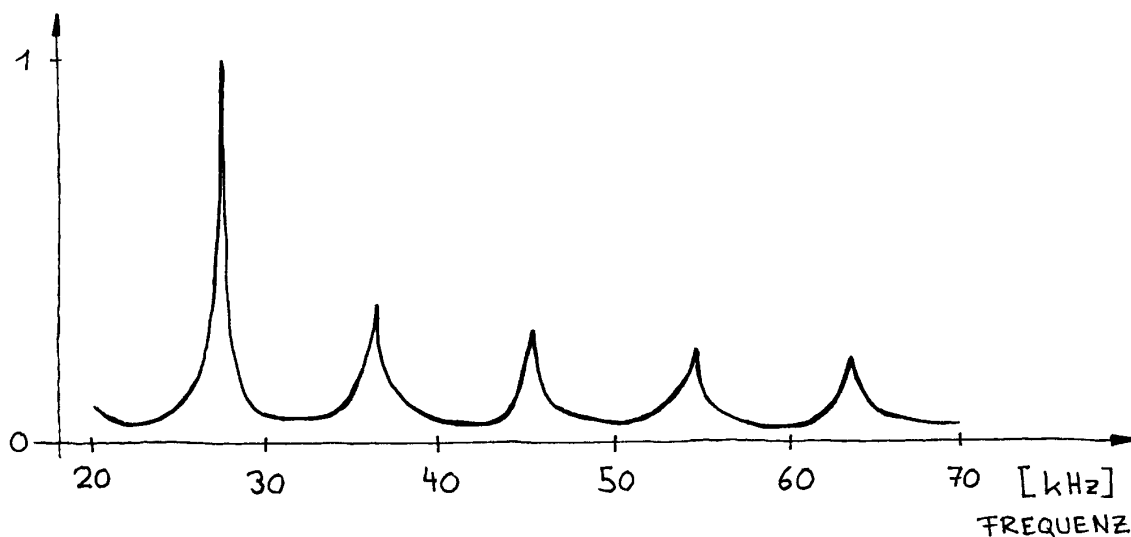


Bild 13.4: Störspektrum Mikrophon 1 bei belasteten Chopperrn

Die Chopper arbeiten mit einer Frequenz von 18kHz. Gut sichtbar sind die Oberwellen bei 36 und 54kHz.

Die Anteile bei 27 und 45kHz sind Oberwellen der halben Chopperfrequenz. Diese Störanteile sind auf die Ansteuerung der H-Brücke zurückzuführen.

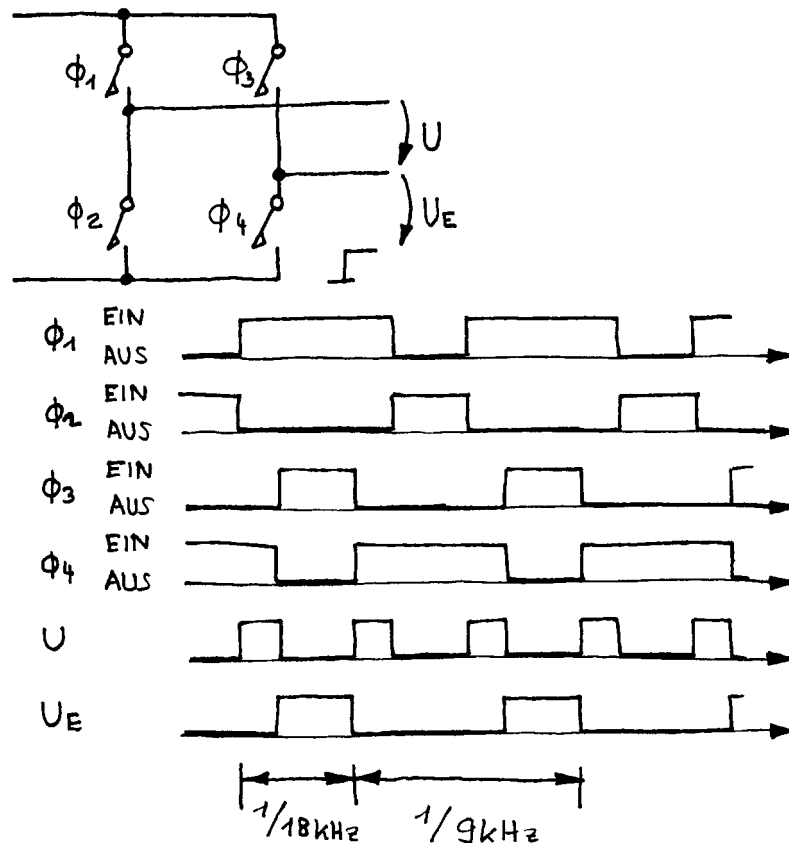


Bild 13.5: Ansteuerung der H-Brücke

### 13.5 Sendepuls

Für die Wahl des Pulses gibt es folgende Einschränkungen:

- Störeinflüsse
- Übertragungscharakteristik der US-Transducer
- starke, direkte akustische Kopplung bei tiefen Frequenzen (ausgeprägte Bodenwellen)
- schlechte Richtcharakteristik bei hohen Frequenzen

Nach etlichen Messungen haben wir den Bereich zwischen 35 und 50kHz gewählt.

Anforderungen an den Sendepuls:

- zeitbegrenzt, damit die Echos nicht überlappen
- hart frequenzbegrenzt, denn zu breitbandige Pulse würden beim Filter im Empfangsteil stark verschmiert
- maximale Leistung bei gegebener Amplitude (Begrenzung wegen US-Sender)

Wir haben uns aus diesen Gründen für einen mit einem Hanning<sup>2</sup>-Fenster gewichteten Sinus entschieden [Anhang F1].

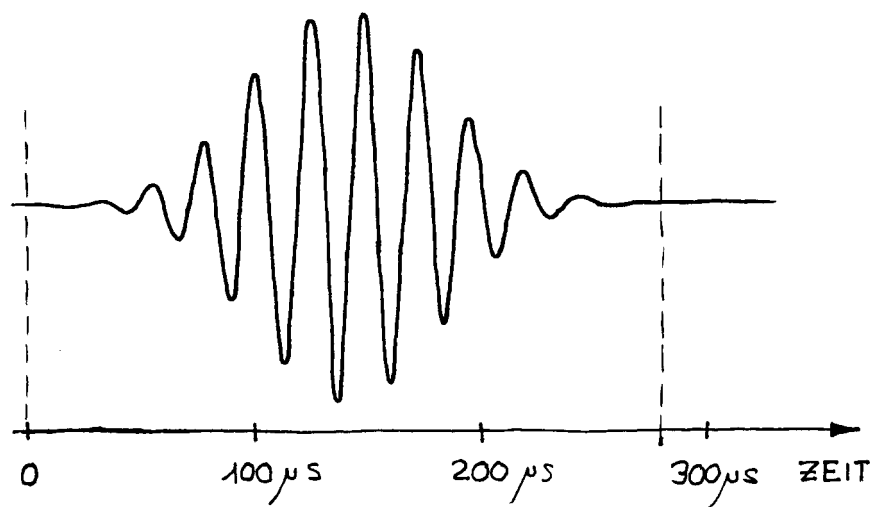


Bild 13.6: Sendepuls im Zeitbereich

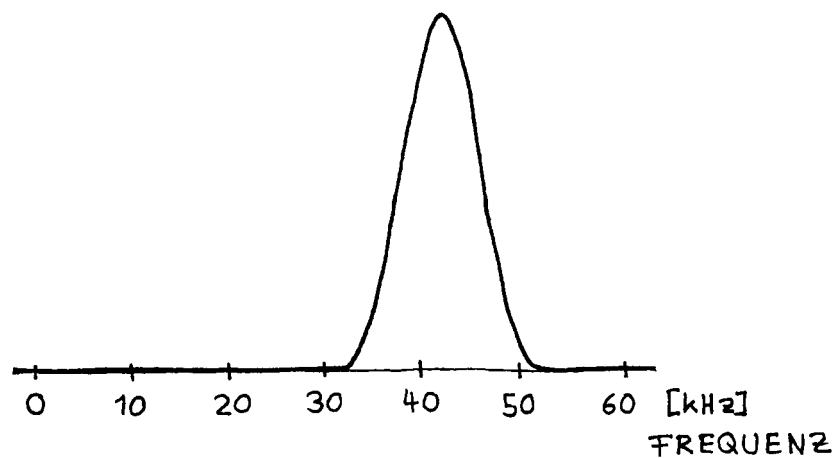


Bild 13.7: Amplitudendichtespektrum eines Sendepulses

### 13.6 Sendeeinheit

Die Sendeeinheit besteht im Wesentlichen aus dem Arbitrary Generator und drei Leistungsverstärkern, welche in der Sender Box untergebracht sind.

Der Sendeimpuls wird im Arbitrary Generator nach jedem Triggerimpuls vom RealITR generiert. Die US-Sender steuern wir mit einer Spannung von  $500V_{pp}$  an. Da wir auch noch die Zuleitungen treiben müssen, brauchen wir Leistungsverstärker. Wegen der hohen Spannung setzten wir Transformatoren ein [Anhang D6].

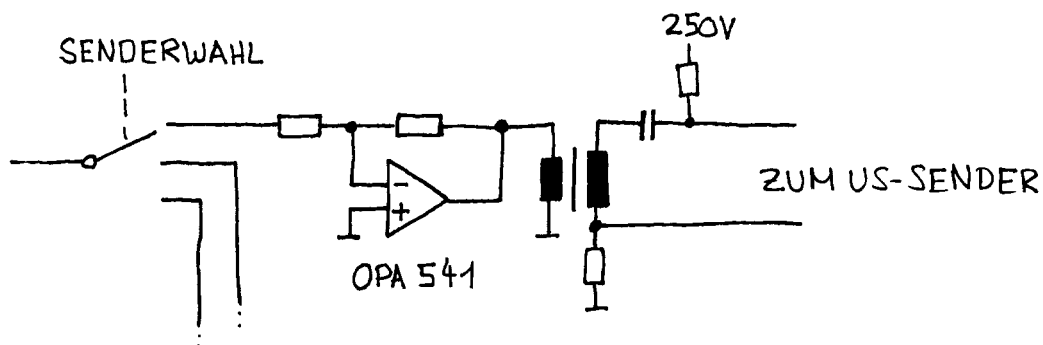


Bild 13.8: Leistungsverstärker und Transformator

Je nach Aufenthaltsort der Kugel müssen wir einen der drei US-Sender ansteuern. Da das Umschalten grosser Leistungen schwierig ist, haben wir für jeden Sender einen eigenen Leistungsverstärker eingesetzt.

### **13.7 US-Transducer**

Wir verwenden Breitband-Kondensator-Transducer (US-Sender und US-Empfänger). Für eine grosse Empfindlichkeit spannen wir die Transducer mit einer Gleichspannung von 250V vor. Diese Spannung erzeugen wir in einem gut abgeschirmten Modul, welches in der Sender Box untergebracht ist. Die Schaltung eines Blitzgerätes benutzen wir zur Spannungswandlung. Zum Schutz der Transducer stabilisieren wir die Spannung mit einem externen Regelkreis. Für den Personenschutz haben wir den Strom auf 2.5mA limitiert [Anhang D8].

#### **US-Sender**

Die US-Sender haben wir unmittelbar unter den Spulen befestigt.

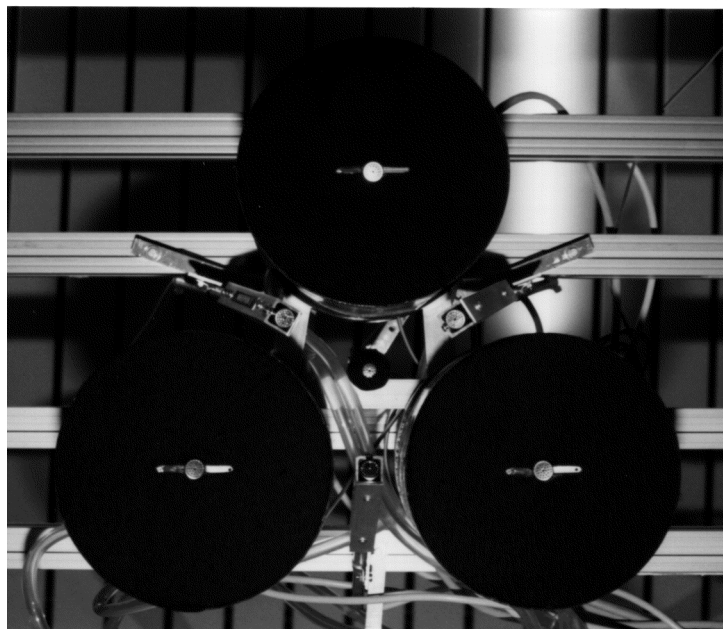


Bild 13.9: Spulenansicht mit US-Sendern und US-Mikrophonen

#### **US-Mikrophone**

Die Realisierung einer Halterung für die US-Mikrophone gestaltete sich sehr schwierig, da wir die genaue Position und Ausrichtung noch nicht kannten [Anhang E1]. Zudem muss eine Vorverstärkerschaltung zur Signalaufbereitung in dieser Vorrichtung untergebracht werden.

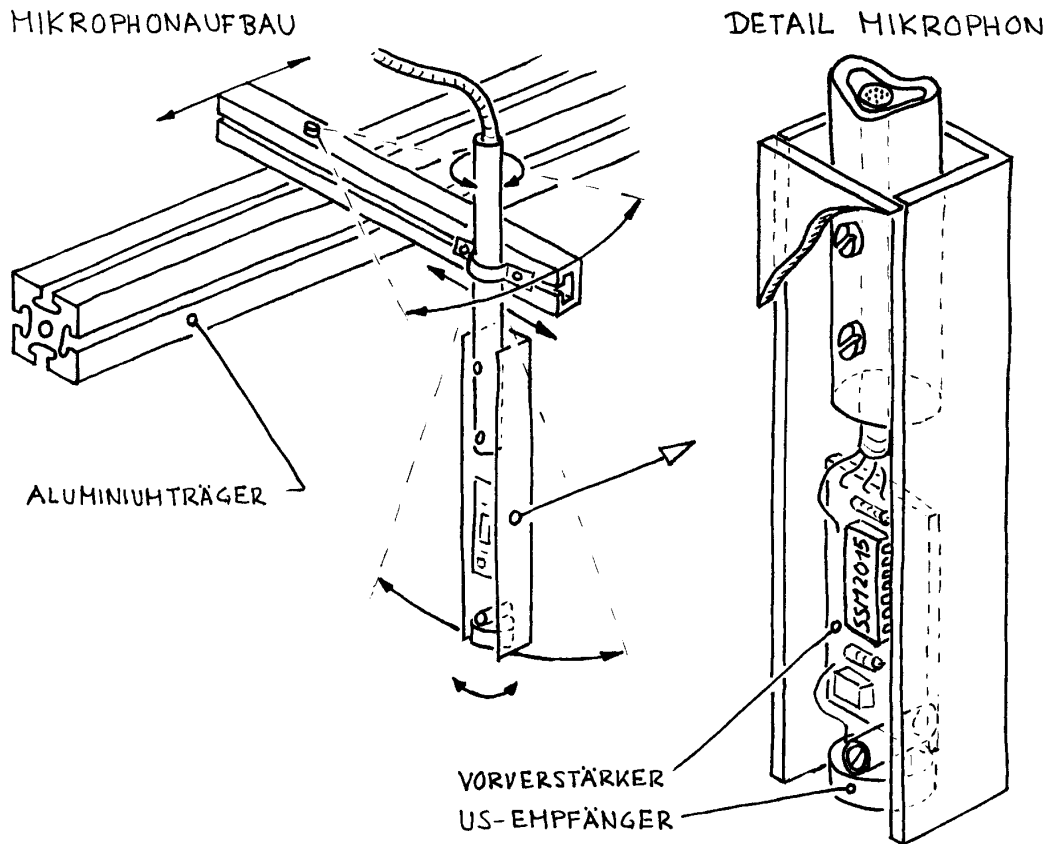


Bild 13.10: Aufbau der US-Mikrophon-Halterung

Ein Verstärker, welcher sich unmittelbar beim US-Empfänger befindet, verstärkt die Signale und treibt die langen Leitungen [Anhang E2].

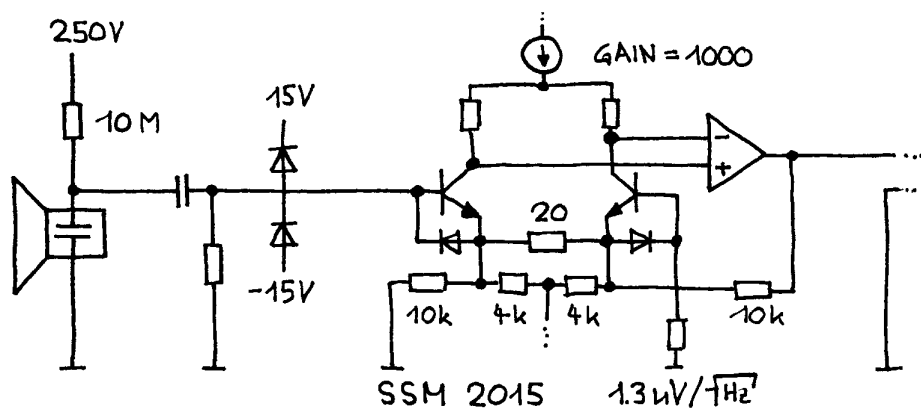


Bild 13.11: Schaltung des Mikrophon-Vorverstärkers

### 13.8 Akustischer Aufbau

Aus geometrischen, mechanischen und elektrischen Gründen entschieden wir uns, die Sender unterhalb der Spule und die Mikrophone dazwischen anzubringen. Zur Optimierung von Position und Ausrichtung der Sender und Mikrophone, machten wir diverse Experimente. Bei der Bestimmung der Kugelposition treten verschiedene akustische Probleme auf. Zum einen gibt es direkte Kopplung von Sender zum Empfänger und zum anderen hat man mit Reflexionen zu kämpfen, vorallem mit jenen des Fussbodens.

Die direkte akustische Kopplung rührt von Oberflächenwellen, welche vom Sender über die Spulenunterseite zum Empfänger laufen. Wir konnten diesen Einfluss beachtlich reduzieren, indem wir Filz auf der Unterseite der Spule aufklebten. Die Reflexionen vom Fussboden und von anderen Teilen konnten wir am effizientesten mit einem schräg aufgespannten Teppich unterdrücken. Der Teppich reflektiert den Schall in Richtung Zuschauer [Anhang F2].

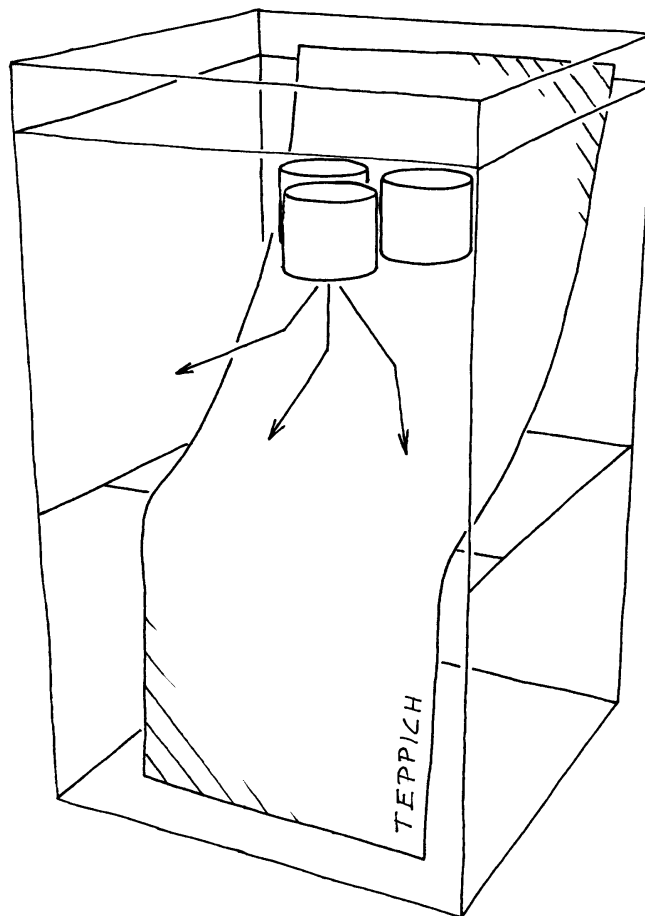


Bild 13.12: Teppich gegen Reflexionen



### 13.9 Bandpassfilter

Um Störungen neben dem Nutzfrequenzbereich wirksam zu unterdrücken, haben wir folgendes Bandpassfilter eingesetzt:

- untere Grenzfrequenz 35kHz
- obere Grenzfrequenz 50kHz
- Chebyshev-Verhalten mit 0,5dB Ripple
- 12. Ordnung

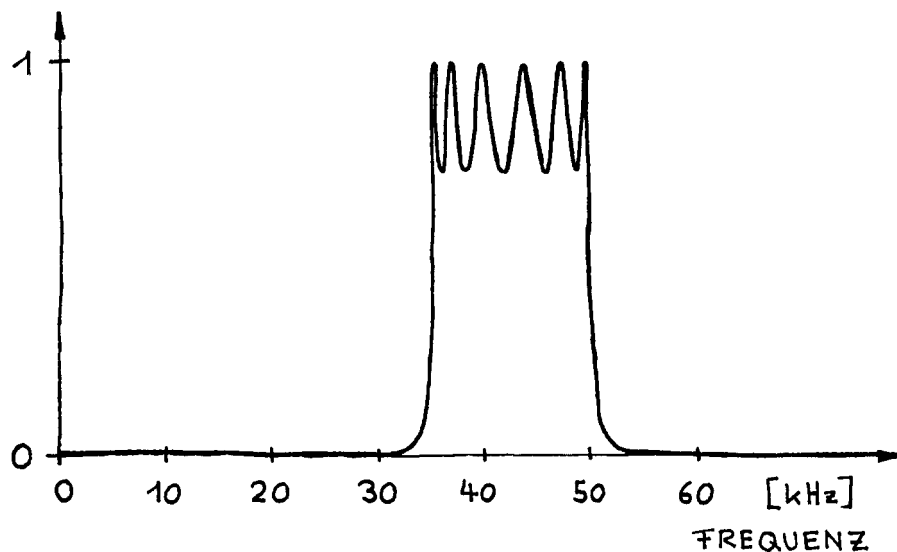


Bild 13.13: Amplitudengang vom Bandpass

Nach reiflicher Überlegung entschieden wir uns aus Aufwands- und Platzgründen SC-Filter zu verwenden. Durch Variation der Clockfrequenz ist es möglich, die Grenzfrequenzen aller vier Bandpassfilter (eines pro Mikrophon) miteinander zu schieben.

Die Dimensionierung des Filters war sehr aufwendig. Die Gainverteilung, die hohen Güten und Frequenzen waren problematisch. Wir mussten den heutigen Stand der SC-Technologie voll ausreizen.

Die Berechnungen zur Dimensionierung des Filters befinden sich im Anhang F3.

### 13.10 Gleichrichtung

Zur einfachen Detektion der Echos formen wir die empfangenen Signale um. Zuerst wird das Signal gleichgerichtet. Eine Schaltung aus Widerständen, Kondensatoren und einer Diode sorgt anschliessend dafür, dass ein Puls mit einer monoton steigenden Flanke entsteht.

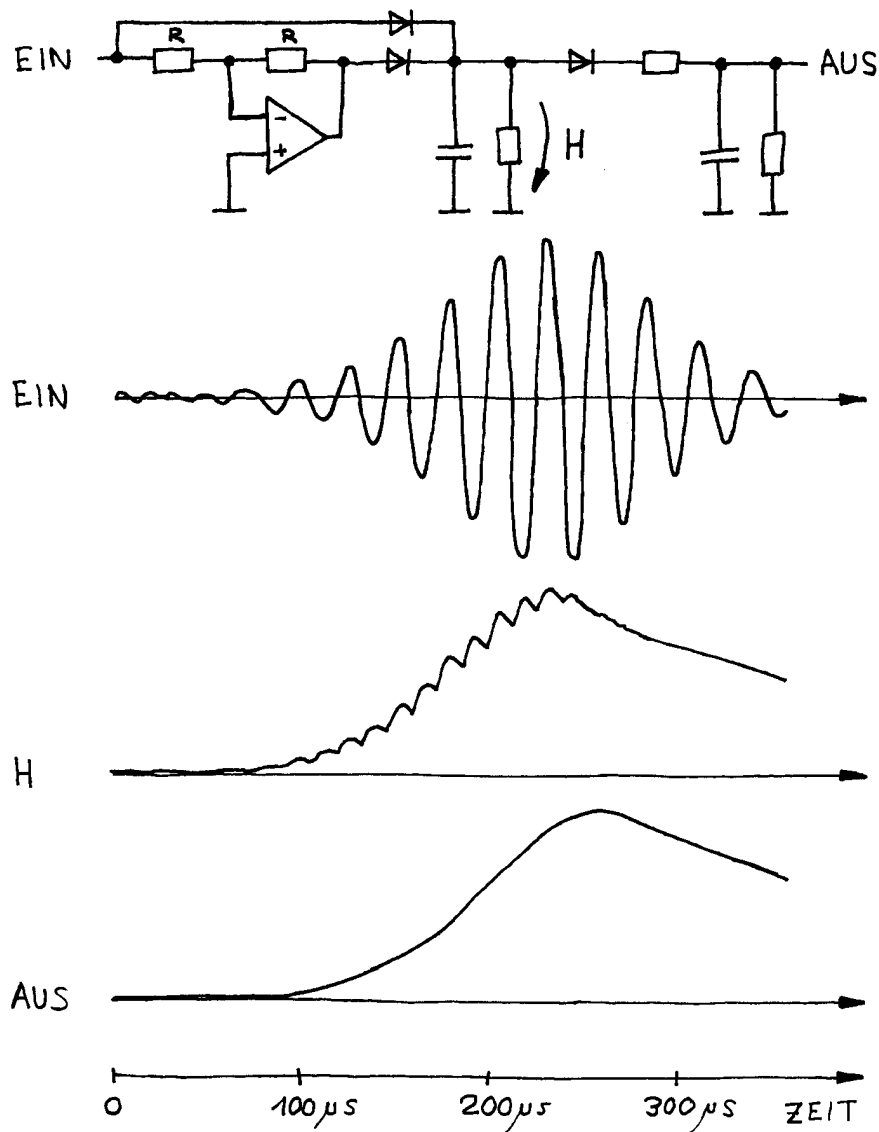


Bild 13.14: Funktion und Aufbau der Gleichrichterschaltung

Die Schwellwertdetektion erfolgt mit einer einfachen Komparatorschaltung.

### 13.11 Zeit→Spannungswandler

Das letzte Glied vor der Auswertung unter Matlab/Simulink ist der Zeit→Spannungswandler. Naheliegender für die Bestimmung einer Laufzeit ist die Verwendung einer Zählerkarte. Das Einbinden in Matlab/Simulink wäre jedoch sehr aufwendig.

Mit dem RealITR als Schnittstelle zum PC fanden wir schliesslich eine einfache und schnell realisierbare Lösung. Das RealITR stellt Analogeingänge zur Verfügung. Wir leiteten deshalb aus der akustischen Laufzeit eine Spannung ab.

Der Wandler besteht aus einem Rampengenerator, einer Sample&Hold-Schaltung und einer Ansteuerlogik.

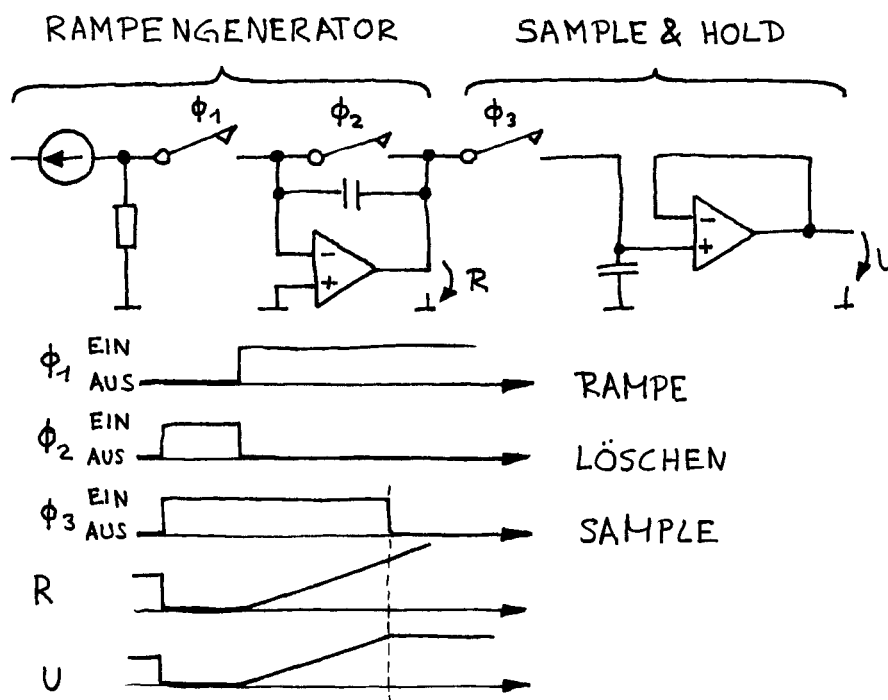


Bild 13.15: Zeit→Spannungswandler

Schemas zum Bandpassfilter, zur Gleichrichtung und zur Zeit→Spannungswandlung befinden sich im Anhang D7.

### 13.12 Berechnung der Kugelposition

Zuerst wollen wir ein wenig auf die Problematik bei der Bestimmung der Kugelposition eingehen.

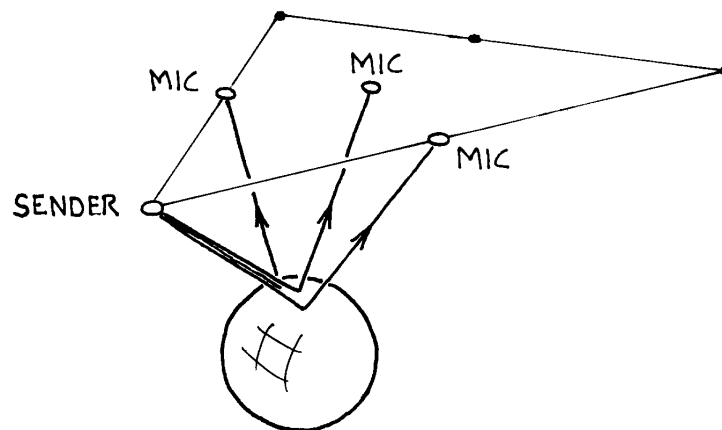


Bild 13.16: Schallreflexion an der Kugel

Alles was man für die Berechnung der Position kennt, sind die drei Schallaufzeiten.

Kennt man eine Laufzeit, so liegt die Kugel auf der Oberfläche eines Rotationsellipsoids, dessen Achse durch Sender und Mikrophon definiert ist.

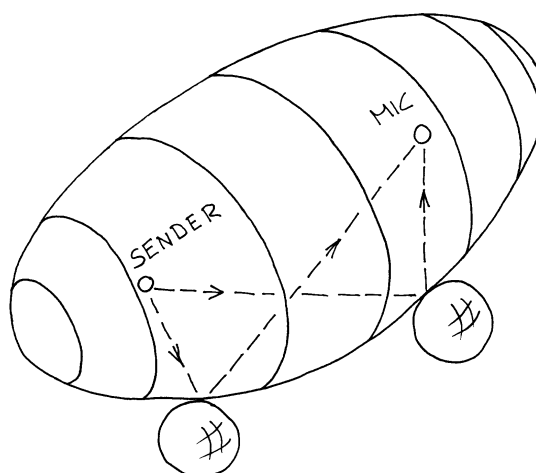


Bild 13.17: Aufenthaltsbereich, bestimmt mit einer Laufzeit

Für die Positionsbestimmung der Kugel muss derjenige Ort berechnet werden, an welchem die Kugel die drei Ellipsoide berührt und sich unterhalb der Spulen befindet. In jedem Abtastintervall muss der Ort berechnet werden. Ein geometrischer Ansatz ist damit ausgeschlossen.

Für die Realisierung mussten wir demzufolge einen anderen Lösungsansatz suchen. Wir haben die Laufzeiten an vielen verschiedenen Orten gemessen und damit eine Näherungsfunktion gebildet.

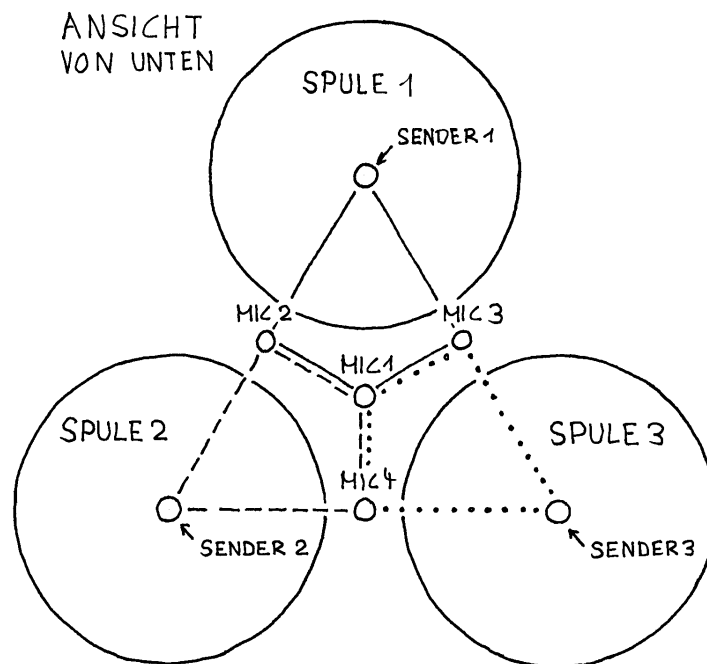


Bild 13.18: Senderbereiche

Im Bereich, der beispielsweise punktiert dargestellt ist, werden die Mikrophone 1, 3 und 4, sowie der Sender 3 verwendet.

Die Laufzeiten erfassten wir mit der Reglerumgebung (Matlab/Simulink). Wir schrieben ein Messprogramm. Die Messwerte portierten wir in Mathematica. Dort berechneten wir die Näherungspolynome für die Positionsbestimmung [Anhang F5].

Als Beispiel ist das Polynom für die Berechnung der X-Koordinaten im Senderbereich 3 aufgeführt:

$$X = 0.1471 + 0.1826 \cdot U1 - 0.1542 \cdot U1^2 - 0.0748 \cdot U3 \\ + 0.1601 \cdot U1 \cdot U3 - 0.0513 \cdot U3^2 - 0.1206 \cdot U4 \\ + 0.1660 \cdot U1 \cdot U4 - 0.0605 \cdot U3 \cdot U4 - 0.0600 \cdot U4^2$$

U1 = Spannung, welche Laufzeit zu Mikrophon 1 repräsentiert

U3 = " " " " " 3 "

U4 = " " " " " 4 "

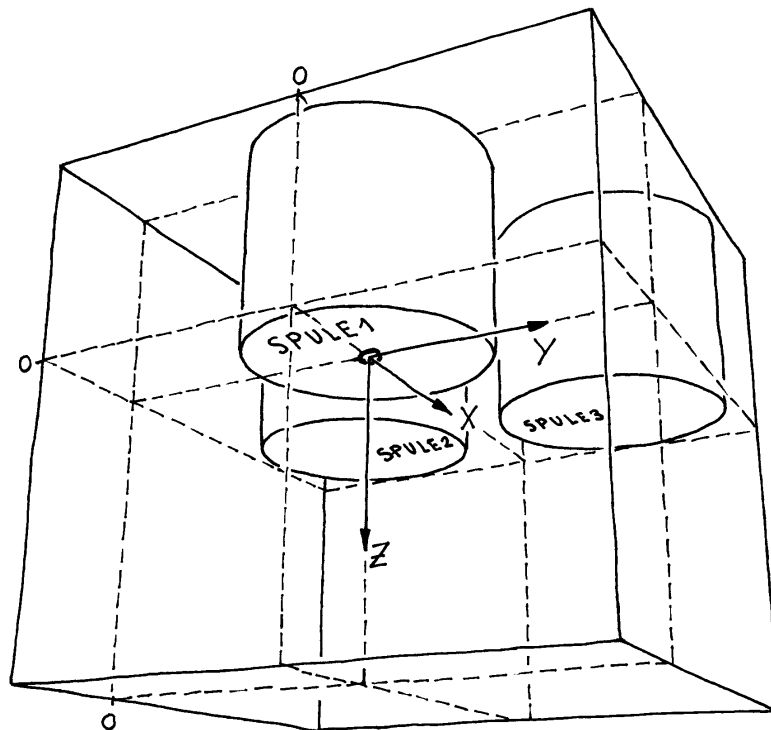


Bild 13.19: Koordinatensystem

Diese Polynome haben wir daraufhin in unser Messsystem eingebunden.

Mit dem in diesem Kapitel beschriebenen Aufbau der Positionserfassung können wir jeden Punkt im Haltebereich der Kugel innerhalb einer Abtastzeit erfassen.

## 14 Regelstrecke

### 14.1 Einführung

Der Kern der Regelstrecke besteht aus der B-Feldregelung, dem Spulen-Kugel-System und der Positionsbestimmung. Die Spulenansteuerung ist Teil der B-Feldregelung.

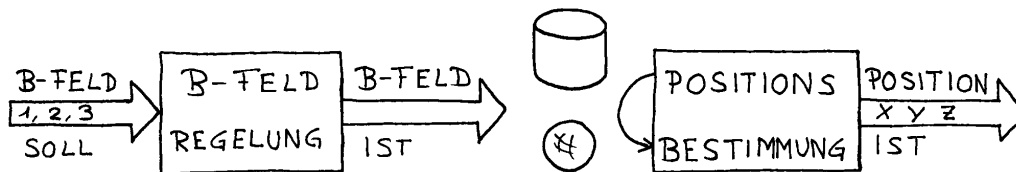


Bild 14.1: Kern der Regelstrecke

Der Kern der Regelstrecke besitzt je drei Ein- und Ausgänge. Der Eingang wirkt auf das B-Feld jeder Spule. Der Ausgang liefert den Ort der Kugel, welcher mit den X-, Y- und Z-Koordinaten beschrieben ist.

### 14.2 B-Feldregelung

Mit der B-Feldmessung waren wir in der Lage, eine B-Feldregelung vorzunehmen. Diese Regelung muss schnell und natürlich stabil sein. Eine schnelle Regelung kann nur mit kleinen Streckenzeitkonstanten erreicht werden.

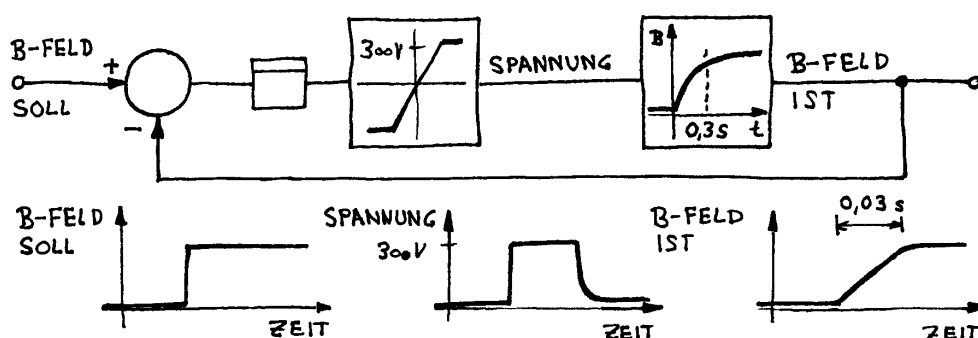


Bild 14.2: stark vereinfachte B-Feldregelstrecke

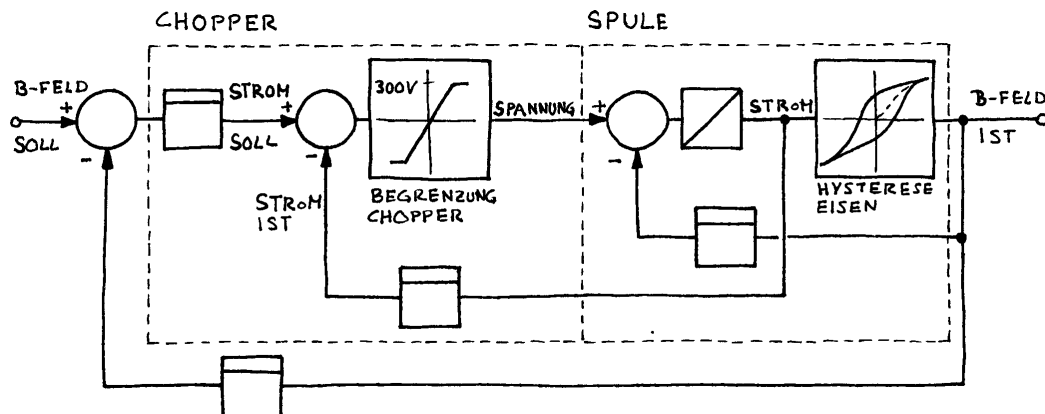


Bild 14.3: detaillierte B-Feldregelstrecke

Die Zeitkonstante einer Spule beträgt 300ms. Chopper für Motoransteuerungen haben eingebaute Filter, welche eine sanfte Regelung von DC-Motoren erlauben. Bei unserer Anwendung verursachen diese aber eine zusätzliche Phasendrehung, was zu Instabilität führt. Wir mussten daher die Chopper entsprechend modifizieren. Dazu brauchten wir natürlich deren Schemas, welche wir nach langem Hin und Her auch erhielten. Ohne grosse mechanische Veränderungen schafften wir es, die Schaltung für unsere Vorgaben abzuändern [Anhang B2].

Tests mit einem speziell generierten Signal zeigten uns, dass die Regelung des B-Feldes einwandfrei funktioniert. Hält man bei einem Test eine Blechkugel ins Magnetfeld, so spürt man die Kraftänderung, welche einem ein Gefühl für die Geschwindigkeit dieser Regelung verleiht.

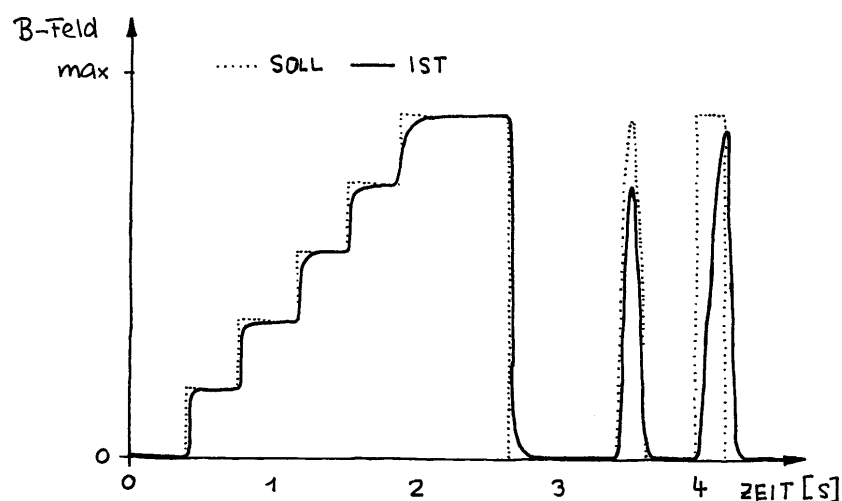


Bild 14.4: Geregeltes B-Feld, Testsequenz



### 14.3 Überblick zur Regelstrecke

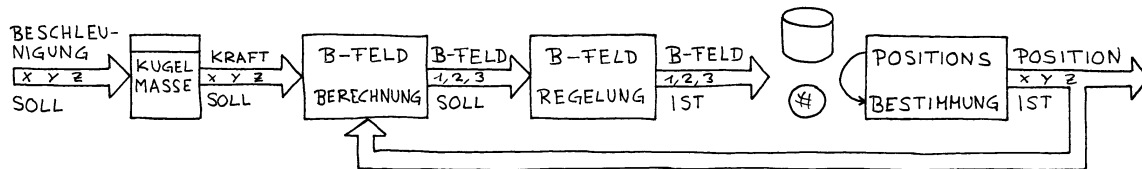


Bild 14.5: Die Regelstrecke

Mit der B-Feldberechnung linearisieren wir den nichtlinearen Kern der Regelstrecke.

### 14.4 B-Feldberechnung

Anhand eines Beispiels wollen wir die B-Feldberechnung erklären. Dabei befindet sich die Kugel an einem Ort in der Schwebe.

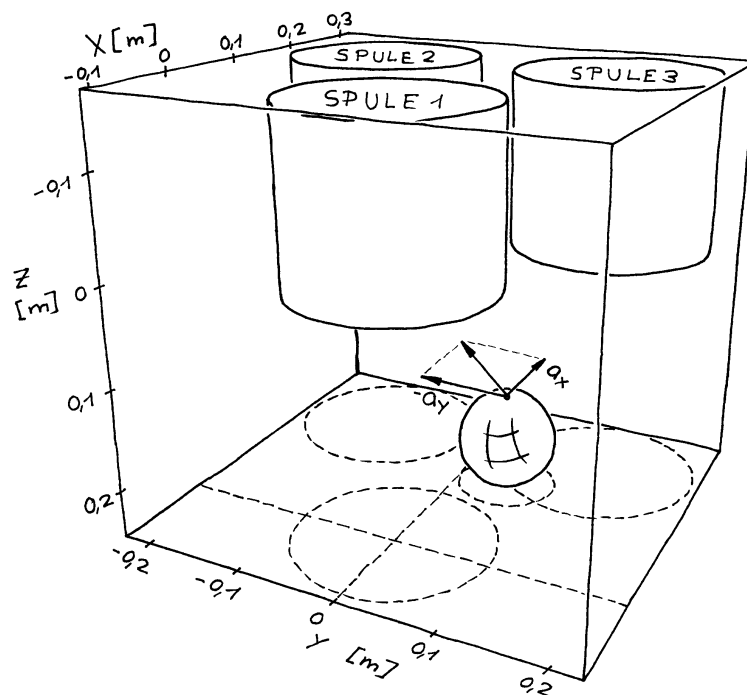


Bild 14.6: Die Kugel befindet sich am Ort ( $X = 0.15\text{m}$ ,  
 $Y = 0.05\text{m}$ ,  $Z = 0.15\text{m}$ , gemessen am obersten  
Punkt der Kugel) in der Schwebe

Die Kugel hat eine Masse von 0.1kg. Damit die Kugel an diesem Ort schwebt, müssen die B-Felder der Spulen folgende Werte haben:

B-Feld Spule 1 = 0.372 Tesla  
B-Feld Spule 2 = 0.266 Tesla  
B-Feld Spule 3 = 0.294 Tesla

Aufgabe: Die Kugel soll mit  $a_x = 1\text{m/s}^2$  in Richtung X und mit  $a_y = -1\text{m/s}^2$  in Richtung Y beschleunigt werden. Wie müssen dazu die B-Felder eingestellt werden?

Diese Frage kann nicht so einfach beantwortet werden.

Für eine Regelung der Kugelposition müssen aber genau solche Aufgaben gelöst werden.

Weshalb wird die Kugel überhaupt zu den Spulen gezogen? Grundsätzlich werden ferromagnetische Stoffe in Richtung grösserer Energiedichte gezogen, also in Richtung des Energiedichtegradienten. Dieser ist in unserem Fall abhängig vom Ort und vom Magnetfeld. Das Magnetfeld bestimmen wir in unserem System durch Messen der B-Feldstärke unter jeder Spule. Die Kraft auf die Kugel ist damit eine Funktion mit sechs Argumenten. Diese algebraisch zu berechnen ist extrem aufwendig. Zudem kennen wir die magnetischen Parameter unseres Systems zu wenig genau.

Es bleibt uns deshalb nichts anderes übrig, als unser System auszumessen und eine Näherungsfunktion zu bilden.

Wir haben den Raum unter den Spulen in die folgenden Bereiche aufgeteilt:

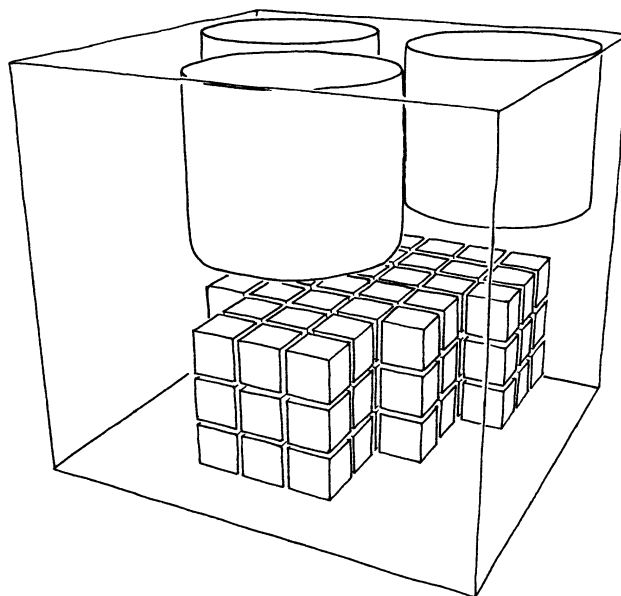


Bild 14.7: Bereiche für die Kraftmessungen

Im Zentrum jedes Würfels befindet sich ein Messpunkt. Bei jedem Messpunkt haben wir die Kraftwirkung auf die Kugel bei verschiedenen Feldeinstellungen gemessen. Insgesamt waren das rund 21'000 Messungen.

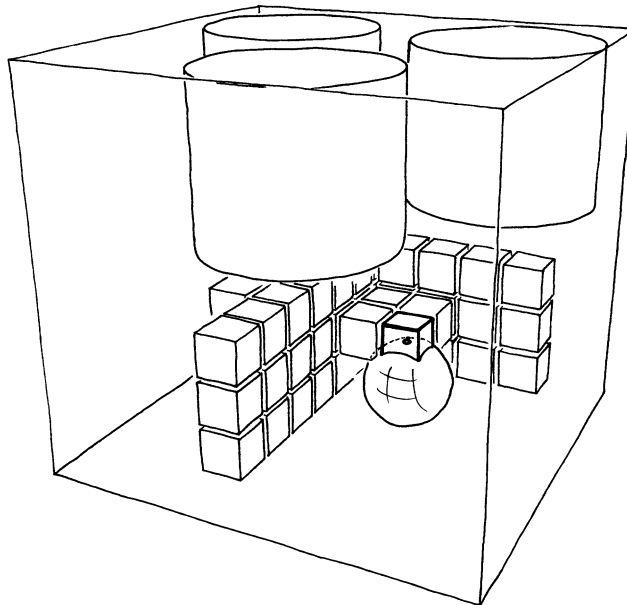


Bild 14.8: Bereich bei  $X = 0.15\text{m}$ ,  $Y = 0.05\text{m}$ ,  $Z = 0.15\text{m}$

In Mathematica haben wir für jeden Messpunkt eine Näherungsfunktion gebildet. Das Bilden dieser Näherungsfunktion ist umständlich und aufwendig. Wir verzichten hier auf die Beschreibung, da sie nicht zum Verständnis beiträgt [Anhang G2].

Die Antwort auf die oben gestellte Aufgabe lässt sich jetzt leicht finden. Zuerst kann man die für die gewünschte Beschleunigung benötigten Kräfte berechnen:

Kraft in Richtung Z	$F_Z = -$	$m \cdot g$	$= -1.0\text{N}$	(hält Kugel in der
Schwebe)				
Kraft in Richtung X	$F_X =$	$m \cdot a_X$	$=$	$0.1\text{N}$
Kraft in Richtung Y	$F_Y =$	$m \cdot a_Y$	$= -$	$0.1\text{N}$

Mit der Näherungsfunktion für den gegebenen Ort können nun die benötigten B-Felder der Spulen bestimmt werden.

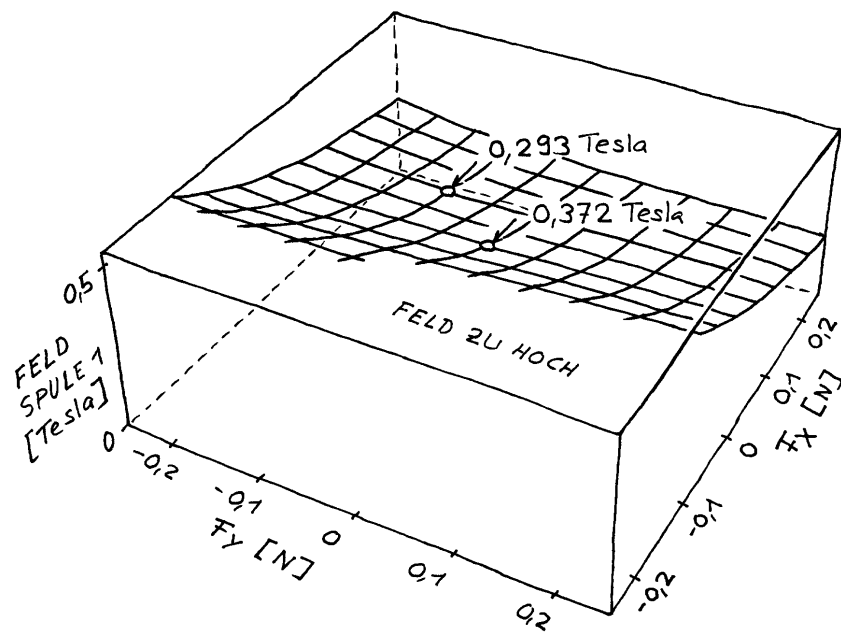


Bild 14.9: B-Feld Spule 1 in Abhängigkeit der Kraft  $F_X$  und  $F_Y$   
bei  $X = 0.15\text{m}$ ,  $Y = 0.05\text{m}$ ,  $Z = 0.15\text{m}$ ,  $F_Z = -1\text{N}$

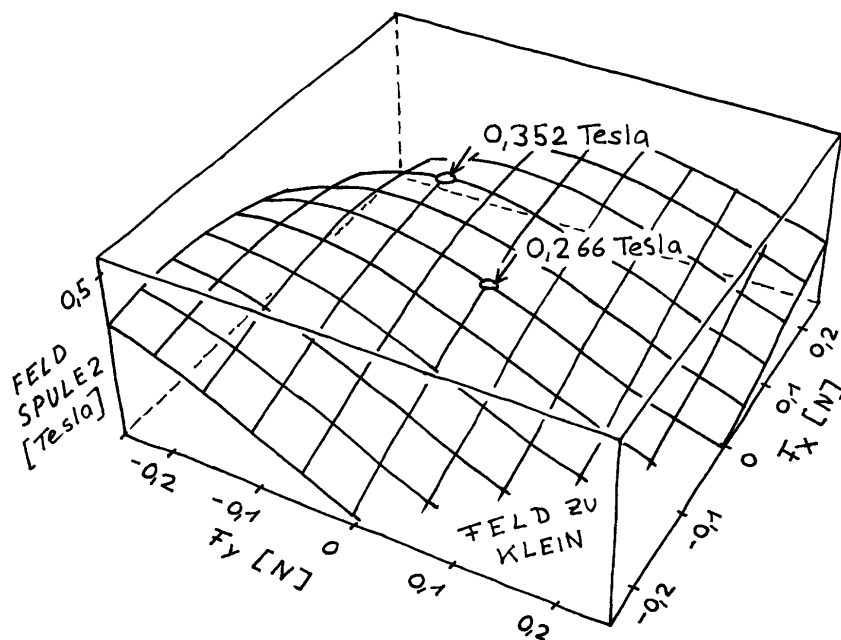


Bild 14.10: B-Feld Spule 2 in Abhängigkeit der Kraft  $F_X$  und  $F_Y$   
bei  $X = 0.15\text{m}$ ,  $Y = 0.05\text{m}$ ,  $Z = 0.15\text{m}$ ,  $F_Z = -1\text{N}$

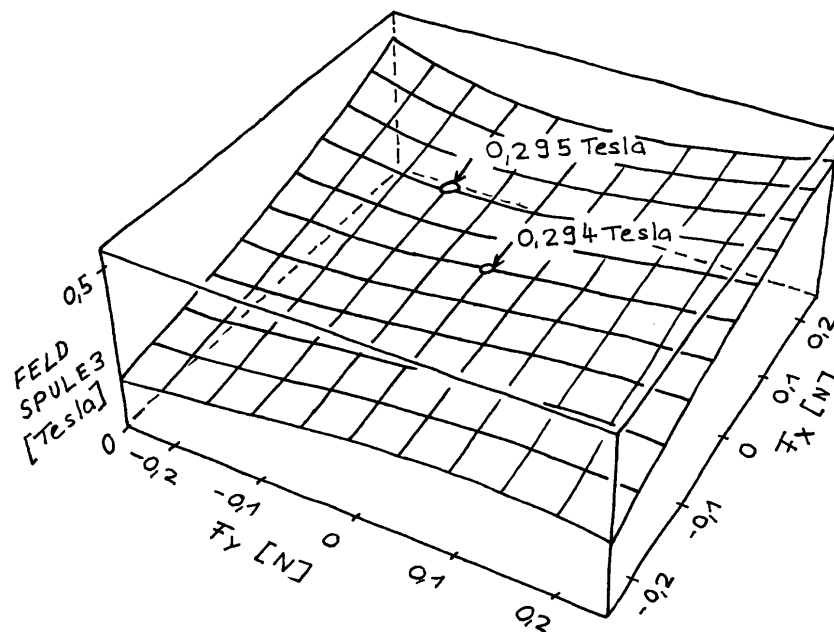


Bild 14.11: B-Feld Spule 3 in Abhängigkeit der Kraft  $F_X$  und  $F_Y$   
bei  $X = 0.15\text{m}$ ,  $Y = 0.05\text{m}$ ,  $Z = 0.15\text{m}$ ,  $F_Z = -1\text{N}$

Durch Interpolation lässt sich ein solches Problem für jeden Aufenthaltsort der Kugel lösen. Aus Rechenzeitgründen muss die B-Feldberechnung in C geschrieben sein. Diese Arbeit steht noch an.

## 15 Regelung

### 15.1 Linearisierung an einem Ort

Für die Inbetriebnahme unseres Systems bildeten wir ein einfaches Modell für den Kern der Regelstrecke. Damit war es möglich, die Kugel an einem Ort unter der Spule 1 schweben zu lassen.

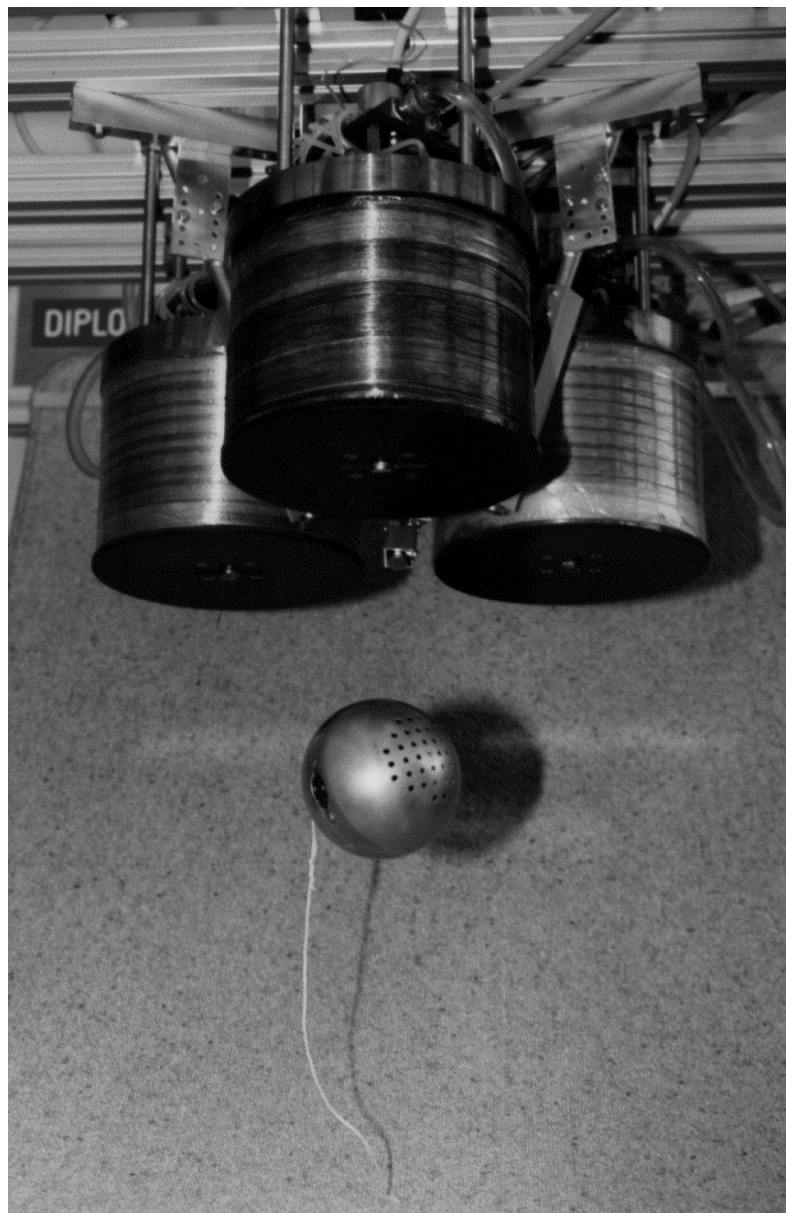


Bild 15.1: Hurra, sie schwebt!

Wir linearisierten den Zusammenhang zwischen der Kraft auf die Kugel, dem B-Feld und dem Abstand der Kugel zur Spule 1 im Betriebspunkt.

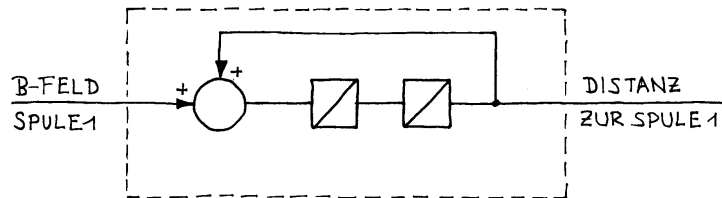


Bild 15.2: Blockschaltbild für den Kern der Regelstrecke

Die für die Regelung ungünstige Mitkopplung bringt zum Ausdruck, dass die Kraft auf die Kugel bei kleiner werdendem Abstand grösser wird.

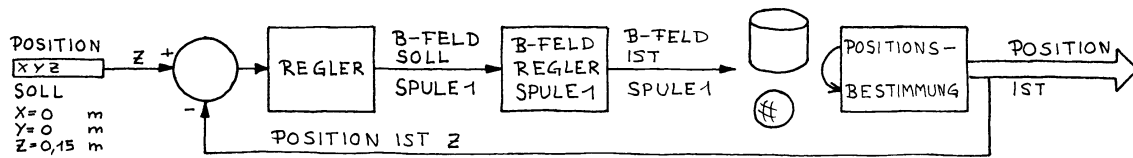


Bild 15.3: Regelung für den linearisierten Kern der Regelstrecke

Für dieses einfache Modell entwarfen wir einen PDT- und einen PIDT-Regler. Das Modell war ausreichend und die Kugel schwebte. Das Experiment hat gezeigt, dass unser System funktioniert.

## 15.2 Klassischer Regler

Damit die Kugel an irgend einem Ort im Haltebereich der Spulen bewegt werden kann, muss eine Regelung für alle drei Spulen vorgenommen werden. Die Struktur mit einem klassischen Regler sieht folgendermassen aus:

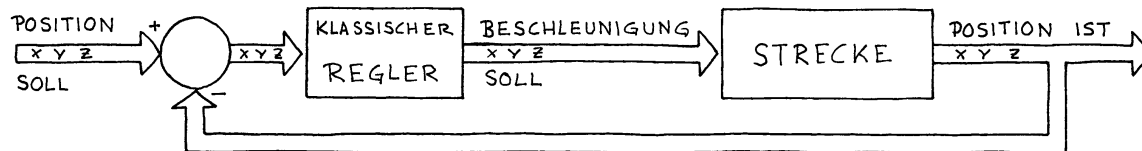


Bild 15.4: Klassische Reglerstruktur

Der Regler hat drei Ein- und drei Ausgänge (MIMO-System). Da die Komponenten X, Y und Z der Position unabhängig voneinander geregelt werden können, lässt sich der Regler in drei Teile aufteilen.

## 15.3 Zustandsregler

Ebenso kann für das Bewegen der Kugel ein Zustandsregler eingesetzt werden. Dieser hat den Vorteil, dass er auch innere Grössen des Systems mitberücksichtigt und deshalb robuster wird.

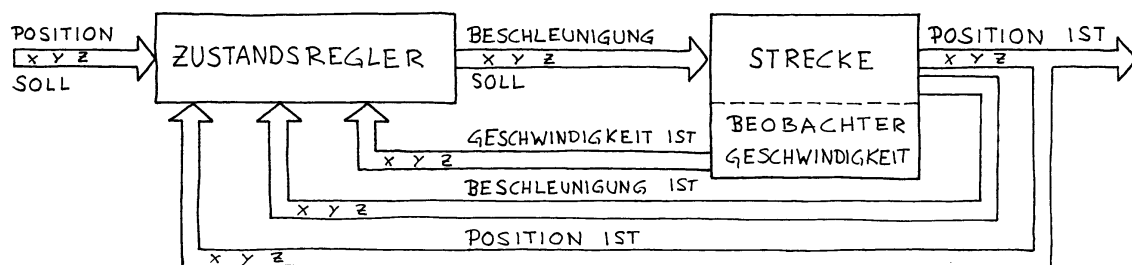


Bild 15.5: Struktur mit Zustandsregler



Damit die Geschwindigkeit (Zustand) gemessen werden kann, muss ein Beobachter eingesetzt werden.

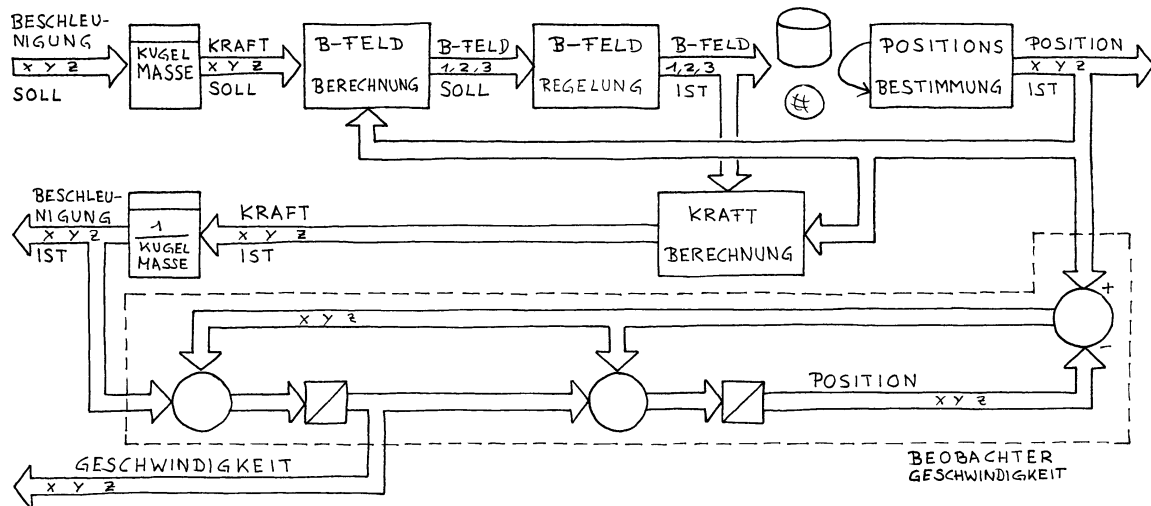


Bild 15.6: Strecke mit Beobachter für die Geschwindigkeit

Die Position erhält man direkt von der Strecke. Mit einer sogenannten Kraftberechnung und einer Umrechnung erhält man aus dem anliegenden B-Feld die Beschleunigung. Für die Geschwindigkeit wird die Beschleunigung integriert. Mit nochmaligem Integrieren erhält man die Position. Die Abweichung der berechneten von der gemessenen Position fließt als Korrekturgröße in den Beobachter für die Geschwindigkeit ein.

## **16 Schlusswort**

Die Arbeit hat uns viel Spass gemacht. Klar gab es auch manchmal Momente, in denen wir uns über unsere Zusage zu dieser Arbeit ärgerten. Vieles ging harzig, und die ständige Zügelei zwischen verschiedene Labors setzte uns auch zu. Auf alle Fälle haben wir viel gelernt. Falls unsere Arbeit weiterverwendet wird, hat sich unser Aufwand sicher gelohnt.

Das Projekt sorgte immer wieder für Aufsehen. Kein Tag, an dem sich nicht irgend jemand nach dem Sinn unserer Aufbauten oder dem Stand des Projektes erkundigte. Das magnetische Lagern einer Kugel ist spannend und das Interesse daran war entsprechend gross.

Die Zusammenarbeit klappte ausgezeichnet. Wir diskutierten oft stundenlang in der Kantine. Neue Ideen konnten am besten bei einem Spaziergang in Richtung Kinderzoo reifen. An die nette Stimme aus der Lautsprecheranlage, welche am Abend mitteilte, dass die Gebäude bald geschlossen würden, gewöhnten wir uns langsam.

Wir haben in der Zeit der Studienarbeiten und der Diplomarbeit viele interessante Gespräche geführt, viele spannende Tips und Anregungen erhalten. Unser Vorhaben wurde von vielen Seiten unterstützt.

Vielen Dank an:

W. Baumann, M. Bonanomi, G. Brügger, U. Denier, H. Domeisen, J. Erni, Herr Feurer, H. Gassmann, K. Haudenschild, S. Hungerbühler, P.S. Märki, J. Quednau, R. Riffel, E. Schneider, K. Schoch, A. Schüeli, P. Steiner, K. Sulzer, S. Temperli, M. Vetsch, U. Wilhelm, J. Zika, R. Zimmermann, ...

Vielen Dank auch an die manchmal vernachlässigten:

Sonja Rota und Yvonne Lütolf ("Chunsch hüt wiederemal früener? ")

## **17 Literaturverzeichnis**

- |      |  |                     |
|------|--|---------------------|
| [1]  | VALVO Permanentmagnete II  | ITR 300025:2        |
| [2]  | Der Differentialflussmagnet  | ETH 99089           |
| [3]  | Magnetlager  | ETH 425 541         |
| [4]  | Elektrische Maschinen  | ITR 320029:1        |
| [5]  | Ein Beitrag zur Bestimmung von<br>Abständen in Luft mit Ultraschall  | ETH HA1926          |
| [6]  | New Developments in Ultrasonic Transducers<br>and Transducer Systems   | ETH P713011:1733    |
| [7]  | Hochauflösende Ultraschallentfernungs-<br>messung mit echtzeitfähiger, digitaler<br>Signalverarbeitung für den industriellen Einsatz | ETH HB5412          |
| [8]  | Berechnung und Optimierung induktiver<br>Luftultraschall-Impulssender  | ETH 943322:1983/10H |
| [9]  | Ein Verfahren zur Konstruktion anwen-<br>dungsoptimierter Ultraschallsensoren<br>auf der Basis von Schallkanälen                     | ETH P413249:185     |
| [10] | Technische Akustik   | ISBN 3-8023-0063-7  |
| [11] | Fortgeschrittene Verfahren zur ultraschall-<br>basierten Objekterkennung in der Robotik  | ETH HA15898         |
| [12] | Regelungstechnik mit PC-Simulation   | ISBN 3-7723-6954-5  |
| [13] | RealITR Version 1.1 User's Manual  | ITR Rapperswil      |