



Ekkehard W. Müller

Konzeption, Bau und Inbetriebnahme eines
Foucaultschen Pendels am Kirchhoff-Institut für Physik

Staatsexamensarbeit

HD-KIP-03-03

**Konzeption, Bau und Inbetriebnahme
eines Foucaultschen Pendels
am Kirchhoff-Institut für Physik**

Staatsexamensarbeit

vorgelegt von Ekkehard W. Müller

Betreuer:
Prof. Dr. K. Meier

5. Mai 2003

Kirchhoff-Institut für Physik
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Inhaltsverzeichnis

	<i>Seite</i>
1. Einleitung	3
2. Der Foucault-Effekt	7
2.1. Die Entdeckung des Foucault-Effekts	7
2.2. Biographie Jean L. Foucault	8
2.3. Theoretische Herleitung des Foucault-Effekts	10
2.4. Der Foucault-Effekt am Breitengrad von Heidelberg	16
3. Das Foucaultsche Pendel am Kirchhoff-Institut für Physik	19
3.1. Entstehungsgeschichte	19
3.2. Detailbeschreibung der einzelnen Komponenten	23
3.2.1. Aufhängung	23
3.2.1.1. Bemessung der Befestigungsdübel	23
3.2.1.2. Deckeninstallation	23
3.2.2. Charron-Ring	24
3.2.2.1. Geschichte des Charron-Rings	26
3.2.3. Pendelseil, Pendelkugel	26
3.2.4. Holzplatte	28
3.2.5. Kippstifte	29
3.2.6. Antriebselektronik der Magnetspule	30
3.2.7. Magnetspule	33
3.2.8. Internetpräsentation	35
3.2.9. Präsentationstafel	36
3.2.10. Technische Daten	36
3.3. Das Foucaultsche Pendel an der Universität Osnabrück	37
4. Messungen mit dem Foucault-Pendel	39
4.1. Bestimmung der Erdbeschleunigung	39
4.2. Bestimmung des Breitengrads	42
4.3. Messung der Antriebselektronik	47
5. Zusammenfassung	49
Anlage A	51
Anlage B	71
Anlage C	79
Anlage D	85
Danksagung	89
Bibliographie	91
Erklärung	93

Kapitel 1

Einleitung

Zeitgleich mit der Grundsteinlegung des 1. Bauabschnitts des Neubaus der Physikalischen Institute der Universität Heidelberg wurde am 02. November 1999 das Kirchhoff-Institut für Physik gegründet. Dieses ging aus den bis dahin getrennt arbeitenden Instituten für Hochenergiephysik und für Angewandte Physik hervor. Im Herbst 2002 konnte es das nunmehr fertiggestellte Gebäude im Neuenheimer Feld 227 beziehen. Am 5. November 2002 wurde ich mit der Staatsexamensarbeit „Konzeption, Bau und Inbetriebnahme eines Foucaultschen Pendels am Kirchhoff-Institut für Physik“ beauftragt. Bereits vor Planungsbeginn war man sich innerhalb des Instituts darüber einig, auf der Nordseite des Gebäudes ein solches Pendel zu errichten. Der Nordflur des Gebäudes bot sich zum einen wegen seiner Höhe als Standort an und zum anderen ist das Pendel wegen der dort befindlichen Glasfassade auch von außen sichtbar. Da direkt vor der Nordseite des Kirchhoff-Instituts einer der drei zentralen Zugänge zum Neuenheimer Feld verläuft, wird hier das Foucaultsche Pendel ideal präsentiert. Jeder Passant bemerkt nun schon vor Betreten des Gebäudes, dass die physikalische Forschung ins Neuenheimer Feld Einzug gehalten hat. Neugierig gewordene Besucher haben die Möglichkeit, das Foucaultsche Pendel zu besichtigen - denn über die große Treppe in der Magistrale des Kirchhoff-Instituts gelangt jeder Interessierte zu der angebrachten Informationstafel und dem Pendel.

Da das Foucaultsche Pendel direkt an der Gebäudedecke befestigt ist und sich die Schwingungsebene knapp über dem Fußboden des ersten Stockes befindet, ergibt sich eine Pendellänge von über 11 m. Die daraus resultierende Schwingungsdauer der ungefähr 70 kg schweren Pendelkugel aus Messing beträgt 6,7 s. Sichtbar gemacht wird der die Erddrehung zeigende Foucault-Effekt mit Hilfe von 48 kreisförmig angeordneten Kippstiften, die alle 40 Minuten nach und nach durch die Pendelkugel umgestoßen werden.

Bereits während die Feinmechanische Werkstatt des Kirchhoff-Instituts die Einzelteile gefertigt hat, wurde deutlich, dass ein großes Interesse an Besichtigungsterminen seitens umliegender Schulen besteht. Darauf hatten uns auch schon die

Betreuer des Foucaultschen Pendels der Universität Osnabrück hingewiesen, deren Pendelaufbau dem Foucault-Pendel des Kirchhoff-Instituts als Vorbild gedient hat. Wie schon in Osnabrück gelingt es hoffentlich auch in Heidelberg, durch die Errichtung des Foucaultschen Pendels Schüler für das Fach Physik zu begeistern und einen Anstoß für ein späteres Physikstudium zu geben. Die Möglichkeit, Schulklassen im Kirchhoff-Institut mit Hilfe des Foucault-Pendels auf anschauliche Weise zeigen zu können, dass sich die Erde tatsächlich dreht, ist ein weiterer Schritt hin zu einer engeren Zusammenarbeit von Schulen mit der Universität. Als eine bereits etablierte Einrichtung ist der jährlich stattfindende Schülertag der Fakultät für Physik zu nennen. Darüber hinaus gibt es weitere Projekte der Fakultät wie z. B. die Kurzfilme „Anderthalb Minuten“ und das Projekt „Physik mit 10“.

Da das Foucaultsche Pendel am Kirchhoff-Institut auch mit einer eigenen Internetseite auf der Institutsseite vertreten ist, werden über die täglich vorbeilaufenden Passanten hinaus auch andere physikalisch Interessierte angesprochen. Die im Internet veröffentlichten Bilder, Texte sowie die live gesendeten Kameraaufnahmen sollen zum Nachdenken anregen und einen realen Besuch folgen lassen. Speziell für den Besuch von Schulklassen wurde eine Informationsbroschüre erarbeitet, in der jede Schülerin / jeder Schüler daheim noch einmal alles Wichtige nachlesen und verstehen kann.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in die drei Abschnitte „Der Foucault-Effekt“, „Das Foucault-Pendel am Kirchhoff-Institut“ und „Messungen mit dem Foucault-Pendel“. Im ersten Abschnitt wird über den Physiker Jean L. Foucault biographisch berichtet, ebenso über die historische Einordnung der Entdeckung des Foucault-Effektes. Im Anschluss daran wird der Foucault-Effekt theoretisch betrachtet. Die Lösung der Differentialgleichung wird für das Heidelberger Foucault-Pendel berechnet und graphisch dargestellt. Auf den Einfluss des Breitengrads wird ebenfalls gesondert eingegangen. Im zweiten Abschnitt wird dann über die Entstehungsgeschichte des Foucault-Pendels am Kirchhoff-Institut berichtet. Weiterhin werden alle Einzelteile von der Deckenaufhängung bis hin zur Internetpräsentation beschrieben. Als Abschluss des zweiten Abschnittes wird noch kurz über unser Vorbild am Fachbereich Physik der Universität Osnabrück berichtet. Im letzten Kapitel der vorliegenden Arbeit werden die beiden mit dem Pendel durchgeführten Messungen beschrieben: Die Bestimmung der Erdbeschleunigung und die Bestimmung des Breitengrades von Heidelberg.



Abb. 1.1.: Das Kirchhoff-Institut gespiegelt in der Pendelkugel

Mit freundlicher Genehmigung von Jennifer Duwe

Kapitel 2

Der Foucault-Effekt

In diesem Kapitel wird im ersten Abschnitt die Entdeckung des Foucault-Effekts im Jahre 1851 und dessen Bedeutung für die damalige Wissenschaft beschrieben. Der zweite Abschnitt beschreibt das Leben von Jean L. Foucault. Die theoretische Herleitung des nach ihm benannten Effekts wird in Abschnitt drei dargestellt. Der vierte Abschnitt dieses Kapitels leitet die Tatsache her, dass die Schwingungsebene des in Heidelberg aufgestellten Pendels in 24 Stunden keine Drehung von 360° ausführt, sondern die Pendelebene sich lediglich um knapp 275° gegenüber dem Beobachter dreht.

2.1. Die Entdeckung des Foucault-Effekts

Die Vorführung des Foucault-Effekts 1851 war der erste direkte Beweis für die Rotation der Erde, der ohne Bezugspunkte im Weltall auskam. Die Erkenntnis, dass sich die Erde um ihre Polarachse dreht, war schon im Jahre 250 v. Chr. von Erathostenes beschrieben worden, doch fiel es in der damaligen Zeit schwer, die Bevölkerung von der sich drehenden Erde zu überzeugen. Bis zum Mittelalter war man ja noch von der Scheibenform der Erde überzeugt. Die Erde wurde als Mittelpunkt des Weltalls angesehen. Die Wissenschaft war also gefordert, Beweise zu liefern, die jedermann nachvollziehen konnte. Die ersten Versuche, die Erdrotation anschaulich zu erklären, unternahm Johannes Kepler mit der Veröffentlichung der drei Keplerschen Gesetze, mit denen die Planetenbewegung mathematisch beschrieben werden konnte. Doch erst Isaac Newton legte mit den Axiomen der Mechanik, speziell mit dem Trägheitsbegriff, den Grundstein für die Entdeckung des Foucault-Effekts. J. Kepler und I. Newton wirkten im 17. Jahrhundert.

Dann folgte der erste praktische Versuch eines Nachweises: Man ließ einen Stein in einen tiefen Schacht fallen. Die Ablenkung von seiner Ausgangslage sollte gemessen werden. Jedoch war der Schacht nicht tief genug, um eine signifikante Abweichung feststellen zu können. (I. Newton hatte die Abweichung des Steins nach Osten vorhergesagt.) Sowohl Simeon Poisson als auch Gaspard Coriolis beschäftigten sich in der

Folgezeit mit rotierenden Bezugssystemen. S. Poisson untersuchte die Ablenkung von Gewehrkugeln auf der Erde und konnte damit die Rotation der Erde zeigen. Seine Ergebnisse machte er jedoch nicht so publik, dass eine breite Mehrheit davon Kenntnis bekommen konnte. G. Coriolis beschrieb dann die nach ihm benannte Corioliskraft, die J. Foucault letztendlich für den Bau des Foucault-Pendels verwertete. Das erste Pendel, welches J. Foucault am 3. Januar 1851 baute, war nur etwas länger als 2 m und hing im Keller seines Wohnhauses. Um das Pendel exakt auslenken zu können, befestigte J. Foucault es an einem dünnen Faden in ausgelenkter Stellung und brannte den Faden anschließend durch. So war gewährleistet, dass keine störenden Tangentialkräfte beim Anstoßen auftraten. Der solche Störungen vermeidende Charron-Ring war noch nicht erfunden. Doch die Tangentialkräfte waren nicht das größte Problem. In den ersten Versuchen ist immer der Draht am Aufhängepunkt gerissen. Dieses Problem war einige Tage später gelöst, so dass am 3. Februar 1851 der zweite Versuch in der Pariser Sternwarte an einem 12 m langem Pendel öffentlich gestartet werden konnte. Ende März wurde dann die dritte Versuchsreihe durchgeführt, diesmal im Panthéon, einer Pariser Abteikirche. Das dritte Pendel war nunmehr 67 m lang und besaß eine 28 kg schwere Kugel. Die für Paris errechnete Drehung der Achse von 270° pro 24 h trat dann auch ein.

Interessant ist, dass bereits 208 Jahre vor J. Foucault der Italiener Vincenzio Viviani im Jahre 1643 in Rom im Prinzip den Foucaultschen Pendelversuch vorführte - doch war es ihm nicht gelungen, den Versuch einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen, so dass der eigentlich erfolgreiche Versuch wieder in Vergessenheit geriet.

2.2. Biographie Jean L. Foucault



Abbildung 2.1.: Jean L. Foucault

Jean Foucault wurde am 18. September 1819 in Paris geboren. Über die Eltern ist nur bekannt, dass der Vater als Verleger und Verlagsbuchhändler tätig war. Im Hinblick

auf die umfangreiche spätere Ausbildung J. Foucaults ist ein wohlhabendes Elternhaus zu vermuten. Im Alter von zehn Jahren wurde er auf das „Colleg Stanislas“ in Paris geschickt. Doch der als weder folgsam noch strebsam auffallende Schüler musste die Schule bald darauf verlassen, da sich der Direktor außerstande sah, ihm weiterhin Unterricht zu erteilen. In den folgenden Jahren wurde der Schüler J. Foucault dann von einem Privatlehrer unterrichtet. Nach erfolgreicher Beendigung seiner Schulausbildung begann J. Foucault das Studium der Medizin an der Universität Paris. Von dieser Zeit ist nicht viel bekannt - in einigen Werken wird über die Ekelgefühle berichtet, die er beim Sezieren gehabt haben soll und wegen derer er sein Studium abbrach. Nach einer weiteren Zeit als Assistent eines namentlich nicht bekannten Wissenschaftlers, der auf dem Gebiet der Optik, speziell der Mikroskopie, tätig gewesen sein soll, wechselte J. Foucault 1844 im Alter von 25 Jahren von der Universität Paris an das „Journal de Debat“, wo er als wissenschaftlicher Berichtersteller tätig war.

Hier kam es nun zu einer für die Wissenschaft wichtigen Begegnung mit dem nur fünf Tage jüngeren Armand Fizeau. Zusammen forschten J. Foucault und A. Fizeau bis 1851 an der Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft und Wasser. Um 1846 wurde die Methode der Messung mit Hilfe eines Zahnrades und wenig später die Drehspiegelmethode vorgestellt. Mit der Methode der Drehspiegelung war es dann möglich, die Lichtgeschwindigkeit in Luft mit 298.000 km/s anzugeben. Außerdem stellten beide Forscher fest, dass die Lichtgeschwindigkeit in Wasser geringer ist als in Luft. J. Foucault erkannte die Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit in Materie vom Reziproken des Brechungsindex der jeweiligen Materie. Zeitlich parallel zu der Forschung auf dem Gebiet der Optik hat sich J. Foucault auch mit der Erforschung von Wirbelströmen in Metallen beschäftigt. Im Jahre 1851 stellte er dann einer breiten Öffentlichkeit in der Pariser Abteikirche Panthéon das als „Foucault-Pendel“ in die Geschichte eingegangene 68m lange Fadenpendel vor, welches auf eindrucksvolle Weise die Drehung der Erde demonstrierte. Wenig später stellte er das von ihm erfundene Gyroskop vor, mit dem man die Kräfte, die auf einen Kreisel wirken, messen kann. Für all diese Verdienste erhielt J. Foucault im Jahre 1850 die höchste Auszeichnung, die von der Societé Royal vergeben wird, die „Medaille Copley de la Societé Royal de Londres“. Diese wurde ihm insbesondere für die Erforschung von Wirbelströmen in Metallen verliehen.

Im Jahre 1855 begann J. Foucault dann Forschungen am Observatorium in Paris. Auf ihn geht die Entwicklung eines Spiegelfernrohres zurück, mit dem eine erheblich bessere Auflösung und Vergrößerung als mit den damaligen Linsenfernrohren möglich war. Mit dem von J. Foucault entwickelten Fernrohr konnten erste Spektren von Himmelskörpern aufgenommen werden. Knapp zehn Jahre später wurde ihm dann erneut eine Auszeichnung verliehen: Er wurde Mitglied des „Institut de France“. Im Jahr 1866 erkrankte er an Aphasie, die zu einer vollständigen Erblindung und Taubheit führte, am 11. Februar 1868 starb er in seiner Geburtsstadt Paris.

2.3. Theoretische Herleitung des Foucault-Effekts

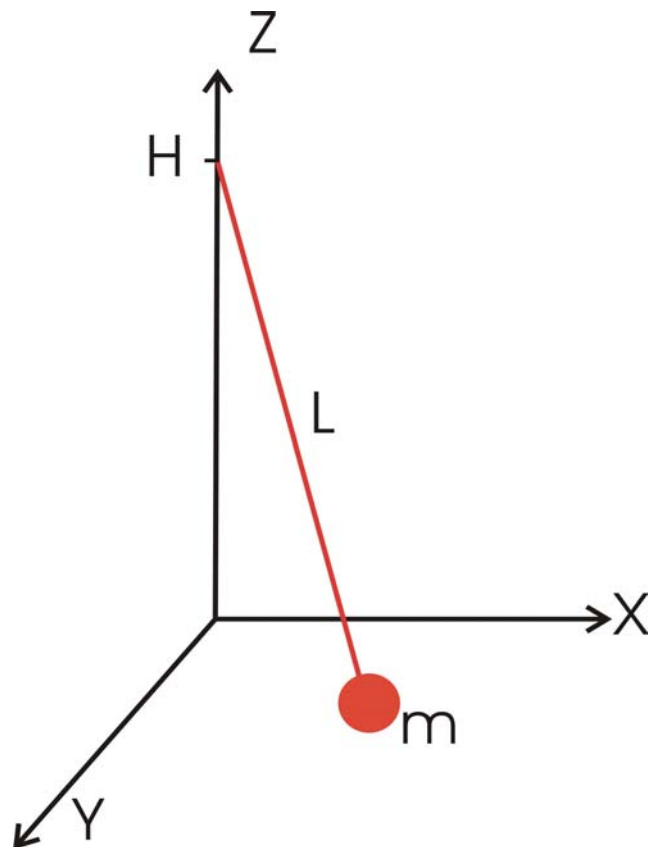


Abb. 2.2.: Pendel im Koordinatensystem

Abb. 2.2.: Das Pendel der Länge L (gemessen vom Schwerpunkt der Pendelkugel bis zur Aufhängung) ist am Punkt $(0, 0, H)$ befestigt. Das Pendel wird als mathematisches Pendel betrachtet, d. h. die gesamte Masse wird als Massepunkt am unteren Ende des als masselos geltenden Seils befestigt.

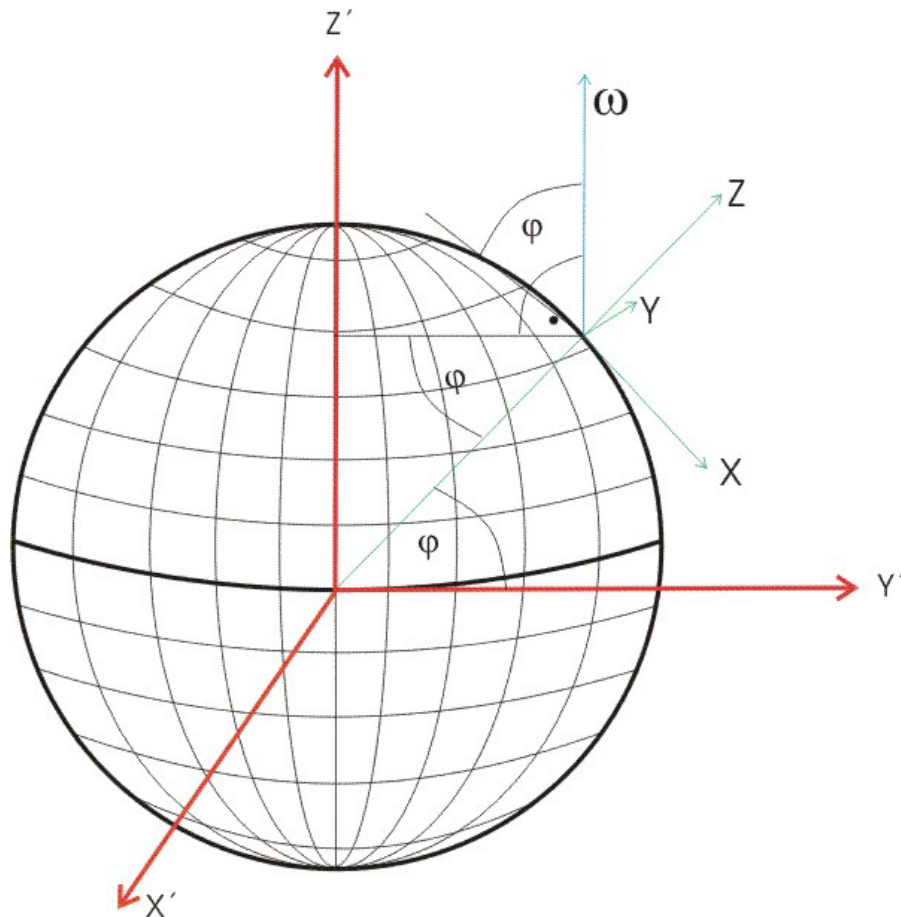


Abb. 2.3.: Bezugssysteme

Abb. 2.3.: Das rote Koordinatensystem (gestrichene Größen) hat seinen Ursprung im Mittelpunkt der Erde, wobei die Erde näherungsweise als Kugel betrachtet wird. Die z' -Achse entspricht ihrer Polarachse. Die z -Achse des grünen Bezugssystems (ungestrichene Größen, Laborsystem) zeige radial vom Erdmittelpunkt nach außen. Die ω -Achse ist die Rotationsachse (Polachse) der Erde, die x -Achse zeige tangential in Richtung Süden und die y -Achse zeige tangential in Richtung Osten. Der jeweilige Breitengrad des Ursprungs des Laborsystems ist durch den Winkel φ gegeben.

Im folgenden werden die auftretenden Kräfte auf die Pendelkugel betrachtet:

1. Als erste Kraft ist die Gravitationskraft zu nennen, die das Pendelgewicht nach unten zieht. Durch die Aufhängung am Pendelseil sorgt diese Kraft dafür, dass das Pendel immer wieder in seine Ruhelage zurückschwingt.

Gravitationskraft:
$$\vec{F}_G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{pmatrix}$$

2. Die Trägheit sorgt dafür, dass die Pendelkugel in der Ruhelage nicht zum Stehen kommt, sondern weiterschwingt zu einer erneuten Vollausslenkung. Die dann wieder wirkende Gravitationskraft lässt das Pendel zurückschwingen.
3. Durch die Luftreibung wird das Pendel bei jeder Schwingung abgebremst. Die Auslenkung wird also immer kleiner und das Pendel kommt irgendwann zur Ruhe. Am Foucault-Pendel des Kirchhoff-Instituts wird die Luftreibung durch das Magnetfeld einer zentral angeordneten Magnetspule ausgeglichen, die immer dann eingeschaltet wird, wenn das Pendel zur Ruhelage zurückschwingt. Dadurch wird es zum Mittelpunkt hin beschleunigt. Kurz vor Erreichen des Mittelpunktes wird der Spulenstrom wieder ausgeschaltet. Da die Luftreibung bzw. der Strömungswiderstand von der Geschwindigkeit der Pendelkugel linear abhängt, sind langsame Schwingungen besser. Je länger das Pendelseil ist, desto kleiner wird somit der Luftwiderstand.
4. Durch Luftströmungen von außerhalb bzw. durch nichtlaminare Strömungen hinter der Pendelkugel kann es zu seitlichen Abweichungen der Pendelschwingung kommen. Diese Abweichungen führen schließlich zu elliptischen Bahnen. Das Pendel beginnt zu taumeln. Diese Taumelbewegungen unterbinden wir mit Hilfe des Charron-Rings, der 400 mm unterhalb der Seilaufhängung angebracht ist. Das Seil legt sich bei jeder Schwingung während der halben Schwingungszeit an den Charron-Ring an, der die Tangentialkomponenten der Störbewegungen durch Reibungskraft kompensiert.
5. Die Kraft, welche schließlich zum Foucault-Effekt führt, ist die Corioliskraft, eine durch die Pendelbewegung auf der sich drehenden Erde hervorgerufene Scheinkraft. Diese Kraft führt zur Drehung der Schwingungsebene des Pendels im Institutsgebäude.

Corioliskraft:
$$\vec{F}_C = -m\vec{\omega} \times \dot{\vec{x}} \quad \text{mit } \vec{\omega} = \begin{pmatrix} -\cos \varphi \\ 0 \\ \sin \varphi \end{pmatrix}_{\text{Laborsystem}}$$

6. Es tritt keine Torsion auf, d. h. die Pendelkugel dreht sich nicht um die Achse des Pendelseiles. Das wird durch eine seitlich auf der Pendelkugel angebrachte Markierung verdeutlicht. Diese Markierung zeigt immer in die gleiche Richtung.
7. Die aufgrund der Erddrehung auftretende Zentrifugalkraft steht orthogonal zur Erdachse, kann aber in unserem Fall vernachlässigt werden, da die Zentrifugalkraft 10.000 mal kleiner als die Gravitationskraft ist.

Zentrifugalkraft: $\vec{F}_Z = -\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{x})$ vernachlässigbar da $O(\omega^2)$.

In der folgenden Herleitung werden die unten aufgeführten Konstanten benutzt:

Pendellänge L ,	Eigenfrequenz des Pendels $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}}$,
Amplitude A ,	Rotationsfrequenz der Erde ω ($O(\omega) = 10^{-5}$)

Die Pendellänge L ist wesentlich größer als die Amplitude A , des weiteren ist die Eigenfrequenz des Pendels um 5 Größenordnungen größer als die Rotationsfrequenz der Erde.

$$\begin{aligned}
 L \gg A &\Rightarrow L \gg z \\
 &\Rightarrow z \approx 0 && \text{x und y haben } O(A) \\
 &\Rightarrow \dot{z} = \ddot{z} = 0
 \end{aligned}$$

Zwangsbedingung:

$$f(\vec{x}) := (L - z)^2 + x^2 + y^2 - L^2 = 0$$

nach Pythagoras (siehe Abb. 2.2.)

Lösung durch Lagrange - I - Formalismus:

$$\vec{F}_G + \vec{F}_C + \lambda \vec{\nabla} f(\vec{x}) = 0$$

eingesetzt:

$$\begin{aligned}
 2m\omega\dot{y} \sin \varphi + 2\lambda x - m\ddot{x} &= 0 && (1) \\
 -2m\omega(\dot{x} \sin \varphi + \dot{z} \cos \varphi) + 2\lambda y - m\ddot{y} &= 0 && (2) \\
 -mg + 2m\omega\dot{y} \cos \varphi + 2\lambda(z - L) - m\ddot{z} &= 0 && (3) \\
 (L - z)^2 + x^2 + y^2 + z^2 &= 0 && (4)
 \end{aligned}$$

Die Pendelkugel hat auf 550mm Auslenkung einen Hub von 16mm. Verglichen mit der Pendellänge von 1100mm bedeutet das, dass sich die Kugel quasi nur in der x-y-Ebene bewegt, was die Annahme $z = 0$ berechtigt. Damit wird die vierte Gleichung überflüssig.

$$2m\omega\dot{y} \sin \varphi + 2\lambda x - m\ddot{x} = 0 \quad (1')$$

$$-2m\omega\dot{x} \sin \varphi + 2\lambda y - m\ddot{y} = 0 \quad (2')$$

$$2\lambda = -\frac{mg}{L} + 2\frac{m\omega}{L} \dot{y} \cos \varphi \quad (3')$$

der Term für 2λ wird nun in die beiden ersten Gleichungen eingesetzt:

$$2m\omega\dot{y} \sin \varphi + \left(-\frac{mg}{L}x + 2\frac{m\omega}{L} \dot{y}x \cos \varphi - m\ddot{x}\right) = 0$$

$$-2m\omega\dot{x} \sin \varphi + \left(-\frac{mg}{L}y + 2\frac{m\omega}{L} \dot{y}y \cos \varphi - m\ddot{y}\right) = 0$$

Weglassen der $O(A^2)$ Terme führt zu:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - 2\omega\dot{y} \sin \varphi + \omega_0^2 x &= 0 \\ \ddot{y} + 2\omega\dot{x} \sin \varphi + \omega_0^2 y &= 0 \end{aligned} \quad \text{mit: } \omega_0^2 = \frac{g}{L}$$

Lösung des DGL-Systems:

$$\begin{aligned} (\ddot{x} + i\ddot{y}) + 2\omega i(\dot{x} + i\dot{y}) \sin \varphi + \omega_0^2(x + iy) &= 0 \quad \text{mit } H := (x + iy) \\ \Leftrightarrow \ddot{H} + 2\omega i \sin \varphi \dot{H} + \omega_0^2 H &= 0 \end{aligned}$$

Ansatz:

$$\begin{aligned} \Rightarrow H(t) &= H_0(t) e^{-i\omega \sin(\varphi)t} \\ \Rightarrow \ddot{H}_0 + (\omega_0^2 + 2\omega^2 \sin \varphi) H_0 &= 0 \quad \text{mit } 2\omega^2 \sin \varphi = O(\omega^2) \\ \Rightarrow \ddot{H}_0 + \omega_0^2 H_0 = 0 \Rightarrow H_0(t) &= A e^{i\omega_0 t} + B e^{-i\omega_0 t} \\ \Rightarrow H(t) &= \left(A e^{i\omega_0 t} + B e^{-i\omega_0 t} \right) e^{-i\omega \sin(\varphi)t} \end{aligned}$$

mit Anfangsbedingungen:

$$\begin{aligned} H(0) &= A \\ \dot{H}(0) &= 0 \end{aligned} \quad \Omega := \omega \cdot \sin(\varphi)$$

folgt Lösung:

$$\Rightarrow H(t) = A e^{-i\omega \sin(\varphi)t} \cdot \left\{ \cos(\omega_0 t) + i \frac{\omega \sin(\varphi)}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right\}$$

In obige Lösung $H(t)$ wird in der folgenden Beispielrechnung mit den Daten des Foucaultschen Pendel am Kirchhoff-Institut die Pendelbewegung simuliert:

$$A = 550 \text{ mm},$$

$$L = 11000 \text{ mm},$$

$$\varphi = 49,4^\circ,$$

$$\omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1},$$

$$\omega_0 = 0,94 \text{ s}^{-1}$$

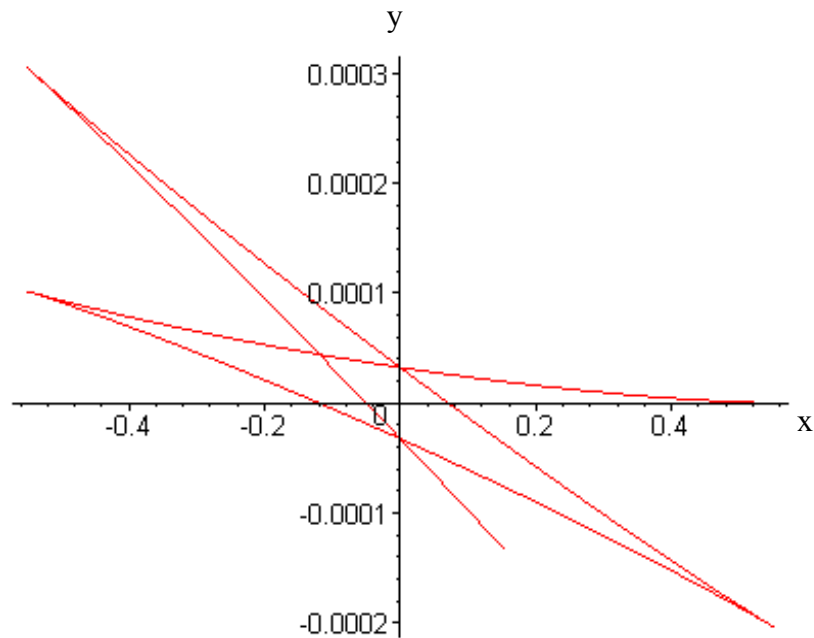


Abb. 2.5.: zwei Schwingungen

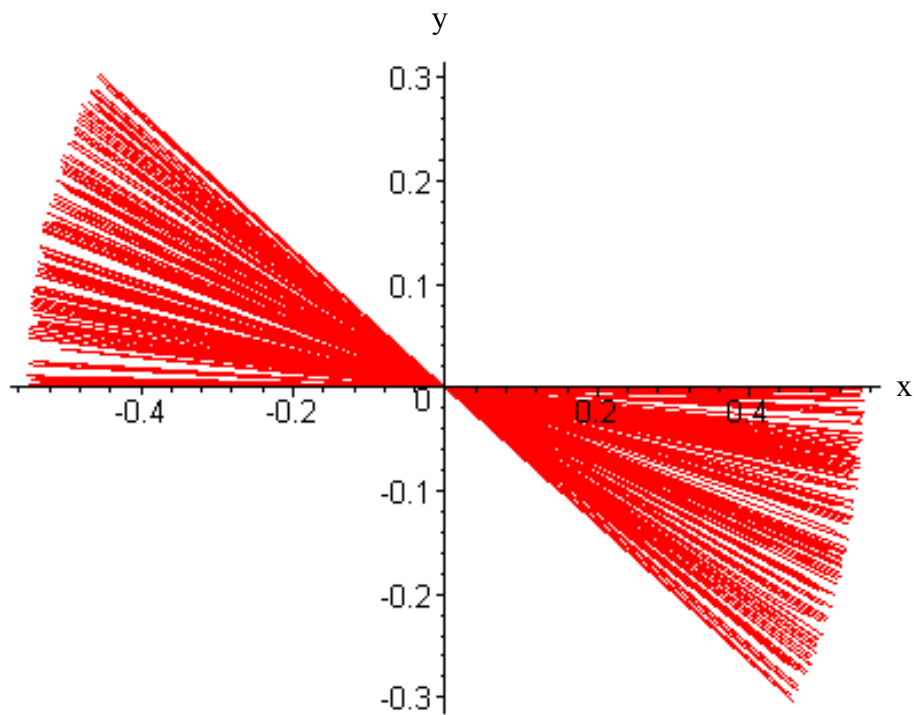


Abb. 2.6.: Schwingungsdauer von 4 Stunden

2.4. Der Foucault-Effekt am Breitengrad von Heidelberg

Die Erdkugel dreht sich in 24 Stunden einmal um ihre Polarachse. Befindet sich nun ein Foucault-Pendel direkt an einem der beiden Pole ($\varphi = \pm 90^\circ$), so führt die Schwingungsebene die Drehung in 24 Stunden aus, da sich die Erdkugel in 24 h genau einmal um ihre Polachse gedreht hat.

Am Äquator ($\varphi = 0^\circ$) kann man keinen Foucault-Effekt feststellen, da die Erdoberfläche hier keine Rotationsbewegung, sondern eine reine Translationsbewegung ausführt. Ein am Äquator aufgestelltes Pendel führt daher nur diese Translationsbewegung von West nach Ost aus. Die Schwingungsebene erfährt keine Rotationsbewegung.

Die Winkelgeschwindigkeit Ω der Schwingungsebene ist also an den beiden Polen am größten, während sie am Äquator gleich Null ist. Allgemein ist $\Omega = \omega * \sin(\varphi)$. Auf der Nordhalbkugel ist $\varphi \geq 0$, also erfolgt die Drehung der Schwingungsebene im Uhrzeigersinn. Auf der Südhalbkugel erfolgt sie dementsprechend entgegen dem Uhrzeigersinn.

Anschaulich vorstellen kann man sich die Veränderung der Winkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Breitengrad durch folgende Skizze:

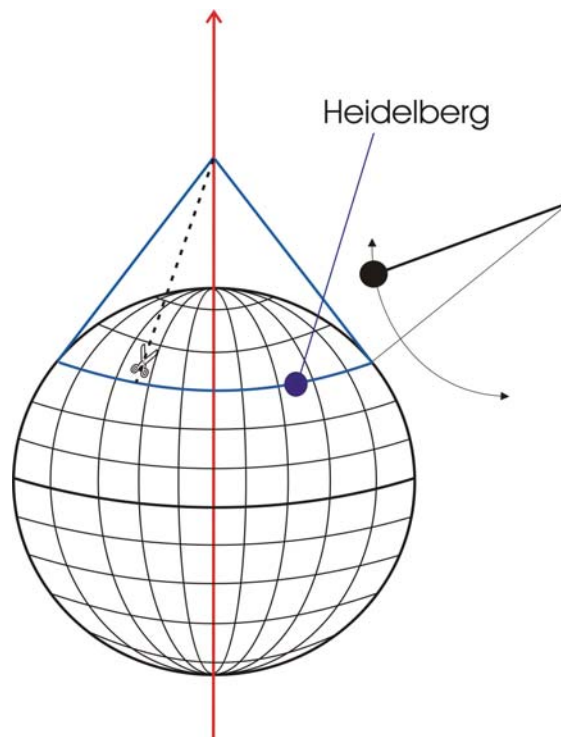


Abb. 2.7.: gedachter Kegel am Breitenkreis

Der blau gezeichnete Kegel wird längs der gestrichelten Linie aufgeschnitten und anschließend aufgerollt. Dadurch entsteht ein Kreissegment, welches in Abb. 2.8. dargestellt ist:

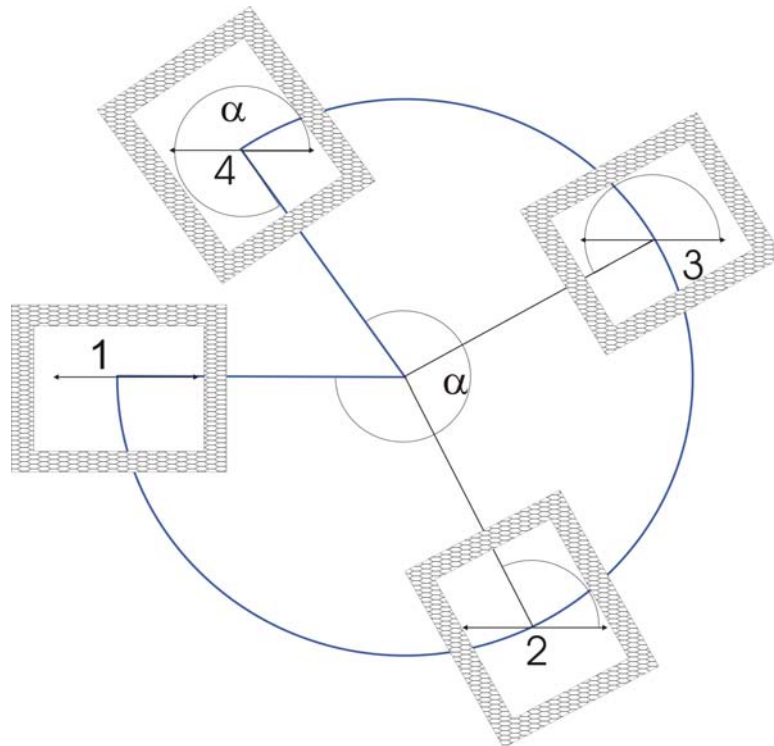


Abb. 2.8.: aufgeschnittener Kegel

Bei Ziffer 1 ist die anfängliche Schwingungsebene dargestellt, bei Ziffer 2 hat sich die Schwingungsebene im Institutsgebäude bereits um ca. 110° gedreht, Ziffer 3 zeigt die Drehung um ca. 200° und bei Ziffer 4 ist die Drehung α eines vollen Tages erreicht. Man beachte, dass sich der Beobachter auf dem blau eingefärbten Kreissegment bewegt, während die Schwingungsebene ihre Position nicht verändert.

Den Winkel α , um den sich die Schwingungsebene pro Tag dreht, kann man mit Hilfe des Breitengrades φ berechnen:

$$\alpha = 360^\circ \cdot \sin(\varphi)$$

Die Stadt Heidelberg hat den Breitengrad $49^\circ 25'$, was einem Winkel von $49,42^\circ$ entspricht. Somit dreht sich die Schwingungsebene des Foucault-Pendels im Kirchhoff-Institut in 24 Stunden um $273,5^\circ$.

Die Umlaufbewegung der Erde um die Sonne oder die Neigung der Erdachse gegenüber der Ekliptik haben keinen Einfluss auf die Drehbewegung der Pendelachse.

Kapitel 3

Das Foucaultsche Pendel am Kirchhoff-Institut für Physik

In diesem Kapitel wird das neu errichtete Foucaultsche Pendel am Kirchhoff-Institut in Heidelberg beschrieben. Im ersten Abschnitt wird über die Entstehung berichtet, über die Probleme und Fragestellungen, die hierbei aufgetreten sind, und die es zu lösen galt. Der zweite Abschnitt beschreibt den Aufbau, die Fertigung und die Funktionsweise der einzelnen Komponenten der gesamten Installation. Im dritten und letzten Teil wird noch kurz auf das Foucaultsche Pendel an der Universität Osnabrück eingegangen.

3.1 Entstehungsgeschichte

Um zu Beginn exakte Pläne erstellen zu können, war es nötig, die genaue zur Verfügung stehende Bauhöhe zu ermitteln. Da es nicht möglich war, ohne Montagegerüst an die zur Aufhängung des Pendels genutzte Decke zu gelangen, musste auf eine andere Methode der Höhenmessung zurückgegriffen werden. Das Ingenieurbüro Engelbach & Partner Frankfurt stellte hierfür dankenswerterweise das Messgerät „Leica Disto pro“ zur Verfügung, das mit Hilfe eines reflektierten Laserstrahles die Bauhöhe von 11,582 m ermittelte. Die Fehlertoleranz liegt bei dem verwendeten Modell und der ermittelten Höhe bei weniger als 2 mm, die Fehlertoleranz des Messgerätes ist also kleiner als die Höhenunterschiede, die sich aufgrund einer unebenen Gebäudedecke ergeben. Für die Erstellung der Pläne wurde mit einer Bauhöhe von 11,580 m geplant. In den folgenden Tagen wurden die Konstruktionspläne, die dem Kirchhoff-Institut seitens der Mechanischen Werkstatt des Fachbereichs Physik der Universität Osnabrück überlassen wurden, gesichtet und hinsichtlich der geringeren zur Verfügung stehenden Bauhöhe (in Osnabrück sind das 19,60 m) überarbeitet. Hierbei bereitete besonders die Modifikation des Charron-Ringes Probleme, da nicht bekannt war, wie weit der Charron-Ring in die Auslenkung des Pendelseils hineinragen muss. Nach einem Gespräch mit Prof. Dr. L. Schön aus Berlin, der u. a. auch bei der Konstruktion des Osnabrücker Foucault-Pendels mitgewirkt hat, wurden die Ausmaße des Charron-Rings wie folgt festgelegt: Das Pendel

kann bis zu seiner halben Vollausslenkung frei schwingen. Dann legt sich das Seil am oberen Anfang des 2-fach konischen Charron-Rings (s. Abb. 3.6. und Abb. 3.7.) an, bis das Pendel die Vollausslenkung erreicht und sich das Seil ganz an den Charron-Ring angelegt hat. Auf dem Weg zur Ruhelage löst sich das Seil wieder bis hin zur halben Auslenkung vom Charron-Ring. Danach beginnt der Kreislauf von Neuem. Nach der Montage des Pendels Anfang März 2003 wurde festgestellt, dass die Maße des Charron-Rings richtig gewählt waren und er seine Aufgabe, elliptische Schwingungen und seitliche Taumelbewegungen zu vermeiden, erfüllte. Nach der Konstruktion des Charron-Rings wurden dann die Konstruktionszeichnungen für die Pendelkugel, den Deckenring, den Charron-Ring und die Haltestangen neu gezeichnet und der Feinmechanischen Werkstatt zusammen mit den geänderten Zeichnungen aus Osnabrück am 15.11.2002 zur Anfertigung der immerhin 46 Einzelteile übergeben. Der Zeitplan sah vor, das Pendel Anfang März zu montieren, so dass bis Anfang Mai noch genügend Zeit für evtl. Korrekturen und Messungen mit Auswertung verblieb.



Abb. 3.1.: M. Weiser, Feinmechanische Werkstatt



Abb. 3.2.: D. Weiskat, Elektronikwerkstatt

Im folgenden geplant wurde die Antriebselektronik der Magnetspule. Basierend auf den Plänen der Elektronikwerkstatt des Fachbereichs Physik der Universität Osnabrück wurde eine Elektronikteilleiste erstellt, die dann aber noch teilweise seitens der Elektronikwerkstatt des Kirchhoff-Instituts überarbeitet wurde. Die sich nun stellende Aufgabe war die Anfertigung der Stromspule, die mittig in die Holzplatte (s. Kap. 3.2.4.) eingelassen werden sollte. Die Feinmechanische Werkstatt fertigte einen Wickelkörper für die Spule ($\varnothing = 310 \text{ mm}$) an, die – eingespannt in die größte Drehbank des Instituts – dann mit Backlackdraht gewickelt wurde. Dieser Draht besteht aus Kupfer im Inneren, einer Isolationsschicht, die erst bei über 250°C schmilzt, sowie einer äußeren Klebstoffschicht, die bereits bei 180°C flüssig wird. Die fertig gewickelte Spule wurde dann über mehrere Tage hinweg gebacken. Die Entfernung des Wickelkörpers ging nicht ohne Probleme vonstatten, da sich der Klebstoff auch mit dem Wickelkörper – trotz vorheriger Präparierung mit Teflonspray – verbunden hatte. Die nun einbaufertige Spule mit ca. 2120 Windungen (ca. 1,2 km Draht) hat einen gemessenen Widerstand von $16,3 \Omega$.

Im Januar wurde dann die pneumatische Installation zur Aufstellung der Kippstifte (s. Kap. 3.2.5.) geplant und die einzelnen Komponenten bestellt sowie an der Holzplatte, auf der die Kippstifte stehen und in deren Mitte die Ringspule eingelassen ist, gearbeitet. Des weiteren wurden die Kippstifte poliert und lackiert. Auch die Pendelkugel, die am 22. Januar von der Feinmechanischen Werkstatt des Physikalisch-Chemischen Instituts fertig gedreht war, wurde dann in zweitägiger Feinarbeit poliert. Die Holzplatte wurde mit der Hilfe meines Vaters in den Räumen der Firma Schreinerei Müller, Mörlenbach hergestellt: Zu Beginn mussten die 19mm starken Spanplatten zugeschnitten und zusammengeleimt werden, im Anschluss daran wurde die Platte kreisrund gefräst. Parallel dazu wurden drei rechteckige Platten für die Informationstafel zugeschnitten. An den folgenden Samstagen wurden dann die Kanten aufgeleimt, furniert und lackiert.

Am 24. Februar 2003 wurde am Standort des Foucault-Pendels das mit einer Arbeitshöhe von 9,60m beindruckend hohe Montagegerüst aufgestellt. Dieses Montagegerüst ist eigentlich als freistehendes Gerüst konzipiert. Dennoch wurden aber darüber hinaus drei Verbindungsstreben zum Treppenhaus hin angebracht, um eine für das Bohren in der Decke ausreichende Stabilität zu gewährleisten. Bei Auf- und Abbau konnte ich auf die Hilfe von Herrn Knebel, dem damaligen Hausmeister des Kirchhoff-Instituts, und Herrn Rothmüller, einem ehemaligen Schulkameraden, zählen. Das Montagegerüst blieb dann zwei Wochen lang aufgebaut. In dieser Zeit wurden an der Gebäudedecke zuerst vier Sicherungshaken montiert. Auch die Lampen, die das Pendel beleuchten, wurden an der richtigen Stelle angebracht und ausgerichtet. Ebenso wurde die gesamte Deckenkonstruktion mitsamt Charron-Ring und Pendelseil montiert. Während der Arbeiten auf dem Montagegerüst, das man eigentlich ohne Seilsicherung betreten darf, war immer durch einen Sitzgurt zusätzliche Sicherheit gewährleistet. Der Gurt war mit einem in den Sicherungshaken befestigtem Fallstopfseil verbunden.



Abb. 3.3.: Aufbau des Montage-Gerüsts



Abb. 3.4.: Bohren der Dübellöcher

Anfang April wurde die Antriebselektronik mitsamt Magnetspule montiert. Des Weiteren wurde die Aufstellautomatik der Kippstifte in der Diplomandenwerkstatt unter der Aufsicht von Herrn Spiegel hergestellt. Im Anschluss daran wurden sie an der mittlerweile nach Heidelberg gebrachten Holzplatte befestigt. Die Kippstifte stellen sich alle 12 Stunden, jeweils um 12 Uhr mittags und um Mitternacht, automatisch wieder auf. Eine derartige Aufstellautomatik ist noch an keinem anderem Foucault-Pendel in Betrieb.

Das Pendel war damit fertiggestellt. Kurz vor der Eröffnungsfeier wurden noch die Präsentationstafel und das von Herrn Maier geschweißte Geländer angebracht.

Ebenfalls im April wurde die für das Foucault-Pendel erstellte Internetpräsentation in den Internetseiten des KIP eingebunden und online geschaltet.

3.2 Detailbeschreibung der einzelnen Komponenten

3.2.1. Aufhängung

3.2.1.1. Bemessung der Befestigungsdübel

Die Befestigung an der Gebäudedecke des KIP (Stahlbeton B35, 300 mm stark, dicht bewehrt) erfolgt mit drei Reaktionsankern, bestehend aus 10 mm starken Gewindestangen aus Edelstahl, die mit Verbundmörtel verankert sind. Diese Reaktionsanker sind von der deutschen und europäischen Bauaufsicht zur Verankerung in Beton geprüft und zugelassen. Die mit dem Programm COMPUFIX durchgeführten Berechnungen ergaben einen Ausnutzungsgrad von 0,03 bei Stahlbruch der Gewindestangen, einen Ausnutzungsgrad von je 0,08 bei Dübelversagen und Betonausbruch. Dieser Ausnutzungsgrad kann bei Einhaltung aller Sicherheitsbeiwerte bei 1 liegen. Die Ausnutzungsgrade sind berechnet für eine quadratische Dübelanordnung mit vier Gewindestangen, wir benutzen aber nur drei Gewindestangen, also ist der Ausnutzungsgrad einer der drei von uns eingesetzten Dübeln jeweils zu verdoppeln. Aber auch dann ist immer noch ein ausreichendes Sicherheitsniveau vorhanden, um alle auftretenden Kräfte abtragen zu können. Die Berechnungen sind als Anlage beigefügt.

3.2.1.2. Deckeninstallation



Abb. 3.5.: Deckenaufhängung

Von oben beginnend wird von den in der Decke befestigten Gewindestangen die erste Deckenplatte mit 500 mm Durchmesser aus Edelstahl gehalten, die mit sechs kreisförmig unter 60° angebrachten M16-Bohrungen ausgestattet ist, um die Haltestangen der nächsten Halteplatte aufnehmen zu können. In die sechs M16-Bohrungen sind die 60 mm langen Abstandsstangen geschraubt, mit denen die zweite Deckenplatte genau waagrecht ausgerichtet worden ist. Die zweite Deckenplatte ist ebenfalls aus Edelstahl, hat aber einen um 100 mm geringeren Durchmesser gegenüber der direkt an der Decke befestigten Platte. Alle drei Deckenplatten sind je 18 mm stark, um eine ausreichende Stabilität und Biegesteifigkeit gewährleisten zu können.

Mittig in der zweiten Platte ist eine Aussparung vorgesehen, in welche die aus drei Einzelteilen bestehende Seilklemmung eingeschraubt wird. Das 3 mm starke und 11,4 m lange Stahlseil wird nicht auf komplizierte Art und Weise reibungsfrei gelagert, sondern nur zwischen zwei Stahlplatten eingeklemmt. Eine reibungsfreie Aufhängung wäre nur bei einer starren Pendelstange nötig, aber solche Stangen werden nur bei Pendeln benutzt, die lediglich Zimmerhöhe zur Verfügung haben. Die zweite Deckenplatte verfügt über drei kreisförmig angebrachte M16-Bohrungen, die zur Befestigung der 420 mm langen Abstandsstangen für den Charron-Ringes dienen. Der Charron-Ring mit einem Durchmesser von 120 mm ist auf der dritten Deckenplatte mit einem Durchmesser von 300 mm befestigt. Der Innendurchmesser des Charron-Ringes liegt bei 23 mm, das entspricht der halben Auslenkung des Pendels in dieser Höhe. Die gesamte Deckenaufhängung ist 560 mm hoch und wiegt 58,2 kg. Frei schwingen kann das Seil ab der Einklemmung, also 142 mm unterhalb der Gebäudedecke.

3.2.2. Charron-Ring



Abb. 3.6.: Charron-Ring

Die ersten Fadenpendel, die den Foucault-Effekt zeigen sollten, konnten immer nur für kurze Zeit schwingen, da sich dann die anfangs ebene Pendelbahn immer mehr zu einer elliptischen entwickelte. Die dafür notwendigen tangential angreifenden Störkräfte entstehen durch Luftzug, nichtlaminare Strömungen hinter der Kugel oder andere äußere Einflüsse wie z. B. dem Umstoßen der Kippstifte durch die Pendelkugel. Da man durch die elliptischen Pendelbahnen keinen Foucault-Effekt mehr beobachten kann, war es notwendig, diese Störungen zu minimieren. Dies erfolgt beim Pendel des Kirchhoff-Instituts durch einen 400 mm unterhalb der Seilklemmung angebrachten Charron-Ring. Der Charron-Ring ist so konzipiert, dass sich das Seil bei jeder Vollausslenkung während der halben Schwingungszeit an den Innenring anschmiegt. Der Innenring ist so konzipiert, dass sich das Seil nicht auf einmal, sondern innerhalb einer halben Auslenkung, an dem Ring anschmiegt, d.h. der obere Querschnitt ist kleiner als der untere Querschnitt. Der obere Querschnitt hat einen Durchmesser von 22 mm, das entspricht einer halben Vollausslenkung. Der untere Querschnitt hat einen Durchmesser von 24 mm, das entspricht dann einer Vollausslenkung ab der Mitte des Charronringes gerechnet. Dementsprechend wurde der Innenring von oben unter einem Winkel von $88,5^\circ$ und von unten mit einem Winkel von $93,1^\circ$ aufgedreht. Die dadurch entstandene Schnittkante kann man auf Abb. 3.7. erkennen.

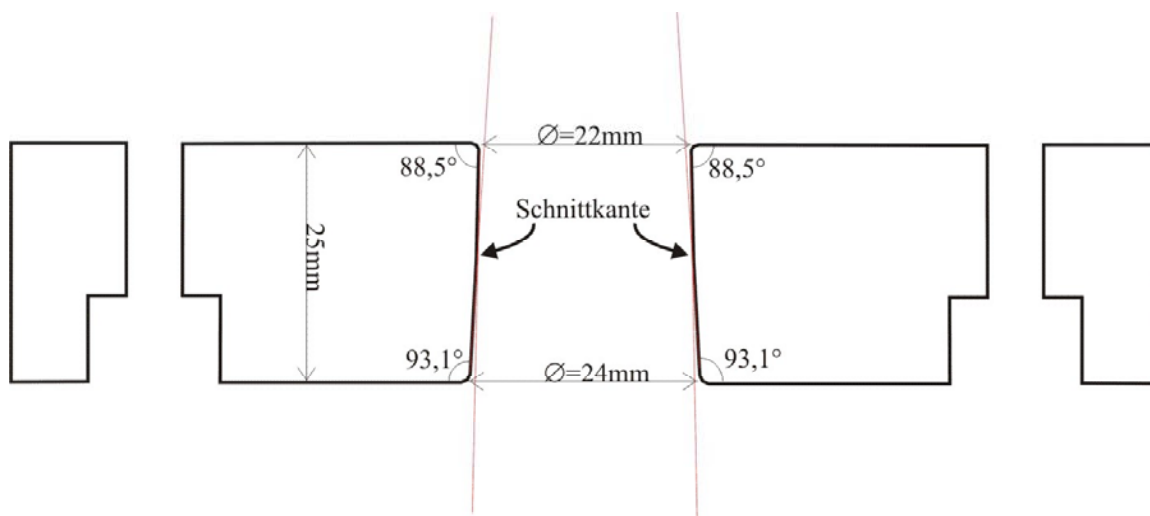


Abb. 3.7.: Schnittzeichnung des Charron-Rings

Die störenden Tangentialbewegungen des Pendels werden durch das Anpressen des Seiles an den Charron-Ring durch Reibung eliminiert. Ein Nachteil ist aber, dass der Foucault-Effekt durch den Charron-Ring teilweise unterdrückt wird: Liegt das Seil am Charron-Ring an, wird auch die durch die Corioliskraft hervorgerufene seitliche Ablenkung unterdrückt. Doch der Foucault-Effekt ist in der zweiten Hälfte einer jeden Schwingung weitaus geringer als direkt nach dem Nulldurchgang, da die Corioliskraft (siehe Simulation in 2.3. „Theoretische Herleitung des Foucault-Effekts“) proportional zur Geschwindigkeit der Pendelkugel ist. Am Nulldurchgang ist diese am größten. So berichten auch die Betreuer des Osnabrücker Foucault-Pendels von einer Verfälschung der Ergebnisse bei der Bestimmung des Breitengrades über die Rotationszeit der Pendelebene.

Da der Foucault-Effekt minimiert wird, misst man einen betragsmäßig kleineren Breitenkreis als den theoretisch erwarteten.

3.2.2.1. Geschichte des Charron-Rings

Der Charron-Ring wurde vermutlich von Fernand Charron (geboren 1884) um 1931 erfunden. F. Charron hat einige naturwissenschaftliche Werke verfasst. Er hat sich unter anderem mit der Entwicklung eines Elektrometers zur Messung kleinster Spannungen und mit verschiedenen Methoden zur Bestimmung von Materialeigenschaften befasst. So berichtet er 1938 über eine Methode zur Bestimmung der Fettigkeit und Schmierfähigkeit von Ölen [„Recherches sur un procédé de détermination de l'onctusité des lubrifiants“, 1931]. Durch eine zufällige Namensgleichheit mit einem französischen Rennfahrer und Automobilkonstrukteur, über den wesentlich mehr Artikel aufzufinden waren, ist es leider trotz Bemühungen zweier bibliographischer Dienste der UB Heidelberg und der Nationalbibliothek von Paris nicht gelungen, weiterführende Daten über den Forscher F. Charron herauszufinden. Da weder Geburtsort, damaliger Wohnort oder Sterbeort bekannt sind, war es auch nicht möglich, über die jeweiligen Gemeinden eine Auskunft zu erbitten.

3.2.3. Pendelseil, Pendelkugel

Das verwendete Stahlseil hat eine Längendichte von $0,0354 \text{ kg/m}$ und besteht aus 49 Einzeldrähten, von denen je 7 zu einem Seil geflochten sind. Diese 7 dünnen Seile sind dann zu dem endgültigen Seil geflochten. Das Seil hat einen Außendurchmesser von 3 mm. Die reine Seillänge liegt bei unserem Foucault – Pendel bei 10,961 m, denn die Pendellänge von 11,421 m beinhaltet auch den halben Kugeldurchmesser und den „verschenkten“ Raum oberhalb der zweiten Deckenplatte.



Abb. 3.8.: polierte Pendelkugel auf Drehbank



Abb. 3.9.: Einzelteile

Um eine möglichst hohe Masse der Pendelkugel zu erreichen, wurde der Durchmesser der Messingkugel auf 250 mm festgelegt. So wird eine Masse von 68,7 kg

erreicht. Die Oberfläche der Kugel wurde poliert, um einen optisch schöneren Gesamteindruck entstehen zu lassen. Im Inneren ist die Messingkugel mit einer 82 mm starken Bohrung ausgehöhlt, in die ein Eisenkern eingelassen wurde. Dies ist notwendig, da sonst der Antrieb versagt hätte, da reines Messing nicht auf das Magnetfeld der Spule reagiert. In dem 80 mm starken Eisenkern ist wiederum eine M22-Bohrung vorhanden, in der die Seilklemmung eingeschraubt ist. Die durchgängige M22-Bohrung ist nötig, um die Seillänge zu justieren und gegebenenfalls nach einiger Zeit nachjustieren zu können. Am oberen Ende der Kugel ist ein optisch schön anzusehendes Abschlussstück angebracht, in dem ein Seilführungsstück integriert ist. Das untere Ende der Kugel wird ebenfalls von einem separaten Abschlussstück begrenzt. In dieses ist aber noch ein 25 mm langer Stift eingeschraubt. Dessen Unterseite ist poliert, so dass hier die Strahlen der Infrarot-LEDs reflektiert werden können. Die gesamte Kugel mit Abschlussstücken und unterem Stift hat eine Höhe von 325 mm.

Nachdem die Pendelkugel befestigt war und frei am Pendelseil hing, dehnte sich das Seil im wesentlichen aufgrund des Seilschlupfes um 8,6 cm. Der Seilschlupf ist bei aus verschiedenen Drähten gewickelten Seilen unvermeidbar. Da dies nur eine einmalige Dehnung gleich nach Montage der Kugel war, konnte das Seil um die gedehnte Länge gekürzt werden. Der Anteil der elastischen Verformung von 4,7 mm ist klein gegenüber dem Anteil des Seilschlupfes von 8,1 cm. Weiterhin kann sich das Seil noch bei Temperaturschwankungen dehnen. Da aber der Längenausdehnungskoeffizient mit $\alpha = 11,59 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ sehr klein ist, dehnt sich das Seil bei einer Schwankung von 18°C auf angenommene 28°C nur um 0,116mm aus. Diese temperaturbedingte Längenänderung ist vernachlässigbar.

3.2.4. Holzplatte

Um den Foucault-Effekt bestmöglichst darstellen zu können, wurde wie oben beschrieben eine runde Holzplatte mit einem Durchmesser von 1400 mm angefertigt, auf der 48 Kippstifte angeordnet sind. Die Holzplatte wurde mit Lärchenfurnier veredelt, die 40 mm breite Kante wurde mit Lärchenmassivholzkanten verkleidet. Die Holzart Lärche bot sich an, da die Wandverkleidungen des Kirchhoff-Instituts aus einjähriger Gebirgslärche aus der Steiermark bestehen. In der Mitte der Holzplatte ist die Spule mitsamt Weicheisenkern eingelassen. Auf der Holzplatte ist eine Windrose auflackiert, die die vier Himmelsrichtungen und die Zwischenrichtungen anzeigt.



Abb. 3.10.: Holzplatte bei der Fertigung



Abb. 3.11.: Fertige Holzplatte

3.2.5. Kippstifte

Die Kippstifte bestehen aus je einem 70 mm hohem Messingzylinder mit 11 mm Durchmesser. Die im Fachhandel erhältlichen Messingstifte sind ursprünglich als Senklote gedacht. Am unteren Ende jedes Stiftes befindet sich schon eine Kugel. Die Kippstifte können sich durch unter der Holzplatte angebrachte Pneumatik-Hubkolben automatisch wieder aufrichten.

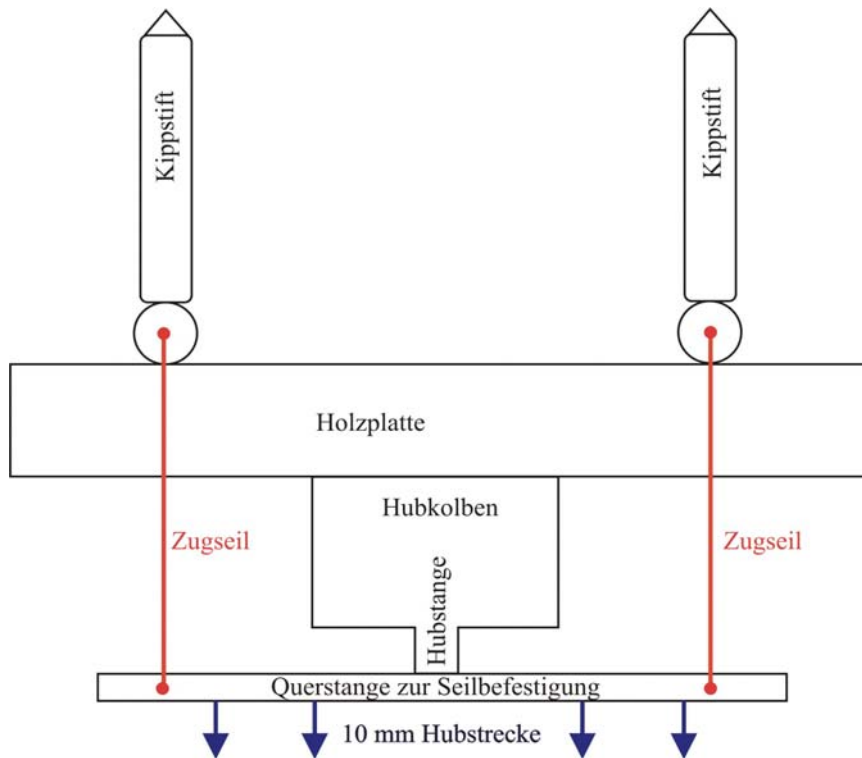


Abb. 3.12.: schematische Darstellung des Kippmechanismus

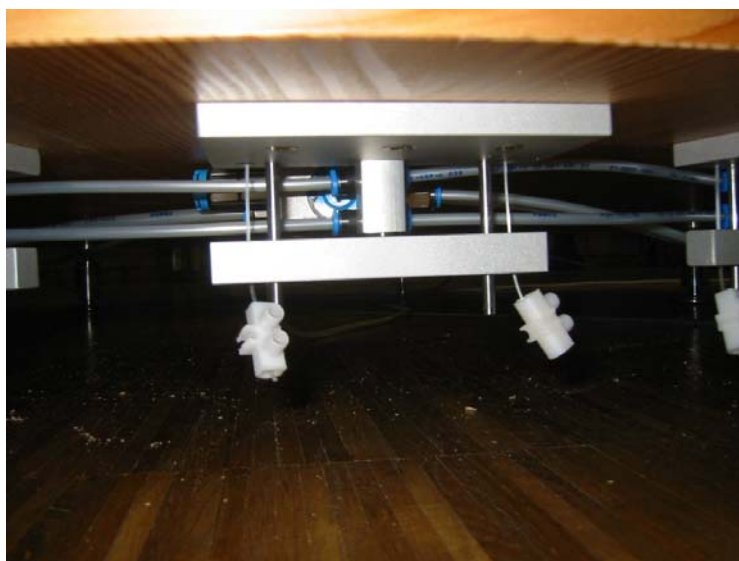


Abb. 3.13.: Aufstellmechanismus

3.2.6. Antriebselektronik der Magnetspule

Um einen dauerhaften Betrieb des Foucaultschen Pendels gewährleisten zu können, ist es notwendig, die Luftreibung, welche irgendwann zum Stillstand der Pendelkugel führen würde, zu kompensieren. Dies geschieht über eine in der Holzplatte eingelassene Ringspule in einem Weicheisenkern (s. 3.2.7. „Magnetspule“). Durch diese Ringspule fließt immer dann ein Strom von 1,15 A, wenn sich die Kugel in der Annäherungsphase an die Spule befindet. Durch das entstehende Magnetfeld wird der sich in der Messingkugel befindende Eisenkern angezogen und dadurch die Kugel zum Mittelpunkt der Spule und damit der Holzplatte hin beschleunigt. Auf diese Weise gelingt es, die Luftreibung genau zu kompensieren, da die Stromstärke variiert werden kann, bis die gewünschte Amplitude von 61 cm erreicht ist und gehalten wird.

Um die Spule jeweils zum richtigen Zeitpunkt unter Strom setzen zu können, nämlich dann, wenn sich das Pendel gerade wieder nach einem Vollausschlag der Spule nähert, benötigt man eine Sensorik, die jeden Nulldurchgang des Pendels detektiert und anschließend eine Verzögerungszeit t_1 schaltet, die so lang sein muss, dass das Pendel bis zum Vollausschlag schwingt, umkehrt und sich der Spule auf ca. 10 cm nähert. Nun muss die Elektronik einen Stromimpuls mit der Länge t_2 auf die Spule geben, um das für die Anziehung notwendige Magnetfeld zu erzeugen. Dieser Stromimpuls darf dauern bis die Spule über die äußere Hälfte der Ringspule geschwungen ist. Kurz danach wird wieder ein Nulldurchgang detektiert, da die Pendelkugel nun in die entgegengesetzte Richtung schwingt. Der Ablauf beginnt damit von Neuem.

Zur Zeit ist am Foucault-Pendel eine „Elektronik auf Probe“ installiert, mit welcher die drei späteren Zähl displays noch nicht angesteuert werden können. Die vordere Flanke des vom Sensor erzeugten Rechteckimpulses wird in einem Differenzglied durch einen invertierenden Verstärker (IC1) und einen Kondensator (C2) abgegriffen. Diese Flanke aktiviert dann den für den Nulldurchgang zuständigen Monoflop (IC2). Dieser IC2 steuert eine LED an, die den Nulldurchgang anzeigt. Der nach dem Nulldurchgang angesteuerte Monoflop (IC3) generiert die Wartezeit und steuert ebenfalls eine LED an. Nach Ablauf der Wartezeit wird das nächste Monoflop (IC4) angesteuert, welches das Startsignal für den Stromimpuls liefert. Zeitgleich dazu werden die Anzeige-LEDs in der Spulen-Mitte angesteuert. Das Ansteigen und Absteigen des Stromimpulses wird über eine Integratorschaltung (IC5) realisiert. Die Flanken können durch zwei Potentiometer geregelt werden. Die so erzeugte Steuerspannung wird dann über eine Stromquellschaltung (IC7 und T3) in Strom umgesetzt. Darüber hinaus wurde noch eine „sample-and-hold“-Schaltung eingebaut, die den nach dem Ansteigen konstanten Strom abtastet und abspeichert, so dass man den maximalen Stromwert über ein Amperemeter messen kann. Ohne diese Schaltung würde das Amperemeter nur den zeitlich gemittelten Stromwert anzeigen, der viel kleiner wäre.

Direkt in der Spulen-Mitte ist die Triggerung für den Sensor untergebracht. Das Steuerelement versorgt gleichzeitig den Sensor und die sechs Infrarot-LEDs. Somit ist sichergestellt, dass der Sensor nur auf die von den Dioden ausgesendeten Strahlen mit der passenden Frequenz reagiert. Evtl. einfallendes Sonnenlicht oder das Licht der künstlichen Beleuchtung stören den Sensor somit nicht.

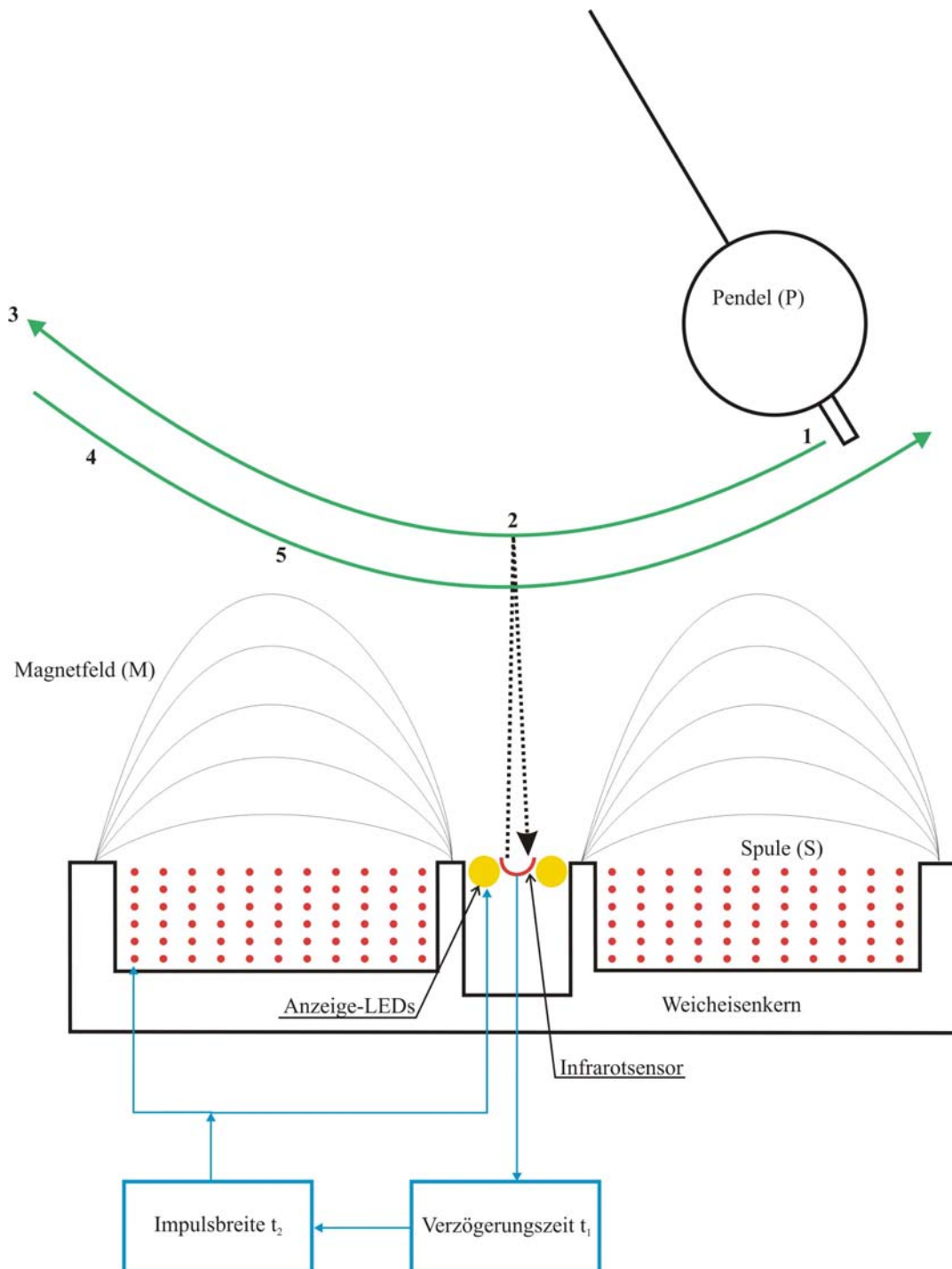


Abb. 3.14.: schematische Darstellung der Spulensteuerung

Die in Abb. 3.14. eingezeichneten Positionsziffern werden nun erläutert:

- 1 Die Pendelkugel nähert sich dem Spulen-Mittelpunkt, wo sich ein Infrarotsensor sowie sechs Infrarot-LEDs befinden.
- 2 Die von den Infrarot-LEDs ausgesendeten Lichtstrahlen werden an der Unterseite der Pendelspitze reflektiert und dann vom Sensor detektiert. Dadurch wird ein Signal erzeugt, das die nachgeschaltete Elektronik als Startsignal benutzt. Dieses Startsignal schaltet nun die Wartezeit (Verzögerungszeit t_1).
- 3 Die Pendelkugel befindet sich am Umkehrpunkt, dem Vollausschlag. Noch immer läuft die Wartezeit.
- 4 Die Pendelkugel hat sich der Ringspule (S) auf ca. 10 cm genähert. Hier endet die Wartezeit und der Stromimpuls (Impulsbreite t_2) für die Spule wird gestartet. Während der Strom durch die Spule fließt, leuchten auch die sechs weiteren im Spulen-Mittelpunkt angebrachten Anzeige-LEDs. Die Pendelkugel (P) wird durch das entstandene Magnetfeld radial zum Spulen-Mittelpunkt hin beschleunigt.
- 5 Hier wird der Strom ausgeschaltet, da sonst das Magnetfeld die Pendelkugel abbremsen würde; weiter mit 1.

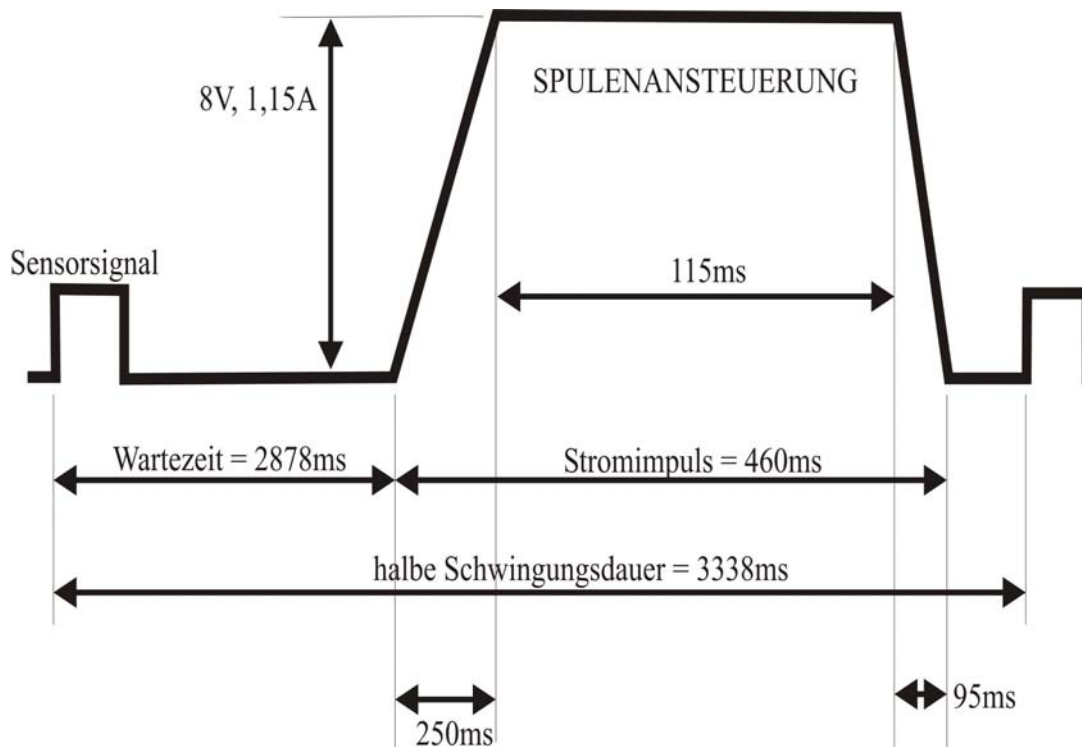


Abb. 3.15.: Zeitdiagramm der Spulenansteuerung

3.2.7. Magnetspule

Die Spule besteht aus ca. 2120 Windungen Kupferdraht (ca. 1,2 km Länge) mit je 1 mm Durchmesser. Die Spule ist 48 mm hoch und hat einen Durchmesser von 310 mm. Das erzeugte Magnetfeld hat eine Stärke von max. 116 mT bei einem Stromfluss von 1 A. Die in Abb. 3.16. gezeigte Magnetfeldmessung wurde ohne den Weicheisenkern durchgeführt. Dieser wurde zur besseren Orientierung miteingezeichnet.

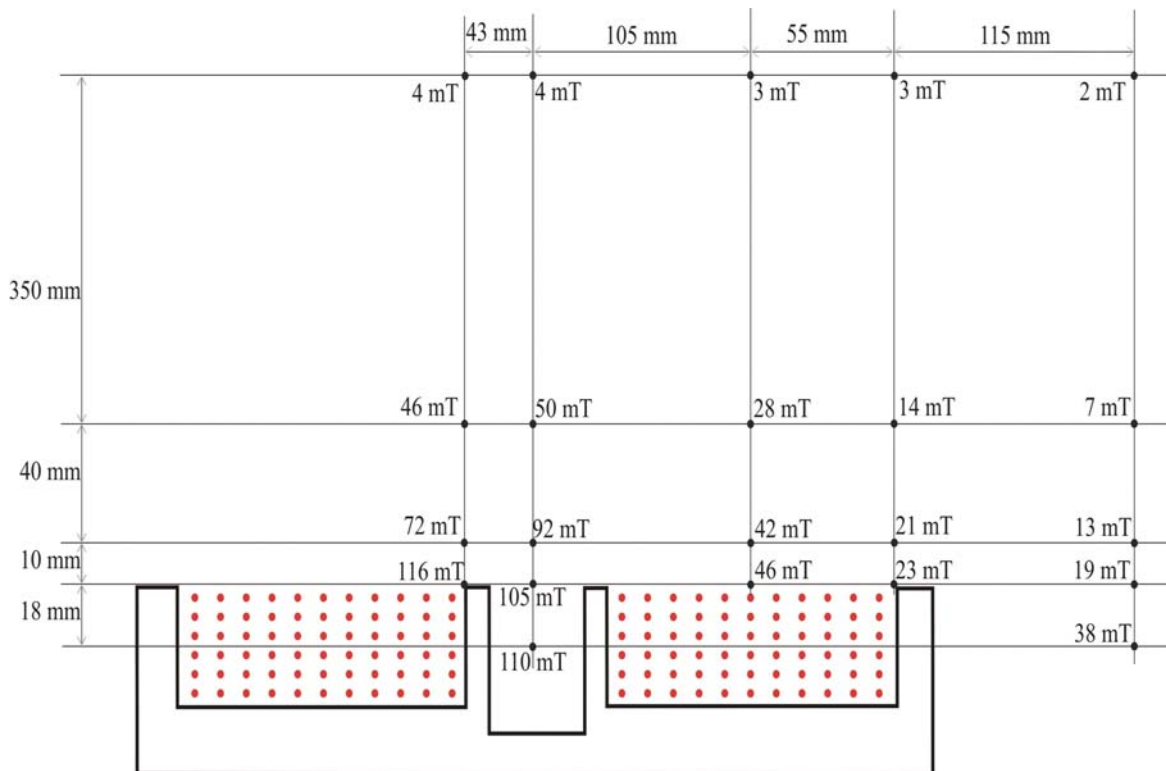


Abb. 3.16.: Magnetfeldmessung der Spule

Die Pendelkugel wird bei einer Vollausslenkung um 16 mm gegenüber dem Nulldurchgang angehoben. Das entspricht einer potentiellen Energie von 10,9 Joule bei 69,3 kg Kugelmasse. Gleichsetzen mit der kinetischen Energie im Nulldurchgang ergibt eine Geschwindigkeit von 0,56 m/s. Wenn jemand die Kugel mit Hilfe eines Motors in 5 Sekunden über das 90 cm hohe Gelände hieven wollte, so müsste er eine Arbeit von 122,4 W verrichten. Dies entspricht einer Stundenleistung von 88,1 kWh oder einem 360 PS – Motor mit einem Wirkungsgrad von 33 %.

$$v_{\text{Nulldurchgang}} = 0,56 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h = 611,9 \text{ J} = W$$

$$P = \frac{W}{t} = 122,4 \text{ W} \hat{=} 88,1 \text{ kWh}$$

Pro Schwingung muss die Spule sehr wenig Energie auf die Kugel übertragen, da die Dämpfung durch Luftreibung sehr gering ist. So wird die Amplitude nach 100 Schwingungen nur um 2 cm kleiner, das entspricht 3,3 %. Pro Schwingung muss die Spule also eine Energie von 3,6 mJ auf die Kugel übertragen.

Die aus der nulldurchgangsgeschwindigkeit resultierende Corioliskraft liegt bei

$$F_C = 2 \cdot m \cdot v \cdot \omega = 8,98 \cdot 10^{-4} \text{ N} .$$

3.2.8. Internetpräsentation

Der Internetauftritt des Foucaultschen Pendels wurde erstellt, um auswärtige Personen, die nicht jeden Tag auf dem Weg in das Neuenheimer Feld das Foucaultsche Pendel sehen, zu einer Besichtigung zu animieren. Das Kirchhoff-Institut selbst besitzt ein umfangreiches Angebot von Informationen auf seiner Startseite <http://www.kip.uni-heidelberg.de/>. Unter der Überschrift „Öffentliche Wissenschaft“ ist unter anderem die Startseite zum Internetauftritt des Foucaultschen Pendels zu finden. Diese Seite enthält verschiedene Unterseiten, die so miteinander vernetzt sind, dass man sie sich nacheinander ansehen kann. Den Anfang macht die Seite „Willkommen“, wo ein kurzer Begrüßungstext steht.

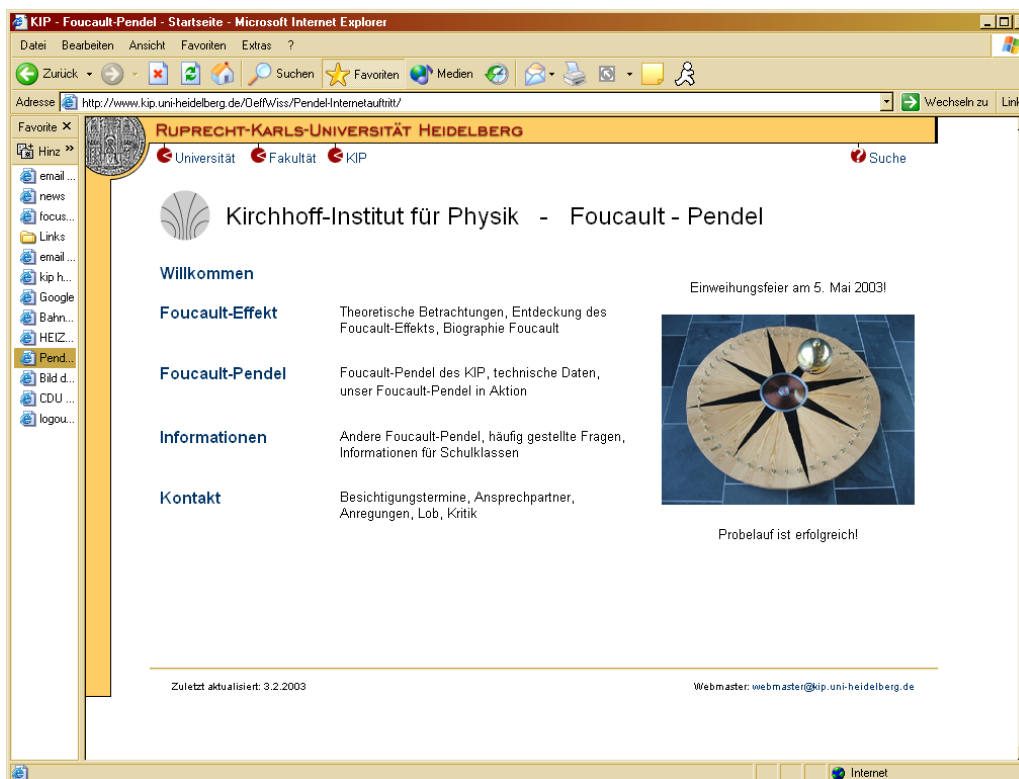


Abb. 3.17.: Internetauftritt - Startseite

Als nächstes öffnet sich dann der Abschnitt „Foucault-Effekt“. Hier sind vier Dokumente mit den Titeln „Theoretische Herleitung des Foucault-Effekts“, „Der Foucault-Effekt am Breitenkreis“, „Biographie Foucault“ und „Die Entdeckung des Foucault-Effekts“ anklickbar. Diese vier Dokumente stellen allgemeine Abhandlungen dar, um den Leser in die Thematik des Foucault’schen Pendels einzuführen.

Die dritte Unterseite hat „Das Foucault-Pendel am Kirchhoff-Institut“ als Thema. Hier findet man die technischen Daten und die Bildergalerie. Auf dieser Seite besteht auch die Möglichkeit, mittels einer Internetkamera das Pendel live zu betrachten. Die

Internetkamera filmt die Pendelplatte schräg von oben, so dass sich der Foucault-Effekt auch hier gut beobachten lässt.

Die nächste Unterseite mit dem Titel „Informationen“ besteht aus zwei Links. Der erste Link führt zum Foucaultschen Pendel der Universität Osnabrück. Der zweite Link enthält eine Linksammlung von anderen Foucaultschen Pendeln auf der ganzen Welt. Diese Linksammlung ist noch nicht vollständig und wird laufend ergänzt. Auf dieser Seite finden sich auch die E-Mail Adressen, unter denen sich Schulklassen oder andere an einer Besichtigung interessierten Personen nach einem Termin erkundigen können. Das Pendel und die dazugehörige Informationstafel kann man ohne vorherige Anmeldung besichtigen. Wenn allerdings ein Institutsangehöriger für Fragen zur Verfügung stehen soll, muss dies vorher abgesprochen werden.

Auf der fünften und letzten Unterseite mit der Überschrift „Kontakt“ findet man die Adresse des Instituts und weitere Ansprechpartner für Terminvereinbarungen.

3.2.9. Präsentationstafel

Die ebenfalls aus Lärchenholz angefertigte Präsentationstafel dient der übersichtlichen Information des Besuchers. Hier liegt die Broschüre zum Foucault-Pendel aus, des weiteren findet die Elektronik zur Magnetspulen-Ansteuerung hier ihren Platz. Die an der Informationstafel ausgehängten Texte sind größtenteils der vorliegenden Staatsexamensarbeit entnommen. Zusätzlich wurde ein Hinweis mit Blick auf die gute Zusammenarbeit mit der Universität Osnabrück angebracht.

3.2.10. Technische Daten

Länge des Pendelseiles	11,086 m
Durchmesser des Pendelseiles	2,8 mm
Masse der Pendelkugel	69,3 kg
Durchmesser der Pendelkugel	25,0 cm
Masse der Deckeninstallation	58,2 kg
Schwingungsdauer	6,677 s
Auslenkung der Pendelkugel	61,5 cm
Maximales Magnetfeld bei 1 A	116 mT
Höhe der gesamten Installation	11,582 m
Anzahl der Spulenwindungen	ca. 2120
Durchmesser der Bodenplatte	140 cm
Anzahl der Kipp-Stifte	48
Betriebsdruck der Hebepneumatik	4,8 bar

3.3. Das Foucaultsche Pendel an der Universität Osnabrück

Die Fakultät für Physik der Universität Osnabrück ist im Besitz eines 19,6 m hohen Foucaultschen Pendels, das uns als Anregung und Vorbild gedient hat. Im Vorfeld der Konzeption des Foucaultschen Pendels am Kirchhoff-Institut der Universität Heidelberg besuchten sowohl der Leiter der Feinmechanischen Werkstatt unseres Instituts, Herr Lamade, als auch ich die Fakultät für Physik in Osnabrück, um uns ein umfassendes Bild von der dortigen Ausführung machen zu können. Dieses wurde über mehrere Jahre hinweg von verschiedenen Mitgliedern der Fakultät entworfen, gebaut und betreut. So bestand das Pendel zu Beginn aus einer Deckenaufhängung ohne Charron-Ring, der Messingkugel und einer Magnetspule für den Dauerbetrieb. In den folgenden Jahren ist dann der Charron-Ring montiert worden, des weiteren wurde eine Holzplatte angefertigt, auf der die 51 Kippstifte Platz finden. Für die Aufbewahrung dieser Kippstifte ist ein aufwendig gearbeiteter Koffer aus Plexiglas hergestellt worden, da die Kippstifte nur zur Vorführung aufgestellt werden. Darüber hinaus wurde eine Staubabdeckung für die Holzplatte angefertigt, über der das Pendel mit einem verkürzten Reflektorstift trotzdem noch schwingen kann. In einem nächsten Schritt wurde eine Beleuchtung der Holzplatte angebracht, bestehend aus einem Punktscheinwerfer, der an der Gebäudedecke befestigt ist. Anschließend wurde eine Informationstafel installiert. Des weiteren wurde um die Holzplatte herum ein beweglicher Messingring montiert, auf dem die Ziffern 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 und 24 angebracht sind. Dieser Messingring dient als Uhr, die allerdings jeden Tag neu gestellt werden muss, deshalb ist der Messingring beweglich gelagert. Das Foucaultsche Pendel in Osnabrück erfreut sich bei den Schulen der dortigen Umgebung großer Beliebtheit. So finden sich immer wieder Klassen ein, die einen Tag und eine Nacht hindurch die Wanderung des Pendels ausmessen und dann den Breitengrad bestimmen.



Abb. 3.18.: Das Vorbild in Osnabrück

Kapitel 4

Messungen mit dem Foucault-Pendel

4.1. Bestimmung der Erdbeschleunigung

Kurz nach der Montage der Deckenaufhängung, des Pendelseils und der Pendelkugel wurde die Zeit bis zur Fertigstellung der Holzplatte genutzt, um die Erdbeschleunigung g über die Schwingungsdauer des Foucault-Pendels zu messen. Zu diesem Zeitpunkt war noch keine Spule montiert, so dass das Pendel ohne äußere Anregung frei schwingen konnte. Die Pendelkugel wurde nur innerhalb des Charron-Rings ausgelenkt, d. h. das Pendelseil berührte den Charron-Ring während der Messung nicht. Andernfalls wäre das Seil bei jedem Anschlag um 420 mm verkürzt worden, was die Auswertung erheblich kompliziert hätte. Die Auslenkung innerhalb des Charron-Ringes entspricht einem Winkel von $1,5^\circ$ oder einer Auslenkung von 30,0 cm. Es wurde sechs mal die Schwingungsdauer von jeweils 200 Schwingungen gemessen. Die Berechnung des Pendelseils über die absolute Deckenhöhe ergibt eine Länge von $L=11,086\text{m}$, da das Seil 14,4 cm unterhalb der Decke frei schwingen kann und der Schwerpunkt der Kugel 35,2 cm über dem Boden liegt. Die Berechnung der Länge des Pendelseils durch Abmessen des Abstands der Aufhängung zur Decke und des Abstands der Kugel zum Boden ist einfacher und genauer als das direkte Messen des Pendelseils. Die Höhe der Decke von 11,582 m wurde bereits im November 2002 mithilfe eines auf 2 Promille genauen Entfernungsmessers auf Basis eines reflektierten Laserstrahls gemessen.

Messung	1	2	3	4	5	6
Zeit ges. [s]	1335,0	1335,5	1335,0	1335,5	1336,5	1334,5
Fehler [s]	$\pm 5,0$	$\pm 5,0$	$\pm 5,0$	$\pm 5,0$	$\pm 5,0$	$\pm 5,0$
Schwingungs- dauer [s]	6,675	6,6775	6,675	6,6775	6,6825	6,6725
Fehler [s]	$\pm 0,025$	$\pm 0,025$	$\pm 0,025$	$\pm 0,025$	$\pm 0,025$	$\pm 0,025$

Tab. 4.1.: Messergebnisse

Nach Bildung des Mittelwertes gilt:

$$T = (6,677 \pm 0,025) s$$

Betrachtung als mathematisches Pendel

Für die Schwingungsdauer T eines mathematischen Fadenpendels mit der Fadenlänge L gilt:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Die Reduktion des Foucault-Pendels auf ein mathematisches Pendel ist gerechtfertigt, da einerseits die Länge L (gemessen von Aufhängung bis Schwerpunkt Kugel) groß gegen die Auslenkung α ist, d. h. $\sin \varphi$ entspricht φ , und andererseits der durch Luftreibung entstehende Fehler der Schwingungsdauer aufgrund der hohen Kugeldichte vernachlässigt werden kann.

Somit berechnet sich g durch:

$$g = 4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{L}{T^2}$$

Der Fehler der Länge des Pendelseils L wird mit 3 cm abgeschätzt, dadurch ergibt sich der Gesamtfehler der Erdbeschleunigung g zu:

$$\Delta g = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \cdot g =$$

es folgt:

$$g = (9,816 \pm 0,058) \frac{m}{s^2}$$

Der Vergleich mit dem Literaturwert für Heidelberg

$$g = 9,810 \frac{m}{s^2}$$

ergibt eine Abweichung von 0,61‰. Der gemessene Wert stimmt innerhalb seiner Fehlergrenzen sehr gut mit dem Literaturwert überein. Dieser Literaturwert wurde mit den

Werten für Heidelberg (121m NN im ersten Stock des Kirchhoff-Instituts; $\varphi = 49,5^\circ$ geographische Breite) mit folgender Formel berechnet:

$$g = (9,8063 - 0,0264 \cdot \cos(2 \cdot \varphi) - 0,000003 \cdot h) \frac{m}{s^2}$$

Betrachtung als physikalisches Pendel

Für die Schwingungsdauer eines physikalischen Pendels gilt:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{I}{m \cdot g \cdot d}}$$

wobei I das Trägheitsmoment des Pendels ist, m die Gesamtmasse (Seil + Kugel) und d die Strecke von Aufhängung bis zum Schwerpunkt des Systems (dies ist der Schwerpunkt der Kugel) darstellt. Das Trägheitsmoment I berechnet sich aus den einzelnen Komponenten wie folgt, hierbei steht s für die reine Seillänge und r für den Kugelradius (es gilt $d = r + s$):

$$I = \frac{1}{3} \cdot m_{Seil} \cdot s^2 + \frac{2}{5} \cdot m_{Kugel} \cdot r^2 + m \cdot (r + s)^2$$

Der dritte Summand ergibt sich aus dem Steinerschen Satz. Er stellt das in mathematischen Pendelmodell benutzte Trägheitsmoment dar. Mit den Werten

$$m_{Kugel} = 69,3 \text{ kg}$$

$$m_{Seil} = 0,4 \text{ kg}$$

$$r = (0,125 \pm 0,001) \text{ m}$$

$$s = (10,961 \pm 0,03) \text{ m}$$

ergibt sich

$$I = (8582,5 \pm 47,2) \text{ kg m}^2$$

Damit liegt das im mathematischen Pendelmodell angenommene Trägheitsmoment von

$$I_{math} = m \cdot d^2 = 8566,1 \text{ kg m}^2$$

innerhalb der Fehlergrenzen des Trägheitsmoments I des physikalischen Pendels. Somit berechnet sich g:

$$g = 4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{I}{m \cdot d \cdot T^2} \quad \text{und} \quad \Delta g = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2} \cdot g$$

zu:

$$g = (9,836 \pm 0,079) \frac{m}{s^2}$$

Auch dieser Wert stimmt innerhalb seiner Fehlergrenzen mit dem Literaturwert überein. Es ergibt sich allerdings eine größere Abweichung von 2,65‰. Da beim Modell des physikalischen Pendels genauere Annahmen gemacht wurden, ist der für Heidelberg berechnete Literaturwert wohl nicht richtig. Festzuhalten ist, dass die auf zwei verschiedenen Wegen ermittelten Werte für die Erdbeschleunigung g innerhalb ihrer Fehlergrenzen sowohl mit dem Literaturwert als auch mit dem Wert des jeweils anderen Modells übereinstimmen.

4.2. Bestimmung des Breitengrads

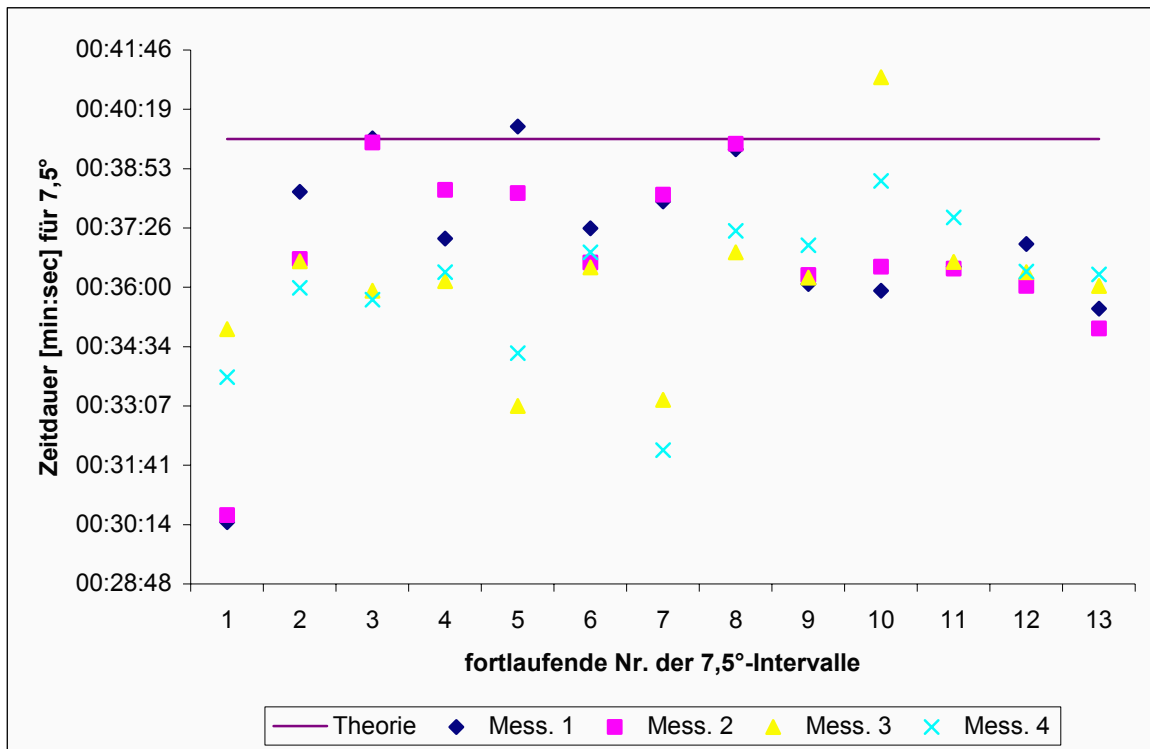
Am 2. und 3. April 2003 wurden je zwei Messreihen am probeweise aufgebauten Foucault-Pendel aufgenommen: Die 48 symmetrisch angeordneten Kipp-Stifte bilden einen Kreis. Dadurch entspricht der Abstand von zwei Kipp-Stiften jeweils einem Winkel von $7,5^\circ$. Um die Winkelgeschwindigkeit der Drehung der Pendelebene bestimmen zu können, wurden die jeweiligen Umfall-Uhrzeiten der Kipp-Stifte notiert:

Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4
08:56:04	08:58:44	08:33:05	08:34:42
09:31:03	09:32:33	09:03:23	09:05:10
10:07:41	10:08:32	09:41:42	09:41:51
10:43:36	10:44:14	10:21:19	10:21:22
11:19:45	11:20:36	10:58:30	10:59:44
11:52:52	11:55:00	11:38:24	11:38:01
12:29:21	12:31:51	12:15:50	12:14:37
13:02:37	13:03:54	12:53:55	12:52:52
13:39:28	13:41:16	13:33:16	13:32:21
14:15:42	14:18:17	14:09:21	14:08:39
14:56:48	14:56:52	14:45:16	14:45:09
15:33:25	15:34:34	15:21:46	15:21:36
16:09:47	16:10:57	15:58:49	15:57:38
16:45:49	16:47:16	16:34:18	16:32:38

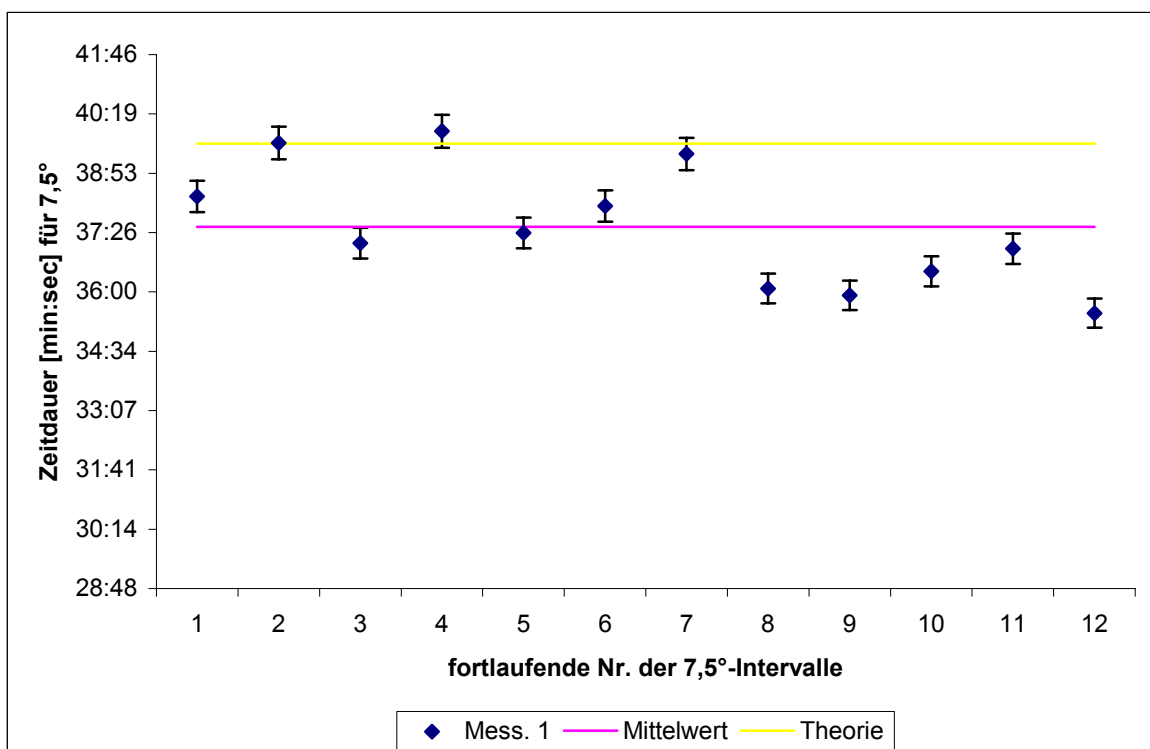
Tab. 4.2.: Umfallzeiten

Es war möglich, zwei Messreihen gleichzeitig aufzunehmen, da die Pendelkugel immer zwei gegenüberliegende Kipp-Stifte umwirft. Diagramm 1 zeigt alle gemessenen Intervallzeiten. Diagramm 2 bis Diagramm 5 zeigen dann die einzelnen Messreihen, zusätzlich wurde hier noch der Mittelwert einer jeden Messreihe eingezeichnet. Der Fehler

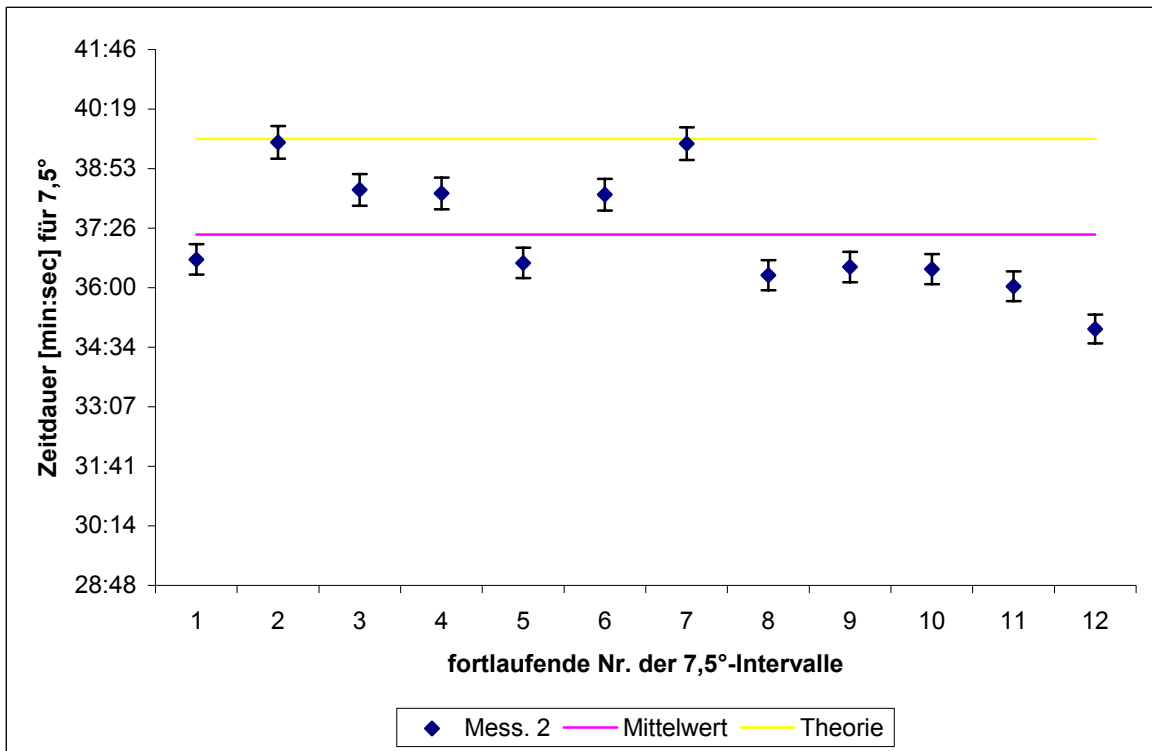
eines jeden Messwertes resultiert aus der endlichen Dicke der Kippstifte, dadurch ist eine Messungenauigkeit von $\pm 1\%$ bedingt.



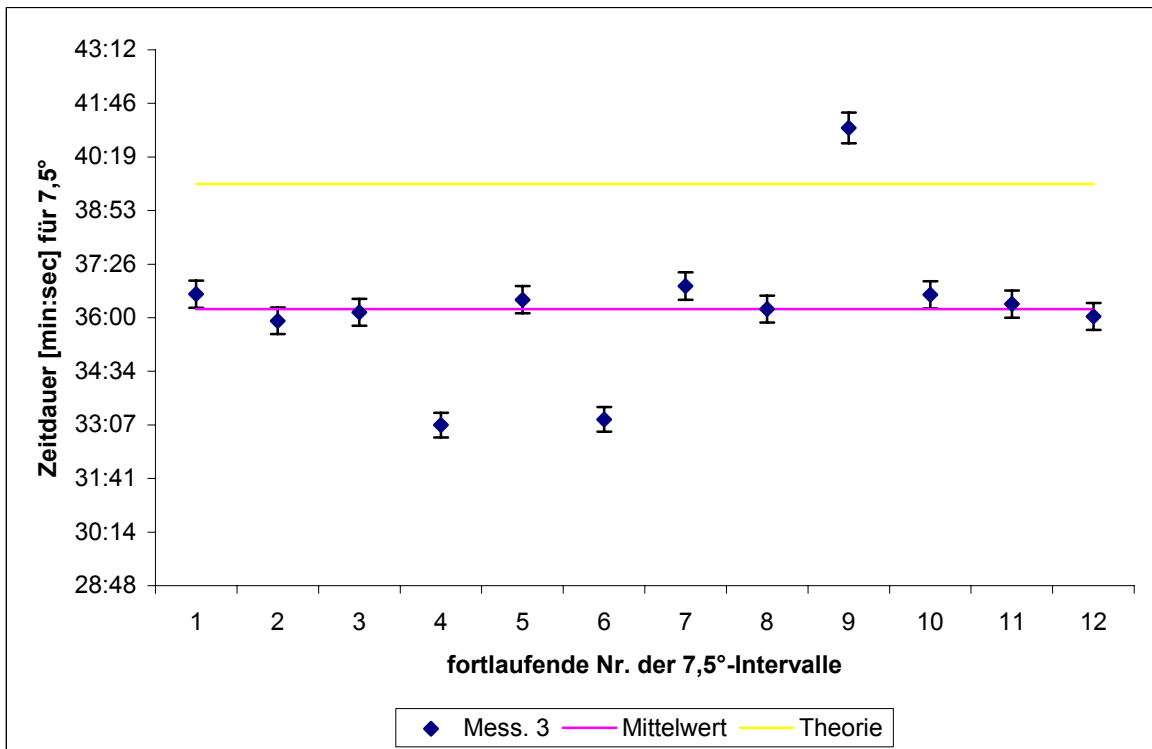
Diag.: 4.1.: alle Intervallzeiten



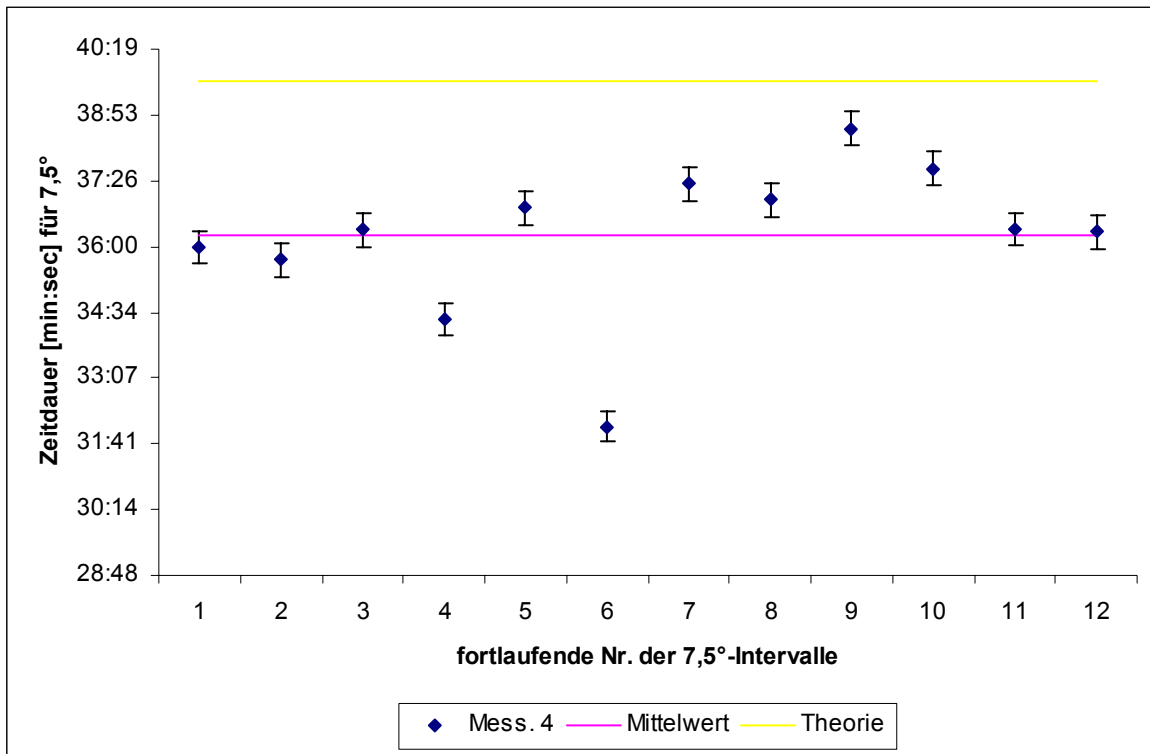
Diag. 4.2.: Messung 1



Diag. 4.3.: Messung 2



Diag. 4.4.: Messung 3



Diag. 4.5.: Messung 4

Der jeweils erste Messpunkt wurde nicht weiter berücksichtigt, da hier der Einschwingvorgang noch nicht abgeschlossen war. Die dadurch verkürzte Zeit entsteht durch die Energie, die der Pendelkugel über die Magnetspule zugeführt wird. Da der verwendete Charron-Ring die Seillänge bei jeder Vollausslenkung um 42 cm verkürzt, entfernt man sich vom Modell des mathematischen Pendels. Um bei verkürzter Seillänge aber die gleiche Amplitude erreichen zu können, die zum Umwerfen der Kipp-Stifte nötig ist, muss im Vergleich zum unverkürzten Seil die Pendelkugel mit mehr Energie versorgt werden. Dies führt zwangsläufig zu einem höheren Hub. Die hierfür aufgebrauchte zusätzliche Energie erzeugt bei jedem Nulldurchgang des Pendels eine höhere Geschwindigkeit. Das führt zu einer größeren Corioliskraft, da diese proportional zur Geschwindigkeit der Pendelkugel ist.

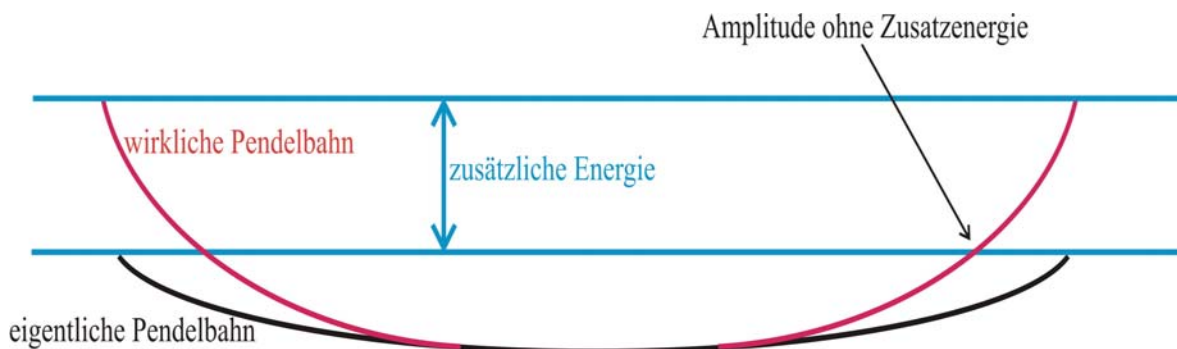


Abb. 4.1.: Einfluss des Charron-Ringes

Des weiteren wurde während des Einschwingvorganges ein Zittern des Pendelseiles bemerkt. Dieses Zittern hatte eine Amplitude von maximal 10 mm. Die Richtung des Zitterns zeigte in die Richtung der Schwingungsebene. Auch dieses Zittern wird durch den Charron-Ring verursacht, da das Pendelseil bei jeder Vollausslenkung an diesem anschlägt. Dadurch wird wie oben beschrieben die Seillänge verkürzt und es überlagern sich im Prinzip zwei Pendelschwingungen. Es entsteht eine Art stehende Welle im Pendelseil. Das Zittern lässt nach ca. 6 Stunden Dauerbetrieb deutlich nach. Die für das Zittern notwendige Energie muss zusätzlich zur Kompensation der Luftreibung auch von der Magnetspule erzeugt werden.

Die großen Abweichungen der Messwerte in den obigen Diagrammen resultieren aus der ungenauen Justierung der Kippstifte sowie aus leichten elliptischen Abweichungen der normalerweise ebenen Pendelbahn. Es ist auch möglich, dass die Kugel nicht immer genau zur Ruhelage zurückgeschwungen ist, sondern z. B. 5mm links am Spulenzentrum vorbeigeschwungen ist. Da zeitgleich mit der Messung auch die Stromstärke der Magnetspule justiert wurde, ergeben sich durch die unterschiedlich große zugeführte Energie ebenfalls Abweichungen.

Die Auswertung der oben notierten Zeiten brachte folgendes Ergebnis:

	Intervallzeit [min:sec]	Standardabweichung [min:sec]
Messung 1	37:35	01:30
Messung 2	37:17	01:26
Messung 3	36:14	01:59
Messung 4	36:14	01:41

Tab. 4.3.: Intervallzeiten

Nach Bildung des Mittelwertes:

$$T_{\text{Intervallzeit}} = (2210 \pm 119)s$$

Nach durchschnittlich 36 Minuten und 50 Sekunden wurde der jeweils nächste Kipp-Stift umgeworfen. Dies geschah in einem Zeitfenster von 4 Minuten. Die für Heidelberg erwartete Intervallzeit liegt bei

$$T_{\text{theoretisch}} = 2376s$$

Der gemessene Wert liegt also innerhalb der 2σ -Umgebung des Literaturwertes.

Die für Heidelberg erwartete Winkelgeschwindigkeit liegt bei $11,36^\circ$ pro Stunde. Die gemessene Winkelgeschwindigkeit liegt bei $(12,2 \pm 0,5)^\circ$ pro Stunde. Eine volle Drehung führt die Pendelebene in 29,5 Stunden statt in der erwarteten Zeit von 31,5 Stunden aus.

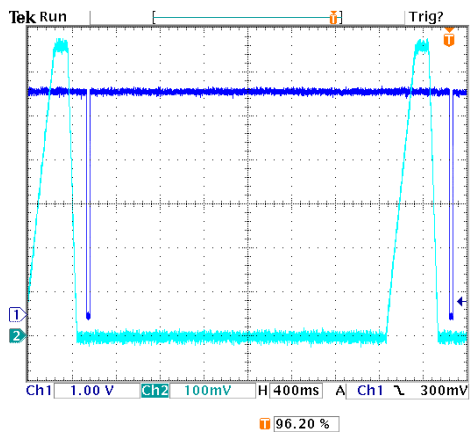
$$\Omega = (12,2 \pm 0,5) \frac{1}{h}$$

Der daraus resultierende Breitengrad ist zu weit nördlich, er liegt bei $54,4^\circ$. Auf diesem Breitengrad liegen Städte wie Kiel und Belfast.

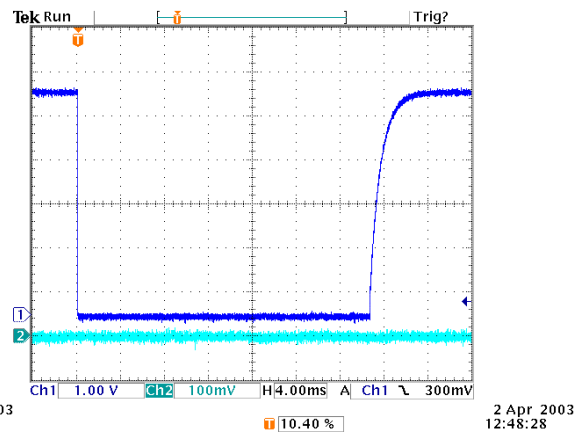
Die oben beschriebene zu schnelle Drehung der Pendelebene aufgrund der zugeführten Energie durch die Magnetspule führt zu dieser nördlichen Abweichung von $5,2^\circ$. Die Verminderung des Foucault-Effekts durch den Charron-Ring wird anders als in Osnabrück überkompensiert. Die in Osnabrück durchgeführten Messungen ergaben einen Breitengrad in der Nähe von Rom.

4.3. Messung der Antriebselektronik

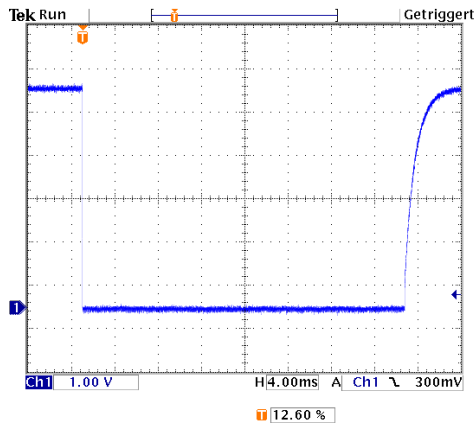
Der Stromimpuls, welcher durch die Magnetspule fließt, sowie der Nulldurchgangsimpuls wurden ausgemessen:



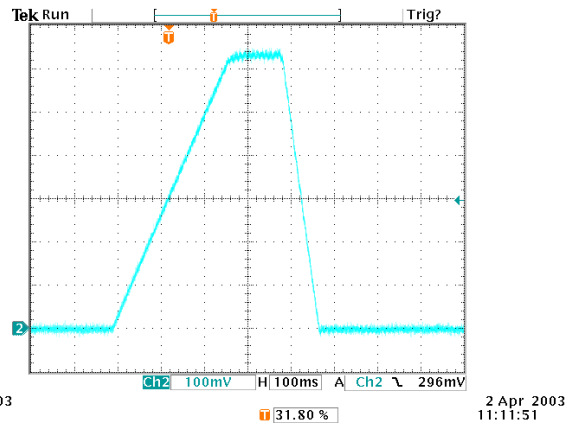
Diag. 4.6.: einzelnes Intervall



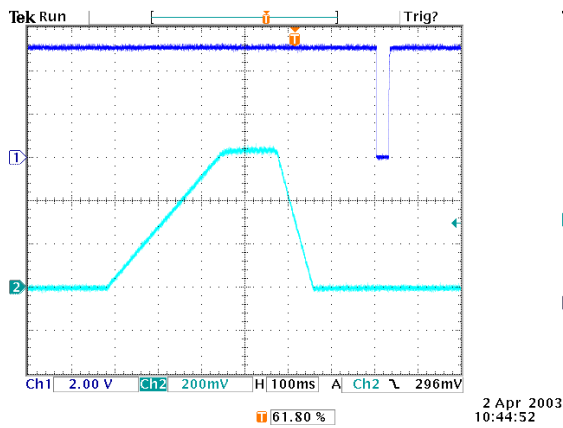
Diag. 4.7.: Nulldurchgang



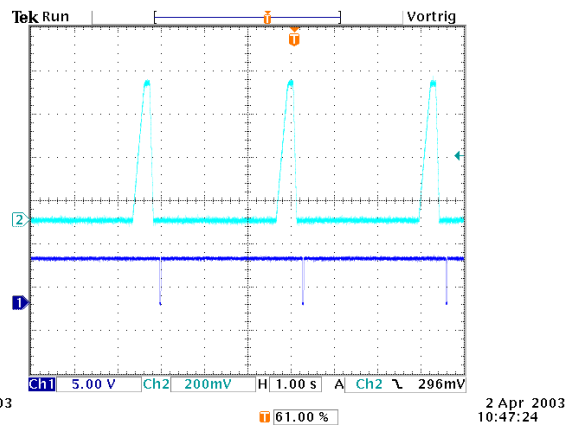
Diag. 4.8.: Nulldurchgang



Diag. 4.9.: Stromimpuls



Diag. 4.10.: drei Intervalle



Diag. 4.11.: Stromimpuls

Diag. 4.6. zeigt zwei aufeinanderfolgende Stromimpulse sowie den nachfolgenden neuen Nulldurchgang. In Diag. 4.7. und Diag. 4.8. wird der Nulldurchgangsimpuls dargestellt. Er hat eine Amplitude von 5V sowie eine Länge von 27ms. Der in Diag. 4.9. und Diag. 4.11. gezeigte Stromimpuls hat eine Amplitude von 1,15A bei einem Messwiderstand von 0,55Ω und eine totale Länge von 460ms. Diag. 4.10. zeigt drei aufeinanderfolgende Intervalle.

Kapitel 5

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird über die Planung, den Bau und den Betrieb des Foucaultschen Pendels am Kirchhoff-Institut für Physik berichtet. Die Arbeit erstreckt sich von der Biographie Foucault bis hin zur Bestimmung des Breitengrades des KIP mithilfe des fertigen Foucault-Pendels. Im Abschnitt „Entstehungsgeschichte“ wird beispielsweise über alle Probleme berichtet, die es zu lösen galt. In der vorliegenden Arbeit wurde alles Wissenswerte über Foucault-Pendel zusammengetragen. Für die Zukunft bleibt zu hoffen, dass das nun in Dauerbetrieb gegangene Foucault-Pendel seine Aufgabe, die Besucher von der sich drehenden Erde zu überzeugen, zuverlässig und dauerhaft ausführen wird.

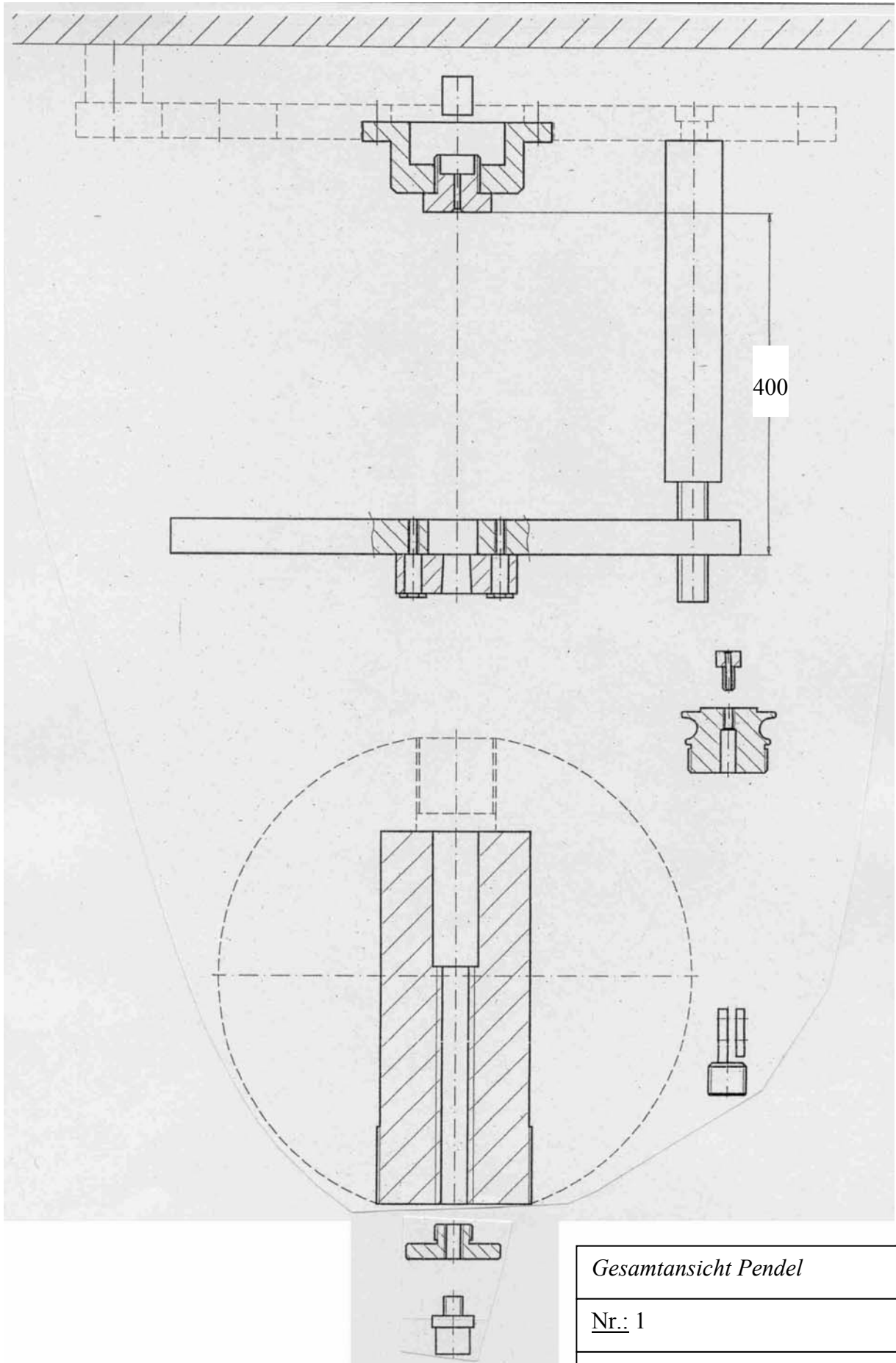
Das vor einem halben Jahr gestartete Projekt zur Errichtung des Foucaultschen Pendels ist nunmehr von meiner Seite aus abgeschlossen, da meine Zeit am Kirchhoff-Institut mit Abgabe der vorliegenden Staatsexamensarbeit endet. Doch auch weiterhin möchte ich mich hiermit bereit erklären, für Führungen und Besichtigungen sowie Wartungsarbeiten zur Verfügung zu stehen. Weiterhin gilt es noch, die endgültige Platine für die elektronischen Bauteile zur Spulenansteuerung zu installieren, da die momentan arbeitende Elektronik noch aus einer Probeplatine besteht. Dann wird die Elektronikbox auch über drei Displays verfügen, auf denen die Stromdauer durch die Spule, die Wartezeit bis zur Stromfreigabe und die Schwingungsdauer angezeigt werden.

Anlage A

Konstruktionszeichnungen

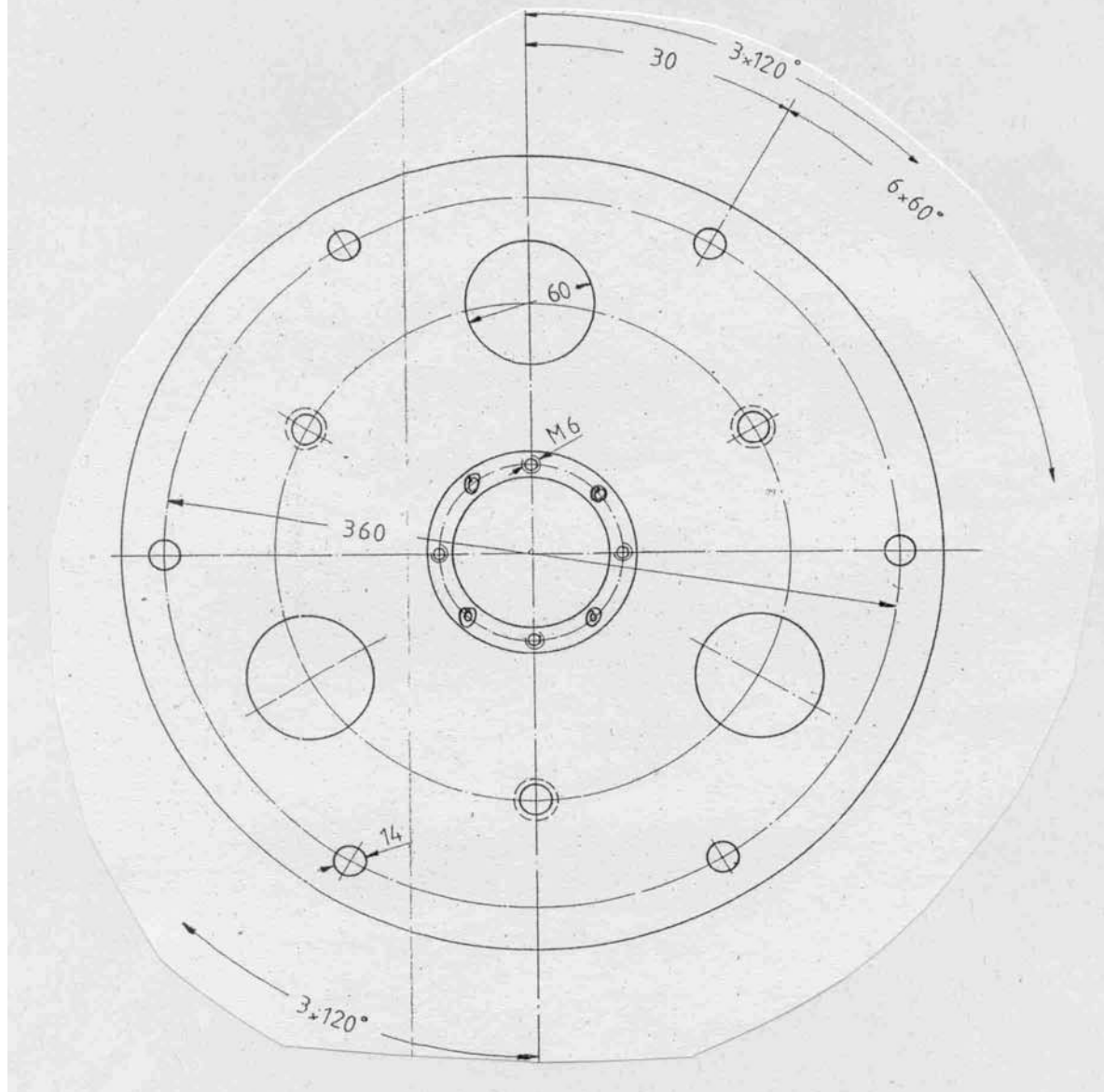
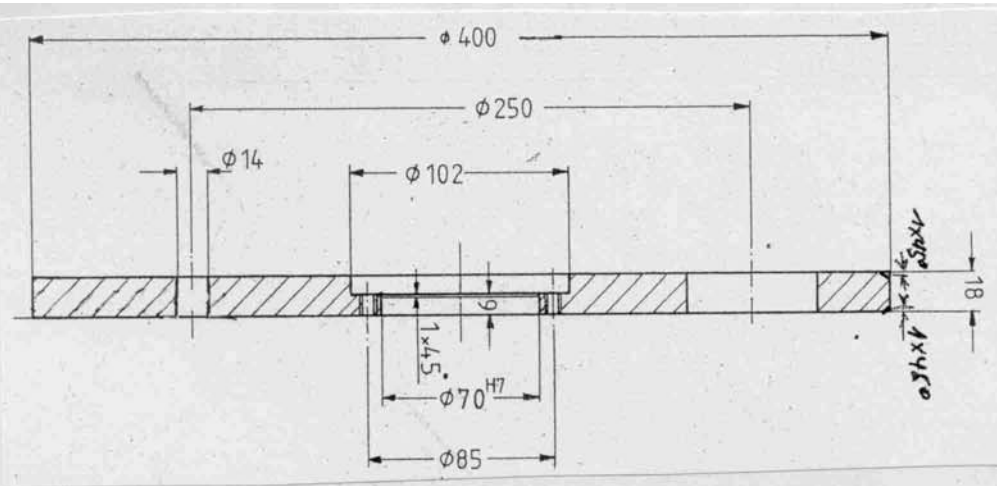
Gesamtansicht des Pendels	Nr. 1	Seite 52
Deckenplatte für Seilaufhängung	Nr. 2	Seite 53
Halteplatte Charron-Ring	Nr. 3	Seite 54
Halterung Seil	Nr. 4	Seite 55
Abstandsstangen Charron-Ring	Nr. 5	Seite 56
Halterung für Seilklemmung	Nr. 6	Seite 57
Seilklemmung	Nr. 7	Seite 58
Charron-Ring	Nr. 8	Seite 59
Abstandsstangen Deckenring	Nr. 9	Seite 60
Deckenring	Nr. 10	Seite 61
Pendelkugel	Nr. 11	Seite 62
Eisenkern für Pendelkugel	Nr. 12	Seite 63
Eisenkern für Pendelkugel	Nr. 13	Seite 64
Kugelendstück oben	Nr. 14	Seite 65
Kugelendstück Abschluss oben	Nr. 15	Seite 66
Seilklemmung in Kugel	Nr. 16	Seite 67
Seilklemmung in Kugel - Detail	Nr. 17	Seite 68
Kugelendstück unten	Nr. 18	Seite 69
Reflektorstift Kugel unten	Nr. 19	Seite 70

Die Konstruktionszeichnungen der Hebe pneumatik, der Kippstifte mit Unterlegplättchen, der Präsentationstafel, des Geländers und des Wickelkörpers der Spule sind in der Anlage nicht mit aufgeführt.



Gesamtansicht Pendel

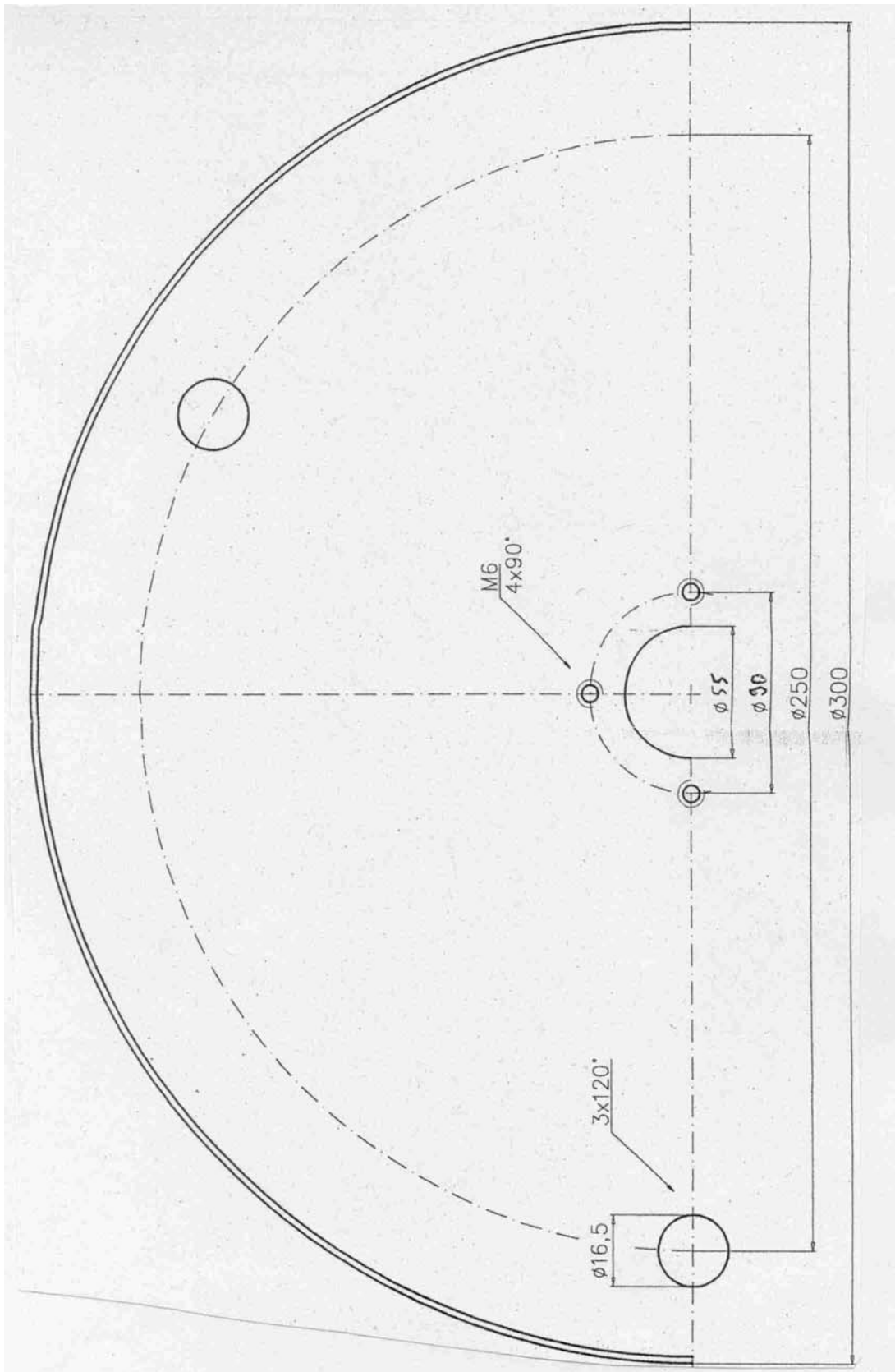
Nr.: 1



Deckenplatte f. Seilaufhängung

Nr.: 2

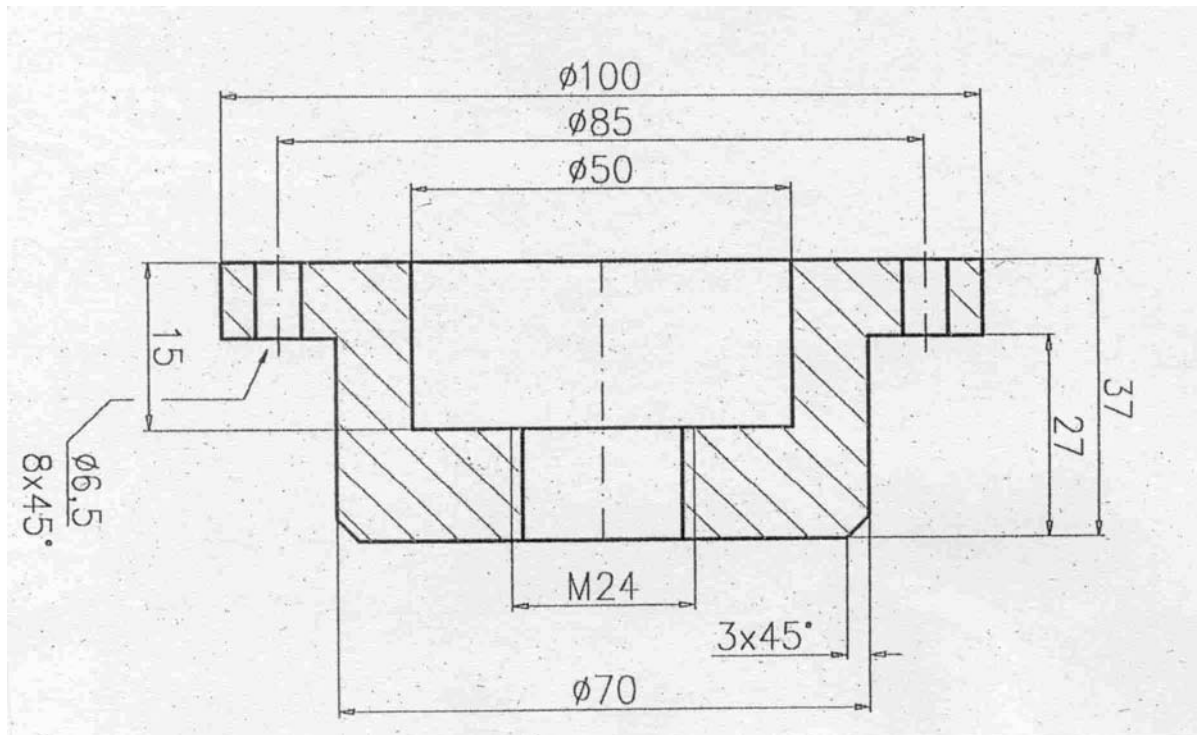
Werkstoff: Edelstahl



Halteplatte Charron-Ring

Nr.: 3

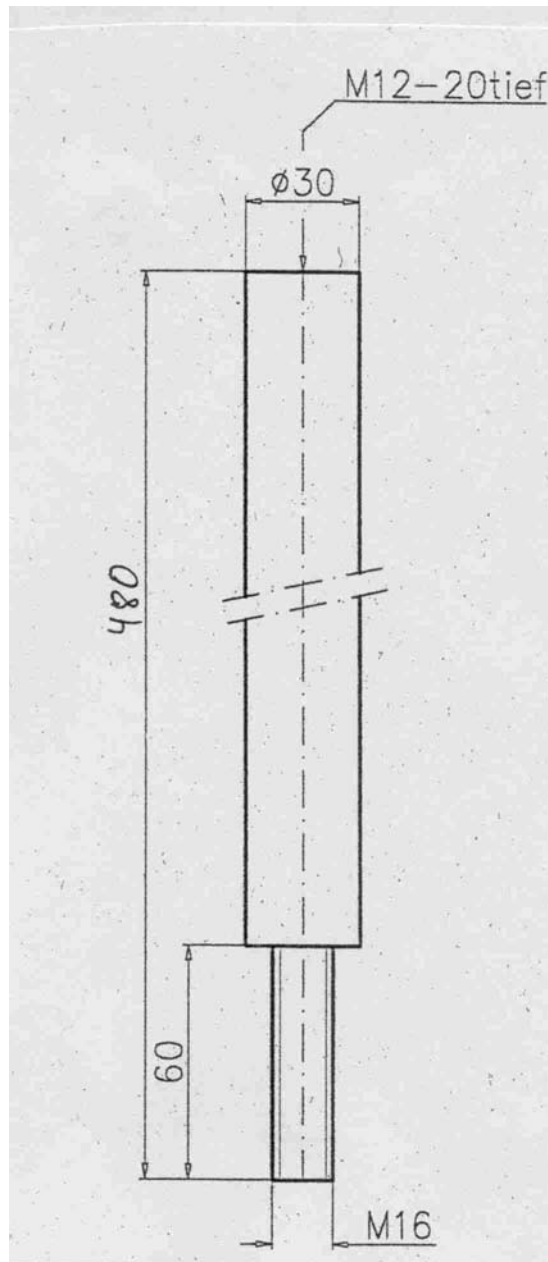
Werkstoff: *Aluminium*



Halterung Seil

Nr.: 4

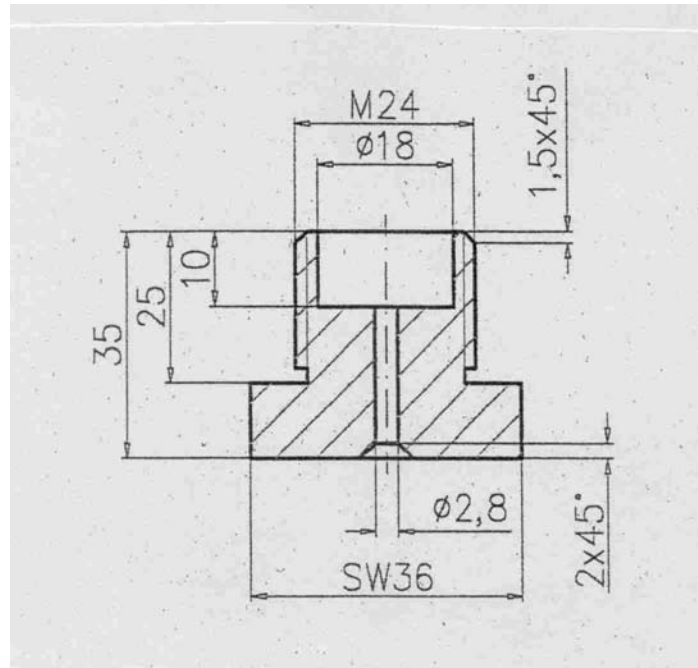
Werkstoff: *Edelstahl*



Abstandsstangen Charron-Ring

Nr.: 5

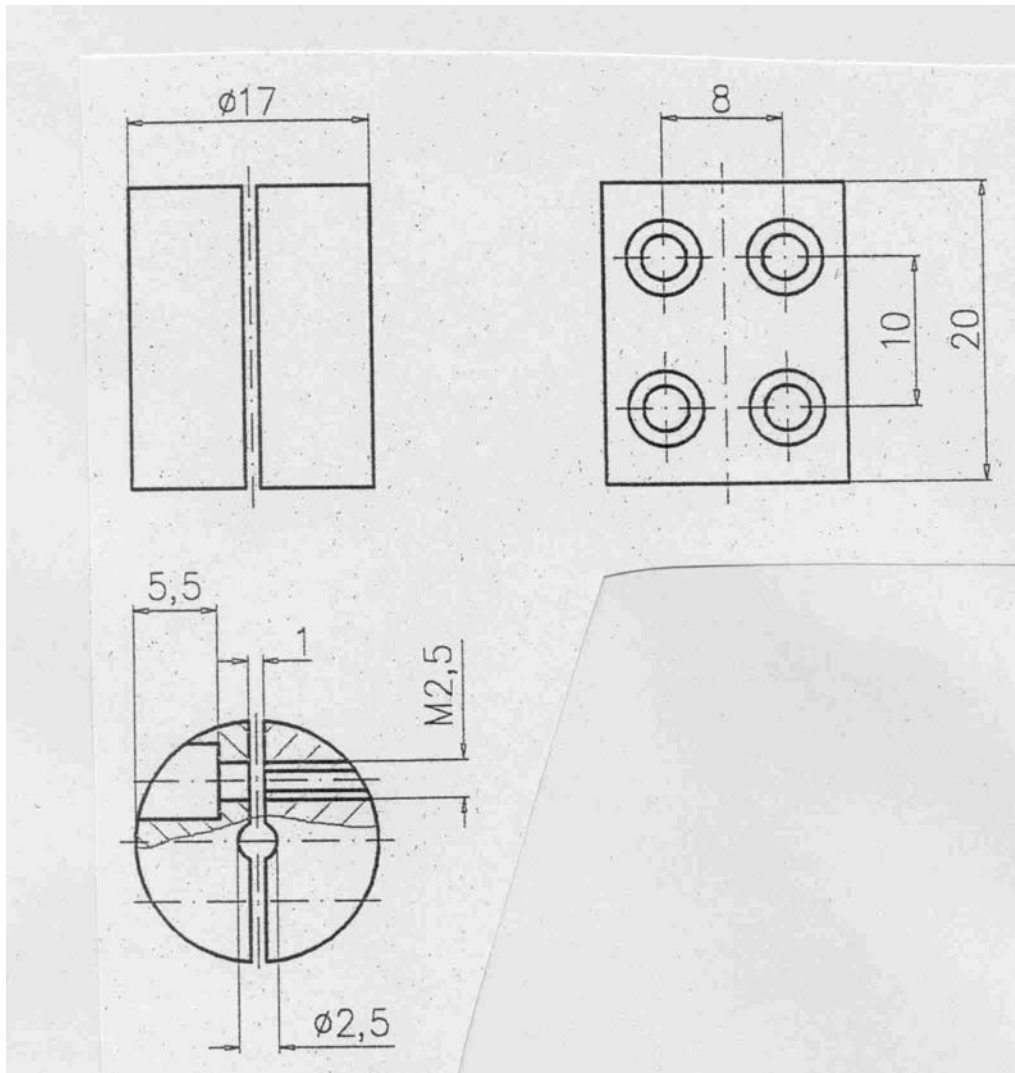
Werkstoff: *Edelstahl*



Halterung für Seilklemmung

Nr.: 6

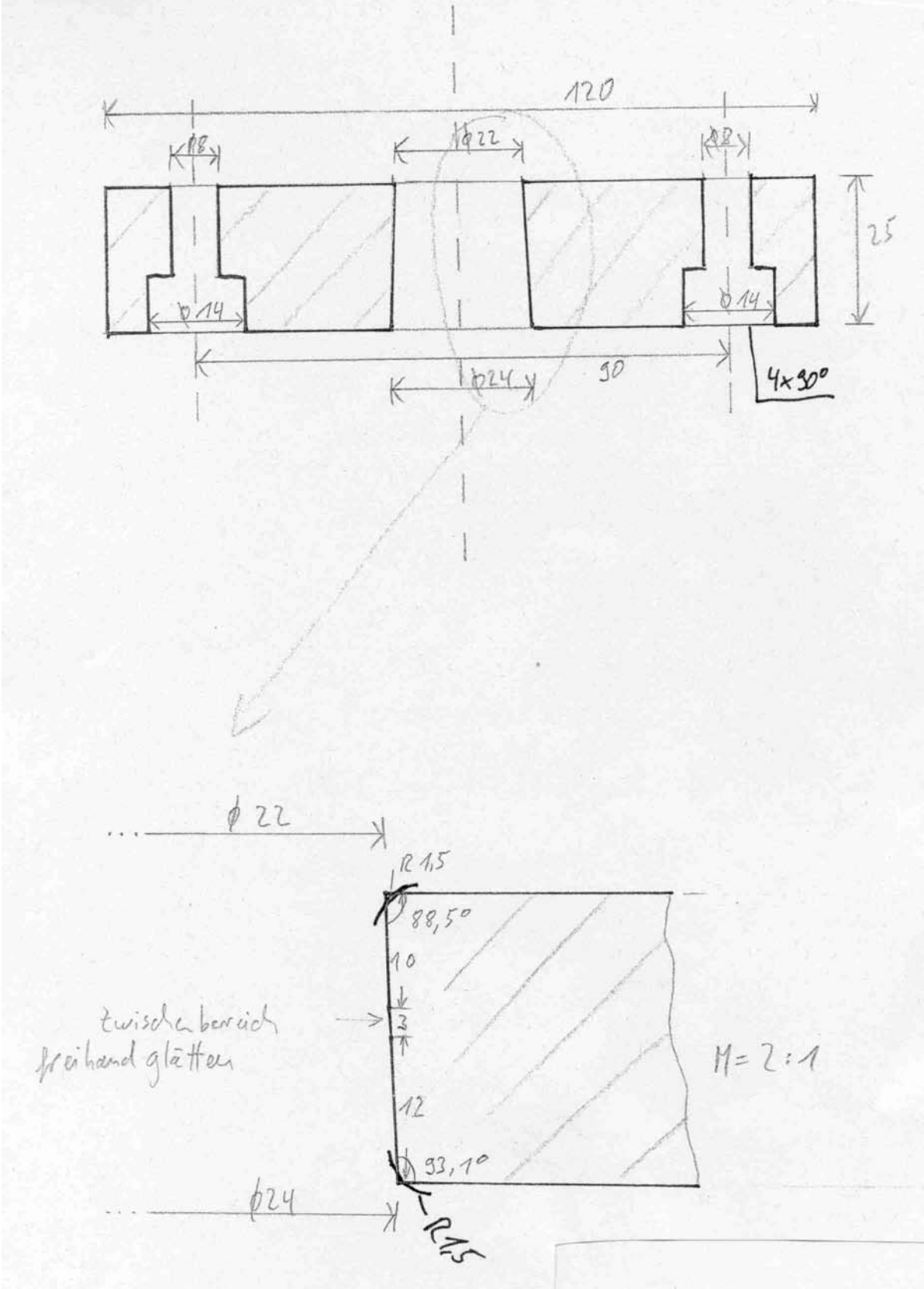
Werkstoff: *Edelstahl*



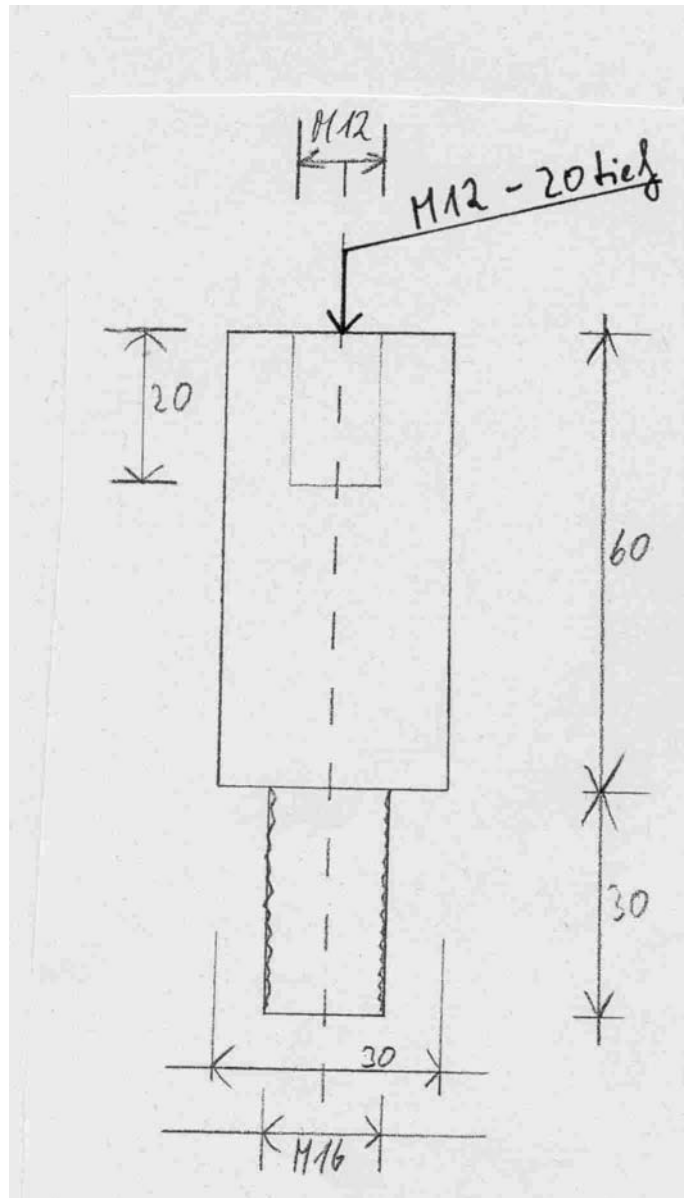
Seilklemmung

Nr.: 7

Werkstoff: *Edelstahl*



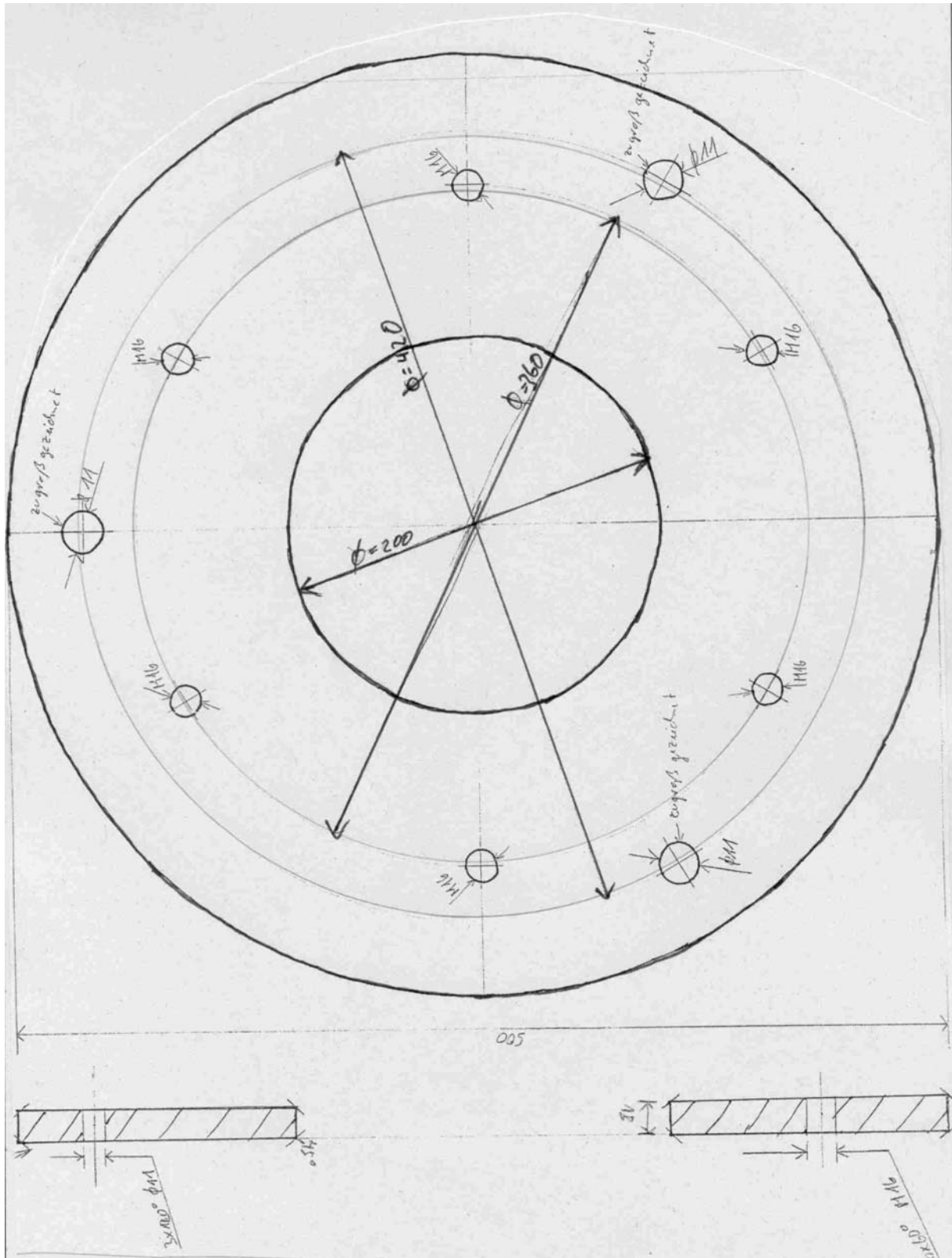
Charron-Ring
Nr.: 8
Werkstoff: Edelstahl



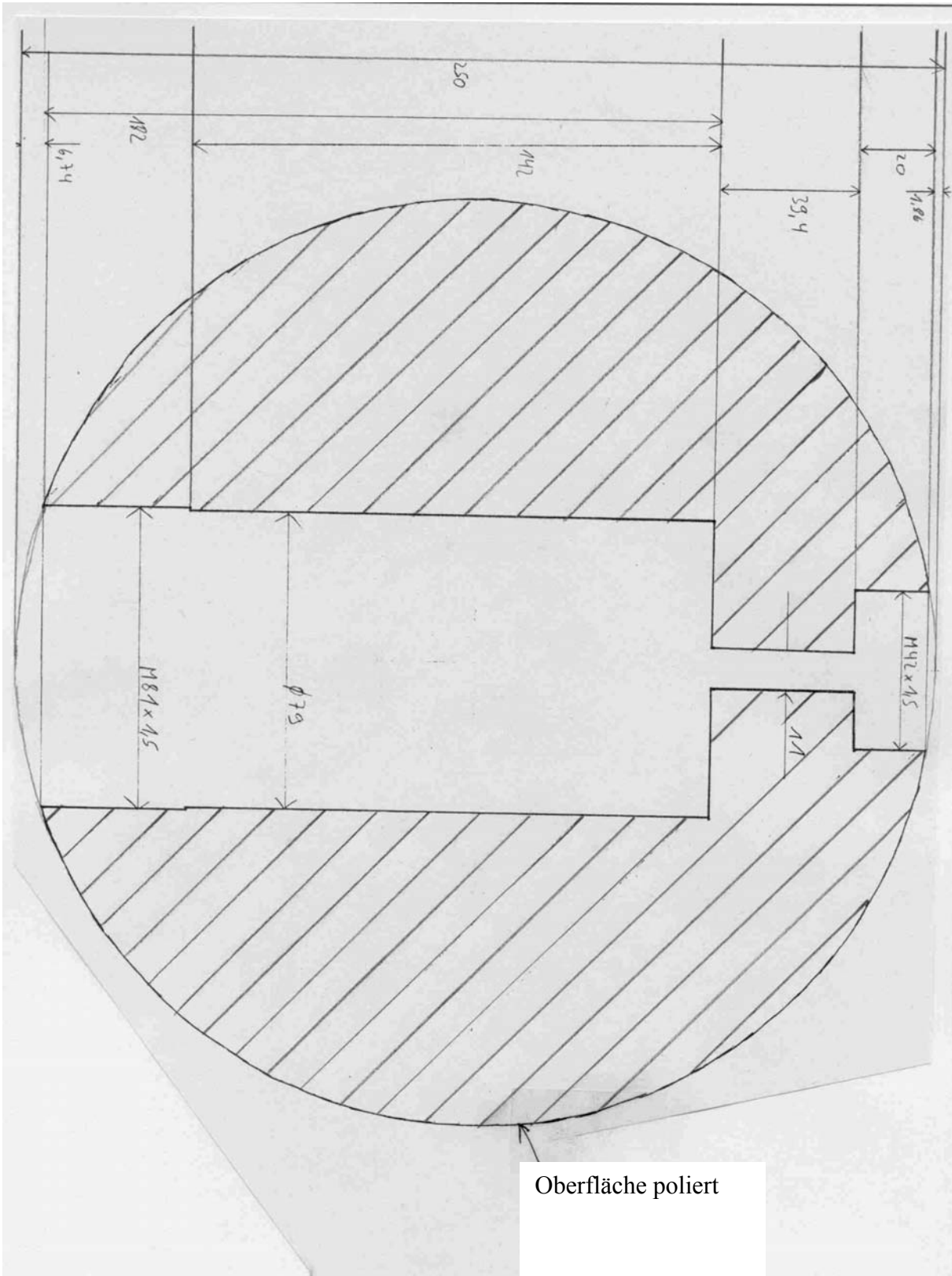
Abstandsstangen Deckenring

Nr.: 9

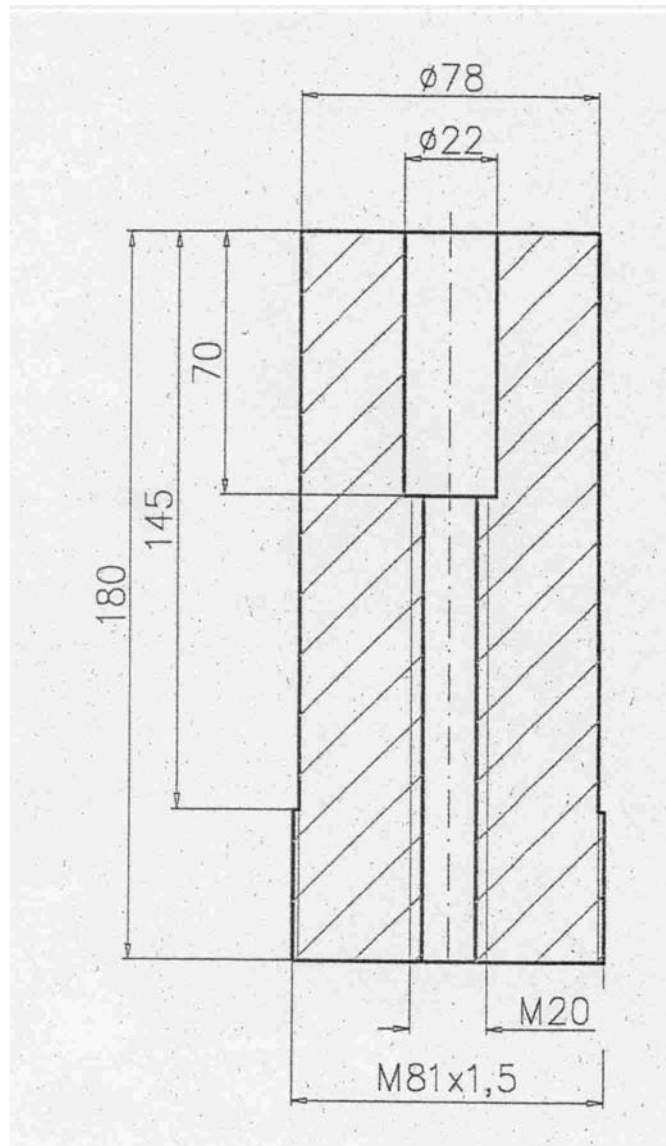
Werkstoff: *Edelstahl*



Deckenring
Nr.: 10
Werkstoff: Edelstahl



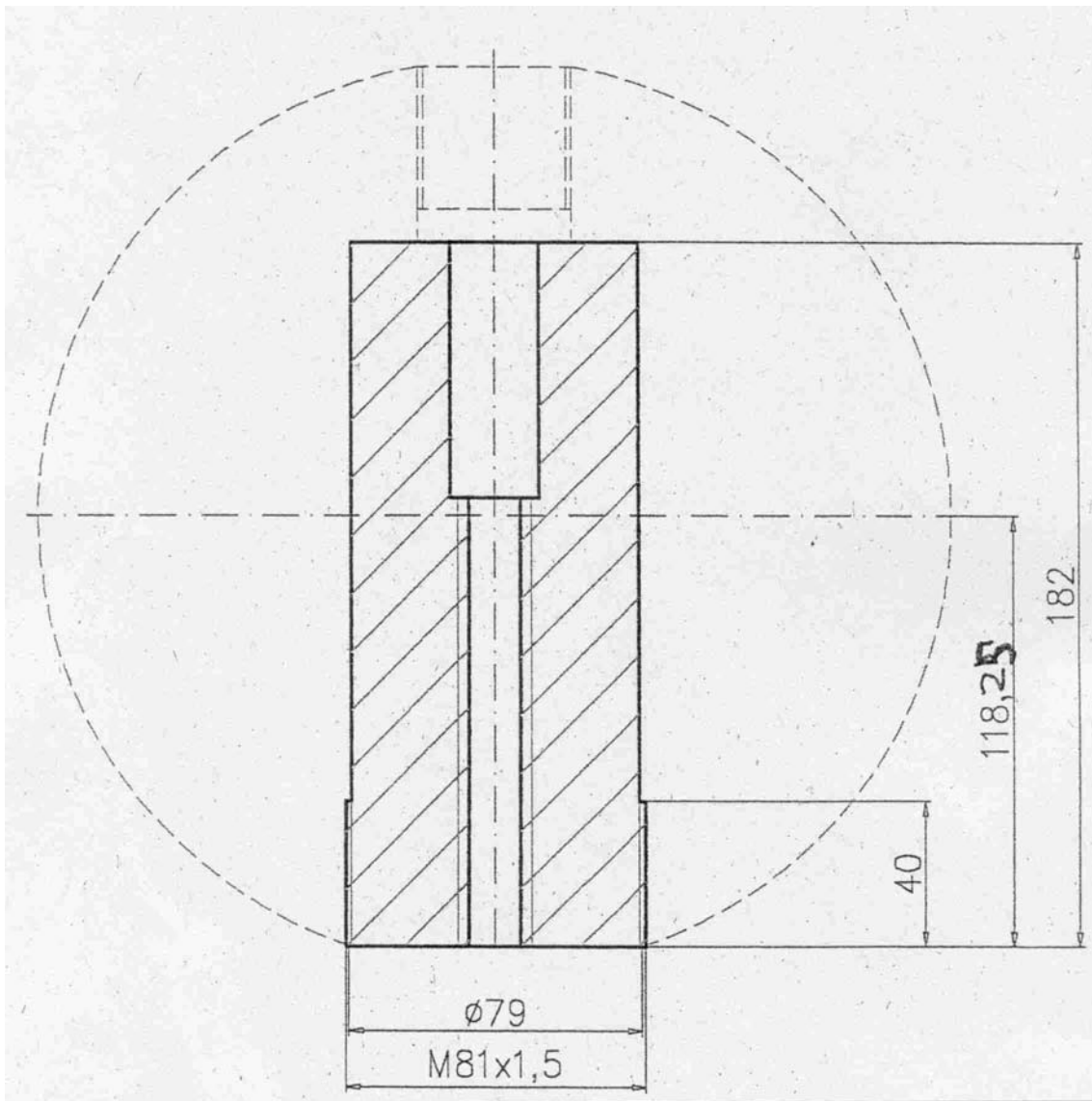
<i>Pendelkugel</i>
<u>Nr.:</u> 11
<u>Werkstoff:</u> Messing



Eisenkern für Pendelkugel

Nr.: 12

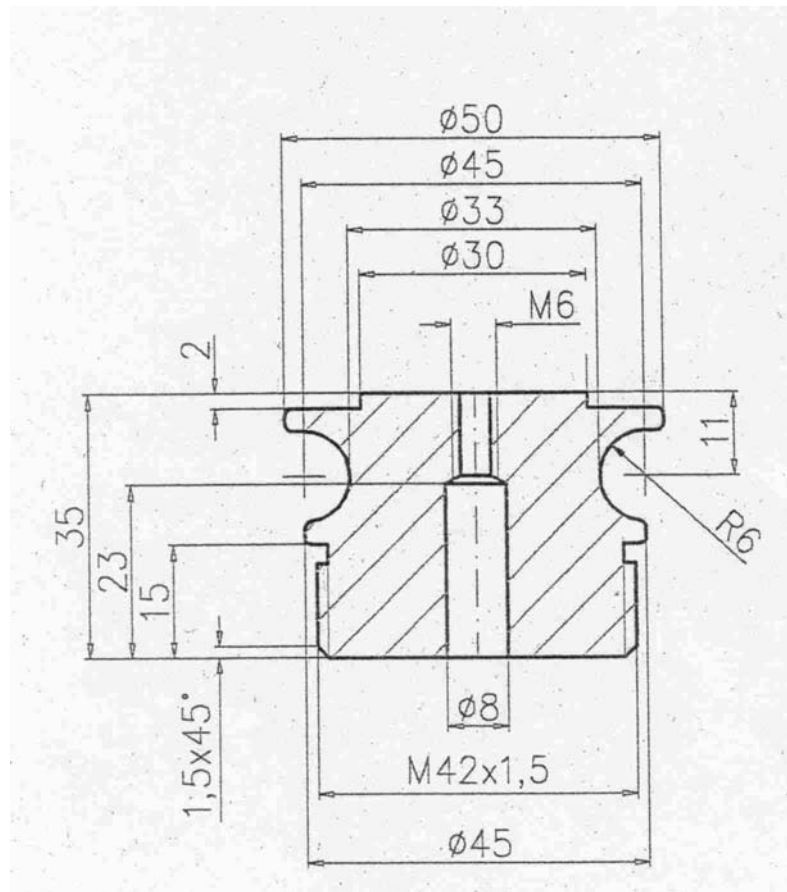
Werkstoff: *Stahl St 37*



Eisenkern für Pendelkugel

Nr.: 13

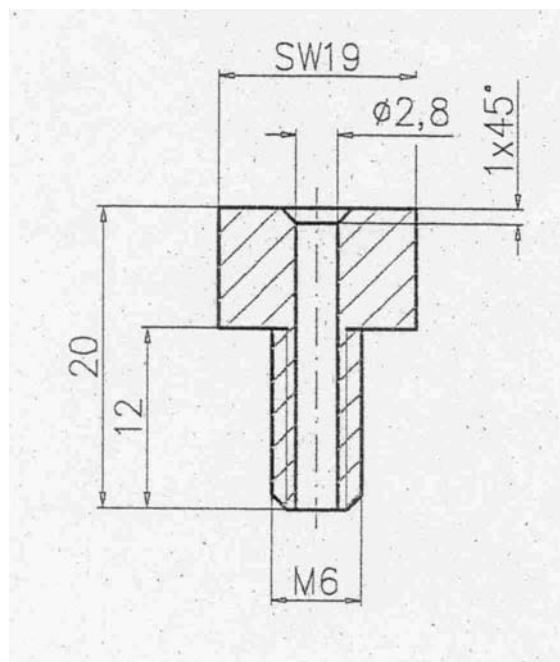
Werkstoff: *Edelstahl*



Kugelendstück oben

Nr.: 14

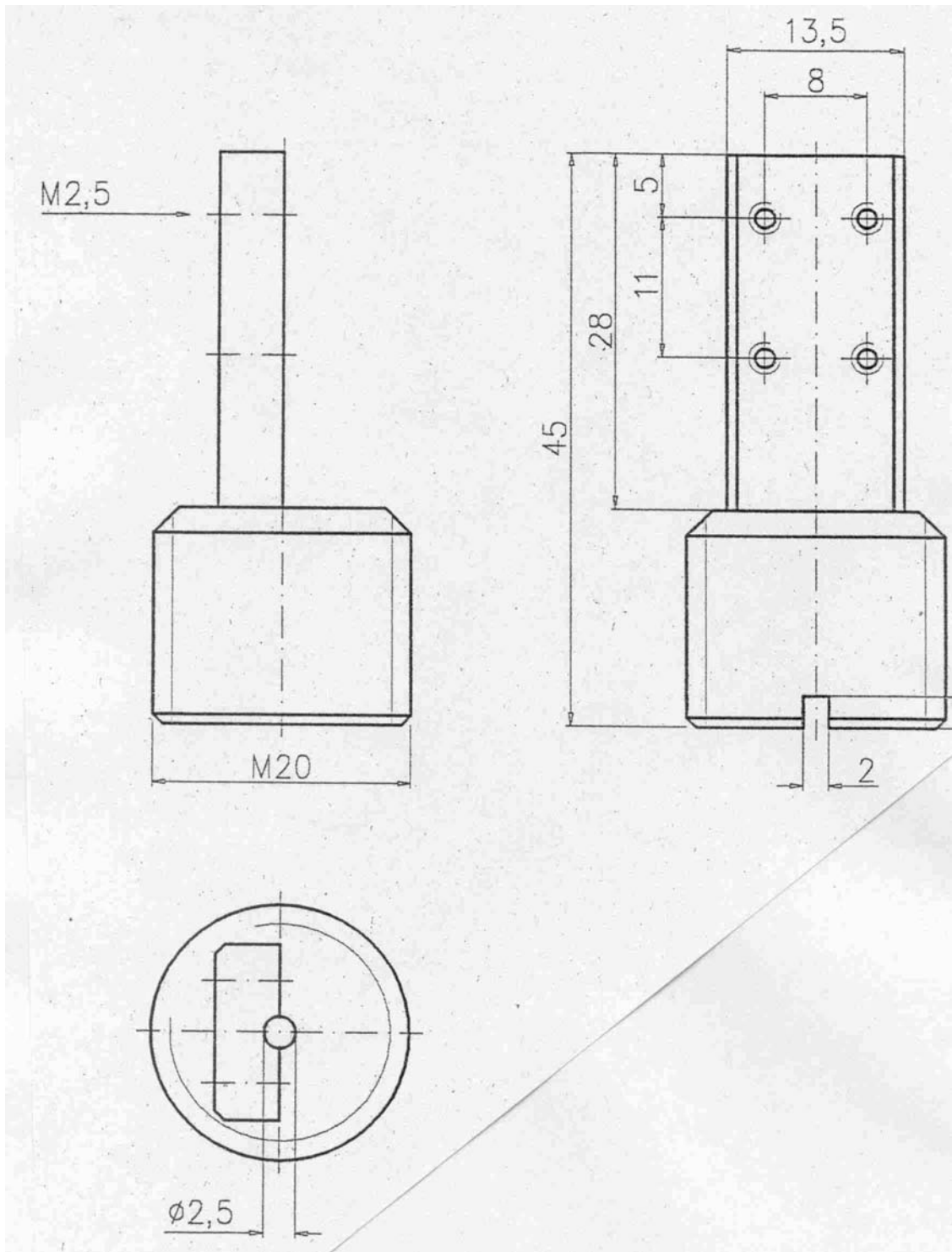
Werkstoff: *Messing*



Kugelendstück Abschluss oben

Nr.: 15

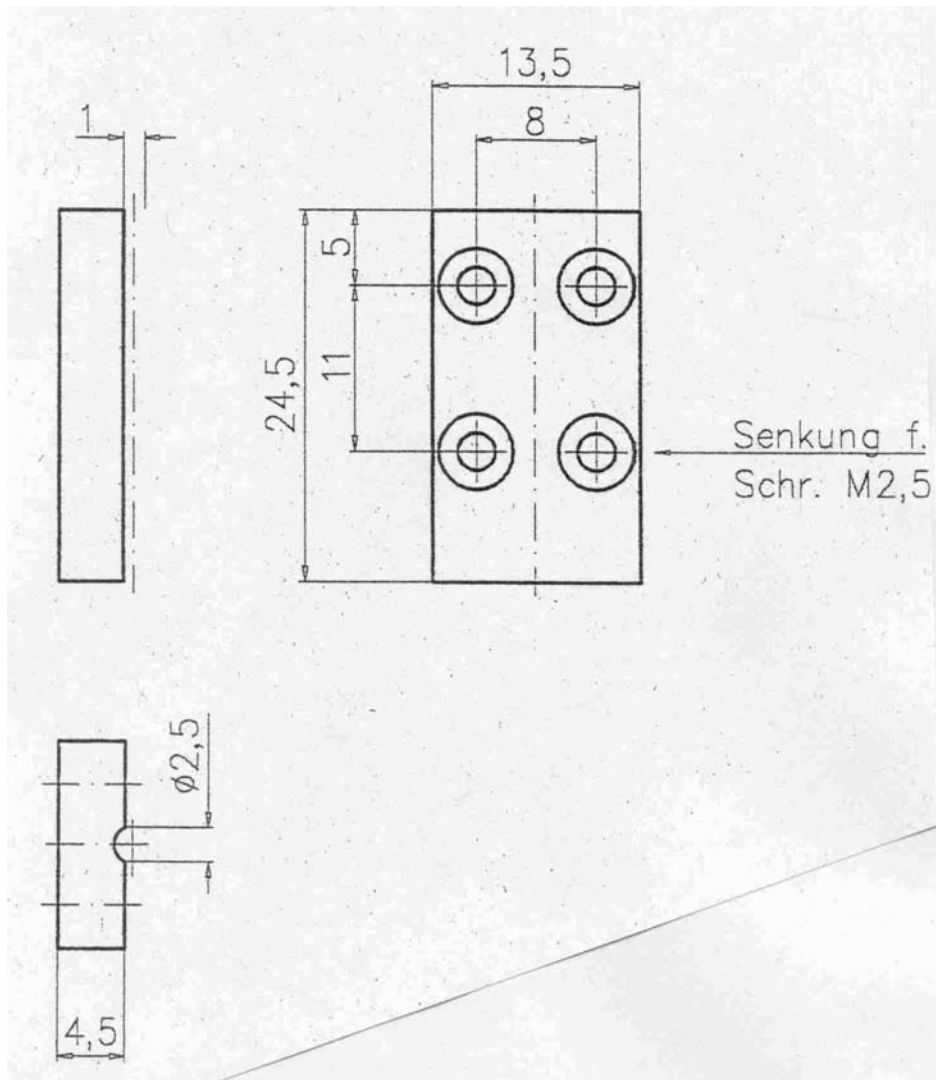
Werkstoff: *Messing*



Seilklemmung in Kugel

Nr.: 16

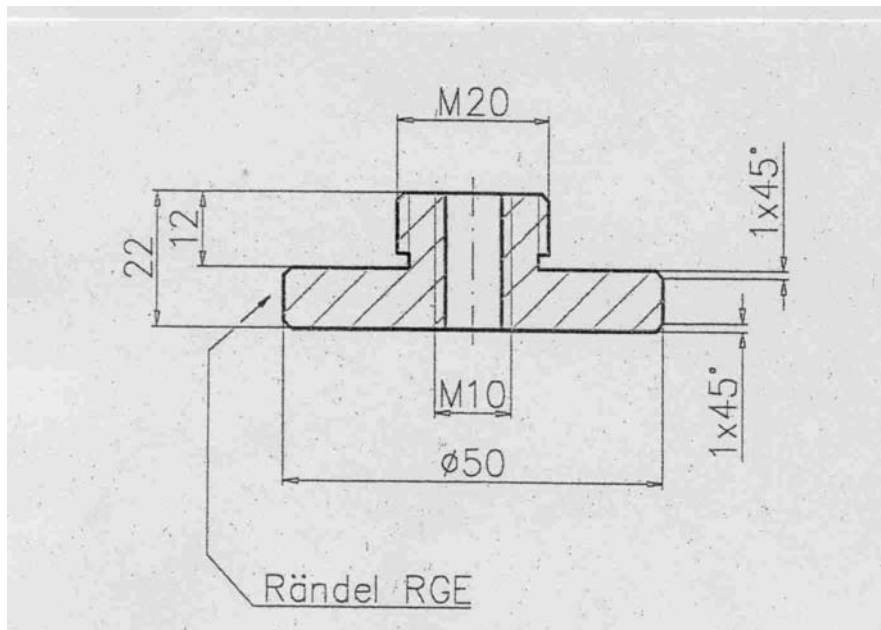
Werkstoff: *Edelstahl*



Seilklemmung in Kugel - Detail

Nr.: 17

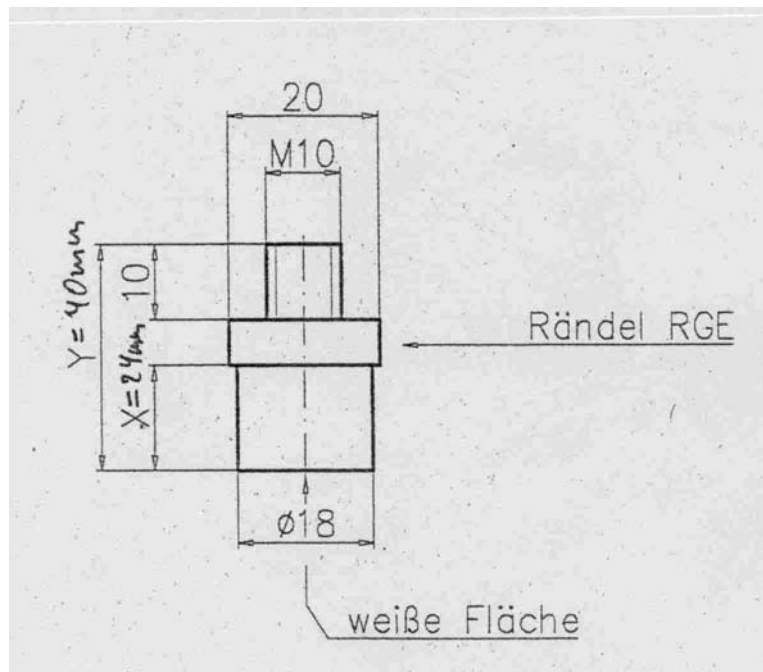
Werkstoff: *Edelstahl*



Kugelendstück unten

Nr.: 18

Werkstoff: *Edelstahl*



Reflektorstift Kugel unten

Nr.: 19

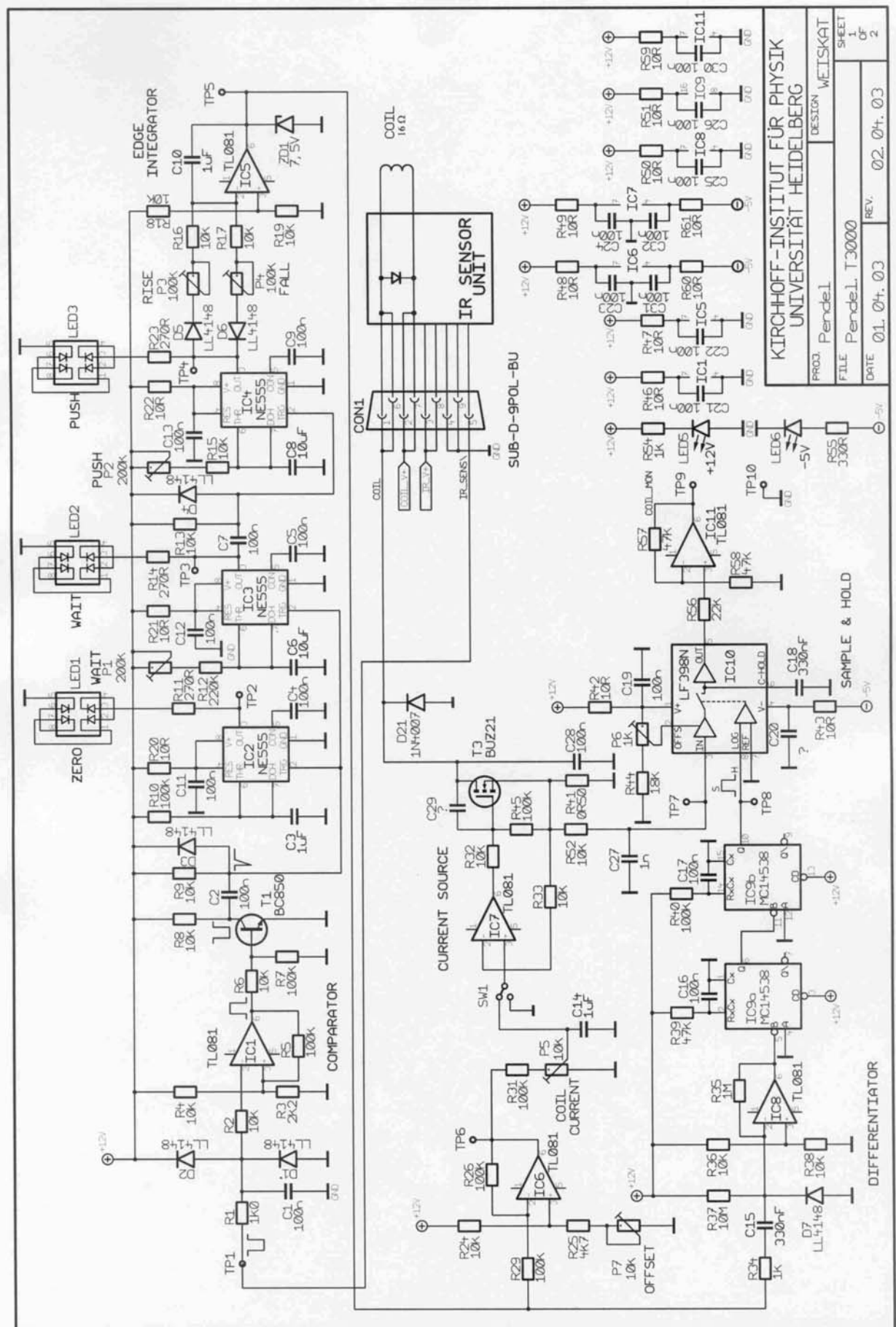
Werkstoff: *Edelstahl*

Anlage B

Schaltpläne der Antriebselektronik

Probeschaltung Hauptplatine	Seite 72
Probeschaltung IR-Sensor	Seite 73
Endgültige Schaltung Hauptplatine	Seite 74
Endgültige Schaltung IR-Sensor	Seite 75
Endgültige Schaltung Displayplatine	Seite 76
Endgültige Schaltung Zeitdiagramm	Seite 77

Zur Zeit ist am Foucault-Pendel die analoge Probeversion der endgültigen quarzgetakteten Ausführung installiert. Die endgültige Ausführung wird über drei Anzeigen verfügen, die jeweils aktuell die Wartezeit, die Stromzeit und die Schwingungsdauer anzeigen.

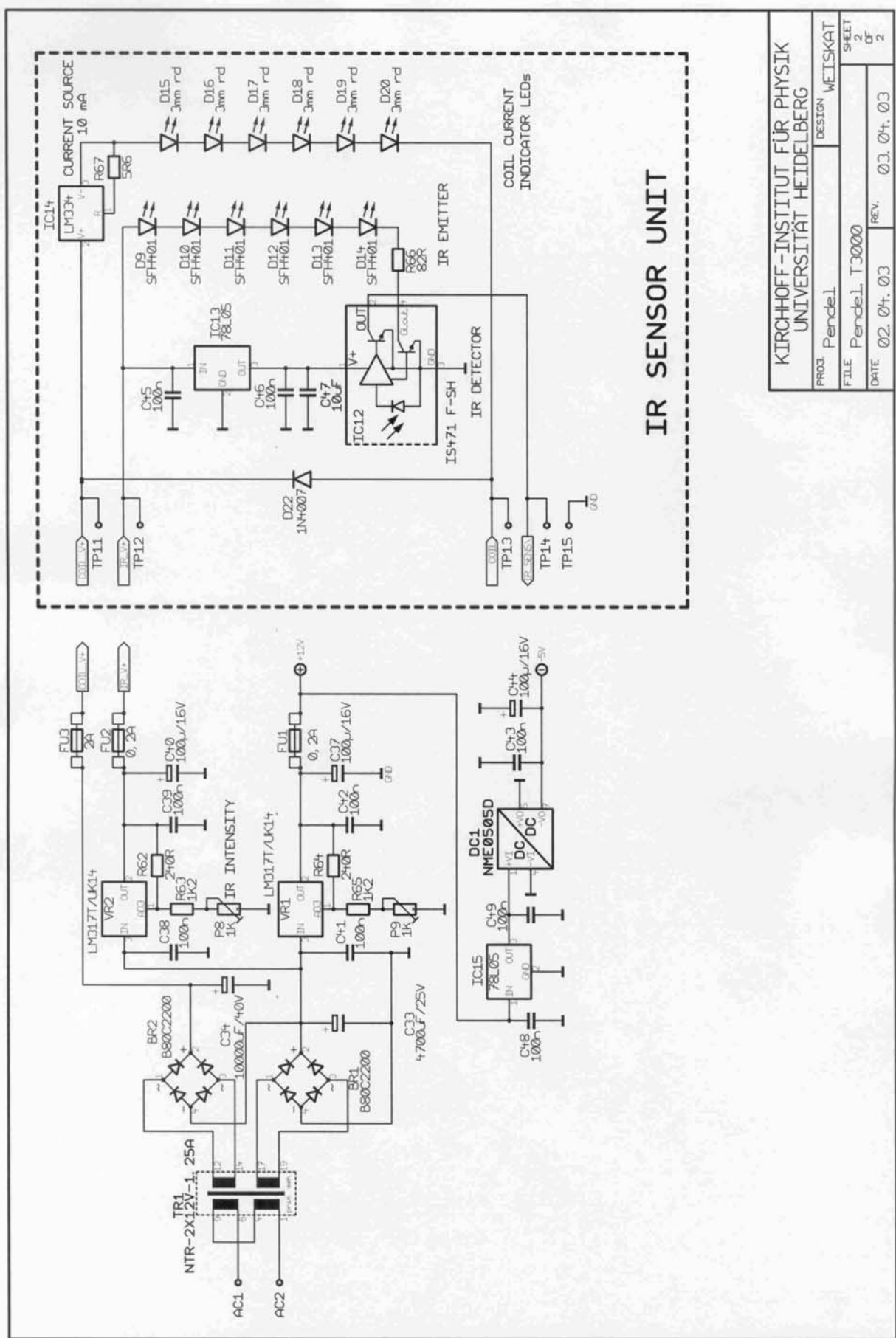


KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK
UNIVERSITÄT HEIDELBERG

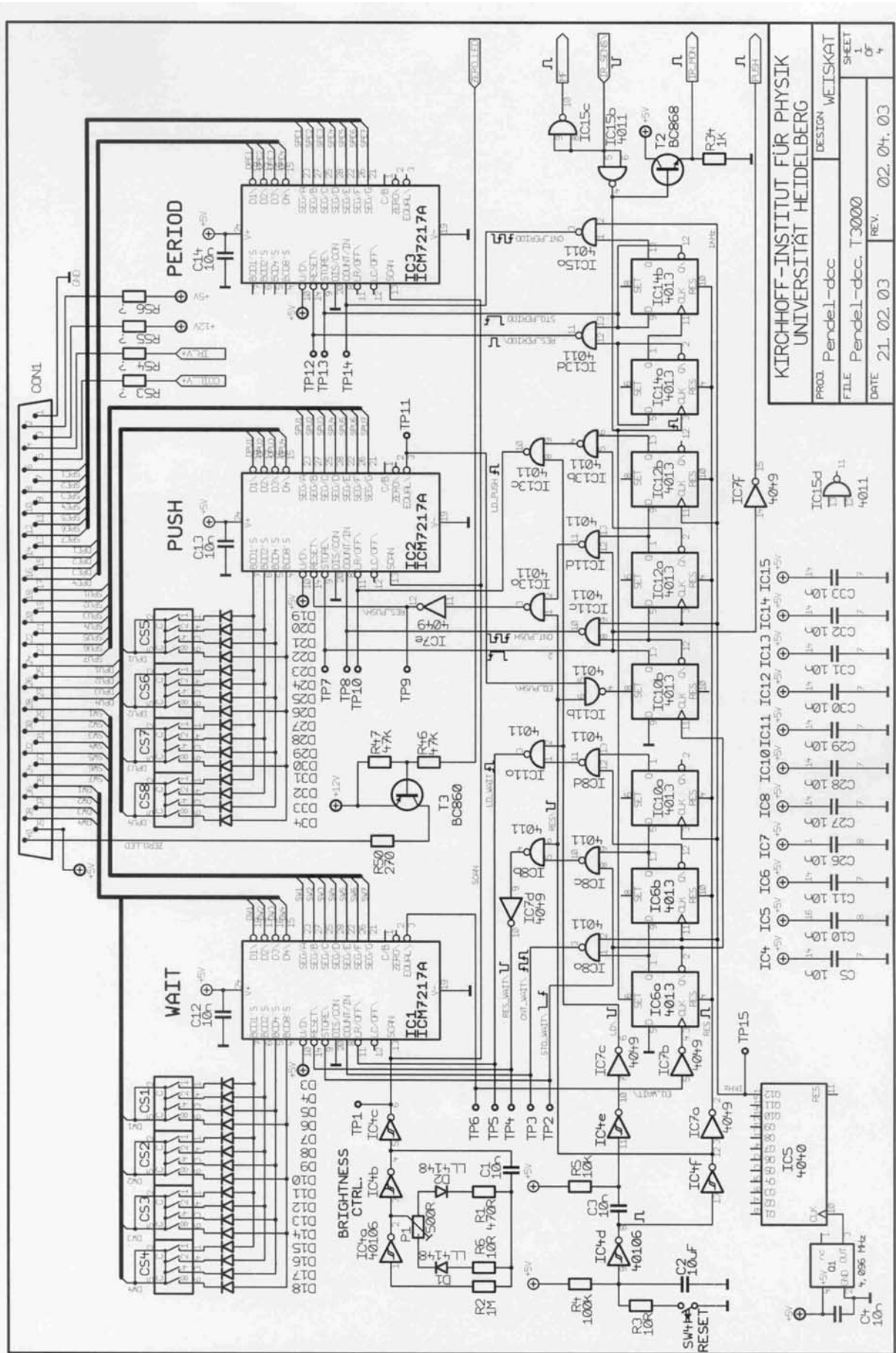
PROJ. PendeL
DESIGN WEISKAT

FILE PendeL.T3000
DATE 01.04.03 REV. 02.04.03

SHEET 1 of 2



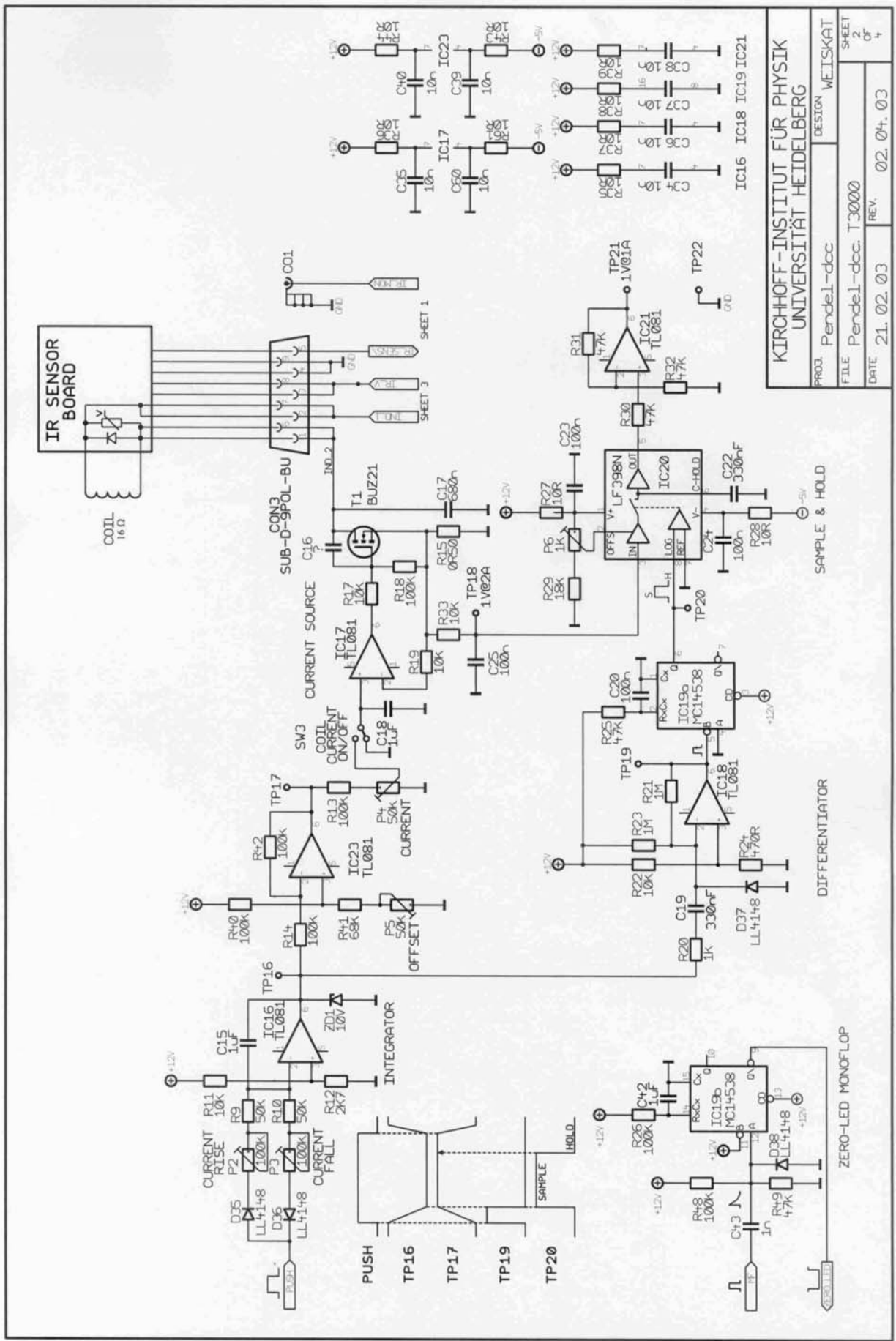
KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK UNIVERSITÄT HEIDELBERG	
PROJ	Pende1
DESIGN	WEISKAT
FILE	Pende1.13000
DATE	02.04.03
REV.	03.04.03
SHEET	2
OF	2



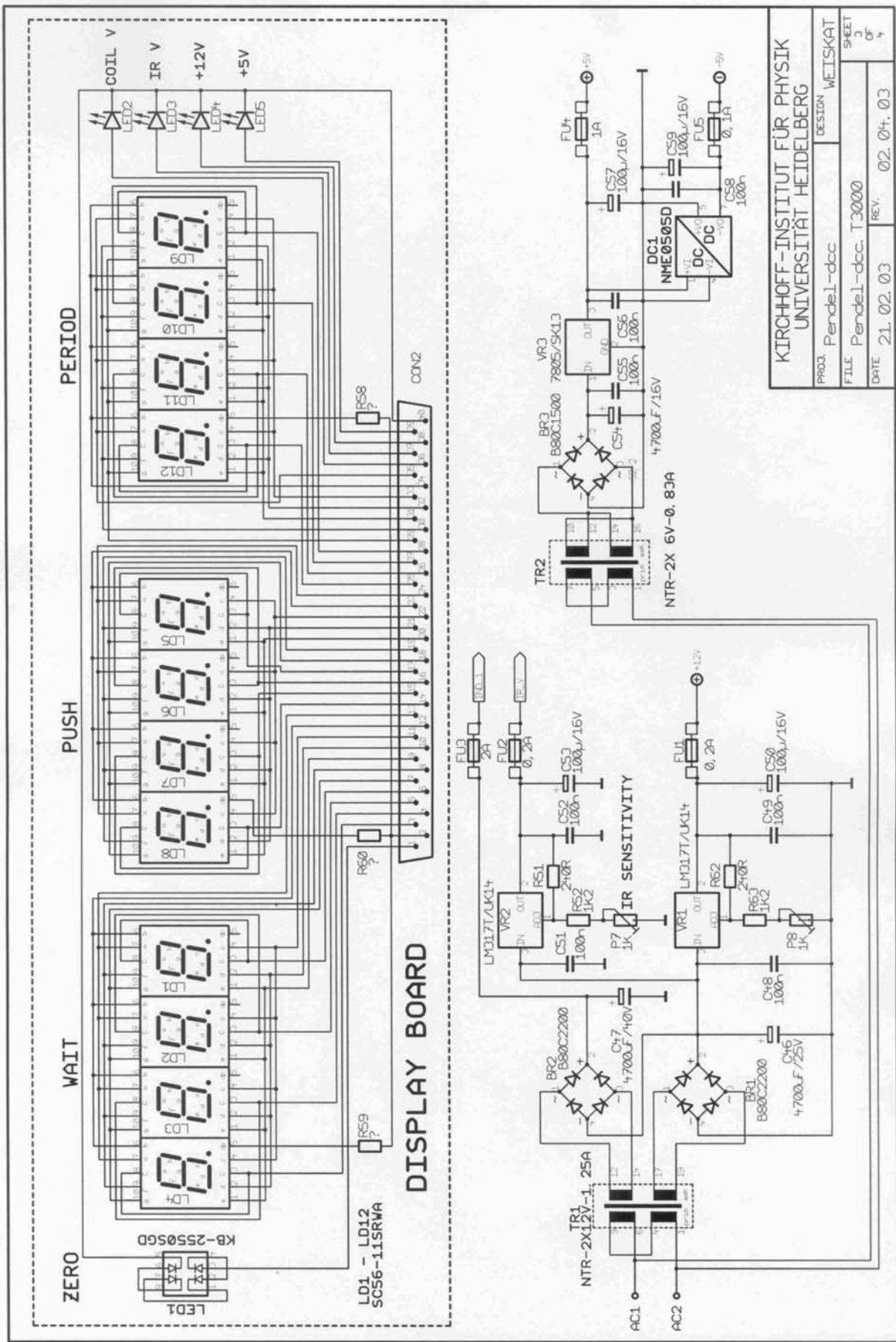
KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK
UNIVERSITÄT HEIDELBERG

PROJ. Pendel-dcc
FILE Pendel-dcc_T3000
DATE 21.02.03 REV. 02.04.03

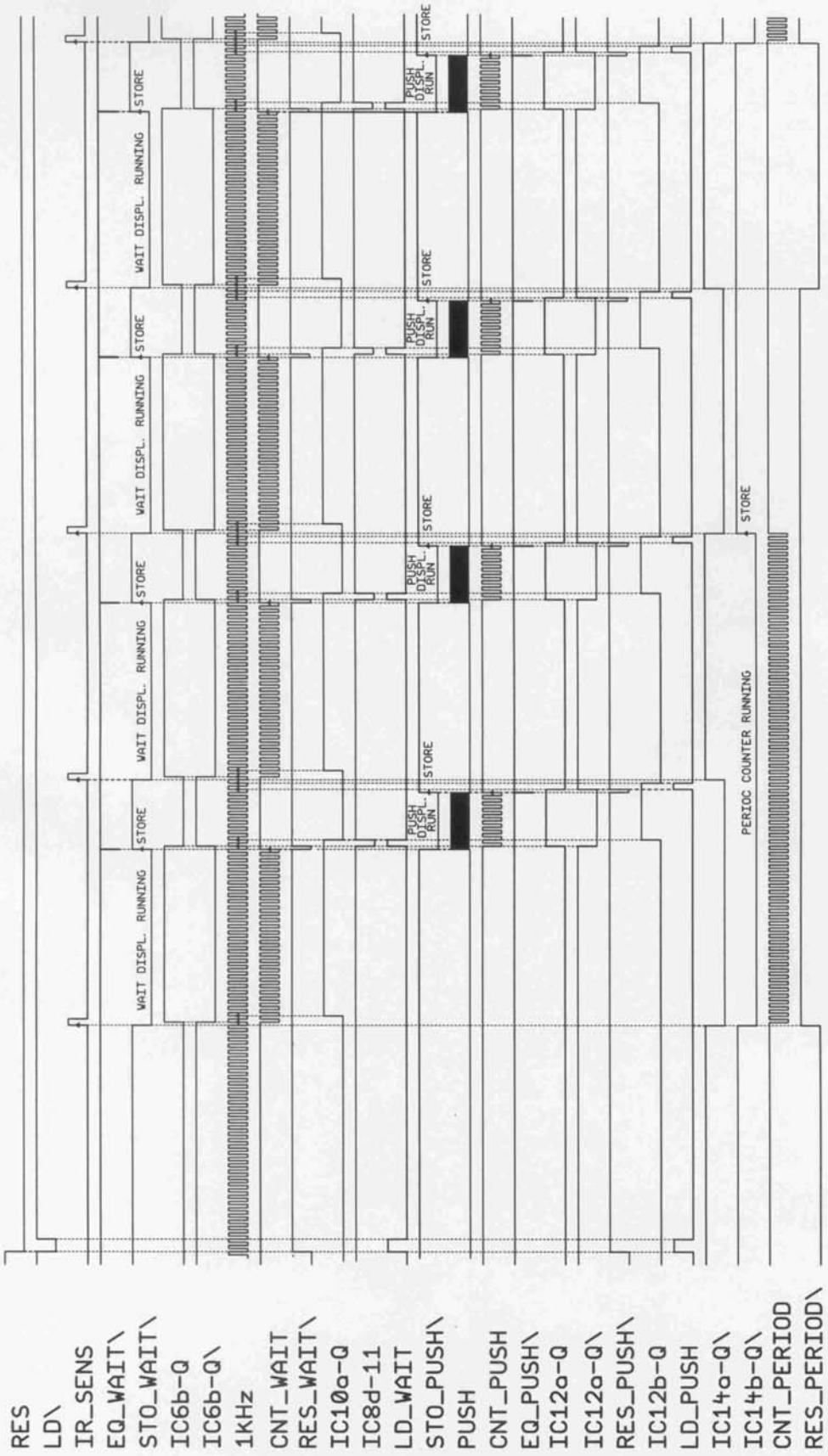
DESIGN WEISKAT
SHEET 1 of 4



KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK UNIVERSITÄT HEIDELBERG	
PROJ. Pendel-dcc	DESIGN WEISKAT
FILE Pendel-dcc.T3000	SHEET 2 OF 4
DATE 21.02.03	REV. 02.04.03



KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK UNIVERSITÄT HEIDELBERG		DESIGN	WEISKAT
PROJ	Pendel-dcc		
FILE	Pendel-dcc.T3000		
DATE	21.02.03	REV.	02.04.03
		SHEET	3
		OF	4



KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK UNIVERSITÄT HEIDELBERG	
PROJ. Pendel-dcc	DESIGN WEISKAT
FILE Pendel-dcc_T3000	SHEET 4 OF 4
DATE 21.02.03	REV. 02.04.03

Anlage C

Bemessung der Befestigungsdübel

Auftretende Kräfte	Seite 80
Zuglasten	Seite 81
Maßstabsgerechte Zeichnung	Seite 82
Montagezeichnung	Seite 83

Die Berechnungen wurden mit dem Dübelbemessungsprogramm COMPUFIX durchgeführt. Die verwendeten Verbundanker-Reaktionsmörtel-Dübel der Firma Fischer-Upat verfügen über die deutsche und europäische bauaufsichtliche Zulassung. Der Zulassungstext (37 Seiten) sowie das Sicherheitsdatenblatt (19 Seiten) wurden nicht mit angefügt.

Die Berechnungen wurden für vier quadratisch angeordnete Dübel durchgeführt, da das Programm keine kreisförmige Anordnung kennt. Die Ausnutzungsgrade der benutzten drei Dübel sind also geringfügig größer.

fischer COMPUFIX

Europäische Zulassung
Bemessen nach ETAG, Anhang C

COMPUFIX 6.2 (build 6.2.0.3198)
Copyright © 1992 - 2002 fischer
Nr. 2

fischer  **Upat**
BEFESTIGUNGSSYSTEME

Artur Fischer GmbH & Co. KG
Postfach 1152 * 72176 Waldachtal
www.fischerwerke.de

28.02.2003

Bauvorhaben: Foucaultsches Pendel am Kirchhoff-Institut für Physik

Bauteil: Bemessung der Befestigungsdübel

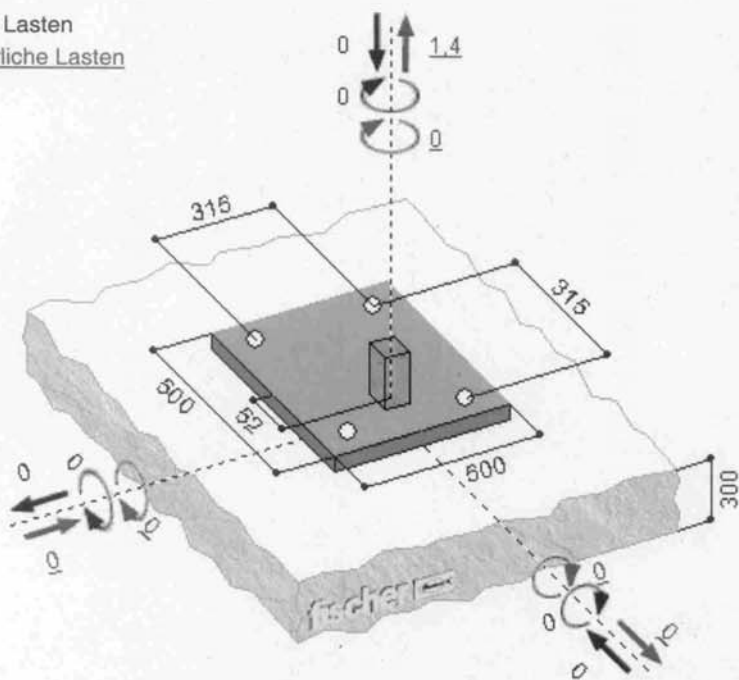
Dübel: Reaktionsanker/Eurobond RG M10 x 165
aus galvanisch verzinktem Stahl (Art. Nr. 50280)

Ankergrund: Ungerissener Beton dicht bewehrt
Betondruckfestigkeitsklasse: B35

Randbewehrung: Ohne Einfluss

Dübelbiegung: Nicht vorhanden

ständige Lasten
veränderliche Lasten



Min. Ankerplattendicke:
5 mm

Stahlgüte der
Ankerplatte:
nichtrostender Stahl: $f_{yk} \geq 240 \text{ N/mm}^2$

Profiltyp:
Vierkantstahl

Profilbezeichnung:
30 x 30

[mm], [kN], [kNm]

Die Bemessung gilt bei Verwendung von fischer Ankerstangen der Festigkeitsklasse 5.8.

ACHTUNG:

Der Bemessung liegen umfangreiche dübelspezifische Kennwerte zugrunde. Bei einem Austausch - auch gegen ähnliche Produkte - muß in jedem Fall eine neue Bemessung erfolgen.

Bei der Bemessung wurde vorausgesetzt, daß die Ankerplatte unter den einwirkenden Schnittkräften eben bleibt. Deshalb muß sie ausreichend steif sein. Der Nachweis einer ausreichenden Steifigkeit ist durch die im Programm enthaltene Bemessung der Ankerplatte erbracht.

Bei der Verwendung von Langlöchern wird vorausgesetzt, dass die Dübel mittig in den Löchern angeordnet sind.

Bitte überprüfen Sie, ob die Klemmdicke des Dübels ausreichend ist.

Die Bemessung gilt bei Verwendung von fischer Ankerstangen der Festigkeitsklasse 5.8.

Zur Gewährleistung der Bauteiltragfähigkeit sind die Nachweise nach Abschnitt 7 der ETAG, Anhang C zu beachten.

Alle übrigen Bedingungen der Zulassung sind zu beachten.

Zuglast

Stahlbruch				Grundlage
	1,35 g + 1,50 q	1,00 g + 1,50 q	1,35 g	
$N_{Rk,s}$ [kN]	30,00	30,00		laut Zulassungsbescheid
γ_{Ms} [-]	1,49	1,49		Teilsicherheitsbeiwert Stahl
$N_{Rd,s}$ [kN]	20,13	20,13		Bemessungswert des Widerstandes
N_{Sd}^h [kN]	0,70	0,70		Bemessungswert der Einwirkungen
$\beta_{N,s}$ [-]	0,03	0,03		Ausnutzungsgrad
$\beta_{N,s} = N_{Sd}^h / N_{Rd,s} = 0,03$				

Kegelförmiger Betonausbruch				Grundlage
	1,35 g + 1,50 q	1,00 g + 1,50 q	1,35 g	
$N_{Rk,c}^o$ [kN]	20,00	20,00		ETAG, Anhang C, Gleichung (5.2a)
$A_{c,N}$ [cm ²]	1296,00	1296,00		ETAG, Anhang C, Abschnitt 5.2.2.4b
$A_{c,N}^o$ [cm ²]	324,00	324,00		ETAG, Anhang C, Gleichung (5.2b)
$A_{c,N} / A_{c,N}^o$ [-]	4,00	4,00		ETAG, Anhang C, Abschnitt 5.2.2.4b
$\psi_{s,N}$ [-]	1,00	1,00		ETAG, Anhang C, Gleichung (5.2c)
$\psi_{ec1,N}$ [-]	1,00	1,00		ETAG, Anhang C, Gleichung (5.2e)
$\psi_{ec2,N}$ [-]	0,75	0,75		ETAG, Anhang C, Gleichung (5.2e)
$\psi_{re,N}$ [-]	0,95	0,95		ETAG, Anhang C, Gleichung (5.2d)
$\psi_{ucr,N}$ [-]	1,00	1,00		ETAG, Anhang C, Gleichung (5.2g)
$N_{Rk,c}$ [kN]	57,14	57,14		ETAG, Anhang C, Gleichung (5.2)
γ_{Mc} [-]	2,16	2,16		Teilsicherheitsbeiwert Beton
$N_{Rd,c}$ [kN]	26,45	26,45		Bemessungswert des Widerstandes
N_{Sd}^g [kN]	2,10	2,10		Bemessungswert der Einwirkungen
$\beta_{N,c}$ [-]	0,08	0,08		Ausnutzungsgrad
$\beta_{N,c} = N_{Sd}^g / N_{Rd,c} = 0,08$				

fischer COMPUFIX

COMPUFIX 6.2 (build 6.2.0.3198)

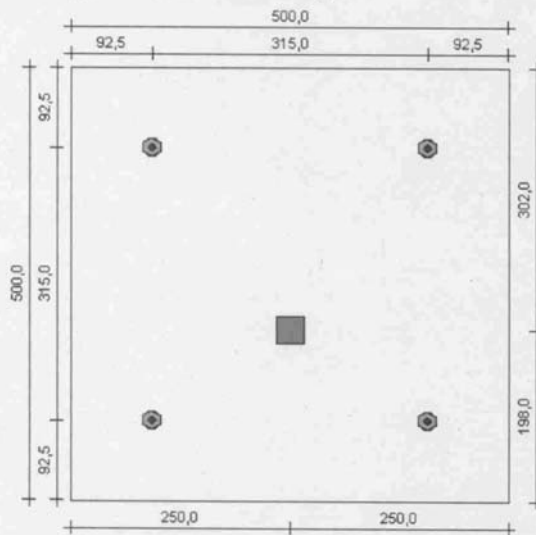
Copyright © 1992 - 2002 fischer

Nr. 2

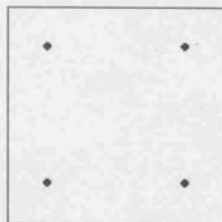
28.02.2003

Durchziehen / Herausziehen				Grundlage	
		1,35 g + 1,50 q	1,00 g + 1,50 q		1,35 g
$N_{Rk,p}$	[kN]	20,00	20,00		laut Zulassungsbescheid
Y_{Mp}	[-]	2,16	2,16		Teilsicherheitsbeiwert Herausziehen
$N_{Rd,p}$	[kN]	9,26	9,26		Bemessungswert des Widerstandes
N_{Sd}^h	[kN]	0,70	0,70		Bemessungswert der Einwirkungen
$\beta_{N,p}$	[-]	0,08	0,08		Ausnutzungsgrad
$\beta_{N,p} = N_{Sd}^h / N_{Rd,p} = 0,08$					

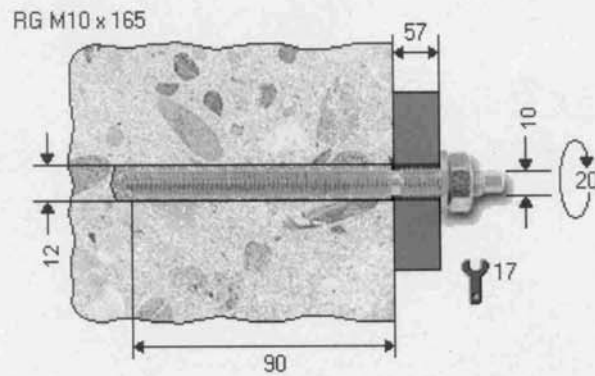
Maßstabgerechte 2D-Zeichnung



Lochbild:



Montagezeichnung



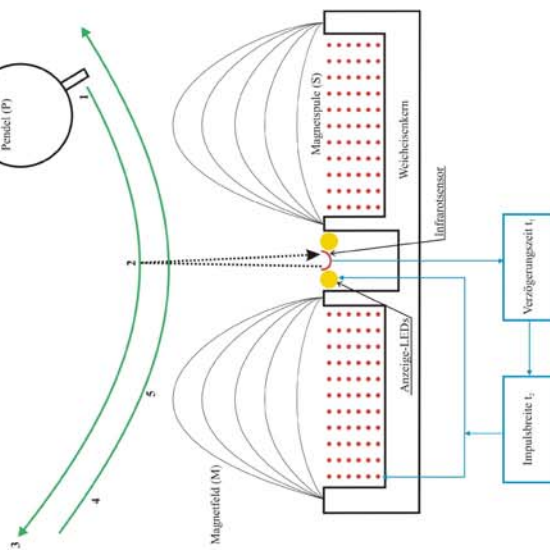
Klemmdicke	t_{fix}	[mm]	57
Gewindedurchmesser	M	[mm]	10
Anzugsdrehmoment	M_D	[Nm]	20
Schlüsselweite		[mm]	17
Verankerungstiefe	h_{ef}	[mm]	90
Bohrlochdurchmesser	d_{nom}	[mm]	12
Bohrlochtiefe	h_0	[mm]	90

Anlage D

Informationsbroschüre

Die nachfolgend angefügte von mir erstellte Informationsbroschüre liegt an der Präsentationstafel am Foucault-Pendel aus. Die Original-Datei im pdf-Format befindet sich in der EDV-Abteilung.

Beschreibung des Magnetantriebes



- 1 Pendelkugel nähert sich dem Spulen-Mittelpunkt, wo sich ein Infrarotsensor sowie sechs Infrarot-LEDs befinden.
- 2 Die von den Infrarot-LEDs ausgesendeten Lichtstrahlen werden an der Unterseite der Pendelspitze reflektiert und dann vom Sensor detektiert. Dadurch wird ein Signal erzeugt, das die nachgeschaltete Elektronik als Startsignal benutzt. Dieses Startsignal schaltet nun die Verögerungszeit t_v .
- 3 Die Pendelkugel befindet sich am Umkehrpunkt, dem Vollauschlag. Noch immer läuft die Verögerungszeit t_v .
- 4 Die Pendelkugel hat sich der Ringspule (S) auf ca. 10 cm genähert. Hier endet die Verögerungszeit t_v und der Stromimpuls für die Magnetspule wird gestartet. Während der Strom durch die Spule fließt, leuchten auch die sechs weiteren im Spulen-Mittelpunkt angebrachten AnzeigeleDs. Die Pendelkugel (P) wird durch das entstandene Magnetfeld radial zum Spulen-Mittelpunkt hin beschleunigt, die Reibungsverluste werden kompensiert.
- 5 Hier wird der Strom ausgeschaltet, da sonst das Magnetfeld die Pendelkugel abbremsen würde; weiter mit 1.

Funktionsweise des Charron-Rings

Die durch Luftströmungen und sonstige äußere Einflüsse auftretenden seitlichen Taumelbewegungen des Pendels werden beim Anpressen des Seiles an den Charron-Ring durch Reibung in Wärme umgewandelt und somit eliminiert. Ohne Charron-Ring würde die anfangs ebene Pendelbahn zu einer elliptischen Bahn werden.

Gravitation und Trägheit in der modernen Physik

Die einfache Pendelbewegung als auch der Foucault-Effekt beruhen auf der Eigenschaft massiver Körper, zugleich träge zu sein und sich gegenseitig durch die Schwerkraft anzuziehen. Interessant ist, dass die tiefen physikalischen Ursachen für diese Tatsachen noch immer sehr wichtige Forschungsgebiete der grundlegenden Physik bilden. Der Ursprung der Masse als auch die Struktur der Schwerkraft und ihre Beziehung zu den anderen Naturkräften werden mit modernen Experimenten der Elementarteilchenphysik erforscht, wie sie zur Zeit auch im Kirchhoff-Institut für Physik vorbereitet werden.

Technische Daten

Länge des Pendelseiles:	11,086 m
Durchmesser des Pendelseils:	2,8 mm
Masse der Pendelkugel:	69,3 kg
Durchmesser der Pendelkugel:	25,0 cm
Masse der Deckeninstallation:	58,2 kg
Schwingungsdauer:	6,677 s
Auslenkung der Pendelkugel:	0,61 m
Maximales Magnetfeld bei 1 A:	118 mT
Höhe der gesamten Installation:	11,582 m

Das Seil ist an der Deckeninstallation eingeklemmt, nicht drehbar gelagert, da die Pendelkugel immer die gleiche Richtung beibehält. Die Kippstüfe stellen sich automatisch wieder auf.

Unser Dank gilt der Universität Osnabrück für die vielfältige Unterstützung.

Das Foucault'sche Pendel am Kirchhoff-Institut wurde im Rahmen der Staatsexamensarbeit von Ekkehard Müller konzipiert, aufgebaut und in Betrieb genommen.

Kontakt

<http://www.kip.uni-heidelberg.de>

Ekkehard.Mueller@kip.uni-heidelberg.de

Besichtigungen sind während der Öffnungszeiten des Instituts immer möglich, Führungen bitte vereinbaren!

Foucault-Pendel

erbaut 11/2002 – 5/2003

Kirchhoff-Institut für Physik
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg



Das im ersten Stockwerk des Kirchhoff-Instituts für Physik schwingende Foucault'sche Pendel demonstriert die Erdrotation. Dabei sind keine Bezugspunkte im Weltall wie z. B. die Sonne nötig. Die Erdrotation zeigt sich durch die Drehung der Pendelebene im Institutsgebäude. Durch diese Drehung werden die aufgestellten Kippstüfe nach und nach umgeworfen, womit der Foucault-Effekt deutlich sichtbar wird.



Historisches zum Foucault-Effekt

Die Erkenntnis, dass sich die Erde täglich um die eigene Achse dreht, war schon im Jahre 284 v. Chr. von Eratosthenes beschrieben worden, doch fiel es in der damaligen Zeit schwer, die Bevölkerung der sich drehenden Erde davon zu überzeugen.

Viel später folgte der erste praktische Versuch eines Nachweises: Ein Stein wurde in einem tiefen Schacht fallen gelassen, die Ablenkung von der Ausgangslage sollte gemessen werden. Der Schacht war jedoch nicht tief genug, um eine signifikante Abweichung feststellen zu können. Isaac Newton hatte die Abweichung des Steines nach Osten vorhergesagt. Gaspard Coriolis beschrieb 1835 dann die nach ihm benannte Corioliskraft, die Jean Foucault letztendlich für den Bau des Foucault-Pendels verwertete. Das erste Pendel, welches J. Foucault am 3. Januar 1851 baute, war nur etwas über 2 m lang und hing im Keller seines Wohnhauses. Um das Pendel exakt auslenken zu können, befestigte Foucault es an einem dünnen Faden in ausgenähter Stellung und braunte den Faden anschließend durch. So war gewährleistet, dass keine störenden Tangentialkräfte beim Anstoßen auftraten. Die Tangentialkräfte waren jedoch nicht das größte Problem. In den ersten Versuchen riss immer der Draht am Aufhängepunkt. Dieses Problem war einige Tage später gelöst, so dass am 3. Februar 1851 der zweite Versuch in der Pariser Sternwarte an einem 12 m langem Pendel öffentlich starten konnte. Ende März wurde dann die dritte Versuchsreihe durchgeführt, diesmal im Pantheon, einer Pariser Kathedrale. Das dritte Pendel war nunmehr 67 m lang und besaß eine 28 kg schwere Kugel. Die für Paris errechnete Drehung der Achse von 270° in 24 h trat dann auch genau so ein.



Jean Leon Foucault

Interessant ist, dass bereits 190 Jahre vor J. Foucault der Italiener Vincenzo Viviani im Jahre 1661 in Rom im Prinzip den Foucault'schen Pendelversuch vorführte, doch war es ihm nicht gelungen, den Versuch einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen, so dass die schon damals erfolgreiche Vorführung wieder in Vergessenheit geriet.

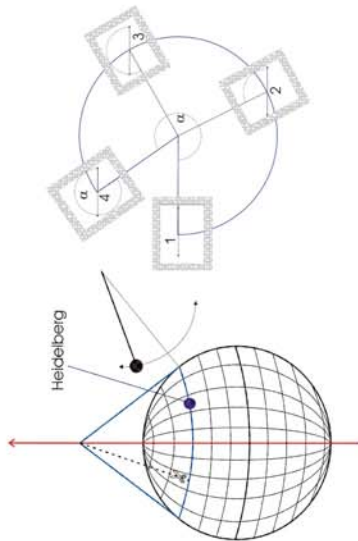
Die wirkenden Kräfte

1. Als erste Kraft ist die Schwerkraft zu nennen, die das Pendelgewicht nach unten zieht. Gemeinsam mit der Aufhängung am Pendelseil sorgt die Schwerkraft dafür, dass das Pendel immer wieder nach einer Auslenkung in die Ruhelage zurückschwingt.
2. Die Trägheit sorgt dafür, dass die Pendelkugel nicht im Mittelpunkt zum Stehen kommt, sondern weiterschwingt zu einer erneuten Vollauslenkung. Die dann erneut wirkende rücktreibende Kraft lässt das Pendel wieder zurückschwingen.
3. Durch die Luftreibung wird das Pendel bei jeder Schwingung abgebremst. Die Auslenkung wird also immer kleiner und das Pendel kommt irgendwann zur Ruhe. Beim Pendel des KIP wird die Luftreibung durch eine zentral angeordnete magnetische Ringspule ausgeglichen.
4. Durch Luftströmungen von außerhalb bzw. durch nichtlaminare Strömungen hinter der Pendelkugel kann es auch zu seitlichen Abweichungen der Pendelschwingung kommen. Diese Abweichungen führen dann zu elliptischen Bahnen, das Pendel beginnt zu taumeln. Diese Taumelbewegungen unterbinden wir mit Hilfe eines Charron-Ringes, der 40 cm unterhalb der Seilaufhängung angebracht ist. Das Seil legt sich bei jeder Schwingung während der halben Schwingungszeit an den Charron-Ring an, der die seitlichen Bewegungen durch Reibungskräfte kompensiert.
5. Die Kraft, welche schließlich zum Foucault-Effekt führt, ist die Corioliskraft, eine durch die Pendelbewegung auf der sich drehenden Erde hervorgerufene Scheinkraft. Diese Kraft führt zur Drehung der Schwingungsebene des Pendels im Institutsgebäude. Das Pendel weigert sich gewissermaßen, an der Erddrehung teilzunehmen. Es tritt keine Torsion (Verdrehung) auf. Die Pendelkugel dreht sich nicht um die Achse des Pendelseiles. Dies wird durch eine seitlich auf der Pendelkugel angebrachte Markierung verdeutlicht. Die Markierung zeigt immer in die gleiche Richtung.
7. Die aufgrund der Erddrehung auftretende Zentrifugalkraft wirkt senkrecht zur Erdachse, kann aber in unserem Fall vernachlässigt werden, da die Zentrifugalkraft 10.000 mal kleiner ist als die Gravitationskraft.

Einfluss des Breitenkreises

Die Erdkugel dreht sich in 24 Stunden einmal um ihre eigene Achse, die vom Nordpol zum Südpol verläuft. An einem Punkt zwischen Pol und Äquator ist die Drehbewegung aufgrund der Geometrie der Kugel geringer als am Pol, durch den geringeren Anteil der Drehbewegung führt das Pendel in 24 Stunden keine volle Umdrehung mehr aus. Je näher man das Pendel an den Äquator stellt, desto höher wird der Anteil der Wanderbewegung, der die Pendelachse nicht dreht, und desto geringer ist der Anteil der Drehbewegung. Anschaulich vorstellen kann man sich die Abnahme der Drehbewegung durch folgende Skizze:

Der blau gezeichnete Kegel wird längs der gestrichelten Linie aufgeschnitten und anschließend aufgerollt. Dadurch entsteht ein Kreissegment:



Bei Ziffer 1 ist die anfängliche Schwingungsebene dargestellt, bei Ziffer 2 hat sich die Schwingungsebene bereits um ca. 110° gedreht, Ziffer 3 zeigt die Drehung um ca. 200° und bei Ziffer 4 ist die Drehung eines vollen Tages erreicht. Man beachte, dass sich der Beobachter auf dem blau eingefärbten Kreissegment bewegt, während die Schwingungsebene aufgrund der Trägheit der Pendelkugel ihre Position nicht verändert.

Den Winkel α , um den sich die Schwingungsebene pro Tag im Institutsgebäude dreht, kann man mit Hilfe des Breitengrades φ berechnen:

$$\alpha = 360^\circ \cdot \sin(\varphi)$$

Die Stadt Heidelberg hat den Breitengrad 49°25'. Somit dreht sich die Schwingungsebene des Foucault-Pendels im Kirchoff-Institut in 24 Stunden theoretisch nur um 273,5°.

Danksagung

Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Prof. Dr. K. Meier, der mich mit der Errichtung des Foucaultschen Pendels am Kirchhoff-Institut im Rahmen der vorliegenden Staatsexamensarbeit beauftragt hat. Bedanken möchte ich mich bei ihm für die vielfältige Unterstützung während der Planungs- und der Bauphase, denn jedes sich mir stellende Problem konnte ich mit ihm besprechen und dadurch meist lösen. Durch diese fortwährende freundliche Begleitung fiel mir vieles leichter.

Die Zeit am Kirchhoff-Institut war der mit Sicherheit schönste Abschnitt meines Studiums, deshalb möchte ich mich bei allen KIPianern für die nette Aufnahme und gute Arbeitsatmosphäre bedanken. Besonders erwähnen möchte ich die morgendliche Kaffeerrunde mit Bea, Claudia, Elke, Hildegard, Irmi, Lothar und all den anderen, die immer für positive Stimmung sorgte. Claudia gilt mein Dank für ihre vielfältige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Irmi und Lothar möchte ich mich für die Hilfe bei der Erstellung der Homepage bedanken, bei Hildegard für die Abwicklung der Finanzen und bei Bea und Elke für all die Aufmunterungen und lustigen Momente.

Des Weiteren gilt allen direkt am Projekt „Pendel“ Beteiligten mein Dank, angefangen bei den Mitarbeitern der Feinmechanischen Werkstatt, insbesondere bei Herrn Weiser, der alle Einzelteile mit höchster Präzision herstellte. Weiterhin gilt mein Dank dem Werkstattleiter Herrn Lamade, der dafür sorgte, dass alle Einzelteile auch fristgerecht fertig wurden. Dankend erwähnen möchte ich auch die Elektronikwerkstatt mit Herrn Weiskat als Produzent der Antriebselektronik.

Der Firma Schreinerei Walter Müller, Mörlenbach, gilt mein Dank für die Überlassung der Räumlichkeiten und Maschinen für die Herstellung der Pendelplatte.

Meinem Kommilitonen L. Schilling gilt mein Dank für die kritische Durchsicht der Arbeit, ebenfalls bedanken möchte ich mich bei allen, die mir mit Ratschlägen, Anregungen und Kritik immer wieder weiter geholfen haben.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich während meines ganzen Studiums immer unterstützt hat.

Bibliographie

Experimentalphysik 1, Mechanik und Wärme, W. Demtröder, Berlin, 1998

Grundkurs Theoretische Physik 1, Klassische Mechanik, W. Nolting, München, 1988

Grundkurs Theoretische Physik 2, Analytische Mechanik, W. Nolting, München, 1990

Handbuch der Physik Bd. III.1., Prinzipien der klass. Mechanik, S. Flügge, Berlin, 1960

Mechanik Akustik Wärme, Lehrbuch Experimentalphysik, Bergmann, Berlin, 1990

Physics, Atkins, New York, 1966

Physik, A. Finn, Oldenburg 2000

Physik, P. Tipler, Heidelberg, 1994

Repetitorium Theoretische Physik, A. Wachter, H. Hoerber, Wuppertal, 1998

Brockhaus Enzyklopädie, Mannheim, 1989

Katalogue Bibliotheque Nationale, Paris

National Union Katalog, Paris

Erklärung

„Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe und dass alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quellen als Entlehnungen kenntlich gemacht worden sind.“

Heidelberg, 5. Mai 2003

Ekkehard W. Müller