

# GYMNASIUM ICKING

Facharbeit im Leistungskurs

Physik

Thema : Messung des elektrostatischen Feldes mit einer selbstkonstruierten „Feldmühle“

Vorgelegt von :

Stefan Kneifel

am

01.02.2001

Note / Punktzahl (einfache Wertung)

/  
1 Einleitung

Kursleiter

\_\_\_\_\_

Elektrische und magnetische Felder sind seit Beginn an Bestandteile unserer Welt. Schon immer erzeugten Blitze auf tiefen Frequenzen mächtige Impulse und auch der Mensch nutzt nahezu das gesamte Frequenzspektrum für seine verschiedensten Anwendungen, wie Radio, Radar oder Mikrowelle, um nur wenige zu nennen. Das statische Magnetfeld der Erde ermöglicht unser Leben ohne die ständige Bombardierung mit kosmischer Strahlung und erlaubt den Menschen sich mittels Kompaß auf dem Globus zu orientieren. Gewitter erzeugen starke elektrostatische Felder, welche mit ihren Entladungen möglicherweise den Menschen das Feuer und damit die Zivilisation brachten.

Nun war es das Ziel dieser Facharbeit ein Messgerät zu konstruieren, mit dem man speziell elektrostatische Felder messen kann. Dieses Messgerät sollte auch für geo-physikalische Messungen einsetzbar sein. Dieses wären z.B. die Messung des schwachen elektrischen Feldes in der Atmosphäre, dem sogenannten „Schönwetterfeld“. Es entsteht durch die positive Ladung der Ionosphäre und der negativen Ladung der Erdoberfläche, welche durch Blitzenentladungen erzeugt werden. Weitere interessante Messungen wären z.B. den Feldverlauf unter einem vorüberziehenden Gewitter zu beobachten.



Dass diese Feldmessungen aus geophysikalischer Sicht bedeutsam sind, soll ein Zitat zeigen, in dem die Wichtigkeit des E-Feldes bei der Gewittervorwarnung ersichtlich wird:

„Im Kennedy-Space-Center wurde festgestellt, dass 80% der Gewitter von denen Donner gehört wurde, den Beobachter nicht passierten. (...) Bei der Feldmessung mit der Feldmühle können aussagekräftige Schlüsse aus dem zeitlichen Verlauf des elektrostatischen Bodenfeldes am Beobachtungsort gezogen werden. Das Schönwetterfeld, hervorgerufen durch die positiv

geladenen Ionosphäre, beträgt am Boden um + 130 V/m. Wenn dieses schwache, positive Schönwetterfeld durch Null geht und dann negativ wird, kann mit großer Sicherheit auf die Annäherung eines Gewitters geschlossen werden. Üblicherweise wird man etwa 10 bis 20 Minuten nach der Feldumkehr mit einem Gewitter am Ort des Beobachters zu rechnen haben.“ (Hasse/Wiesinger S. 70/71 [1])

Aber auch für den Einsatz in Schulexperimenten sollte das Messgerät einsetzbar sein.

Es werden für diesen Zweck auch Messgeräte kommerziell angeboten, jedoch liegen diese preislich im Bereich von 2000 DM und mehr (z.B. das „Influenz-E-Feldmeter“ von Phywe).

Im folgenden wird das Prinzip der Messung, der Aufbau und die Kalibrierung des Messsystems beschrieben. Nachfolgend wird über die Ergebnisse einzelner Freilandmessungen berichtet und die Weiterentwicklung mit einer selbstgebauten Auswertelektronik dargestellt.

2 Messmethoden

Es gibt generell 2 Messverfahren:

- Die *Potentialsonden*, welche Potentialdifferenzen messen;
- Die *Influenzsonden*, welche die Feldstärke mit Hilfe der Flächenladungsdichte  $\sigma$  messen;

### 2.1 Das Messprinzip der Potentialsonden

Das elektrische Feld wird hierbei durch die Messung einer Potentialdifferenz bestimmt.

Um das Potential an einem bestimmten Ort im Feld zu bestimmen, bringt man einen leitenden Körper (z.B. eine Kugel oder einen Draht) in das Feld. Diesen verbindet man leitend mit einem statischen Voltmeter (Elektrometer). Durch

Influenz- und Eigenladung verändert der Leiter jedoch den ursprünglichen Feldlinienverlauf. Das Elektrometer wird einen Wert des Potentials anzeigen, der geringer ist als der des ungestörten Feldes. Durch Ionen der Luft können die Ladungen auf dem Leiter fort getragen werden, bis dieser das ungestörte, höhere Potential angenommen hat. Indem man die Ionenkonzentration durch eine Flamme oder einen radioaktiven Strahler erhöht, wird dieser Ladungstransport beschleunigt.

Die elektrische Feldstärke ergibt sich folgendermaßen:

Misst man mit der Anordnung entlang der Feldlinien an zwei Orten das Potential und ermittelt den Abstand  $d$  der Messpunkte, so kann die Feldstärke berechnet werden (Abb. 1)

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U_{12} = \Delta\varphi$$

$$\frac{U_{12}}{d} = E$$

Bei Messungen elektrostatischer Felder in der Atmosphäre, wird man das Erdpotential als Nullpotential annehmen. Dadurch spart man sich den zweiten Messpunkt.

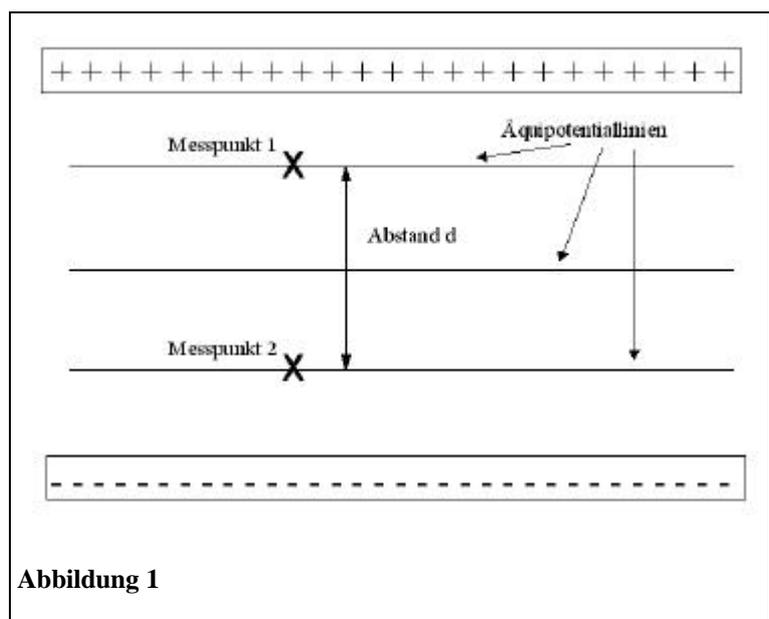


Abbildung 1

## 2.2 Das Messprinzip der Influenzsonden

Die Messung macht sich den Zusammenhang zwischen der Feldstärke  $E$  und der durch Influenz hervorgerufenen Flächenladungsdichte  $\sigma$  zu Nutzen.

Die Grundgleichung des elektrischen Feldes lautet:

$$\frac{Q}{A} = E \varepsilon_0 \quad \frac{Q}{A} = \sigma \quad \sigma : \text{Flächenladungsdichte (in As/m}^2\text{)}^1$$

Dieser Zusammenhang wird nun eingehend am sog. „Wilson-Prinzip“ erläutert:

Ein elektrisches Feld bewirkt beeinfluzierte Flächenladungen auf der Erde ( $\sigma = E \varepsilon_0$ ).

Wenn man eine flache Metallplatte auf die Erdoberfläche legt und sie erdet, treten auf ihr ebenfalls Flächenladungen auf - je nach Feld positive oder negative. (Abb. 2 oben)

Wenn diese Platte mit einer anderen geerdeten Platte zugedeckt wird, so treten die Ladungen auf der oberen Platte auf und die Ladungen auf der ersten Platte fließen nach Erde ab (Abb. 2 unten). Das Feld wird quasi durch die obere Platte abgeschirmt. Wenn man nun diese abfließenden Ladungen mißt, so kann man auf die vorher vorhandene Flächenladungsdichte schließen und so das Feld berechnen. (nach Feynman S.167 [2])

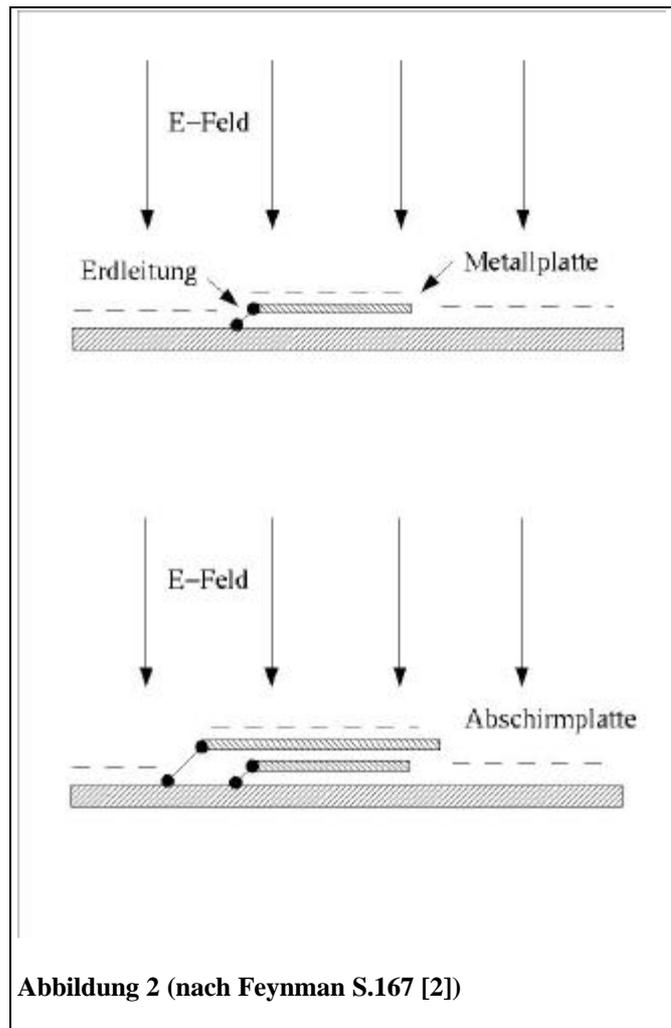


Abbildung 2 (nach Feynman S.167 [2])

<sup>1</sup> Die Flächenladungsdichte  $\sigma$  wird auch als Verschiebungsdichte oder Flußdichte  $D$  bezeichnet

Diese Ladungsmessung kann z.B. mit einem Elektrometer oder einem Galvanometer erfolgen.

Um bei dieser Messeinrichtung eindeutige Messergebnisse zu erreichen, muß das Feld entsprechend groß sein oder die Messplatten müssen eine möglichst große Fläche besitzen. Außerdem erfolgt das ständige Auf- und Zudecken hier manuell und ist für genaue und kontinuierliche Feldmessung ungeeignet.

Dieses Messprinzip wurde nun weiter verbessert und automatisiert. Die meist verwendete Variante, die sog. „Feldmühle“ wird nun im Folgenden genauer erläutert.

### 2.2.1 Die „Feldmühle“ als Weiterentwicklung der „Wilson-Platten“

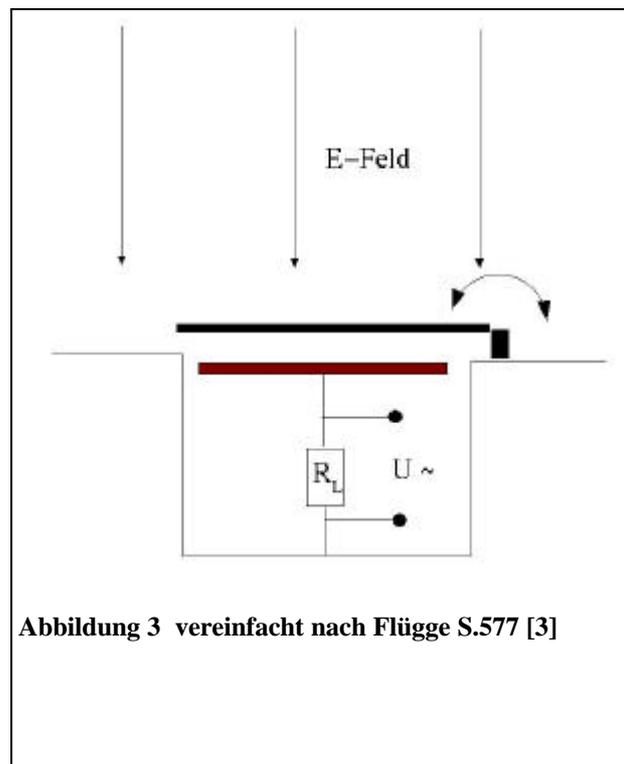
Bei der Feldmühle wird das Feld durch ein geerdetes Flügelrad periodisch abgeschirmt und auf die Messplatten durchgelassen. (Abb. 3)

Die influenzierte Ladungsdichte schwankt nun zwischen 0 und  $\epsilon_0 E$ . Sie ist in Amplitude und Vorzeichen dem Feld proportional.

Die auf- und abfließenden Ladungen leitet man über einen möglichst hohen

Widerstand  $R_L$  gegen Masse ab und erhält hierdurch eine

Wechselspannung  $U$ , die wiederum in der Amplitude der Feldstärke proportional ist. Die Frequenz der Wechselspannung entspricht der Umdrehungs-geschwindigkeit des Flügelrades. Die Energie, welche zur Signalauswertung benötigt wird, stammt aus der Bewegungsenergie des



Flügelrades. Somit wird dem E-Feld durch die Mess-anordnung keine Energie entzogen.

Die Wechselspannung  $U$  ergibt sich aus folgender Herleitung (Flügge S.577 [3]):

$R_L$  : Lastwiderstand über den die Ladungen fließen und an dem  $U$  abfällt,

$Q_0$  : Oberflächenladung ohne Abschirmung,

$Q$  : Oberflächenladung in Abhängigkeit von  $t$ ,

$\omega$  : Umdrehungsgeschwindigkeit des Flügelrades,

$A_0$  : Fläche der Messplatte,

$E$  : Einwirkendes statisches E-Feld,

$C$  : Kapazität der mit  $R$  verbundenen Messplatten und Anschlußdrähte.

$$Q = Q_0 \cdot \sin \omega t \quad (I)$$

Aus  $\frac{Q_0}{A_0} = \epsilon_0 \cdot E$  folgt  $Q_0 = \epsilon_0 \cdot E \cdot A_0$  (II)

$$\text{II in I} \Rightarrow Q = \epsilon_0 \cdot E \cdot A_0 \cdot \sin \omega t \quad (III)$$

$$U = R_L \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (IV) \quad \text{nach Einsetzen von III in IV und Ableitung ergibt sich dann:}$$

$$U = R_L \cdot \epsilon_0 \cdot E \cdot A_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (V)$$

Nach Flügge S.578 [3], ist für die Verwendbarkeit der Formel Voraussetzung, dass die Zeitkonstante  $= R \cdot C$  kleiner ist als  $\frac{1}{\omega}$  ■

Nun sagt die Amplitude der Wechselspannung zwar etwas über die Feldstärke aus, um jedoch die Richtung des Feldes feststellen zu können, muss man während der Messung die jeweilige Stellung der Abschirmplatten herausfinden. Es ist entscheidend zu wissen, wie die Polarität der Messspannung beim Auf- bzw. Abdecken ist. Beim Aufdeckvorgang werden die Messplatten dem Feld ausgesetzt. Nimmt man beispielsweise den Feldlinienverlauf von Abb. 4 an, so herrscht im Moment des Aufdeckens auf den Platten ein Elektronenmangel vor. Es fließen negative Ladungen von Erde über den Widerstand auf die Platten. Wenn man nun die technische Stromrichtung verwendet, ergibt sich also beim Aufdeckvorgang ein negativer Spannungsimpuls. Dieser wird am Oszilloskop als negative Sinushalbwelle sichtbar.

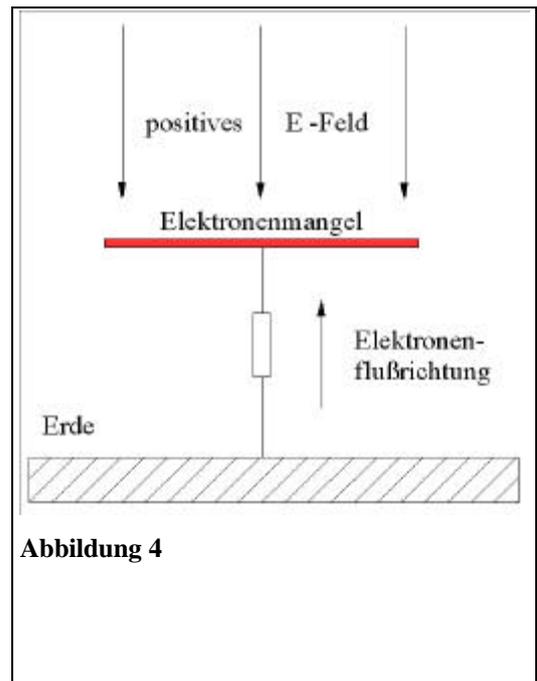
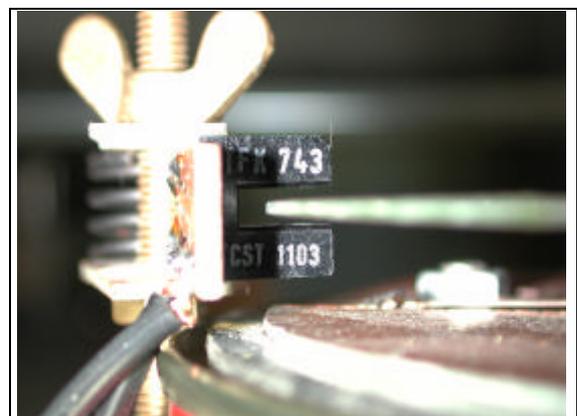


Abbildung 4

Beim umgekehrten Feldlinienverlauf ergibt sich entsprechend ein positiver Spannungsimpuls.

Für die Registrierung der Plattenstellung sorgt eine Gabellichtschranke. Diese besteht zum einen aus einer Leuchtdiode, welche Infrarotlicht ausstrahlt. Dieses Licht und die Bauart, sind besonders geeignet, da Streulicht, z.B. durch Sonneneinstrahlung, kaum Einfluß ausübt. Gegenüberliegend angeordnet ist ihr ein Phototransistor. Bei diesem wird die Emitter - Kollektorstrecke bei ausreichender Lichteinstrahlung leitend. Fehlt diese, so sperrt der Transistor, d.h. die Strecke wird hochohmig. Für die Unterbrechung der Lichtschranke sorgt das Flügelrad. Legt man an den Transistor über einen Widerstand eine Spannung an, so kann man am Transistor eine Rechteckspannung abgreifen, welche in ihrer Frequenz mit der Umdrehungsgeschwindigkeit des Flügelrades und somit auch mit der des Messsignals übereinstimmt. Angenommen die



Detailaufnahme der Gabellichtschranke

Lichtschanke wird so angeordnet, dass beim Aufdecken der Platten die Lichtschanke unterbrochen wird, so sperrt der Transistor und man misst einen positiven Rechteckimpuls. Vergleicht man nun das Sinussignal der Messplatten mit dem Rechtecksignal der Lichtschanke, kann man auf die Polarität des Feldes rückschließen.

Bei der beschriebenen Anordnung würden bei einem positiven Feld, z.B. dem Schönwetterfeld der Atmosphäre, das Messsignal und die Rechteckspannung um  $180^\circ$  phasenverschoben sein. Bei entgegengesetzter Feldrichtung wären die Signale gleichphasig. Der Phasenunterschied der beiden Spannungen kann leicht an einem Zweistrahloszilloskop angezeigt werden.

### 3 Mechanischer Aufbau der „Feldmühle“

#### 3.1 Motor zum Antreiben des Flügelrades

Es wurde ein Motor aus einem alten Videorecorder verwendet, da er in einem weitem Spannungsbereich einstellbar ist (ca. 3 bis 20 V<sub>DC</sub>). Außerdem läuft er sehr leise und braucht wenig Strom, was ihn vor allem für Akku-Betrieb geeignet macht. Ein wichtiger Aspekt ist noch zusätzlich, dass der Motor eine geerdete Achse besitzt und somit eine zusätzliche Erdung des Flügelrades darstellt (eventuell spart man so eine zusätzliche Erdung).

#### 3.2 Flügelrad und Messplatten

Aus einem Stück kupferkaschierten Platinen-material wurde eine Scheibe mit einem Durchmesser von 15 cm ausgesägt (der Durchmesser richtet sich nach dem verwendeten Gehäuse). Diese Scheibe wurde in 4 gleich große Sektoren unterteilt und nach einer Vorlage ausgeschnitten (Abb. 5). Man könnte die Scheibe durchaus auch in mehrere Sektoren unterteilen.

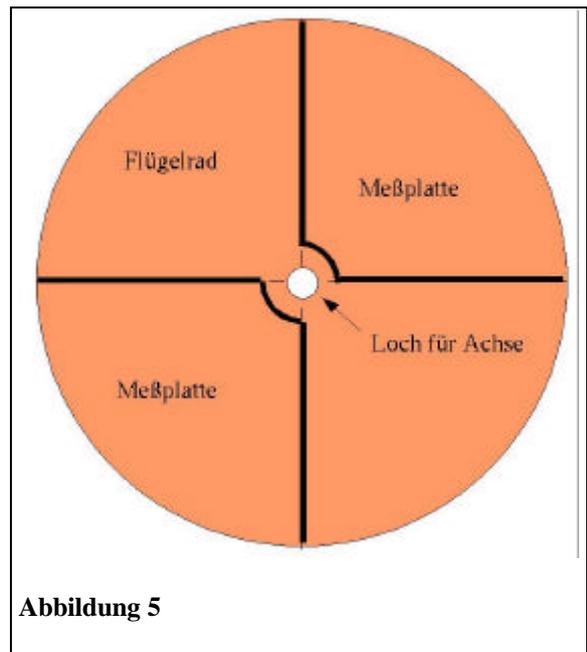


Abbildung 5

Nun wurde das Flügelrad auf eine Achse montiert. Hierzu wurde ein Messingrohr mit 6 mm Durchmesser verwendet, das genau

über die Motorachse passt. Um das Messingrohr auf der Motorachse zu fixieren, wurde seitlich ein 2 mm Gewinde geschnitten und mit einer Schraube das Messingrohr an der Achse festgeklemmt.

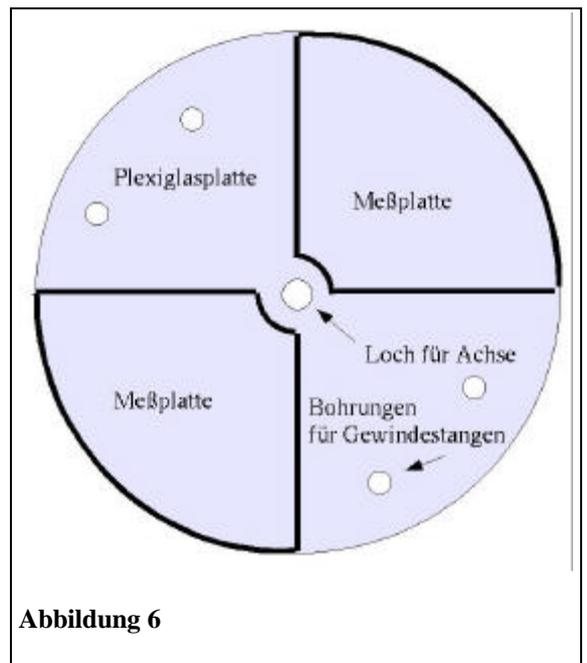


Abbildung 6

Durch das Flügelrad wurde mittig ein 6 mm Loch gebohrt, durch das das Messingrohr gesteckt wird. Jetzt konnte das Rohr mit dem Flügelrad rechtwinklig verlötet werden. Um eine bestmögliche Erdung des Flügelrades zu garantieren, wurde noch ein geerdetes Kupferband in einer Schlaufe um das Messingrohr gewickelt.

### 3.3 Plexiglasplatte, Träger der Messplatten

Um die Messplatten isoliert zu befestigen, wurde aus geeigneten Isolatormaterial (z.B. Plexiglas) eine Scheibe ( $\varnothing$  15 cm) ausgeschnitten. Auf

dieser wurden jetzt die Messplatten (z.B. mit doppelseitigem Klebeband) befestigt. Zusätzlich wurde in die Mitte ein Loch gebohrt, durch das die Achse des Flügelrades gesteckt wird. Die Anordnung der Messplatten und des Flügelrades ergibt nun von oben gesehen wieder einen Kreis (Abb. 6).

### 3.4 Trägerplatte für den Motor und Befestigung mit Gewindestangen

Zusätzlich wurde noch eine Platte als Befestigung für den Motor ausgeschnitten. Diese wurde ebenfalls wieder aus dem stabilen Platinenmaterial hergestellt werden. Der Videorecordermotor wurde mit drei Schrauben an der Platte befestigt .

Durch die Plexiglasplatte und die Motorhalterung wurden jeweils vier Löcher gebohrt, um mit Gewindestangen ( $\varnothing$  4mm) die Ebenen miteinander zu verbinden. Man hat hierdurch den Vorteil, dass man die Abstände gegebenenfalls

verändern kann und die Konstruktion sich leicht auseinander-bauen lässt (Abb. 7)

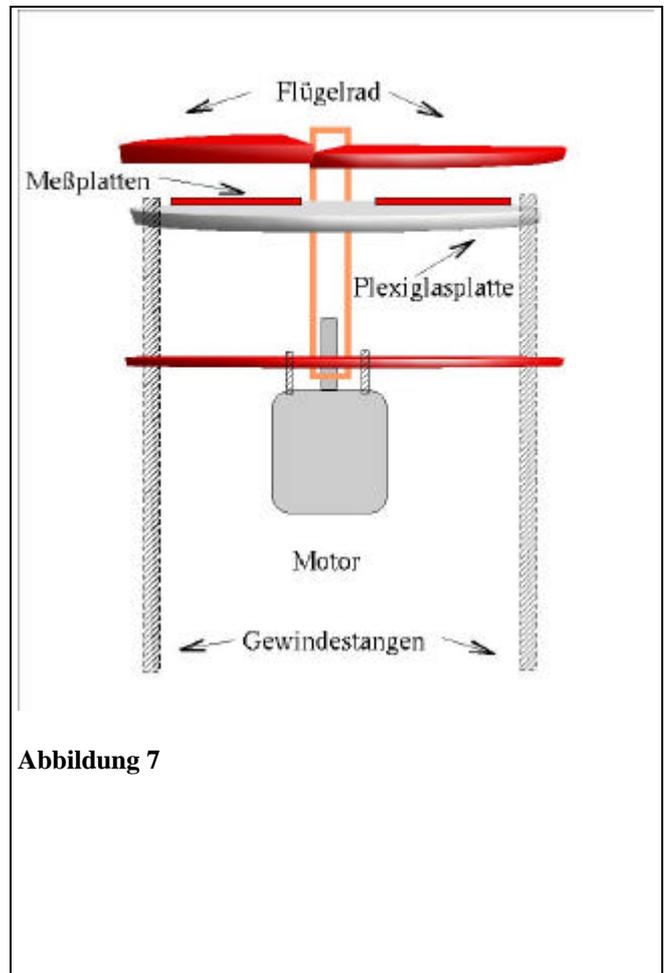


Abbildung 7

### 3.5 Gehäuse

Als Gehäuse fand hier ein alter Honigtopf Verwendung, aber auch eine alte Kecksdose oder eine leere Kaffeedose ist eine geeignete Alternative. Das verwendete



-11 Photo der aufgebauten Feldmühle

Gehäuse sollte allerdings aus Metall sein um unerwünschte Störeinflüsse zu vermeiden.

### **3.6 Lichtschrankenkonstruktion**

Für die Registrierung der Feldrichtung, musste noch eine Anordnung befestigt werden, mit der man die Gabellichtschranke exakt positionieren kann. Hierzu wurde der Lack vom Gehäuse an zwei Stellen entfernt und die Oberfläche verlötet. Jetzt konnten zwei Messingmuttern an das Gehäuse gelötet werden, um die Gewindestange am Gehäuse zu fixieren. Auf dieser Gewindestange wurde nun mit einer Halterung die Gabellichtschranke genau so angebracht, dass der Lichtstrahl von den Abschirmplatten unterbrochen wird und sie die Anordnung nicht berühren.

## **4 Kalibrierung**

### **4.1 Die Kalibrierungseinrichtung**

#### **4.1.1 Kondensator zur Felderzeugung**

Die Messanordnung wurde nun in einem künstlichen E-Feld, welches durch zwei Kondensatorplatten erzeugt wurde, kalibriert. Es wurde die Linearität der Messanordnung überprüft und eventuelle Störeinflüsse sollten aufgezeigt werden.

Da die Feldmühle selbst größtenteils aus Metall besteht, verändert sie das Messfeld. Um trotzdem eine Kalibrierung vornehmen zu können, ist es wichtig, ein möglichst homogenes Feld zu erzeugen. Um ein annähernd homogenes elektrisches Feld zu erhalten, müssen die Kondensatorplatten möglichst groß sein. Es wurden hierzu auf einen Pappkarton einseitig Alufolie angebracht, um eine leitende Oberfläche zu erzeugen. Die andere Platte bildete ein gleich großes Kupferblech. Beide Platten wurden nun an dem Gestell eines Experimentiertisches befestigt und mit Isolierungen gegen Überschlüge auf den Tisch versehen.

Die Fläche der Platten beträgt  $A_C = 100\text{cm} \cdot 50\text{cm} = 5000\text{cm}^2 = 0,5 \text{ m}^2$

Der Abstand beträgt 0,6m.

Die Kapazität C ist somit:  $C = \epsilon_0 \frac{A_C}{d} = 7,4 \text{ pF}$

Bei z.B. 1000V würde demnach die Feldstärke  $E = \frac{U}{d} = \frac{1\text{kV}}{0,6\text{m}} = 1,6\text{kV/m}$  betragen.

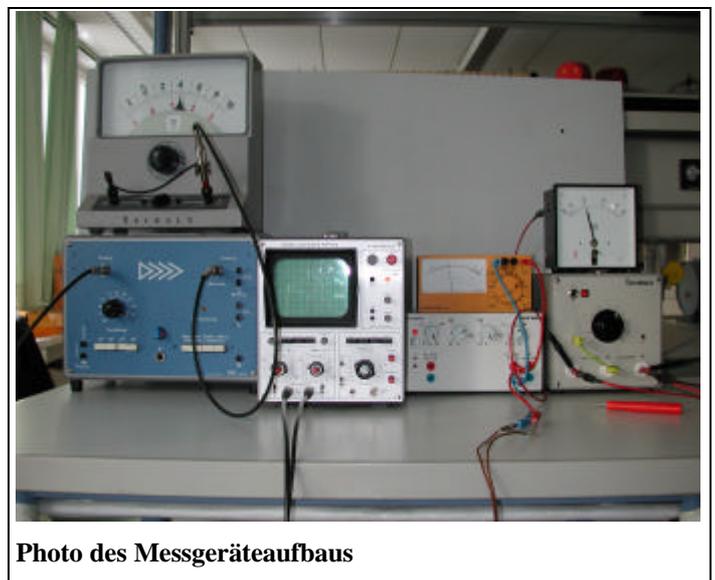
In diesem Kondensator wurde nun die Feldmühle auf Styroporblöcken isoliert aufgestellt.

#### 4.1.2 Messgeräte und Spannungsversorgung

Das schwache Messsignal der Feldmühle wurde über eine abgeschirmte Leitung dem Niederfrequenz - Messverstärker (Phywe 07550) zugeführt. Die verstärkte Sinusspannung wurde mit einem Drehspulinstrument angezeigt.

Um die Feldrichtung zu bestimmen, wurde das unverstärkte Messsignal und die Rechteckspannung der Gabellicht-schranke auf dem Zweistrahloszilloskop (HM 412) dargestellt. Durch ein Gleich-spannungsnetzteil wurde der Motor der Feldmühle angetrieben. Die Kondensatorspannung erzeugte ein Hochspannungsnetzteil (Leybold 52237), welches bis zu 6kV erzeugen kann.

Die Hochspannung wurde mit geeigneten Spannungsmessern überprüft. (she. Photo oben)



#### 4.2 Messkurven

Im Versuch 1 und 2 wurde die Feldmühle unterschiedlich starken E-Feldern ausgesetzt. Es wurde die Messspannung  $U_{\text{mess}}$  in Abhängigkeit von der Kondensatorspannung  $U_C$  gemessen.

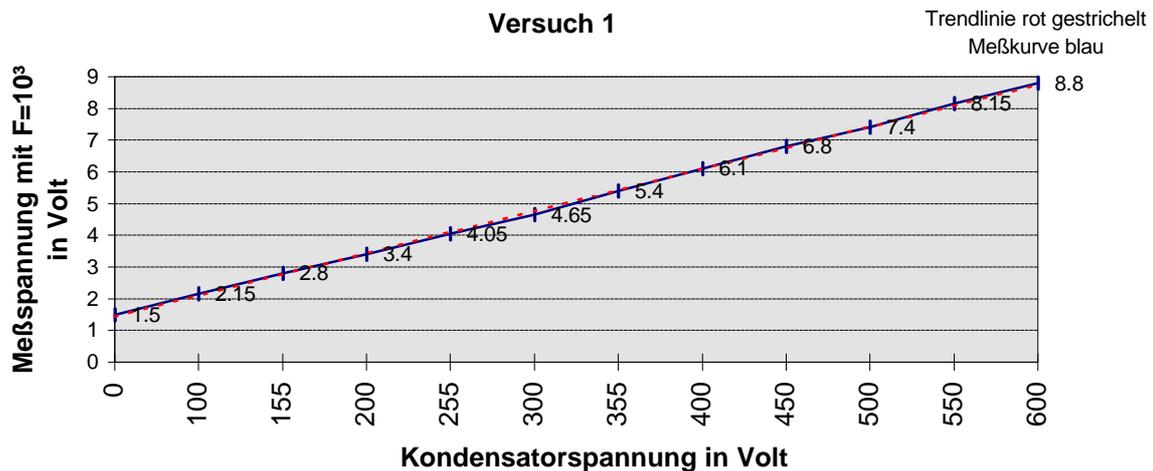
## Versuch 1

Voltmeter (Kröncke 1360); Messbereich 600V DC

Die Umdrehungsgeschwindigkeit des Motors betrug 77 Umdrehungen / s.

Der Verstärkungsfaktor F des Messverstärkers betrug  $F = 10^3$

Messgröße n	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10	M 11	M 12
U <sub>mess</sub> / V	1,5	2,15	2,8	3,4	4,05	4,65	5,4	6,1	6,8	7,4	8,15	8,8
U <sub>C</sub> / V	0	100	155	200	255	300	355	400	450	500	550	600
E-Feld V / m	0	166	258	333	425	500	591	666	750	833	916	1000



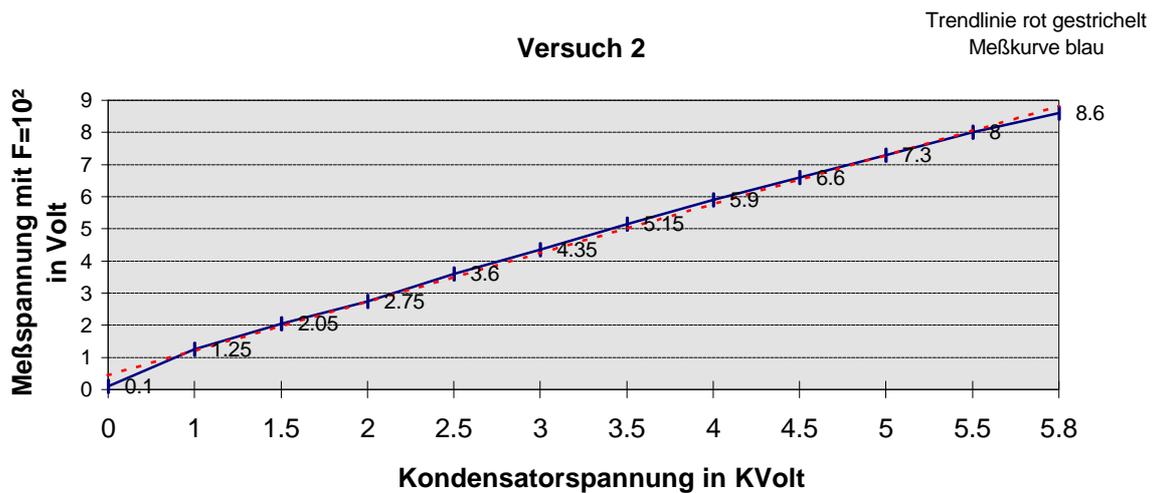
## Versuch 2

Hochspannungsvoltmeter (Leybold 54039) bis 6kV

Die Umdrehungsgeschwindigkeit betrug 77 Umdrehungen / s.

Der Verstärkungsfaktor F des Messverstärkers betrug  $F = 10^2$

Messgrößen	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10	M 11	M 12
U <sub>mess</sub> / V	0,10	1,25	2,05	2,75	3,60	4,35	5,15	5,90	6,6	7,30	8,00	8,60
U <sub>C</sub> / kV	0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	5,8
E-Feld kV / m	0	1,67	2,50	3,33	4,17	5,00	5,83	6,67	7,50	8,33	9,17	9,67



### 4.3 Auswertung der Messkurven

In beiden Versuchen zeigten die Messreihen ein sehr lineares Verhalten. Die Kurve stimmt bis auf wenigen Ausnahmen mit der Ausgleichsgeraden überein. Deutlich sichtbar ist allerdings auch die Nullpunktverschiebung des verstärkten Signals, vor allem bei höherem Verstärkungsfaktor. Die größten Messungenauigkeiten sind am Anfang der Messung, bei kleinem Feld und damit schwachen Messsignal zu beobachten.

### 4.4 Störeinflüsse

#### - Einstrahlung von 50Hz - Wechselfeldern

Durch Überprüfung am Oszilloskop konnte festgestellt werden, dass es sich hier um starke

50 Hz - Einstrahlungen aus dem Stromnetz handeln muß, da die Messspannung durch die Motorgeschwindigkeit in der Frequenz verändert werden kann, und somit von der Störspannung, die sich nicht ändert, unterscheiden lässt. Diese Einstrahlung ist hauptsächlich dafür verantwortlich, dass die Messgenauigkeit und Empfindlichkeit der Messapparatur begrenzt ist, da sie das Messsignal stark überlagert. Ein Filter ist technisch schwierig, da die Frequenz der Messspannung durch die maximale Umdrehungsgeschwindigkeit des Motors auf ca. 100 Hz beschränkt wird. Dadurch wäre ein Filter zu wenig selektiv und

würde außerdem effektiv nichts gegen die Einstrahlung von Oberwellen der 50 Hz - Spannung nützen.

#### **- Voltaeffekt**

Zwischen zwei Metallen, welche durch eine Luftschicht getrennt sind, können Voltasche Kontaktspannungen auftreten, welche dann eine Nullpunktverschiebung hervorrufen. Nach Israel, S.338 [4], können diese bei Feldmühlen bis zu 100 mV annehmen.

#### **- Statische Aufladungen und Drehzahlschwankungen**

Es können statische Aufladungen auftreten, da durch die Bewegung des Flügelrades auch Luft an den Messplatten reibt. Zuletzt können auch Drehzahlschwankungen des Motors die Messspannung beeinflussen. Dieser Effekt ist hier allerdings unwahrscheinlich, da die Spannung aus einer regulierten Quelle stammt und der Motor konstant läuft, was sich an der Frequenz leicht überprüfen lässt.

#### **5 Freilandmessungen**

Im Folgenden sollte nun das natürliche „Schönwetterfeld“ zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche gemessen werden. Es wurden Messungen an zwei unterschiedlichen Orten und bei verschiedenen Wetterlagen gemacht. Die Feldmühle wurde zunächst mit einem geerdeten Metalleimer vom Feld abgeschirmt. Die Störspannung bzw. Offsetspannung des Verstärkers konnte jetzt als Nullpunkt genommen werden. Nach Entfernen der Abschirmung, musste der zusätzliche Spannungsaussschlag  $\Delta U$  vom E-Feld herrühren.

#### **5.1 Messung „Theatron“**

##### **Angaben zur Messung:**

**Ort:** Im Zentrum des Theatrons des Gymnasium Icking

**Zeit:** Am Mittwoch, den 13.12.2000 zwischen 10.00 und 11.00 Uhr

**Wetterlage:** windig, starke Böen, bedeckter Himmel, trocken / vereinzelte Tropfen

**Messgeräte: Messverstärker (Eingangswiderstand  $R_i = 1 \text{ M}\Omega$ ) mit Anzeigeeinstrument**

**(she. Kap. 4.1.2), Metalleimer zur Abschirmung, Feldmühle**

**Verstärkung:  $F = 10^3$**

**Anzeigebereich: 0 - 10 V AC**

**Motorfrequenz: 65 Hz**

**Offsetspannung: 2,6 - 2,7 V (Störspannung bei abgeschirmter Feldmühle)**

**Messung Nr. 1 und Nr. 2 ergaben unter genannten Bedingungen folgende Ergebnisse:**

**$\Delta U_1 = 1,5 - 2,0 \text{ V} \Rightarrow$  effektive Signalspannung  $U_F = 1,5 - 2,0 \text{ mV}$**

**$\Delta U_2 = 1,8 \text{ V} \Rightarrow$  effektive Signalspannung  $U_F = 1,8 \text{ mV}$**

**(Unter effektiver Signalspannung  $U_F$ , versteht man die tatsächliche Messspannung welche von der Feldmühle ohne Verstärkung geliefert wird. Sie ergibt sich indem man  $\Delta U$  durch den Verstärkungsfaktor  $F$  teilt.)**

**Diese Messspannungen eingesetzt in Formel V aus Kap. 2.2.1, ergeben folgende Feldstärken:**

$$U = R_L \cdot \varepsilon_0 \cdot E \cdot A_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (\text{V})$$

$$E = \frac{U_{1/2} \cdot \sqrt{2}}{1 \text{ M}\Omega \cdot \varepsilon_0 \cdot (56,25 \text{ cm}^2 \cdot \pi \cdot 1/2) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 65 \text{ Hz}}^2$$

$$E_1 = 66 - 88 \text{ V / m} \quad E_2 = 80 \text{ V / m}$$

**Das Drehspulinstrument ist in Effektivwerten geeicht, deswegen ist auch  $U_{1/2}$  nur die gemessene Effektivspannung. In die Formel muss allerdings die Spitzenspannung eingesetzt werden, deswegen muss man mit dem Faktor  $\sqrt{2}$  multiplizieren.**

## **5.2 Messung „Sportplatz“**

## Angaben zur Messung:

**Ort:** In der Mitte des Sportplatzes des Gymnasium Icking  
**Zeit:** Am Donnerstag, den 14.12.2000 zwischen 10.00 und 11.00 Uhr  
**Wetterlage:** bewölkter Himmel, trocken, wenig Wind  
**Messgeräte:** wie in Kap. 5.1 jedoch zusätzlich Oszilloskop (she. Kap. 4.1.2)  
**Verstärkung:**  $F = 10^3$   
**Anzeigebereich:** 0 -10 V AC  
**Motorfrequenz:** 65 Hz  
**Offsetspannung:** 1,1 V

$\Delta U = 1,9V \Rightarrow$  effektive Signalspannung  $U_F = 1,9 \text{ mV}$   
eingesetzt in Formel IV aus Kap. 2.2.1:

$$E = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{1 \text{ M}\Omega \cdot \epsilon_0 \cdot (56,25 \text{ cm}^2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{2}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 65 \text{ Hz}}$$

$E = 84 \text{ V / m}$  (zu dieser Messung gibt es eine Videoaufnahme)

### 5.3 Auswertung der Messergebnisse

Bei den Messungen im Theatron war zu beobachten, dass die Spannung sich sehr schnell änderte und das Anzeigeeinstrument an sich unruhig war. Deshalb waren auch zwei Messungen nötig. Die Offsetspannung war groß, was auf die Nähe zum Schulgebäude und die damit verbundenen Störeinstrahlungen schließen lässt. Die Messbedingungen waren nicht optimal, da durch die Gebäude starke Feldverzerrungen auftreten.

Bei der Messung in der Mitte des Sportplatzes waren die Störeinflüsse weniger stark, was schon allein an der nur halb so großen Offsetspannung erkennbar ist. Die Anzeige war sehr viel ruhiger. Das Feld wurde weniger verzerrt, da der Abstand zum Schulgebäude größer war. Die Anzeige der Signale am

---

<sup>2</sup> In Klammern steht die Fläche. Da die Meßplatten nur die Hälfte der Kreisfläche haben, steht der Faktor  $\frac{1}{2}$

Oszilloskop erlaubte eine Bestimmung der Richtung des Feldes. Es ergab sich richtigerweise ein positives Feld. Zu beobachten war außerdem eine schwache Feld-änderung, welche durch unterschiedlich geladene Wolken hervorgerufen worden sein könnte.

Die Größe der Feldstärke war bei beiden Messungen geringer als der in der Literatur angegebene Durchschnittswert von 130 V/m (Bergmann/Schaefer, S. 87 [5]). Für eine exakte Messung des Feldes wäre es notwendig gewesen, die Messung auf einer möglichst ebenen Fläche, ohne Bäume, Gebäude und andere Störfaktoren, durchzuführen. Da diese idealen Bedingungen hier kaum erreichbar waren, ist die etwas schwächere Feldstärke erklärbar. In der Literatur wird angegeben, dass das natürliche elektrische Feld in der Nähe des Erdbodens zwischen 64 und 317 V/m liegen kann (Bergmann/Schaefer, S. 86 [5]).

Aus Kilinski, S.85 [6] stammt folgendes Zitat, was die niedrigere Feldstärke aufgrund von meteorologischen Einflüssen bestätigt:

„Auch einen geschlossene Stratusdecke übt eine Wirkung auf das Potentialgefälle aus. Die Werte fallen kleiner aus, außerdem treten Schwankungen auf. An heiteren Zirkus- und Kumulustagen hingegen hat man keinen Wolkeneinfluß festgestellt.“

Unter Berücksichtigung der ungünstigen Messbedingungen und den natürlichen Schwankungen des Feldes, sind die Messwerte also durchaus realistisch.

## 6 Auswertelektronik und Veränderungen an der Feldmühle

Die Auswertelektronik beruht maßgeblich auf dem Schaltungsvorschlag von MacGorman, S.120 [7]. Die Schaltung wurde allerdings nicht in vollem Umfang übernommen, sondern nur teilweise als Vorlage verwendet. Sie wurde außerdem entsprechend der Messapparatur angeglichen und verändert.

Die Auswertelektronik hat 3 wichtige Aufgaben, welche im folgenden erläutert werden:

- Abschwächung der Störeinstrahlung (v.a. 50 Hz) mit Hilfe eines Differenzverstärkers
- Gleichrichtung der Sinusspannung unter Berücksichtigung der Feldrichtung
- Verstärkung des Messsignals

### 6.1 Differenzverstärkerschaltung

Aus MacGorman S.118 f. [7], stammt die Idee, *zwei* Messplattenpaare zu verwenden. In der bisher beschriebenen Anordnung ist es nur *ein* gegenüberliegendes Messplattenpaar, welches die Sinusmessspannung liefert. Wenn man ein weiteres Plattenpaar um  $90^\circ$  versetzt auf der Plexiglasplatte anordnet, erhält man ein zweites Messsignal, welches in der Amplitude gleich, aber um  $180^\circ$  phasenversetzt ist.



Feldmühle mit 2 Messplattenpaaren

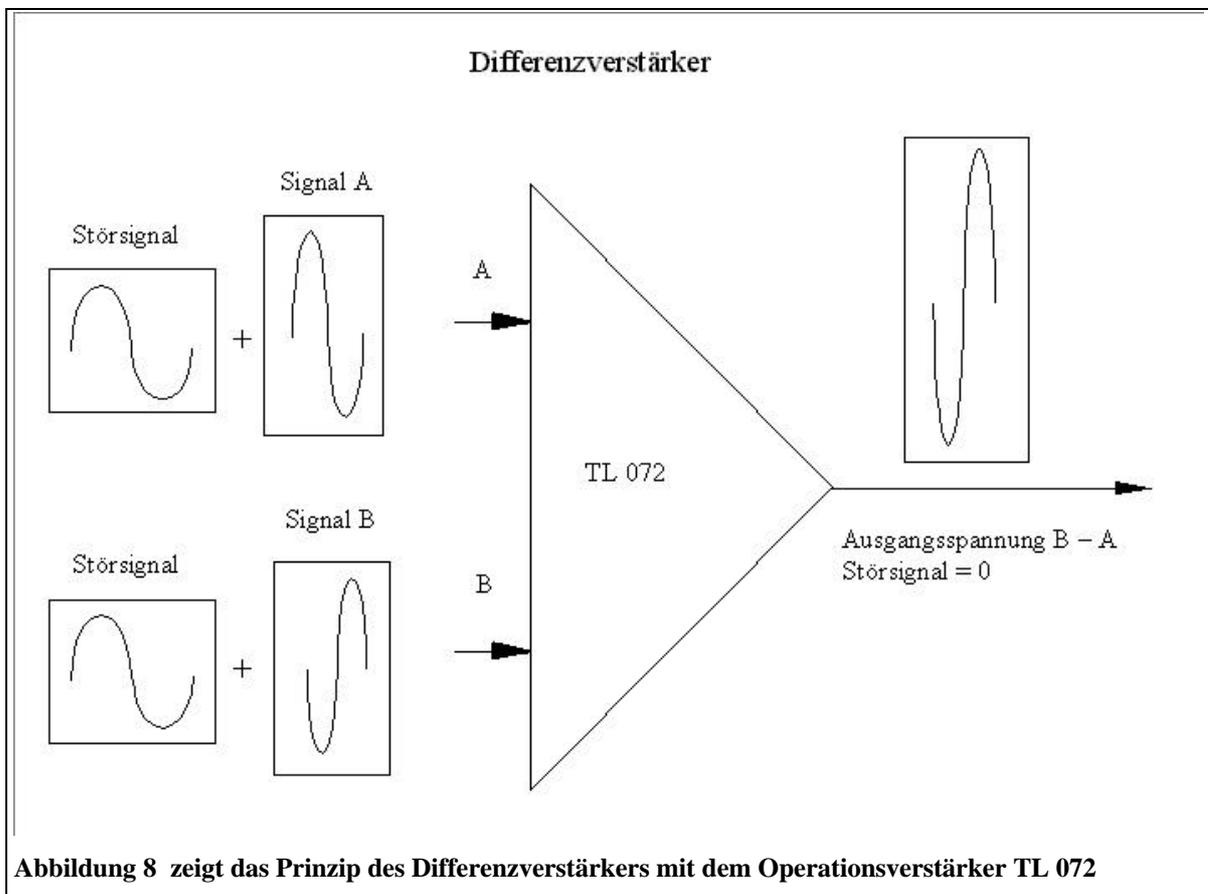
Dieser Phasenunterschied entsteht durch die zeitlich versetzte Ab- bzw. Aufdeckung der Messplattenpaare. (she. Photo)

Eine bekannte elektronische Operationsverstärkerschaltung ist der sog. Differenzverstärker (Krämer, S.33 f., [8]). Dieser Verstärker besitzt zwei Eingänge (z.B. Eingang A und B). Die Ausgangsspannung ist die Differenz der beiden Eingangssignale (z.B.  $B - A$ ). Wenn nun am Eingang A und am Eingang B z.B.  $+3V$  anliegen, ist am Ausgang keine Spannung messbar. Liegt jedoch an Eingang A z.B.  $+2V$  und am Eingang B  $+5V$ , so liefert der Verstärker (Verstärkungsfaktor sei gleich 1) am Ausgang  $+5V - 2V = +3V$ .

Diese interessante Eigenschaft beschränkt sich natürlich nicht nur auf Gleichspannung sondern funktioniert auch mit Wechselspannungen.

Legt man nun das Messsignal des Plattenpaares A auf den Eingang A und das Signal vom Plattenpaar B auf den Eingang B, so liegen die Messsignale zwar von der Amplitude her gleich an den Eingängen an, allerdings mit einem

Phasenunterschied von  $180^\circ$ . Durch diese Phasendifferenz erzeugt der Differenzverstärker ein Ausgangssignal  $B - A$ , welches von der Frequenz her



gleich und dessen Amplitude doppelt so groß ist, wie die der Eingangsspannung. Gleichzeitig kommen von der Feldmühle auch die Störspannungen, welche in Kap. 4.4 beschrieben wurden. Diese liegen jedoch an den beiden Eingängen mit gleicher Phasenlage und gleicher Amplitude an, da sie vom Flügelrad nicht beeinflusst werden. Das hat zur Folge, dass diese gleichtaktigen Signale nicht vom Differenzverstärker verstärkt werden und somit keine Störspannungen mehr am Ausgang messbar sind (Abb. 8).

## 6.2 Gleichrichtung des Messsignals

Um einerseits das Messsignal in eine leicht darzustellende Gleichspannung umzuwandeln und andererseits die Feldrichtung mit zu berücksichtigen, wurde eine weitere elektronische Schaltung gebaut. Diese besteht hauptsächlich aus

einem elektronischen Schalter, der elektrisch angesteuert werden kann. (Abb. 9)

Durch das Rechtecksignal der Lichtschranke wird der elektronische Schalter (CD 4066) geschlossen bzw. geöffnet. Da Rechtecksignal und Messsignal gleichphasig sind, wird immer nur eine Halbwelle durchgelassen. Je nach Feld ist dies die positive oder negative Halbwelle.

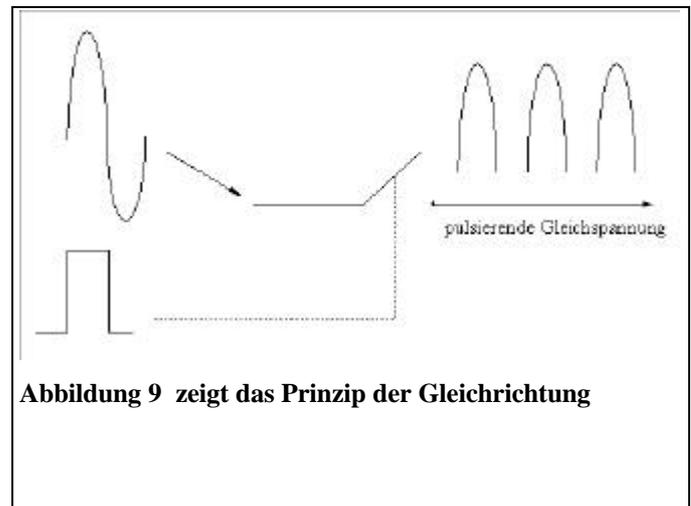
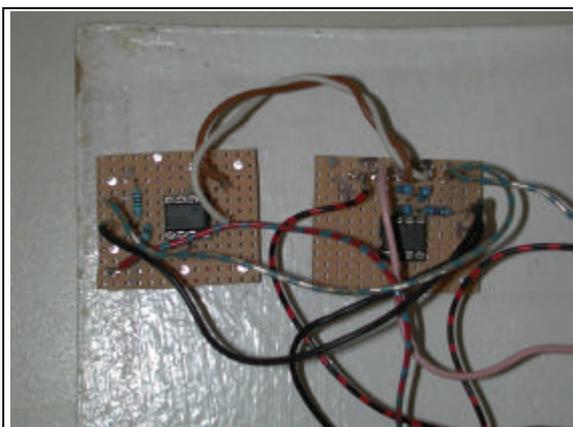


Abbildung 9 zeigt das Prinzip der Gleichrichtung

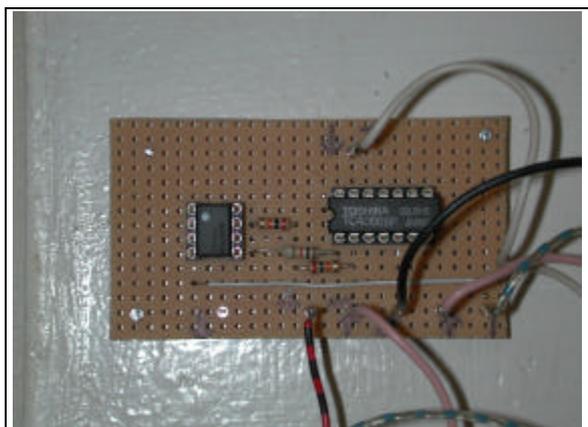
Ein weiterer Vorteil dieses Schalters besteht darin, dass nur Signale, welche die gleiche Frequenz besitzen wie das Messsignal, so gleichgerichtet werden. Noch vorhandene Stör-signale anderer Frequenz werden quasi zerhackt und heben sich auf. Dies stellt eine weitere Filterung des Messsignals dar.

Ein nachfolgender RC-Tiefpassfilter glättet die Gleichspannung zusätzlich und verhindert den Einfluß hochfrequenter Störeinflüsse.

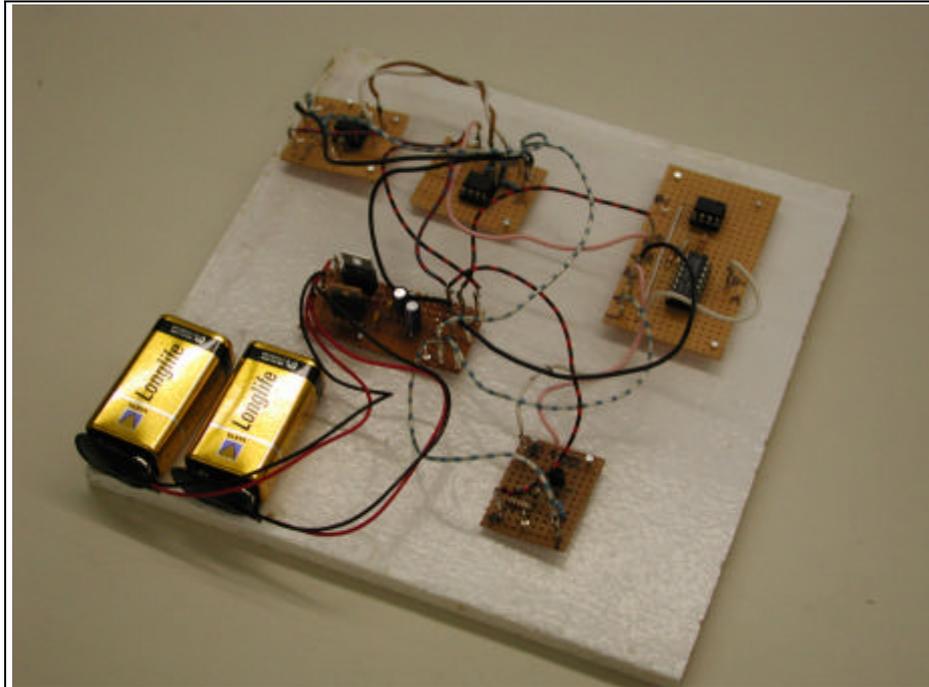
Zuletzt nun Aufnahmen der aufgebauten Schaltungen:



Vorverstärker (li.) und nachfolgender Differenzverstärker (re.)



Elektronischer Schalter (re.) und ein weiterer Endverstärker (li.)



Vollständig aufgebaute Auswertelektronik

## 7 Fazit

Es gelang mit einfachen Mitteln eine Messanordnung zu konstruieren, welche durchaus brauchbare Messergebnisse liefert. Es konnten zwar nicht Genauigkeiten kommerzieller Messgeräte erreicht werden, jedoch wurde durch die Freilandmessungen gezeigt, dass Messungen im Bereich von 100 V/m möglich sind.

Mit der anfänglichen Messanordnung waren große Schwierigkeiten verbunden, da die Messwerte ständig durch Fremdeinstrahlungen verfälscht wurden. Dies ließ sich zwar durch eine Kalibrierung in einem definierten Feld kompensieren, jedoch musste man an einem anderen Standort, oder durch eine Änderung der Messanordnung, ständig neu kalibrieren.

Eine erheblich Verbesserung brachte die Veränderung der Messplattenanordnung und die Schaltung mit einem Differenzverstärker. Der Einfluss von Störeinstrahlungen konnte dadurch beinahe gänzlich eliminiert werden. Leider wurde die ausschlaggebende Literatur erst spät entdeckt und die Anpassung der Schaltung an die Messapertur nahm viel Zeit in Anspruch. Generell ist zur Quellebeschaffung zu sagen, dass das Interesse der Wissenschaft an der Luftelektrizität verstärkt im Bereich von 1915 - 1965 bestand. In der aktuellen Literatur finden sich meist nur Zusammenfassungen

**früherer Ergebnisse. Dies hatte zur Folge, dass die ältere Literatur nicht immer leicht zu beschaffen war und die Mess- und Auswertmethoden darin absolut veraltet waren.**

**Weitere Messungen mit der verbesserten Apperatur konnten aus Zeitgründen und der ungünstigen Witterungsverhältnisse nicht mehr durchgeführt werden.**

**In Zukunft werde ich mich weiterhin mit der Verbesserung der Feldmühle und mit Freiland-messungen beschäftigen.**

Ich erkläre, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

---

Ort , Datum Unterschrift