

# **Nachweis von Potential- differenzen bei der Netz- stromversorgung**

**Wettbewerb „Jugend Forscht“ 2000**

**Ole Massow (19 Jahre)**

**Torsten Bruns (19 Jahre)**

**Arbeitsgemeinschaft „Jugend Forscht“  
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg**

**Leitung: StD Thomas Biedermann**



## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Themenabgrenzung	Seite 3
2. Die theoretische Grundlage der Netzstromversorgung	Seite 3
2.1 Der prinzipielle Aufbau	Seite 3
2.2 Entstehung und Auswirkungen von unsymmetrischer Lastverteilung	Seite 4
3. Modellvorstellungen und Simulationen	Seite 5
3.1 Unsymmetrische Lastverteilung und Vektordarstellung	Seite 5
3.2 Simulation von unsymmetrischer Lastverteilung und Phasenverschiebung	Seite 6
3.3 Der Erdboden als Widerstand	Seite 6
3.4 <b>Potentiale</b>	Seite 7
4. Einordnung des Messgebietes	Seite 8
5. Simulationen der Potentialfelder	Seite 9
5.1 Berechnung der Potentialfelder am PC	Seite 9
5.2 Messung von Potentialen im Modell	Seite 9
5.3 Vergleich der Simulationsergebnisse	Seite 10



## 1. Einleitung und Themenabgrenzung

Zu unserem Thema „Nachweis von Potentialdifferenzen bei der Netzstromversorgung“ sind wir folgendermaßen gelangt: Im Zuge der monatlichen JuFo-Treffen bei Herrn Biedermann fragten wir uns, ob es möglich sei, durch die im Boden auftretenden Potentialdifferenzen ein Radio zu betreiben, für welches zwei in den Boden gerammte Elektroden die nötige Stromversorgung liefern sollten. Dabei hatten wir den Versuch mit dem Apfel, der als Spannungsquelle für eine Uhr dient, im Kopf. Dort wird zwar die Stromversorgung durch Reaktion von Säuren hergestellt, aber bei der Uhr handelt es sich um einen Kleinstverbraucher. So dachten wir, dass es möglich ist, solch eine Last über die im Boden auftretende Spannungen zu betreiben. So utopisch wie diese Idee klingen mag, nahmen wir sie dennoch als Anlass für unsere Untersuchungen. Bei der Beschäftigung mit den notwendigen Grundlagen hatten wir allerdings so viel zu tun, dass diese Ausgangsidee mehr oder weniger in den Hintergrund gerückt ist.

Dafür traten vielmehr folgende Fragen in den Vordergrund:

- Woraus resultieren die im Boden auftretenden Spannungen?
- Welche Rolle spielt der Erdboden als Leiter bzw. Widerstand?
- Wie kann man sich diese Erkenntnisse vorstellen und kann man sich entsprechende Simulationen schaffen?
- Wie groß sind die Spannungen?

Mit diesen Ansätzen näherten wir uns dem Thema. Wir machten es uns zum Ziel, einen Nachweis für solche Spannungen zu erbringen und den Hintergrund zu beleuchten, welcher zum Verständnis der Vorgänge notwendig ist.

## 2. Die theoretische Grundlage der Netzstromversorgung

### 2.1 Der prinzipielle Aufbau

In Kraftwerken wird mechanische Energie in elektrische umgewandelt, d.h. Turbinen treiben Generatoren an, wobei Spannung induziert wird. Diese Spannung im Bereich der sog. Mittelspannung (20000 Volt) wird auf Hochspannung (110 KV bis zu 380 KV) transformiert und über das bundesweite Hochspannungsnetz an Umspannstationen des Mittelspannungsbereiches verteilt. In diesem Netz wird der Strom wiederum in einem Umkreis von einigen zehn Kilometern an Umspannstationen verteilt, diese transformieren die Mittelspannung auf die Niederspannung herunter, die beim Endkunden am Hausanschluss anliegen. Die Strecke der Leiter beträgt dort nur noch eine Länge von wenigen hundert Metern. Alle diese Umspannwerke sind jeweils mit einem Erdungspunkt versehen ebenso wie das Elektrizitätswerk.

Die elektrische Energie wird dabei auf drei Phasen R, S und T als Wechselspannung von 50 Hz übertragen. Die Phasen der Spannungen sind zueinander um  $120^\circ$  verschoben.

Dieser Hausanschluss besteht aus diesen drei Phasen R, S, T und einem Ausgleichsstromleiter PEN. Der Ausgleichsstromleiter stellt dabei nur eine Verbindung zur letzten Transformationsstation her. Dort und im Haus des Stromkunden ist er mit einem Erdungsstab verbunden. Dieser PEN existiert nicht im Mittelspannungs- und Hochspannungsnetz.



Zwischen je zwei der drei Phasen liegt im Niederspannungsnetz jeweils eine Spannung von 380 Volt an (Dreiecksschaltung, Abb. 1a), von jeder der Phasen bezogen auf den PEN jedoch jeweils 220 Volt (Sternschaltung, Abb. 1b). Drehstromgeräte wie z.B. Elektromotore werden so gebaut, dass die Lasten sich jeweils zwischen den Phasen befinden. Da hier alle drei Phasen gleich stark belastet werden, können keine unsymmetrischen

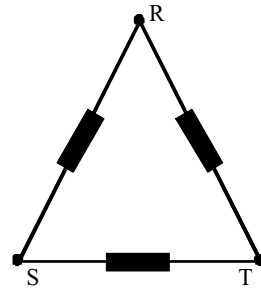


Abb. 1a: Dreiecksschaltung der Phasen R, S, T

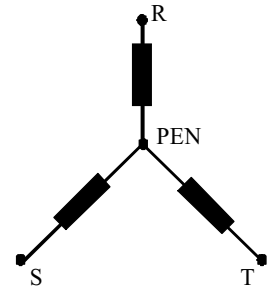


Abb. 1b: Sternschaltung der Phasen R, S, T

Lastverteilungen auftreten. Es gibt jedoch auch Geräte mit Dreiphasenanschluss, die diesen nicht symmetrisch belasten. Dieser Fall tritt z.B. bei Elektroherden in Privathaushalten auf. Hier werden die einzelnen Platten je nach Leistungsbedarf zwischen einer Phase und PEN oder zwischen zwei Phasen geschaltet. Geräte kleinerer Leistung werden so konstruiert, dass die Last zwischen einer Phase und PEN angeschlossen wird. Bei deren Betrieb wird also lediglich eine Phase belastet, die beiden anderen aber nicht, so dass dies zu einer unsymmetrischen Lastverteilung führt. In diesem Fall fließt dann über den PEN ein Strom zwischen Umspanntransformator und Hausanschluss.

Ein weiterer Grund für den Fluss von Ausgleichsströmen können Phasenverschiebungen sein, welche durch den Betrieb bestimmter angeschlossener Geräte entstehen. Allgemein sind dafür Stromabnehmer verantwortlich, die irgendeine Art von Eigeninduktivitäten aufweisen, d.h. Spulen und Schleifen besitzen, die mit zeitlicher Verzögerung zur angeschlossenen Phase eine Spannung induzieren. Dadurch ergibt sich in dieser Phase eine Verschiebung um einen Winkel  $\varphi$ , dabei gibt es Geräte mit positiver wie auch negativer Phasenwinkelverschiebung. Solche Endverbraucher können z.B. Elektromotore sein. Hier existiert eine gewisse statistische Wahrscheinlichkeit, dass sich die daraus resultierenden Ausgleichsströme vieler solcher Verbraucher zu Null addieren.

## 2.2 Entstehung und Auswirkungen von unsymmetrischer Lastverteilung

Aus dem vorausgegangenem Kapitel geht hervor, dass eine symmetrische Lastverteilung bei Drehstromgeräten keinen Stromausgleich über den PEN benötigt. Somit müssen die Geräte, welche zwischen einer Phase und Masse angeschlossen werden, den Strom verursachen, welcher über den PEN-Leiter fließt.

Im Normalfall, d.h. wenn die Lasten auf allen drei Phasen gleich gross sind, fließt kein Ausgleichsstrom, da sich die Phasenströme durch deren zeitliche Verschiebung, auch Phasenverschiebung genannt, zu Null addieren. Zum Nachweis dienen die folgenden Überlegungen:

Jede der drei Phasen sei über einen (gleichgroßen) Widerstand R an den PEN angeschlossen. Für die Ströme durch die drei Widerstände gilt dann:

$$I_R(t) = \frac{\hat{U}}{R} \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ) \quad (1a)$$

$$I_S(t) = \frac{\hat{U}}{R} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1b)$$



$$I_T(t) = \frac{\hat{U}}{R} \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ) \quad (1c)$$

dabei sind ohne Beschränkung der Allgemeinheit die Phasenverschiebungen in Bezug auf den S-Leiter gewählt worden.

Die Summe dieser drei Ströme ergibt den Strom, der durch den PEN-Leiter fließt:

$$I_{PEN}(t) = I_R(t) + I_S(t) + I_T(t) \quad (2)$$

Durch Einsetzen der drei Glg. (1a - c) in Glg. (2) und Ausklammern des gemeinsamen Faktors erhält man

$$I_{PEN}(t) = \frac{\hat{U}}{R} \cdot (\sin(\omega \cdot t - 120^\circ) + \sin(\omega \cdot t) + \sin(\omega \cdot t + 120^\circ))$$

Durch Anwenden der Additionstheoreme für die trigonometrischen Funktionen entsteht der Ausdruck

$$I_{PEN}(t) = \frac{\hat{U}}{R} \cdot (\sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(120^\circ) - \sin(120^\circ) \cdot \cos(\omega \cdot t) + \sin(\omega \cdot t) + \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(120^\circ) + \sin(120^\circ) \cdot \cos(\omega \cdot t))$$

Zusammenfassen ergibt den Term

$$I_{PEN}(t) = \frac{\hat{U}}{R} \cdot (2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(120^\circ) + \sin(\omega \cdot t))$$

Ausklammern von  $\sin(\omega \cdot t)$  liefert

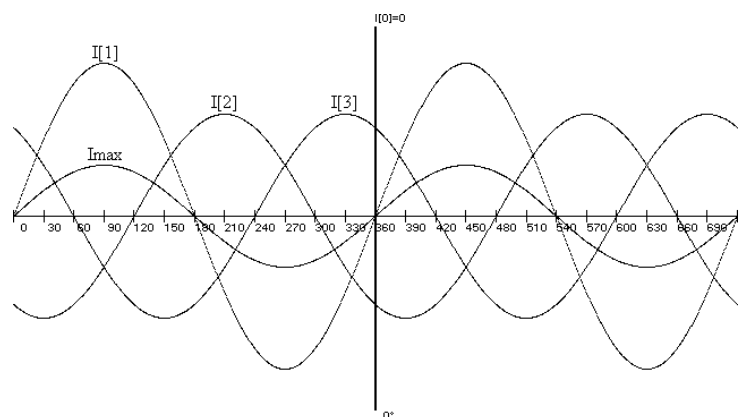
$$I_{PEN}(t) = \frac{\hat{U}}{R} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot (2 \cdot \cos(120^\circ) + 1)$$

Der Cosinus von  $120^\circ$  hat den Wert  $-0,5$ , somit ergibt die letzte Klammer den Wert  $0$ , also gilt:

$$I_{PEN}(t) = 0$$

Was geschieht aber nun bei einer nicht symmetrischen Belastung der drei Phasen? Die entsprechenden Umformungen sind nun nicht mehr so einfach, da der Quotient  $U/R$  für alle drei Phasen ein anderer ist und deshalb nicht einfach ausgeklammert werden kann. Um dennoch eine Aussage über  $I_{PEN}(t)$  machen zu können, berechnen wir in einer Simulation

jeweils die Summe der Teilströme in Abhängigkeit von  $t$  und stellen diese graphisch zusammen mit den Teilströmen dar. Bei zunehmender Asymmetrie der Lastverteilung zeigt sich ein Verlauf für den Ausgleichstrom, der dieselbe Frequenz aufweist, aber je nach Lastverteilung eine nahezu beliebige Phasenlage im Bereich zwischen  $-180^\circ$  und  $+180^\circ$  zur Bezugsphase aufweisen kann. Die Amplitude kann dabei sogar größer werden als die der Einzelströme. Ein Beispiel zeigt die Abbildung 2.



I[1] = 1.50  
I[2] = 1.00  
I[3] = 1.00  
Imax = 0.50

Phasenverschiebung gegen I[1]:  $0^\circ$

<F1> I0I11 <F2> I0I21 <F3> I0I31 <F4> Draw <F5> Redraw <F10> Ende

Abb. 2: Simulation der Ströme von R (I[1]), S (I[2]), T (I[3]) und PEN (Imax) bei unsymmetrischer Netzauslastung



Dieser Ausgleichsstrom fließt über den PEN-Leiter zurück zur Transformatorstation. Treten diese Asymmetrien allerdings im Mittel- oder Hochspannungsnetz auf, wo es diesen PEN-Leiter nicht gibt, erzeugt er im Erdboden eine Potentialdifferenz zwischen dem Erdanschluss der Transformatorstation und dem des Kraftwerks. Innerhalb eines Hausanschlusses kann nicht immer sichergestellt werden, dass die Lasten gleichmäßig auf die drei Phasen verteilt sind, daher ist die Möglichkeit einer unsymmetrischen Belastung relativ hoch - auf den PEN-Leiter kann hier nicht verzichtet werden. An einer Transformatorstation sind jedoch eine Vielzahl von Haushalten angeschlossen, deren Ausgleichsströme sich insgesamt in etwa kompensieren. Je größer die Anzahl von Haushalten an einer solchen Station ist, desto größer ist natürlich auch die Wahrscheinlichkeit der Kompensation solcher Ströme. Das heißt, das sich in der Theorie jegliche auftretenden Ausgleichsströme durch die statistisch gleichmäßige Verteilung aller Lasten auf die drei Phasen zu Null addieren und man bei der Versorgung dieser Stationen auf den PEN-Leiter verzichten kann.

Durch eine Steuerung der Lastverteilung im Mittelspannungsnetz versucht man, diese Ausgleichsströme minimal zu halten, dennoch darf es hier wie auch im Hochspannungsnetz zu Spannungsschwankungen kommen, die laut Aussage der Netzbetreiber bis zu  $\pm 10\%$  betragen können, bevor Sicherungselemente den Stromkreis unterbrechen. Die dadurch verursachten Potentialdifferenzen im Erdboden, der hier die Rolle des PEN-Leiters übernimmt, wollen wir mit unserer Apparatur nachweisen.

An dieser Stelle möchten wir uns ausdrücklich bei Herrn Bollermann von der SVO in Celle bedanken, der uns durch seine Unterstützung und Informationen, die zum Verständnis und letztlich zur Bearbeitung der vorangegangenen zwei Kapitel notwendig waren, sehr geholfen hat

## 3. Modellvorstellungen und Simulationen

### 3.1 Unsymmetrische Lastverteilung und Vektordarstellung

Die bereits erwähnten Dreiecks- und Sternschaltungen der Phasen R, S, T kann man auch in einer Vektordarstellung betrachten, wodurch ebenfalls die Entstehung des Ausgleichstromes bei unsymmetrischer Belastung der Sternschaltung deutlich wird. Hier stellt man die fließenden Ströme als Vektoren dar, wobei die Summe der Vektoren immer Null ergeben muss. Bei stärkerer Belastung einer Phase muss somit ein zusätzlicher Ausgleichsstrom fließen, der in der Sternschaltung über den PEN-Leiter bezogen wird (Abb. 3) [1]. Innerhalb einer Dreiecksschaltung bewirkt er dagegen eine Phasenverschiebung der Ströme.

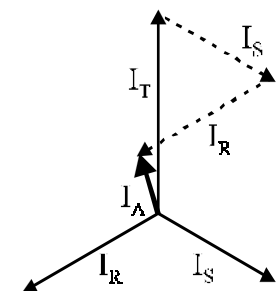


Abb. 3: Sternschaltung als Vektordarstellung

Das bereits erwähnte Simulationsprogramm, welches den Ausgleichsstrom in der Sternschaltung bei unterschiedlicher Belastung der Phasen in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung berechnet und somit die Wellenzüge darstellt (Abb. 2), liefert auch eine entsprechende vektorielle Darstellung der Ströme.

### 3.2 Simulation von unsymmetrischer Lastverteilung und Phasenverschiebung

Um die unsymmetrische Lastverteilung und die Phasenverschiebung in einem Versuch simulieren zu können, ist die dafür notwendige Technik zur Zeit noch im Bau. Da wir aber gute Fortschritte erzielen, ist es sehr wahrscheinlich, diese Apparatur auf dem Wettbewerb präsentieren zu können.



Dazu erzeugen wir mit einer Wienbrücke ein 400 Hz Sinussignal, woraus durch zwei hintereinander geschaltete einstellbare Phasenschieber die anderen beiden Phasen erzeugt werden, welche damit um  $120^\circ$  bzw.  $240^\circ$  in Bezug zur ersten verschoben sind. Die beiden Verschiebungen kann man jeweils durch Potentiometer stufenlos einstellen. Zur Simulation der unsymmetrischen Lastverteilung zeigen wir den Stromfluss sowohl in der Dreiecks-

schaltung wie auch in der Sternschaltung durch eingebaute LED's an. Die Widerstände sind veränderbar, so dass man durch Einfügen unterschiedlich großer Werte eine unsymmetrische Belastung der Phasen erreichen kann. Mit einem Messgerät werden die Ausgleichsströme zwischen den Phasen nachgewiesen.

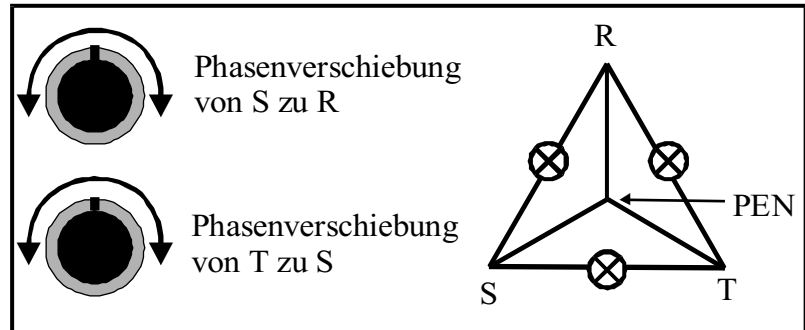


Abb. 4: Dreiphasenfrequenzgenerator zur Simulation von Ausgleichströmen bei unsymmetrischer Lastverteilung und Phasenverschiebungen

### 3.3 Der Erdboden als Widerstand

Die Bestimmung des Widerstandwertes des Erdboden gestaltet sich schwierig. Denn man kann diesen nicht nach den Gleichungen für einen gestreckten Leiter mit bestimmten Querschnitt berechnen. Tatsächlich um einen räumlich ausgedehnten Leiter. Der Strom nimmt darin jeden möglichen Weg. Eine Annäherung an einen solchen Leiter erhält man durch ein Widerstandsnetz, dessen Berechnung jedoch sehr kompliziert wird, wenn die Teilwiderstände nicht alle gleich groß sind. Zum Beispiel ist es sehr überraschend, dass man mit einem Widerstandsmessgerät auf einer leitfähigen Platte, wie wir sie in unserer JuFo-Werkstatt zur Vermeidung statischer Aufladungen haben, zwischen zwei nahezu beliebigen Punkten immer den gleichen Widerstandswert von einigen Kilo-Ohm misst.

Hinzu kommt, dass der Erdboden aus mehreren Schichten besteht, die jeweils spezifische Widerstände besitzen, außerdem spielt die jeweilige Bodenbeschaffenheit und die Art der Kontaktierung eine große Rolle.

Für unsere Simulationen vereinfachten wir den Boden bzw. die Bodenschichten zu einer einzigen homogenen, dünnen leitfähigen Schicht, denn die Untersuchungen über die elektrischen Eigenschaften des Bodens, seine Schichten und den spezifischen Widerstand hätten genug Material für eine eigenständige Untersuchung geliefert.

### 3.4 Potentiale

Wie zuvor beschrieben, wird der Boden von den Stromwerken als Ausgleichsleiter verwendet. Damit ein Strom fließen kann, muss sich eine Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten (im Folgenden als Quelle bzw. Senke bezeichnet) ausbilden, die im Boden zu einem elektrischen Feld führen. Gibt es mehr als zwei Senken, überlagern sich diese Felder an jeder Stelle des Bodens (Superpositionsprinzip). Für jeden Punkt des Bodens kann man nun daraus ein bestimmtes Potential ableiten, das angibt, welche Arbeit man aufwenden müsste, um einen geladenen Probekörper von einem Punkt zu einem anderen zu transportie-



ren. Zwischen den einzelnen Quellen oder Senken liegende Punkte gleichen Potentials ergeben die sogenannten Äquipotentiallinien.

Zunächst betrachten wir nun eine einzelne Senke, deren Bezugspunkt (die Quelle) unendlich weit entfernt ist. Dies kann man vergleichen mit einer geladenen Kugel, die frei im Raum schwebt. Der Boden wird nun angenommen als ein ebener Schnitt durch den Raum, der das Zentrum der Kugel enthält. Für jeden Punkt der Fläche läßt sich nun das Potential des Punktes berechnen. Im Vakuum gilt die Beziehung:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r} \quad (3)$$

Darin ist  $\epsilon_0$  die elektrische Feldkonstante ( $8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ AsV}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ),  $Q$  die elektrische Punktladung und  $r$  der Abstand des Feldpunktes von der Punktladung. Die Ladung  $Q$  setzen wir willkürlich auf den Wert 1, da es uns nur um den qualitativen Verlauf des Feldes geht. Berechnet man die Potentiale für  $0 < r \leq \infty$ , so ist in der perspektivischen graphischen Darstellung ein sogenannter Potentialtrichter zu erkennen. Das Potential des Radialfeldes nimmt antiproportional zum Abstand  $r$  ab (Abb. 5). Für die Darstellung der Äquipotentiallinien zwischen zwei Punkten kann man den in Abb. 6 dargestellten Versuch verwenden. Die Äquipotentiallinien, welche konzentrisch um die Punktladungen verlaufen, werden abgetastet und farblich markiert.

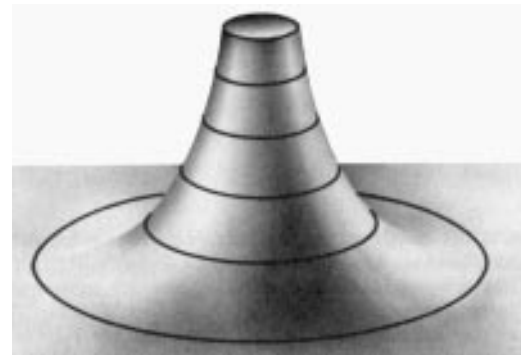


Abb. 5: Potentialtrichter

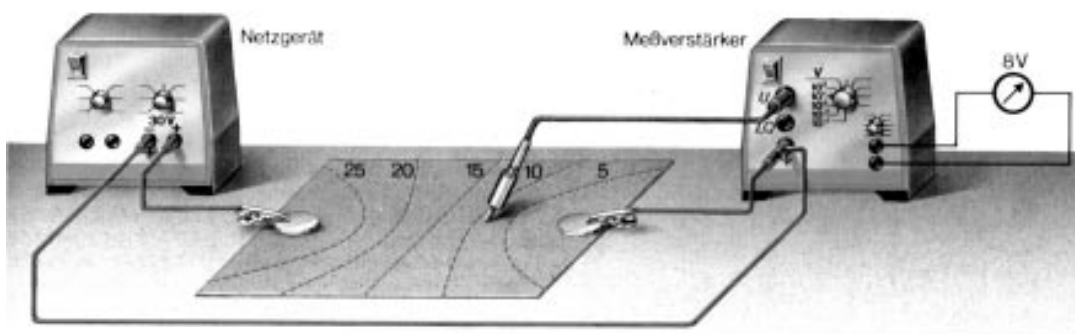


Abb. 6: Messung und Aufzeichnung der Äquipotentiallinien

Bei mehreren Punktladungen nehmen die Potentialverläufe kompliziertere Verläufe an, Abbildung 5 geht über in eine „Landschaft“ aus Bergen und Tälern, während sich nach Abbildung 6 vielfältig gewundene Linien ergeben, die sich jedoch niemals überschneiden. Den Verlauf dieser Linien versuchen wir mit unseren Bodenfeldmessungen im Erdboden nachzuweisen.



## 4. Einordnung des Messgebietes

Als Gebiet für unsere ersten Messungen wählten wir Weesen bei Hermannsburg, da sich hier zum Einen die Werkstätten der Jugend-forscht AG des Christian-Gymnasiums Hermannsburg befinden, zum Anderen ist die Zahl der Transformatorstationen mit fünf eher gering, und der Abstand dieser Stationen zu anderen nicht erfassten ist relativ groß. Somit sollten wir keine Störungen von nicht erfassten Transformatorstationen zu erwarten haben. Die in Hermannsburg liegenden Transformatorstationen sind mindestens 1600 m entfernt. Die Entfernung der Weesener Stationen untereinander beträgt maximal ca. 1500 m (siehe Abb. 6: Trafo Nr. 1 zu Nr. 5), zwei davon liegen außerdem etwas außerhalb in nördlicher Richtung und versorgen Großverbraucher, so dass wir die dort auftretenden Ausgleichsströme vorerst vernachlässigen. Daher bleiben uns noch drei Stationen mit einer maximalen Distanz von ca. 700 m (Trafo Nr. 1 zu Nr. 3) im südlichen Teil Weesens, an denen hauptsächlich Privathaushalte als Endverbraucher angeschlossen sind.

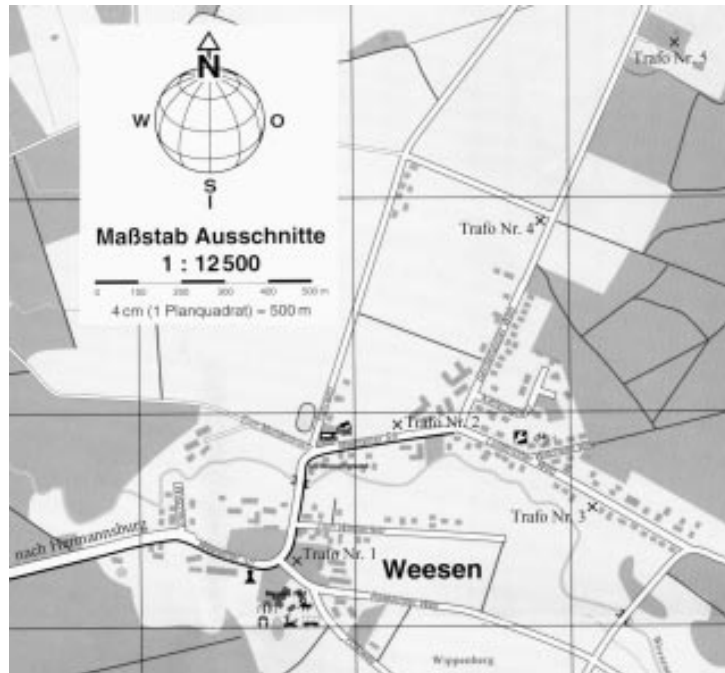


Abb. 7: Geographische Lage der Trafostationen in Weesen

## 5. Simulationen der Potentialfelder

Bevor wir unsere Feldmessungen durchführten, wollten wir die zu erwartenden Verhältnisse in einem Modell darstellen. Dazu verwendeten wir ein Programm, das nach Angabe der Ortskoordinaten und der anzunehmenden Potentiale an diesen Punkten in der Lage war, für die zu betrachtene Fläche die entsprechenden Punktpotentiale zu berechnen und uns in Form verschiedenfarbiger Flächen für die Äquipotentialintervalle graphisch darzustellen. Außerdem übertrugen wir die Ortslage der Transformatorstationen in Weesen bei Hermannsburg maßstabsgetreu auf eine leitfähige Schaumstoffplatte, um sie direkt in kleinem Maßstab auszumessen.

### 5.1 Berechnung der Potentialfelder am PC

Zur Berechnung der Potentiale haben wir folgende Annahmen gemacht: Die Transformatorstationen sehen wir als Punktladungsquellen an. Das entsprechende Gegenpotential stellt ein Kraftwerk dar, die Entfernung zu diesem ist jedoch in unserem kleinen Maßstab als sehr groß zu betrachten und somit für die Ausbildung des Potentialfeldes um Weesen herum vernachlässigbar. Ebenso lassen wir vereinfachend das auf die Transformatoren von Hoch- auf Mittelspannungsstationen zurückzuführende Potentialfeld unbeachtet, da sich diese in einem relativ großen Abstand zu denen in Weesen befinden und wir keine Informationen über die von ihnen ausgehenden Ströme haben.



Bei der Bestimmung des Potentialfeldes am Computer berechnen wir die Potentiale mit der in Abschnitt 4.3 genannten Formel im Abstand  $r$  zu einer Punktladung im davon ausgehenden Radialfeld und addieren anschließend die Potentiale der einzelnen Transformatorstationen.

Das Programm erzeugt uns Grafiken, die die in Intervalle unterteilten Potentiale in einem räumlichen Bezug zu den Stationen Weesens an ihren jeweiligen Orten angeben. In Abb. 8 ist ein Ausschnitt einer solcher Grafikausgabe zu sehen. Da wir diese Simulation dazu benutzen, die Theorie und unsere Messungen zu untermauern, haben wir in dieser Abbildung bereits bestimmte Werte für die Potentiale der Stationen Nr. 1 -5 eingegeben.

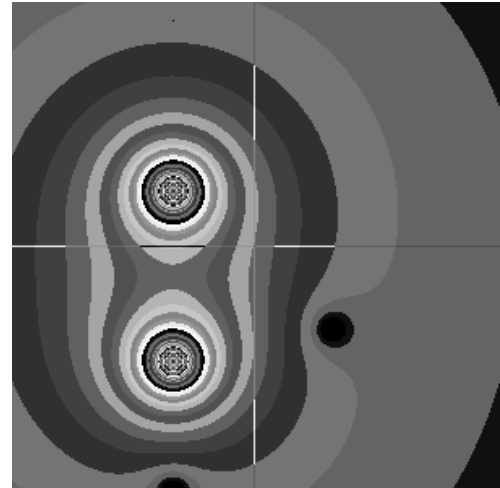


Abb. 8: Berechnetes Potentialfeld

## 5.2 Messung von Potentialen im Modell

Die berechneten Potentiale wollen wir durch eine Simulation nachstellen und nachweisen. Dazu verwenden wir eine elektrisch leitende Schaumstoffplatte mit einer Kantenlänge von 25 cm, in der wir Reißzwecken befestigen, die die geographische Lage der fünf Transformatoren in Weesen repräsentieren sollen und das Potential an diesem Punkt festlegen. In dieser Anordnung ist es aber nicht möglich, durch einen weit entfernten Masseanschluss ein hinreichend weit

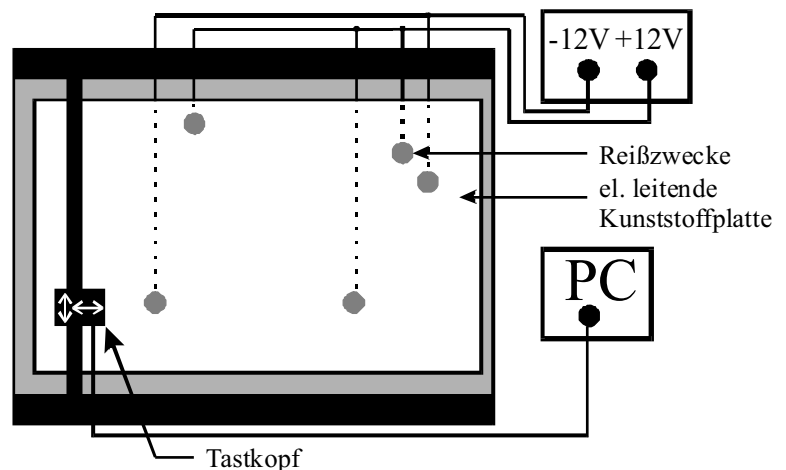


Abb. 9: Aufbau zur Potentialmessung

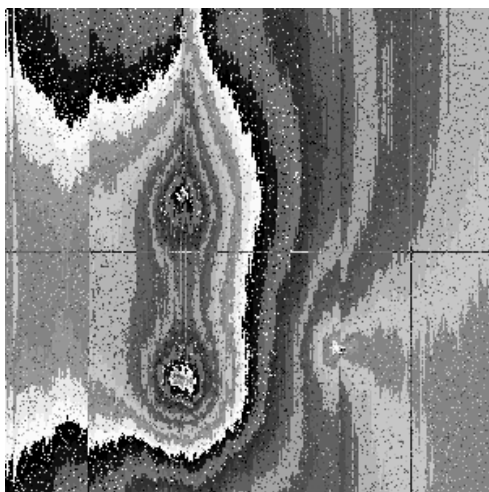


Abb. 10: Auf der Widerstandsplatte gemessenes Potentialfeld

entferntes Bezugspotential zu erzeugen, so dass wir uns mit unterschiedlichen Polaritäten der Simulationsspannung behelfen müssen. Dazu legen wir an die Reißzwecken eine justierbare Spannung im Bereich zwischen -12V und +12V an. Die Schaumstoffplatte ist auf einem xy-Schreiber installiert, und anstelle eines Stiftes verwenden wir eine Stahlfeder zum Abtasten der Platte (Abb. 9). Mit der Feder tasten wir nun in 0,5-Millimeter-Schritten die Oberfläche der Platte ab messen mit einer A/D-Messkarte per Computer die 250000 Werte an den einzelnen Punkten aus, was pro Messung etwa 2,5 Stunden dauert. Zur Darstellung der Ergebnisse (Abb. 10) benutzen wir wieder das Programm, mit dem wir bereits in der Simulation die berechneten Werte darstellen.



### 5.3 Vergleich der Simulationsergebnisse

Schon beim ersten Blick erkennt man, dass die berechnete Simulation und die mit dem X-Y-Schreiber gewonnene Messung trotz völlig unterschiedlicher Methode eine große Ähnlichkeit aufweisen. Von da her können wir erwarten, dass unsere Überlegungen hinsichtlich des Potentialverlaufes im Erdboden bei unseren Außenmessungen sich bestätigen lassen, wenn die von uns dort gemessenen Potentialverläufe den simulierten zumindest ähnlich sehen.

## 6 Feldmessungen

Um die Ergebnisse der Simulation in der Realität nachweisen zu können, brauchen wir einen Messaufbau, der folgende Voraussetzungen erfüllt:

- Er darf nicht an einen bestimmten Ort gebunden sein, da wir die Messungen in der Umgebung von verschiedenen Transformatorkästen durchführen wollen.
- Er muss Messungen auf größere Entfernungen zulassen, damit wir einen hinreichend großen Ausschnitt des Potentialtrichters erfassen können.
- Die Messsonden müssen genügend tief in den Boden eindringen, um in die feuchteren und somit stromführenden Erdschichten zu kommen.
- Er muss gewährleisten, dass nur die Signale mit einer Frequenz von 50 Hz und keine anderen unerwünschten gemessen werden.

### 6.1 Durchführung:

Um nicht an die Nähe einer Steckdose gebunden zu sein, verwenden wir eine USV (Unterbrechungsfreie Stromversorgung für z.B. Computer) als Spannungsquelle für unsere Messgeräte, die es uns erlaubt, bis zu 2,5 Stunden durchgehend mit einem Oszilloskop und einem Universalmessgerät zu messen.

Als Sonden dienen uns ca. 1,7 Meter lange Kupferrohre (Wasserrohre) mit 18 mm Durchmesser, die wir etwa einen Meter tief in die Erde schlagen. Von hier leiten wir das Signal über ein 50-Hz-Bandpassfilter und einen Verstärker (Verstärkungsfaktor 20) durch ein ca. 50 Meter langes, abgeschirmtes Kabel zu unserer Messstation. Die zugehörige Elektronik ist an jedem der beiden Messsonden in einem eigenen

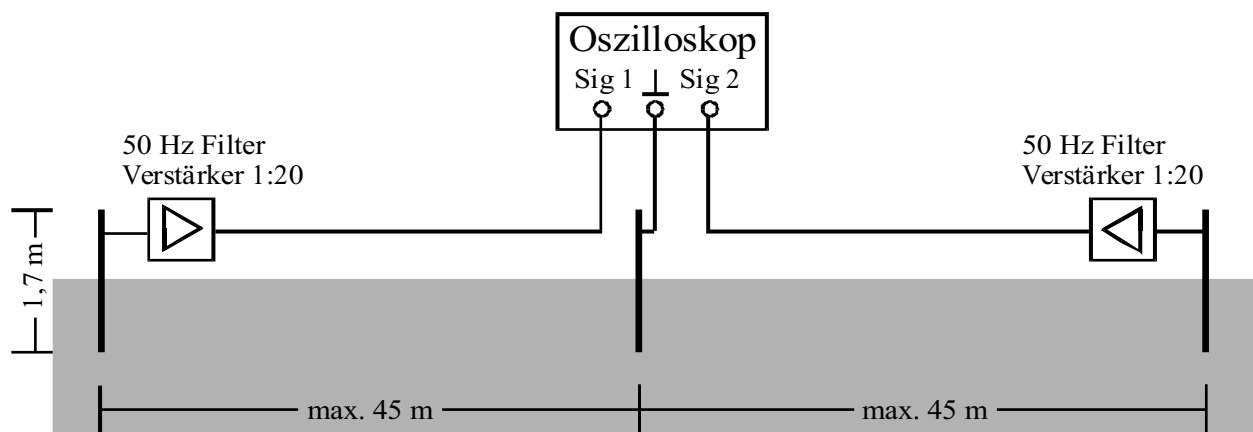


Abb. 11: Prinzipschaltung für die Feldmessung



Gehäuse montiert und wird zur Vermeidung von Störeinstrahlungen über je zwei 9 V-Akkumulatoren betrieben. Die Bezugsmasse erhalten wir durch ein neben der Messstation eingeschlagenes weiteres Kupferrohr. Das verstärkte und gefilterte Signal und die Masse führen wir an ein Oszilloskop zur Spannungsmessung. Den Bodenwiderstand zwischen dem Messpunkt und dem Massepunkt bestimmen wir mit einem Ohmmeter, wobei die Signalkabel als „verlängerte Messleitungen“ direkt an die Messsonden angeschlossen werden.

Die Messstation (und die Bezugsmasse) installieren wir in unmittelbarer Nähe des auszumessenden Transformators, die zweite Sonde schlagen wir in 5-Meter-Schritten im Abstand 5 - 45 Meter (max. Länge des Kabels) von der Messstation in den Boden. Zu jedem Abstand bestimmen wir die Spannung sowie den Bodenwiderstand. Diese Messungen wiederholen wir in einem Winkel von  $90^\circ$  zu den ersten Messungen, um eventuelle Asymmetrien nachweisen zu können.

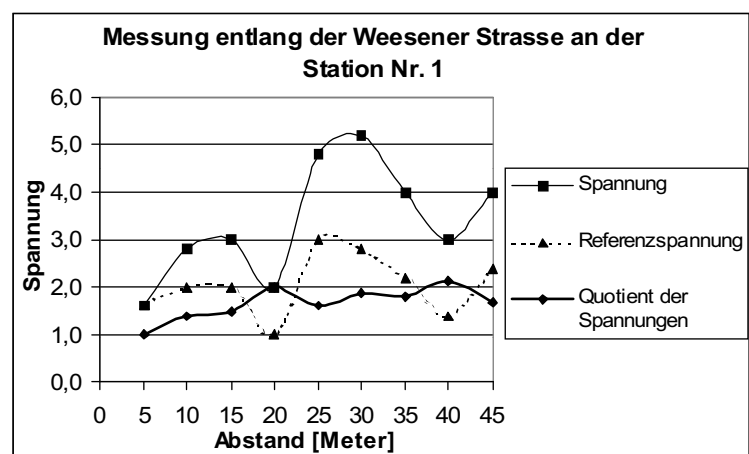
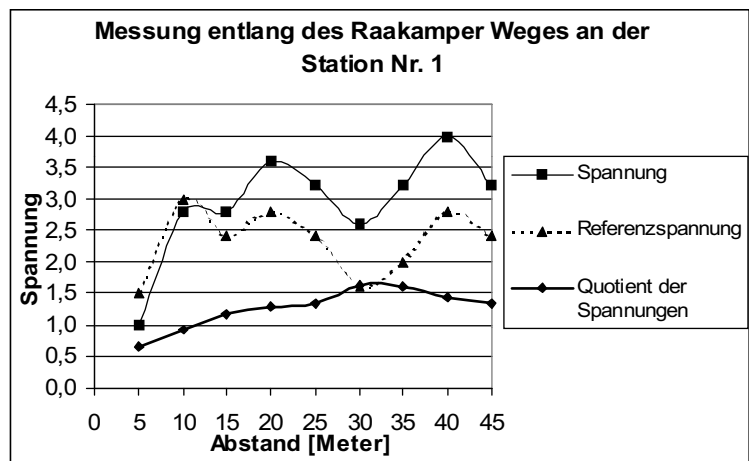
## 6.2 Messergebnisse

### 6.2.1 Potentialmessungen

Eine der ersten Beobachtungen, die wir machen konnten, war ein unregelmäßiges starkes Pulsieren der zu messenden Amplituden auf dem Bildschirm des Oszilloskops mit einer Periode von etwa einer halben bis zu zwei Sekunden. Sie ist nach unserer Ansicht zurückzuführen auf die Ausregelung der Lastasymmetrien durch die Netzbetreiber, um die zulässigen Toleranzen zwischen den einzelnen Phasen nicht zu überschreiten. Überrascht hat uns auch die relativ große Amplitude der von uns gemessenen Spannungen, die vor dem Verstärker Werte von mehr als 250

mV erreichen konnten. In der anschließenden Auswertung auf dem Computer versuchten wir, das Pulsieren dadurch herauszurechnen, indem wir den Quotienten aus der ortfest gemessenen und der an variablen orten gemessenen Spannung gebildet haben. Diese in den Graphen fett gezeichneten Linien lassen andeutungsweise ein Potentialgefälle in Richtung auf die Transformatorstationen erkennen.

Die etwa rechtwinklige Anordnung der beiden Messstrecken zeigt außerdem die Asymmetrie dieses Potentialtrichters um die Station herum. Allerdings sind diese Trichter nicht so ausgeprägt wie in den Simulationen. Außerdem können wir mit den uns zur Verfügung stehenden Messkabeln keine Äquipotential-linien nachweisen, da wir dazu eine erheblich größere Fläche hätten erfassen müssen.





### 6.2.2 Widerstandsmessungen

Die Messungen der Widerstände zwischen den einzelnen Messpunkten erlauben uns eine Aussage über die Ströme, die auf Grund der Potentialdifferenzen im Boden fließen: würden wir eine ohmsche Last zwischen den Messsonden anschließen, könnte mit diesem Strom z.B. unsere eingangs erwähnte Uhr betrieben werden, nachdem die Spannung gleichgerichtet ist. Bei etwa 400 mV Betriebsspannung könnte ein Strom von ca. 100  $\mu$ A entnommen werden, was zum Betrieb der Uhr gerade ausreichen würde.

Außerdem stellten wir fest, dass der mittlere Widerstand von ca. 4000 Ohm stark von den jeweiligen Standorten abhängt. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass wir unsere Messsonden nur etwa einen Meter tief in den erdboden getrieben haben und dabei unterschiedlichste Bodenschichten erreicht haben. Den in der Literatur angegebenen Wert für den meist vorherrschenden Heidesand von einigen Hundert Ohm (bei 1 m Sondenlänge) haben wir an keiner Stelle erreichen können.

### 6.3 Schlussbemerkungen

Wir hoffen, bis zum Regional-Wettbewerb noch einige Messungen in der Nähe einer Hauptumspannstation durchführen zu können, da wir dort einen deutlich stärker ausgeprägten Potentialverlauf erwarten. Insgesamt hat sich bei diesem Projekt wieder einmal gezeigt, dass eine einfach erscheinende Idee sich schnell zu einem mittelgroßen Arbeitsprogramm auswachsen kann, das mit jedem Erkenntnisschritt mehr neue Fragen aufwirft, als man schon beantwortet zu haben glaubt!

## 7 Quellenverzeichnis

- [1] Fachkunde Elektrotechnik, Prof. Dr. G. Springer (Lektorat), Europa-Lehrmittel, Wuppertal 1989, S. 146 ff.
- [2] Metzler Physik, 2. durchgesehene Auflage, Joachim Grehn (Hg.), Metzler Schulbuchverlag, Hannover 1992, S. 195, 196
- [3] KV-Plan Hermannsburg, Massstab 1:25000 und 1:12500, Kommunalverlag Hans Tacke

## Danksagung

Wir möchten uns ganz herzlich bei unserem Betreuer Herrn Thomas Biedermann für seine tatkräftige Hilfe bedanken, mit der er uns in unzähligen Fällen zur Seite stand. Insbesondere bei Diskussionen, die uns viele Male über Hürden hinweg geholfen haben, welche ohne ihn nur schwer überwindbar gewesen wären. Unser Dank gilt natürlich auch der ganzen Familie Biedermann, da sie durch die Arbeit in der Jugend forscht-AG Hermannsburg jede Menge Unruhe und Entbehrungen auf sich nehmen musste.

Weiter möchten wir uns auch bei Herrn Bollermann von der Stromversorgung Osthannover (SVO) für seine freundliche und hilfreiche Unterstützung bedanken, die einige Lücken zu schliessen vermochte.

Danken möchten wir auch allen anderen Jufos für die ideenreichen Gespräche und auch für die produktive Arbeit, besonders Wolfgang für die zweistündige Messungsassistenz bei Regen und Dunkelheit und Stego für die regelmäßigen Erklärungen und Denkanstöße, die uns in der für sie selbst stressigen Zeit halfen.

Zu guter Letzt möchten wir uns natürlich auch bei unserer Basis, also unseren Eltern, bedanken, denn auch sie mussten Entbehrungen bzw. zusätzliche Belastungen zugunsten unserer Jugend forscht-Tätigkeiten hinnehmen.