



universität
wien

DIPLOMARBEIT / DIPLOMA THESIS

Titel der Diplomarbeit / Title of the Diploma Thesis

Historische Entwicklung des Forschungsfeldes
der Atmosphärenelektrizität

Von Franz Serafin Exners luftelektrischen Arbeiten
bis zum heutigen Stand der Forschung

verfasst von / submitted by

Erika Kulik

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Magistra der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, 2016 / Vienna, 2016

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 190 344 412

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

UF Physik und Englisch

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf

Mitbetreut von / Co-Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Franz Sachslehner

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	FRANZ SERAFIN EXNERS LEBEN	4
3	FRANZ SERAFIN EXNERS THEORIE ZUR LUFTELEKTRIZITÄT	13
3.1	Gängige Theorien zur Zeit Exners über den Ursprung der Luftelektrizität...	13
3.1.1	Theorien basierend auf Reibungselektrizität	13
3.1.2	Theorien basierend auf Thermoelektrizität.....	13
3.1.3	Theorien basierend auf Verdampfung von Wasser	14
3.1.4	Theorien basierend auf Influenz.....	16
3.2	Bekannte Tatsachen.....	16
3.3	Franz Serafin Exners Theorie zur Luftelektrizität im Überblick	18
3.3.1	Das Potential der Erde	19
3.3.2	Franz Exners Forderungen an die Forschung	20
3.3.3	Franz Exners Beobachtungen.....	22
4	HISTORISCHE ENTWICKLUNG DES FORSCHUNGSGEBIETES DER ATMOSPHÄRENELEKTRIZITÄT	37
4.1	Luftelektrische Phänomene von der Antike bis zum 18. Jahrhundert	37
4.2	Erstentdeckungen im 18. Jahrhundert.....	39
4.3	Die elektrostatische Periode im 19. Jahrhundert	42
4.4	Moderne Periode der Luftelektrizität.....	48
5	DER GLOBALE ELEKTRISCHE STROMKREIS	51
5.1	Aufbau der Atmosphäre.....	52
5.1.1	Einteilung der Atmosphäre nach ihrem Ionisierungsgrad	52
5.1.1.1	Neutrosphäre.....	53
5.1.1.2	Die Ionosphäre	54
5.1.2	Einteilung der Atmosphäre nach dem Temperaturverlauf	55
5.2	Der globale elektrische Stromkreis	57
6	FELDESTÄRKE / POTENTIALGRADIENT	62
6.1	Messprinzipien	66
6.1.1	Potentialsonden	66
6.1.2	Influenzsonden.....	68
6.1.3	Reduktionsmessungen	69
7	VERGLEICH DES EXNERSCHEN ELEKTROSKOPS MIT EINER ELEKTRISCHEN FELDMÜHLE	70

7.1	Franz Serafin Exners Methode mittels Flammsonde	70
7.1.1	Der Aufbau.....	72
7.1.2	Das Prinzip der Messung.....	74
7.2	Die elektrische Feldmühle	75
7.2.1	Mechanik der Feldmühle.....	78
7.2.1.1	Mechanischer Aufbau einer Feldmühle	78
7.2.1.2	Das Flügelrad	79
7.2.1.3	Das Lichtschranken-Flügelrad.....	83
7.2.2	Die elektronische Schaltung	84
7.2.2.1	Teil 1 der Feldmühlenschaltung	87
7.2.2.2	Teil 2 der Feldmühlenschaltung	88
7.2.2.3	Teil 3 der Feldmühlenschaltung	91
7.2.2.3.1	Funktion des Gleichrichters.....	93
7.2.2.3.2	Glättung.....	94
7.2.2.3.3	Buffering.....	95
7.2.3	Reaktion der Schaltung auf E-Felder unterschiedlicher Polarität	97
7.2.4	Linearität der Schaltung und Bereichsumschalter.....	97
8	FELDMESSUNGEN.....	99
8.1	Elektroskop VII/89	99
8.1.1	Eichung des Elektroskops.....	100
8.1.2	Durchführung der Messung	101
8.1.3	Messwerte.....	104
8.2	Elektrische Feldmühle Q 475 A	105
8.3	Fehlerrechnung und Diskussion	107
9	RESUMEE	111
	Literaturverzeichnis	113
	Abbildungsnachweis	123
	Tabellennachweis	126
A.	Abstract	127
B.	Danksagung	129
C.	Curriculum vitae	130

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Franz Serafin Exner (1849-1926).....	4
Abbildung 2: Physikalisches Institut in Wien IX.....	6
Abbildung 3: Habilitationsfeier von Friedrich Hasenöhl und Stefan Meyer (1899).....	9
Abbildung 4: Physikalische Institute - 1912.....	11
Abbildung 5: Relief von M. Powolny im Arkadenhof der Universität Wien.....	12
Abbildung 6: Niveauflächenverlauf.....	22
Abbildung 7: Linearität des Potentialgefälles	23
Abbildung 8: Abhängigkeit von Dunstdruck und Potentialgefälle	27
Abbildung 9: Erster Nachweis, dass Blitze elektrische Erscheinungen sind.....	40
Abbildung 10: Einfaches Fadenelektroskop	42
Abbildung 11: Elektroskop von Saussure.....	43
Abbildung 12: Quadrantenelektrometer nach W. Thomson (Lord Kelvin)	46
Abbildung 13: Das Forschungsschiff Carnegie	50
Abbildung 14: Atmosphärenschichten nach Ionisierungsgrad und nach Temperatur	55
Abbildung 15: Zusammenhang Potentialgefälle und Gewitteraktivität.....	61
Abbildung 16: Luftelektrisches Feld in Bodennähe bei Schönwetter.....	64
Abbildung 17: Carnegie Kurve	65
Abbildung 18: Messung mittels Potentialsonde.....	66
Abbildung 19: Wilson-Platte	68
Abbildung 20: Das Exnersche Elektroskop.....	71
Abbildung 21: Exnersches Elektroskop transportbereit und während einer Messung.....	72
Abbildung 22: Detailansicht Blättchenträger.....	72
Abbildung 23: Flammensonde.....	73
Abbildung 24: Feldmühle der Blitzforschungsstation am Gaisberg	75
Abbildung 25: Funktionsprinzip einer Feldmühle	76
Abbildung 26: Feldmühle Außenansicht / Feldmühle Innenleben	77
Abbildung 27: Mechanik einer Feldmühle.....	78
Abbildung 28: Segmentflächenänderung als Funktion des Drehwinkels	81
Abbildung 29: Lichtschranke (Optokoppler).....	83
Abbildung 30: Symbol einer Lichtschranke.....	83
Abbildung 31: Operationsverstärker LM741CN	84
Abbildung 32: Symbol eines Operationsverstärkers.....	84
Abbildung 33: Feldmühlenschaltung.....	86
Abbildung 34: Aufgabe der OPs U6 und U7	87
Abbildung 35: Differenzverstärkerschaltung – OP U3.....	89

Abbildung 36: Störungselimination.....	91
Abbildung 37: Teil des Gleichrichters - OP U4	92
Abbildung 38: Funktion des Gleichrichters.....	93
Abbildung 39: Signalglättung.....	94
Abbildung 40: Funktionsweise eines Buffers	96
Abbildung 41: Ausgangssignal bei positiven E-Feldern	97
Abbildung 42: Ausgangssignal bei negativen E-Feldern	97
Abbildung 43: Linearität und Übersteuerung der Schaltung.....	98
Abbildung 44: Exnersches Elektroskop	99
Abbildung 45: Flammensonde im Kondensatorfeld	100
Abbildung 46: Eichkurve Elektroskop VII/89 im Kondensatorfeld bis 500 V.....	101
Abbildung 47: Prof. Sachslehner mit historischem Messgerät	101
Abbildung 48: Flammensonde mit Windschutz.....	102
Abbildung 49: Ausschlag der Blättchen beim Anheben der Flammensonde.....	102
Abbildung 50: E-Feld bei Schönwetterbedingungen	105
Abbildung 51: Elektrische Feldmühle	105
Abbildung 52: Messanzeige der elektrischen Feldmühle bei Schönwetter.....	106
Abbildung 53: Messungen Ende des 19. Jahrhunderts und 2016.....	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abhängigkeit des Potentialgefälles von Temperatur und Wassergehalt der Luft	25
Tabelle 2: Abhängigkeit von Dunstdruck und Potentialgefälle	27
Tabelle 3: Vergleich der Messungen zwischen 1885 und 1890	33
Tabelle 4: Messergebnisse - Elektroskop.....	104
Tabelle 5: Werte für die Fehlerberechnung.....	108

1 EINLEITUNG

Von den ersten Beobachtungen eines lufterlektrischen Feldes durch Lemonnier (1752) bis zu Wilsons Hypothese eines globalen Stromkreises im Jahre 1920 bedurfte es langer und intensiver Forschungsarbeit. Franz Serafin Exner (1849 – 1926) trug mit seinen Arbeiten über Lufterlektrizität entscheidend zur Erforschung dieses Gebietes bei und wurde von Heinrich Mache und Egon Schweidler in ihrer Monographie über atmosphärische Elektrizität sogar als „Begründer der modernen lufterlektrischen Forschung“ bezeichnet.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der vielseitigen Persönlichkeit Franz Serafin Exners, seinem Wirken und insbesondere mit der Analyse seiner lufterlektrischen Arbeiten. Hervorgehoben werden soll auch Exners Einfluss auf seine Schüler, wie er sie prägte und dazu motivierte, in verschiedensten Gebieten selbst erfolgreich Forschung zu betreiben. Zwei seiner Schüler und späterer Mitarbeiter, Victor Hess und Erwin Schrödinger, wurden sogar Nobelpreisträger.

Beginnend mit einer Biographie über Franz Serafin Exner, wird auch ein Überblick über den sogenannten „Exner-Kreis“ – einer Gruppe seiner engsten Mitarbeiter beziehungsweise Schüler – gegeben. Untrennbar mit der Person Exner verbunden ist auch die Geschichte der Physikalischen Institute der Universität Wien, welche ebenfalls kurz beleuchtet wird.

Als Forscher und Lehrperson hatte Exner vier Hauptforschungsgebiete: Lufterlektrizität, Elektrochemie, Spektralanalyse und Farbenlehre. Zudem war er einer der Ersten, der einer akasalen Naturauffassung äußerst positiv gegenüber stand und die Meinung vertrat, dass die Naturgesetze allesamt statistischen Charakter hätten.

Die größten Erfolge konnte Exner zweifelsohne in seinem bevorzugten Forschungsgebiet, der Luftelektrizität, erzielen. Er analysierte über 1000 Potentialgefällemessungen des elektrischen Feldes der Erde und stellte seine eigene Theorie über die Ursache der atmosphärischen Elektrizität auf. Den größten Teil der Beobachtungen führte er im Zeitraum von 1885 bis 1890 mit einer von ihm entwickelten Messapparatur durch – dem Exnerschen Elektroskop.

Diesem Gerät kommt eine ganz besondere Bedeutung zu, da es schon damals relativ präzise Messungen des Potentialverlaufs in der Luft ermöglichte und zudem mobil einsetzbar war. Da diese Apparatur wegweisend für die weitere Entwicklung von Messgeräten atmosphärischer Elektrizität und somit für die Entwicklung des Forschungsgebietes an sich war, wurde im Zuge der Diplomarbeit der historische Versuch der Potentialmessung mittels Flammensonde nachgestellt. Parallel dazu wurden Messungen mit einer modernen elektrischen Feldmühle durchgeführt und die Daten einander gegenüber gestellt.

Ziel der Diplomarbeit ist es, die wissenschaftlichen Arbeiten Exners über Luftelektrizität zu analysieren, ihre Bedeutung für die weitere Forschung aufzuzeigen und mit den heute gültigen Vorstellungen eines globalen elektrischen Kreislaufes in der Atmosphäre zu vergleichen. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit behandelt die Entwicklung von Geräten zur Messung des elektrischen Feldes der Erde. Um den enormen Fortschritt auf dem Gebiet der Messgerätetechnik darzustellen, wird neben einem Überblick über die historische Entwicklung, insbesondere auf die im praktischen Teil verwendeten Methoden und die dahinter stehenden Funktionsprinzipien eingegangen. Zu diesem Zwecke wurde auch eine elektronische Schaltung für eine Feldmühle entwickelt.

Zur sorgfältigen Bearbeitung und Analyse von Exners Arbeiten dienten Originalwerke, u.a. die „Vorlesungen über die physikalischen Grundlagen der Naturwissenschaften“ (Wien, 1919), die „Vorlesungen über Elektrizität“ (Leipzig, Wien. 1888), das von Fleeming Jenkin verfasste (1873) und von Exner übersetzte Werk „Electricity and

Magnetism“ (1880) sowie eine Reihe von Publikationen seiner Forschungsarbeiten, die größtenteils in den „Sitzungsberichten der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften“ veröffentlicht wurden.

Neben dem Studium weiterer umfangreicher Literatur von Exners Zeitgenossen, wurde modernere Fachliteratur zum Thema, angefangen mit den ausführlichen Werken von Hans Israel (ab 1950) bis zu neuesten Forschungsberichten aus den Gebieten der Meteorologie und der Geophysik, herangezogen, um die Entwicklungsgeschichte in diesem Gebiet nachvollziehen zu können. Um die Persönlichkeit Exners sowie den historischen Rahmen der damaligen Zeit so korrekt wie möglich darzustellen, wurde neben persönlichen Aufzeichnungen von Mitgliedern des Exner-Kreises, vor allem auf Quellen, welche die Situation und die Geschichte der Physik zu Exners Lebzeiten beschreiben, zurückgegriffen.

2 FRANZ SERAFIN EXNERS LEBEN

Franz Serafin Exner entstammte einer hochangesehenen Gelehrtenfamilie der Habsburgermonarchie. Er wurde am 24. März 1849 in Wien als Sohn von Franz Serafin Exner (1802-1853) und Charlotte Dusensy (1814–1859) als jüngstes von fünf Kindern geboren. Sein Vater war ein namhafter Philosoph und Pädagoge, der gemeinsam mit dem Philosophen Hermann Bonitz, das österreichische Unterrichtswesen reformierte und die Universität unter dem damaligen Minister Leo Graf Thun-Hohenstein nach den Grundsätzen der Lehr- und Lernfreiheit und der Verbindung von Forschung und Lehre umformte (Benndorf 1937: 1). Schon in jungen Jahren erlag der Philosoph Exner einer schweren Lungenerkrankung, zufällig im gleichen Jahr wie sein Freund, der Physiker Christian Doppler. Nur sechs Jahre danach verloren die fünf Exner-Kinder auch die Mutter und wuchsen unter der Obhut von Freunden der Familie auf. Josef Mozart, ein entfernter Verwandter des berühmten Komponisten, nahm die verwaisten Kinder schließlich bei sich auf und auch Bonitz und der Physiker Josef Loschmidt, beide enge Freunde des verstorbenen Vaters, kümmerten sich um die verwaisten Geschwister. Im Kreise von Philosophen und Wissenschaftlern, wuchsen die Kinder in einer Atmosphäre auf, die das Interesse und die Liebe zur Wissenschaft weckte und sicherlich mitverantwortlich dafür war, dass jeder der Exner-Brüder eine erfolgreiche akademische Laufbahn einschlug. Auch Franz Serafins einzige Schwester Marie, wird als „eine geistig hochstehende und feinsinnige Frau“ beschrieben (Benndorf 1937: 2).



Abbildung 1: Franz Serafin Exner
(1849-1926)

Franz Serafin Exner absolvierte 1860-1867 das Gymnasium in Wien. Sein Interesse galt schon während der Schulzeit den Naturwissenschaften und den antiken Sprachen. Zeit seines Lebens blieb er ein Anhänger der humanistischen Bildung. Sein großes Vorbild war Alexander von Humboldt, weswegen er schon früh plante, physische Geographie zu studieren. Er erkannte aber, dass er für dieses Aufgabengebiet solide

Kenntnisse der Physik benötigte und entschied sich daher im Herbst 1867 für ein Studium der Physik an der Universität Wien (Karlik 1982: 60).

Zu seinen Lehrern zählten namhafte Physiker wie Josef Stefan, Josef Loschmidt und Viktor von Lang. Sie alle genossen einen tadellosen Ruf in Fachkreisen. Die Bedingungen für experimentelle Laboratoriumsarbeit waren jedoch völlig unzureichend und so beschränkte sich der Unterricht fast gänzlich auf die Theorie, allerdings von höchster Qualität. Die Universität Wien hatte zwar im Jahre 1850 ein neu gegründetes Physikalisches Institut, jedoch war die Ausstattung sehr mangelhaft. Während es zu Exners Studienzeit in Deutschland schon etliche große physikalische Institute mit aufstrebendem Laboratoriumsunterricht gab, hatte der Experimentalphysiker Lang, Leiter des schon weit vor 1850 bestehenden Physikalischen Kabinetts und der Lehrkanzel Physik, aufgrund der besonderen Umstände der Wiener Revolution und der Absiedelung des Physikalischen Institutes in die Erdbergstraße 15 weder eigene Räumlichkeiten, noch einen Assistenten und äußerst spärlich Instrumente zur Verfügung (Karlik 1982: 61). Dennoch erlernte Exner bei ihm wissenschaftliches Arbeiten, was für seinen weiteren Werdegang von großer Bedeutung war. Schon im ersten Studienjahr gab Exner selbst Stunden und konnte sich so seinen langgehegten Wunsch Italien zu bereisen erfüllen. Die Schönheit und die Kultur des Landes, die bildenden Künste und die Musik waren ihm seither ein großes Bedürfnis (Benndorf 1937: 3).

In seinem zweiten Studienjahr musste Exner dem Militärsdienst dienen, was ihm äußerst zuwider war, da er jegliche Art von Zwang oder Drill ablehnte. Das anschließende dritte Jahr verbrachte er schließlich an der Universität in Zürich, wo sein Bruder Adolf Römisches Recht lehrte. Dort kam er in Kontakt mit vielen bedeutenden Gelehrten wie beispielsweise August Kundt, Gottfried Semper, Johannes Scherr, Gottfried Keller sowie Otto Benndorf und Wilhelm Conrad Röntgen. Mit den beiden letztgenannten verband ihn Zeit seines Lebens eine innige Freundschaft (Benndorf 1937: 4).

Sein viertes Studienjahr verbrachte er wieder in Wien und promovierte 1871 an der philosophischen Fakultät. Im selben Jahr trat er eine unbesoldete Assistenzstelle bei Kundt an der Universität in Würzburg an. Von 1872 bis 1873 arbeitete Exner dann zusammen mit seinem Freund Röntgen ebenfalls für Kundt an der Universität in Straßburg. Die dortigen Bedingungen gestalteten sich nach Ende des deutsch-französischen Krieges (1871) schwierig und die Eintönigkeit der Arbeit bedrückten Exner, der stets einen ausgeprägten Hang zur Kunst und Musik hatte, zusehends, sodass er 1873 schließlich nach Wien zurückkehrte (Karlik 1982: 62). Im Sommer 1874 habilitierte er sich mit seiner Arbeit "Über die Diffusion durch Flüssigkeitslamellen" (Bittner 1949: 180).

Zu jener Zeit war die physikalische Forschungslandschaft in Wien noch sehr uneinheitlich. Der älteste Bereich, auf den die heutige Fakultät für Physik der Universität Wien zurückblicken kann, war das Physikalische Kabinett, das 1715 gegründet wurde (Bittner 1949: 20). 1865 wurde das Physikalische Kabinett von Viktor von Lang übernommen, der stets danach trachtete, die äußerst bescheidene Situation zu verbessern. Tatsächlich bekam er eine kleine Dotation sowie einen Assistenten bewilligt. Im Herbst 1874 trat Franz Serafin Exner diese Stelle an. Damals übernahm er auch erste Vorlesungen an der Hochschule für Bodenkultur (Karlik 1982: 63).



Abbildung 2: Physikalisches Institut in Wien IX.

Das folgende Jahr 1875 ließ die damaligen physikalischen Forschungseinrichtungen näher zusammenrücken. Sowohl das in Erdberg befindliche Physikalische Institut unter der Leitung von Josef Stefan, der seit 1866 dessen Direktor war, sowie das Physikalische Kabinett aus der Wiener Innenstadt übersiedelten in ein Miethaus in der

Türkenstraße 3 im 9. Bezirk in Wien. Schließlich bezog das im selben Jahr neu gegründete Physikalisch-Chemische Institut ebenfalls Quartier in der Türkenstraße. Als erster Direktor wurde Josef Loschmidt ernannt. Die drei Institute waren also ab 1875 unter einem Dach (Blechl 2004: 8-25).

1877 heiratete Franz Exner Auguste Bache, die jedoch schon bald nach der Geburt der zweiten Tochter verstarb. Exners zweite Ehefrau war Friederike Schuh, die ihm bis an sein Lebensende fürsorglich zur Seite stand und seinen beruflichen Werdegang in jeder Hinsicht unterstützte (Benndorf 1937: 6).

Im Jahre 1879 wurde Exner Extraordinarius; 1883 übernahm er die Redaktion des „Repertorium der Experimentalphysik“, dessen hauptverantwortlicher Herausgeber bis dahin der deutsche Physiker und Astronom Philipp Carl gewesen war. In dieser Eigenschaft pflegte er einen regen Briefwechsel mit zahlreichen Fachkollegen. 1885 zeichnete ihn die kaiserliche Akademie der Wissenschaften zum korrespondierenden Mitglied aus. Zwischen 1885 und 1890 widmete er sich besonders seinem bevorzugten Forschungsgebiet, der Lufterlektrizität. In diesen Jahren verfasste er etliche Artikeln über seine zahlreichen Beobachtungen in aller Welt, die in den „Sitzungsberichten der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften“ veröffentlicht wurden. 1896 wurde Exner wirkliches Mitglied der Wiener Akademie der Wissenschaften und war in dieser Eigenschaft in vielen Bereichen der Physik tätig. Seine Hauptforschungsgebiete waren jedoch die Lufterlektrizität, Elektrochemie, Spektralanalyse und Farbenlehre (Karlik 1982: 67).

Nach Loschmidts Tod folgte Exner 1891 als Ordinarius und Leiter des Physikalisch-Chemischen Institutes nach. Das Gebäude in der Türkenstraße war zu dieser Zeit höchst desolat, wie Benndorf in seiner Gedenkrede an Franz Serafin Exner beschreibt. Der einzige Hörsaal, der durch Entfernen einer Wand geschaffen worden war, verfügte über kein Pult oder Bänke, sodass die Studenten auf Sesseln sitzend auf den Knien mitschreiben mussten. Die Fußböden waren dermaßen wackelig, dass normale Schritte Erschütterungen hervorriefen, die jegliche Art von Präzisionsmessungen

unmöglich machten. Die instrumentelle Ausstattung war äußerst dürftig. Allerdings fügt Benndorf fast wehmütig hinzu:

„Ich führe dies alles nur an, um ein Bild davon zu geben, unter welchen erschwerenden Bedingungen damals in Wien experimentelle Physik betrieben werden mußte. Erst wenn man weiß, welches Quantum an Arbeitskraft infolge dieser unzulänglichen Verhältnisse vergeudet werden mußte, kann man das Geleistete richtig bewerten. Und doch, wenn ich an jene Jahre zurückdenke, erfüllt mich stille Wehmut und die Zeit erscheint mir in verklärtem Lichte durch die Erinnerung an den unvergleichlichen Geist, der dieses Institut erfüllte. Wie nach einem warmen Frühlingsregen die Grasspitzen hervorschießen, so schossen nach dem Amtsantritte Exners die jungen Physiker aus dem Boden.“ (Benndorf 1937: 7).

Unter Exners Leitung kam es zu einem Aufblühen des Institutes, welches in Folge eine Vielzahl an erfolgreichen Wissenschaftlern hervorbrachte. Dies ist sicherlich zu einem großen Teil Franz Exner selbst zu verdanken, dem es gelang eine Atmosphäre zu schaffen, in welcher sich Forschungsgeister voll entfalten konnten. Exner genoss als geistiger Mittelpunkt bei seinen Schülern und Mitarbeitern hohes Ansehen. Dies wurde immer wieder in verschiedenen Gedenkreden von Benndorf über Schweidler und Kohlrusch bis hin zu Schrödinger belegt, die voll Lob für Exners Wesen und sein umfassendes fachliches Wissen sind.

Benndorf (Benndorf 1937: 14) schreibt beispielsweise in seiner Gedenkrede an seinen ehemaligen Lehrer, dass „[Exner] ein ganz seltenes Verständnis für die Jugend besaß und sich dieses auch bis ins höchste Alter bewahrt hat.“ Weiters schwärmt er geradezu von der angenehmen Atmosphäre der damaligen Zeit:

„Was war das aber auch für ein geistiges Zusammenleben zwischen Lehrer und Schülern im II. Physikalischen Institut! Ein Kreis gleichgesinnter Freunde, umgaben wir unseren verehrten und geliebten Lehrer. Zum Tee am späten Nachmittag versammelten wir uns um „Väterchen“. Da mußte jeder von seinen Arbeiten berichten, da gabs keine Heimlichkeiten und keine Prioritätsansprüche, denn alles war durch regen Gedankenaustausch Eigentum aller. Angst vor geistigem Diebstahl betrachtete Exner als Zeichen geistiger Armut.“ (Benndorf 1937: 15)

Diese Zeilen Benndorfs verraten einen gegenseitig zutiefst respektvollen Umgang. Exner wurde von seinen Schülern liebevoll als „Väterchen“ betitelt, was die harmonische Stimmung noch unterstreicht. Sein Wirken lebte sogar noch lange Zeit nach seinem Tod in seinen Schülern weiter. Die meisten physikalischen Lehrstühle wurden, nicht nur in Wien, noch bis weit in die 1930er Jahre von ehemaligen Schülern Exners besetzt. Darunter Josef Tuma (Brünn), Anton Lampa (Prag), Hans Benndorf (Graz), Marian von Smoluchowski (Krakau), Stefan Meyer (Wien), Egon Schweidler (Innsbruck, Wien), Eduard Haschek (Wien), Friedrich Hasenöhl (Wien), Arthur Szarvassi (Brünn), Heinrich Mache (Wien), Viktor Conrad (Brünn, USA), Felix Maria von Exner-Ewarten (Wien), Friedrich von Lerch (Innsbruck), Karl Przibram (Wien), Felix Ehrenhaft (Wien), Erwin Lohr (Brünn), Wilhelm Schmidt (Wien), Franz Aigner (Wien), Victor Franz Hess (Graz, Innsbruck, New York), Karl Wilhelm Friedrich Kohlrausch (Graz), Ludwig Flamm (Wien), Erwin Schrödinger (Jena, Leipzig, Zürich, Berlin, Graz, Dublin, Wien), Hans Thirring (Wien). Einige der Genannten sind auf der nachstehenden Fotografie zu sehen, die ein damals übliches Habilitationsfrühstück, das gemeinsam eingenommen wurde, zeigt (Karlik 1982: 101-157).



Abbildung 3: Habilitationsfeier von Friedrich Hasenöhl und Stefan Meyer (1899)

Doch nicht nur in den Räumen der Universität, sondern auch im Exnerschen Privathaushalt waren Freunde und Kollegen stets willkommen (Benndorf 1937: 16). Benndorf beschreibt die gemeinsamen Abende als zwanglose Treffen des Freundeskreises, bei dem über Allerlei angeregt und auf hohem Niveau diskutiert wurde. Da Exner mit großer Begeisterung schon seit seiner Jugend fremde Länder bereiste, konnte er mit seinen Erzählungen von seinen Reisen nach Italien, Griechenland und Indien immer wieder sein Publikum begeistern. Neben anderen Kulturen, galt sein besonderes Interesse der Musik, weswegen auch immer wieder Kammermusikabende im Hause Exner stattfanden.

Während seiner Tätigkeit als Institutsleiter, stieg nicht nur die Zahl der Dozenten. Exner war auch bemüht, die wirtschaftlichen Verhältnisse des Institutes zu verbessern. 1902 kam es zu einer Neuordnung der physikalischen Forschungsinstitutionen. Aus dem ehemaligen Physikalischen Kabinett bildete sich das I. Physikalische Institut heraus, das ab 1909 unter der Leitung von Ernst Lecher (1856 – 1926) stand. Das Physikalische Institut unter Ludwig Boltzmann (1844-1906) wurde zum Institut für Theoretische Physik und Exners Physikalisch-Chemisches Institut wurde in das II. Physikalische Institut umgewandelt (Blechl 2004: 8-25).

Im Herbst 1907 wurde Exner zum Rector Magnificus der Universität Wien. Seine Rektoratsrede sorgte für einiges Aufsehen, da er sich mit dem modernen Gedanken angefreundet hatte, dass alle Vorkommnisse in der Natur lediglich das Resultat zufälliger Ereignisse sind. Diese Sichtweise, die offensichtlich auf die Forschungsergebnisse seines Kollegen Ludwig Boltzmann zurückgeht, war zur damaligen Zeit noch nicht weitläufig akzeptiert, legte aber den Grundstein für die moderne Quantenphysik (Exner 1908).

Ende des 19. Jahrhunderts führte die Entdeckung und Erforschung der Radioaktivität dazu, dass das Ehepaar Curie in Österreich offiziell um radioaktives Material ansuchte, welches im böhmischen Joachimsthal ausreichend vorhanden war. Damit hatte Exner für seine Mitarbeiter ein neues Forschungsgebiet, das er sehr förderte. Dank einer

großzügigen Spende von Dr. Karl Kuppelwieser konnte das Geld für den Bau eines Institutes für Radiumforschung aufgebracht werden. Zusammen mit seinem Schüler Stefan Meyer, entwarf Exner die Planskizzen des Radiuminstituts. Stefan Meyer sorgte für die Einrichtung, sodass bereits 1910 das neue Institut bezugsfertig war (Karlik 1982: 88-95).

Exner gelang es schließlich, den Staat zu überzeugen, einen Grund für den Neubau der physikalischen Institute anzukaufen. 1913 war dann der Bau der neuen physikalischen Institute in der Boltzmannngasse, unterstützt durch Exners Freund, Ernst Lecher, der Lang nachgefolgt war, vollendet. Die nebenstehende Fotografie zeigt die Außenansicht des Institutsgebäudes, Ecke Boltzmannngasse/Strudlhofgasse, im Jahre 1912.

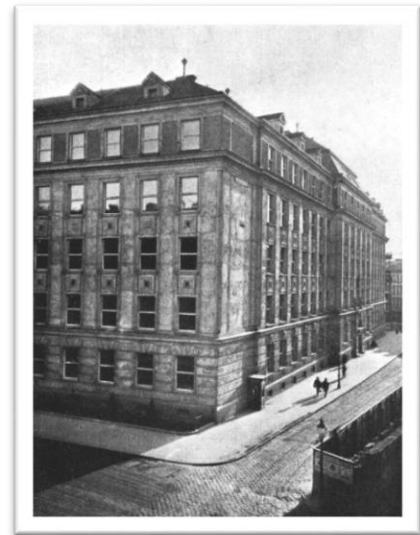


Abbildung 4: Physikalische Institute - 1912

Exner hatte es durch seinen unaufhörlichen Einsatz und sein organisatorisches Geschick geschafft, den experimentellen Unterricht in Wien auf das Niveau der reichsdeutschen Hochschulen anzugleichen. Leider konnte das neue Gebäude in der Boltzmannngasse nicht lange genutzt werden, da mit Ausbruch des I. Weltkrieges die Tätigkeit des Institutes untersagt wurde. Exner sah den Krieg als „Schandmal menschlicher Gesittung“ (Benndorf 1937: 9) und versuchte eindringlich seine Schüler von einer freiwilligen Teilnahme abzuhalten. Eines seiner bedeutendsten Werke über die physikalischen Grundlagen der Naturwissenschaften aus dem Jahre 1919 beginnt mit den Worten „In ernsten und schweren Zeiten flüchtet man gern auf ein Gebiet, das menschlicher Willkür völlig entrückt ist“ (Benndorf 1937: 10).

1920 zog Exner sich schließlich mit über 70 Jahren aus dem Lehrberuf zurück und schrieb ein nicht mehr veröffentlichtes Werk, „Vom Chaos zur Jetztzeit“. Dieses sollte die Geschichte der Erde, angefangen von ihrer Entstehung, über die Entwicklung von

Leben und menschlicher Kultur bis hin zum Weltkrieg umfassen. Das Buch wurde niemals fertig gestellt, da Exner, vermutlich aufgrund einer Gehirnblutung, zwei Jahre vor seinem Tod erblindete. Am 15. November 1926 verstarb er schließlich in Wien, wo er am Sieveringer Friedhof begraben ist.

Ein Relief von Michael Powolny im Arkadenhof der Universität Wien erinnert an die große Persönlichkeit Franz Serafin Exner, der nicht nur ein vielseitiger Physiker war, sondern sowohl fachlich als auch menschlich ganz wesentlich zur Entwicklung und Entfaltung der Physikalischen Institute der Universität Wien beitrug. Seit dem Jahr 2000 erinnert auch eine Gedenktafel am ehemaligen Physikalischen Institut in der Türkenstraße 3 an das Wirken bedeutender Physiker in diesem Haus; auch die Namen Franz Serafin Exners und einiger seiner Mitarbeiter, wie beispielsweise Lise Meitner, sind hier zu lesen.

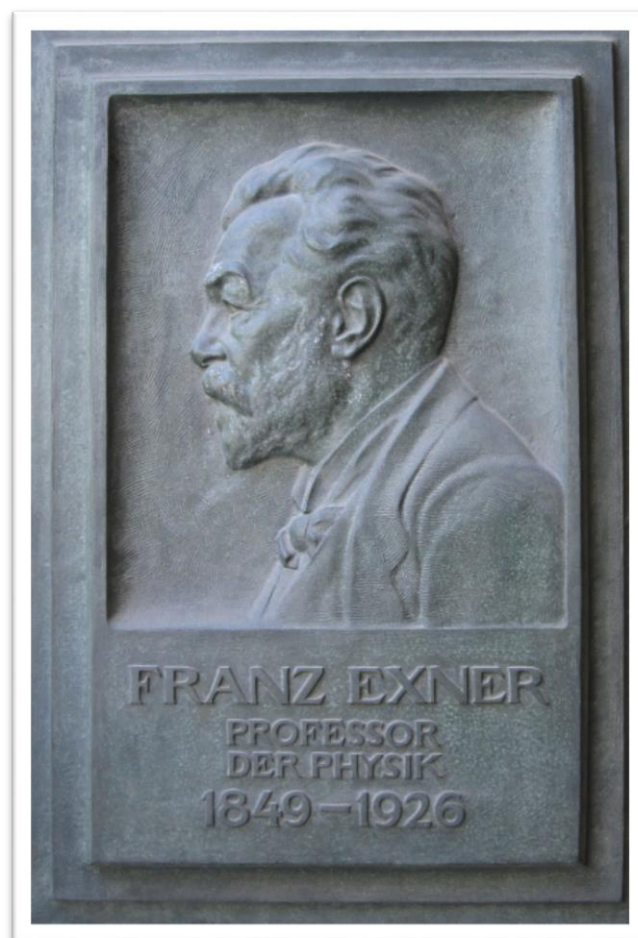


Abbildung 5: Relief von M. Powolny im Arkadenhof der Universität Wien

3 FRANZ SERAFIN EXNERS THEORIE ZUR LUFTELEKTRIZITÄT

3.1 Gängige Theorien zur Zeit Exners über den Ursprung der Lufterlektrizität

3.1.1 Theorien basierend auf Reibungselektrizität

Als Franz Serafin Exner sich intensiv mit dem Thema Lufterlektrizität und deren Ursprung befasste, waren schon rund 150 Jahre seit den ersten Untersuchungen auf diesem Gebiet vergangen. Viele der älteren Theorien über den Ursprung der Lufterlektrizität gehen auf die Tatsache zurück, dass Elektrizität durch *Reibung* verursacht werden kann. Nollet nahm schon 1752 an, dass die Reibung der Wolken an der Luft die Ursache für Lufterlektrizität sei (Exner 1886: 244). Etliche Gelehrte, die sich Ende des 19. Jahrhunderts auf dem Gebiet der Lufterlektrizität betätigten, griffen auf diese Theorie zurück. So schrieben beispielsweise auch Florimond (1861), Lüddens (1876) und Tait (1874/75) der Reibung von Luft und Wolken eine gewisse Rolle bei der Entstehung der atmosphärischen Elektrizität zu (Exner 1886: 245). Exner bemerkte dazu, dass diese Anschauung dadurch widerlegbar ist, dass die Lufterlektrizität umso stärker auftritt, je normaler und klarer, also wolkenloser, die Witterung ist. Ohne Wolken müsste die Lufterlektrizität aber verschwindend gering sein, was sichtlich den Beobachtungen widersprach (Exner 1886: 245).

3.1.2 Theorien basierend auf Thermoelektrizität

Auch die im 18. Jahrhundert entdeckte Pyro- und Thermo-Elektrizität von Körpern wurde als Erklärungsversuch herangezogen. Basierend auf Cantons Vergleich der Luft mit einem Turmalinkristall (1753), der bei Abkühlung oder Erwärmung jeweils elektrisch wird (Exner 1886: 246), schrieben Bequerel (1829) und De la Rive (1854) der Luft *thermo-elektrische* Eigenschaften zu (Exner 1886: 253). Sie nahmen an, dass sich warme und kalte Bereiche der Atmosphäre in unterschiedlichen elektrischen Zuständen befinden. Jedoch konnte Exner auch diese Möglichkeit widerlegen. Seine luftelektrischen Messungen ergaben im Winter durchwegs höhere Werte als im

Sommer, während für die Temperaturdifferenzen das Gegenteil galt (Exner 1886: 246).

3.1.3 Theorien basierend auf Verdampfung von Wasser

Eine besonders beliebte und variantenreiche Erklärung bot die *Verdampfungstheorie*, die ursprünglich auf Alessandro Volta (Volta 1788: 210-238) zurückgeht. Volta stützte sich dabei auf die Beobachtung Bennets (Exner 1886: 246), dass die Verdampfung von Wasser auf glühenden Kohlen mit einer Elektrizitätsentwicklung einhergeht. Auch Saussure, Palmieri, Tait und Wanklyn führten ähnliche Versuche durch und fanden, dass der Dampf stets positiv und das zurückbleibende Wasser negativ geladen ist (Exner 1886: 268). Die Annahme der Anhänger der Verdampfungstheorie war, dass der Verdampfungsvorgang an sich beziehungsweise die Kondensation von Dampf imstande sei, Elektrizität zu erzeugen. Je mehr Verdampfung, desto mehr Lufterlektrizität – so die Schlussfolgerung. Dies wiederum passte nicht zu Exners Untersuchungsergebnissen. Seine Beobachtungen ergaben eine umso stärkere Lufterlektrizität, je geringer der Wasserdampfgehalt in der Luft war. Zudem hatten etliche frühere Versuche, beispielsweise von Pouillet (1827), Peltier (1840) und Faraday (1846), ergeben, dass es sich bei der vermeintlichen Elektrizitätserzeugung lediglich um Reibungselektrizität zwischen dem verdampfenden Wasser beziehungsweise darin gelöster Salze mit den Gefäßwänden handelte (Exner 1886: 247).

Exner misst jedoch einer anderen Frage in diesem Zusammenhang eine größere Bedeutung zu, nämlich „ob der Dampf, der aus einer elektrisch geladenen Flüssigkeit aufsteigt, Elektrizität aus derselben mit fortführt oder nicht“ (Exner 1886: 248). Und er erkennt auch die Schwierigkeit, Resultate aus Laborversuchen auf die im großen Maßstab vorkommenden Vorgänge in der Natur umzulegen. Buff (1854) und De la Rive (1858) beobachteten, dass beim Verdampfen einer elektrisierten Wasseroberfläche der Dampf tatsächlich Elektrizität mit sich führt, jedoch geht Exner sehr vorsichtig mit diesen Ergebnissen um. Schließlich könnte die im Labor gemessene Elektrizität immer irgendwie durch Reibung zustande gekommen sein.

Zudem zeigten sehr sorgfältig durchgeführte Untersuchungen von Blake (1883) keinerlei nennenswerte Spuren von Elektrizität im Dampf von Wasser und Quecksilber. Exner findet jedoch einen nur zu berechtigten Einwand zu Blakes Ergebnissen: Er fragt sich, „wo [denn] die Elektrizität hinkäme, wenn man eine geladene und ideal gut isolierte Flüssigkeit vollständig in Dampf verwandeln würde“ (Exner 1886: 249). Seine Schlussfolgerung zu Blakes Untersuchung ist, dass der Dampf sehr wohl Elektrizität mit sich führt, dass jedoch die Mengen zu gering waren, um nachgewiesen werden zu können. Ein 1878 von Mascart durchgeführter Versuch scheint die Konvektion von Elektrizität beim Verdampfen von Wasser wiederum eindeutig zu belegen. Letztendlich überzeugten Exners eigene Messungen im Jahre 1885 ihn von der Richtigkeit des Mascartschen Experiments.

Mascart wies nach, dass eine elektrisierte Wasserfläche schneller verdampft als eine nicht elektrisierte. Nur jene Moleküle, die genügend Geschwindigkeit haben, können der Flüssigkeit entweichen und zu Dampf werden. Handelt es sich um eine ungeladene Flüssigkeit, wird der Übergang von Molekülen aus der flüssigen in die gasförmige Phase ausschließlich durch die Brownsche Bewegung in Abhängigkeit der Temperatur bedingt sein. Bei geladenen Flüssigkeiten kommen jedoch noch elektrische Abstoßungskräfte zum Tragen. Die Begründung Exners lautet folgendermaßen:

„Führen aber die Moleküle Elektrizität mit sich, so werden sie von der geladenen Oberfläche abgestossen, und zwar mit einer Kraft, die der Dichte der Elektrizität an der Oberfläche proportional ist; [...] das heißt, die Geschwindigkeit der Verdampfung muss zunehmen. [...] Die Versuche von Mascart beweisen, somit, dass der Dampf, der aus einer elektrisirten Oberfläche aufsteigt, eine elektrische Ladung mit sich führt.“ (Exner 1886: 249-250)

Exner führt Mascarts Versuch selbst wiederholte Male mit Wasser, Äther und Alkohol durch (Exner 1886: 250-252). Es gilt für ihn nunmehr als erwiesen, dass Dämpfe, die einer geladenen Flüssigkeit entweichen, Elektrizität mit sich führen. Diese Erkenntnis ist auch eines der Kernstücke seiner Theorie zur Ursache der Lufterlektrizität.

3.1.4 Theorien basierend auf Influenz

1803 stellte Erman und daran anlehnend etwa vierzig Jahre später auch Peltier die Vermutung auf, dass die Erde alleine eine elektrische Ladung besitzt, die Atmosphäre hingegen elektrisch neutral sei. Laut Peltier kommt es zur scheinbaren Elektrizität in der Luft ausschließlich durch *Influenzwirkung* seitens der Erde auf die Luftmassen. Dazu sei bemerkt, dass William Thomson, der spätere Lord Kelvin, 1860 eine äußerst interessante Influenztheorie aufstellte. Er behauptete, dass man nicht nur die Erde als elektrisch negativ geladen, sondern auch die höheren Schichten der Atmosphäre als positiv geladen ansehen müsse und verglich diese Vorstellung mit einer Leydener Flasche – moderner ausgedrückt, mit einem Kondensator – ein der heutigen Sichtweise sehr nahekommendes Bild, das von Exner jedoch abgelehnt wurde. Letztendlich sind es Peltiers Arbeiten, die Exner beeinflussen (Exner 1886: 285).

3.2 Bekannte Tatsachen

Speziell in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts war die Luftelektrizität ein bevorzugtes Forschungsgebiet. Wenn auch die Thesen über ihre Ursachen und Gesetze sehr unterschiedlich waren, stimmten die meisten Forscher in den folgenden Punkten überein (Exner 1886: 224-240):

- **Normale Elektrizität der Luft**

Zahlreiche Beobachtungen über viele Jahre hatten ergeben, dass bei normalen Schönwetter das Potential in der Luft positiv gegen jenes der Erde ist, unabhängig davon ob über Landes- oder Meeresflächen. Bei Bewölkung trat im Allgemeinen ein Sinken des Potentials ein und bei sehr dichten Wolkenansammlungen oder Gewittern kam es zu einer Umkehr in ein negatives Potential.

- **Änderung des Potentials der Luft mit der Höhe**

Ebenso herrschte darüber Übereinstimmung, dass die Potentialdifferenz zwischen Erde und Luft mit zunehmender Höhe anwächst. Abhängig von der Oberflächengeometrie verlaufen die Niveauflächen unregelmäßig und am Ende von Spitzen ist die Feldstärke am größten.

- **Jährlicher Gang der atmosphärischen Elektrizität**

Messungen hatten gezeigt, dass periodische Veränderungen der Lufterlektrizität in Abhängigkeit der Jahreszeit auftreten. Je nach geographischer Breite und klimatischen Bedingungen wichen die Messergebnisse voneinander ab. Generell wurde aber verzeichnet, dass im Winter die normale Lufterlektrizität viel stärker ist als im Sommer.

- **Täglicher Gang der atmosphärischen Elektrizität**

Ebenso waren übereinstimmend ein Tagesgang der atmosphärischen Elektrizität registriert worden. Maxima schienen jeweils um die Zeit des Sonnenunterganges aufzutreten; Minima hingegen zur Mittagsstunde.

Franz Exner machte es sich zur Aufgabe die bisher gemachten Beobachtungen durch eigene zu ergänzen und die bisher aufgestellten Theorien auf ihre Richtigkeit zu überprüfen. Aufgrund seiner zahlreichen Messungen über einen Zeitraum von über fünf Jahren unter unterschiedlichsten klimatischen Bedingungen, stellte er schließlich seine eigene Theorie auf, die auf den Gesetzen der Elektrostatik beruhte. Die Ionenphysik war zu jener Zeit noch vollkommen unbekannt und so schien Exners Theorie der damaligen Zeit und dem Forschungsstand entsprechend in sich schlüssig. Auch wenn sie sich nach Entdeckung der Leitfähigkeit der Luft und der Luftionen als nicht zutreffend erwies, so trug Franz Exner doch wesentlich zur Erforschung der Lufterlektrizität bei.

3.3 Franz Serafin Exners Theorie zur Lufterlektrizität im Überblick

Der Grundgedanke von Exners Theorie ist in der Kant-Laplace'schen Hypothese zu finden, welche die Entstehung des Sonnensystems allein auf grundlegende und universell existierende anziehende und abstoßende Kräfte zurückführt (Exner 1886: 223-224). Exner ist davon überzeugt, dass der Elektrizität bei allen kosmischen Vorgängen eine viel bedeutendere Rolle zukommt, als jemals angenommen.

Überblicksmäßig kann Exners Theorie zur Lufterlektrizität wie folgt zusammengefasst werden:

Ausgehend von der Kant-Laplace'schen Hypothese nimmt Exner an, dass jeder Himmelskörper, und somit auch die Erde, seit seiner Entstehung ein bestimmtes elektrisches Potential in Bezug auf die entfernten Punkte des Weltraumes haben müsse. Dieses elektrische Potential ist die Folge einer Ladung, die einem Überschuss an Elektrizität entspricht.

Er stützt sich dabei auf die von Peltier aufgestellte These (Exner 1886: 285), dass die Erde „als eine im Raume isolierte und elektrisch geladene Kugel“ betrachtet werden kann. Um die Erde herum besteht daher ein elektrisches Feld, das von der Größe und dem Vorzeichen der Erdladung abhängig ist. Die Luft an sich hingegen, ist elektrisch neutral und wird offenbar durch irgendwelche äußeren Umstände elektrisiert. Um die Ursachen der Lufterlektrizität zu ergründen und Gesetzmäßigkeiten aufzustellen, gilt sein Hauptanliegen der intensiven Erforschung dieses luftelektrischen Feldes. Gewitter oder ungünstige Witterung sieht Exner als Störung des „normalen“ Feldes an und konzentriert seine Messungen deshalb hauptsächlich auf Schönwetterbedingungen, oder wie er es ausdrückt „auf den normalen Zustand“ (Exner 1888/Vorlesungen: 134).

Exner schreibt der Erde eine elektrische Ladung negativen Vorzeichens zu. Durch Beobachtungen mit Ballonen wusste er, dass sich in der Atmosphäre ebenfalls negative elektrische Ladungen befanden. Deren Existenz führte er auf Verdampfungsvorgänge von Wasser an der Erdoberfläche zurück. Wenn sich

Wassermassen in Dampfform erheben, nehmen sie negative Elektrizität von der Erdoberfläche mit. Dadurch muss das Potentialgefälle an Stellen, wo sich solche elektrischen Wassermassen in der Atmosphäre ansammeln, sprich Wolken, abnehmen und ins Negative übergehen. Das stimmt genau mit seinen Beobachtungen bei bewölktem Himmel oder einbrechendem Regen überein. Die Messungen bei Schönwetter ergaben durchwegs positive Werte. Das Regenwasser, das zu Boden fällt ist demnach ebenfalls stets negativ geladen und bringt mit dem Abregnen die negativen Ladungen zur Erde zurück, die ihr beim Verdampfen entzogen worden waren.

3.3.1 Das Potential der Erde

Franz Exner hatte an der Universität Wien unter anderem eine Reihe von Vorlesungen über Elektrizität gehalten. In seinem 1888 erschienenen Werk „Vorlesungen über Elektrizität“ ist ein eigenes Kapitel der atmosphärischen Elektrizität und dem Potential der Erde gewidmet. Obwohl er erwähnt, dass es keinen eindeutigen Beweis für die Existenz einer von Natur aus geladenen Erde gibt, nimmt er dies doch mit großer Wahrscheinlichkeit an. Als Begründungen führt er die Erscheinung von sogenannten Erdströmen und die Erkenntnisse seiner eigenen Untersuchungen der Lufterlektrizität an.

Erdströme treten auf, weil zwei Punkte der Erde, die nur einige hundert Meter auseinander liegen, fast nie dasselbe Potential aufweisen und daher eine Potentialdifferenz besteht. Das manifestiert sich dadurch, dass durch einen Draht, der zwei solche Punkte verbindet, messbare elektrische Ströme fließen. Unter anderem machen sich diese Ströme in Telegraphenleitungen bemerkbar, da sie mitunter erhebliche Störungen verursachen (Exner 1888/Vorlesungen: 132). Über die Ursachen dieser Potentialdifferenzen gab es unterschiedliche Auffassungen. Zum Einen wurde angenommen, dass bestimmte meteorologische Prozesse, wie zum Beispiel Gewitter, für die Erzeugung von Elektrizität an einzelnen Stellen der Erdoberfläche verantwortlich sind. Solche Stellen müssten dann vorübergehend ein anderes Potential aufweisen als die übrigen Bereiche der Erdoberfläche, wodurch die

Bildung von Erdströmen, die natürlich bestrebt sind diesen Ladungsunterschied auszugleichen, erklärt werden könnte.

Exner spricht sich allerdings gegen diese Vermutung aus, da er meint, dass die Störungen in Telegraphenleitungen, wie sie bei Gewittern auftreten, von ganz anderer Größenordnung sind als die gewöhnlichen Erdströme. Außerdem sind Erdströme auch stets bei Schönwetter vorhanden und bleiben relativ konstant. Er geht daher davon aus, dass Elektrizität nicht auf irgendeine Weise erzeugt wird, sondern dass es sich um Verschiebungen bereits vorhandener Ladungen an der Erdoberfläche, also um Influenzwirkung handelt. Die Potentialdifferenzen an der Erdoberfläche, welche die Erdströme verursachen, würden also durch Influenzwirkung von jeglichen elektrischen Massen, die sich außerhalb der Erde in deren elektrischem Feld bewegen – somit auch durch vorbeiziehende Wolken – hervorgerufen werden (Exner 1888/Vorlesungen: 133).

Als überzeugendsten Punkt für die elektrische Ladung der Erde sieht Exner die Ergebnisse seiner Untersuchungen der atmosphärischen Elektrizität an, der er sich vor allem zwischen 1885 und 1890 intensiv gewidmet hat. Diese sollen im Folgenden genauer dargestellt werden.

3.3.2 Franz Exners Forderungen an die Forschung

Zu Beginn seiner Forschungen beschäftigte Exner sich mit der Frage, welchen Wert das Potential der Erde, bezogen auf den absoluten Nullpunkt der Potentiale, hat. Unter Letzterem ist das Potential an einem Punkt zu verstehen, welcher unendlich weit von allen elektrischen Massen entfernt ist. Er mutmaßt, dass mit der Beantwortung dieser Frage zugleich die Lage des absoluten Nullpunktes der Elektrizität gegeben wäre, denn „wir könnten angeben, um wie viele (willkürliche) Einheiten derselbe tiefer liegt als das Potential der Erde.“ (Exner 1888/Vorlesungen: 131).

Exner ist sich im Klaren, dass diese Frage nicht einfach mittels Laborversuchen beantwortet werden kann. Nur eine sehr große Anzahl von Potentialmessungen zu verschiedenen Jahres- und Tageszeiten, in unterschiedlichen Höhenlagen und im besten Falle in den unterschiedlichsten geographischen Breiten können Antworten liefern. Sein Wunsch ist es, ein über die Erde verteiltes Netz von Stationen einzurichten, wo zahlreiche Parameter (Klima, Meereshöhe, Tageszeit, meteorologische Bedingungen, usw.) und deren Zusammenhänge mit der Lufterlektrizität studiert werden sollen. Für dieses Vorhaben wurde eine Kommission einberufen, der neben Exner auch Elster, Geitel, Nernst und Wiechert angehörten. In Folge wurden von der Wiener Akademie der Wissenschaften Beobachtungsstationen in Wien, Kremsmünster, Innsbruck und Triest gegründet (Karlik 1982: 73).

Ende des 19. Jahrhunderts beschäftigten sich eine Reihe von Forschern aus aller Herren Länder mit dem Thema Lufterlektrizität. Trotz des umfangreichen Materials zahlreicher Beobachtungen und Messungen über viele Jahre hinweg, findet Exner, dass das bis dahin gesammelte Material nicht dazu geeignet ist, um die damals zahlreichen Hypothesen, inklusive seiner eigenen, einer quantitativen Prüfung zu unterziehen.

Im 96. Band der Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften von 1887 formuliert er seine Zweifel folgendermaßen:

„Erstens wurde immer und wird leider noch an allen meteorologischen Stationen, wo fortlaufende Beobachtungen gemacht werden, nach einem ganz willkürlichen und unbestimmbaren Masse gemessen, indem die Potentiale zwar in Volt ausgedrückt, aber auf einen Punkt in der Luft bezogen werden, dessen Lage auf jeder Station eine andere und in elektrischer Beziehung nicht definirte ist.“ (Exner 1887/Sitzungsberichte Bd. 96: 420)

Und weiter:

„Ein zweiter Grund für die Unbrauchbarkeit der vorhandenen Beobachtungen zu vorliegendem Zwecke liegt darin, dass die Stationen zumeist innerhalb grösserer Städte situirt und damit all den durch Rauch und Staub verursachten Störungen ausgesetzt sind; [...]“ (Exner 1887/Sitzungsberichte Bd. 96: 421).

Exner plädiert daher dafür, dass die Beobachtungen an fixen Stationen durch gleichzeitige Messungen mittels transportabler Apparate auf freier Ebene in der Nachbarschaft reduziert werden sollen, um so korrekte Werte für das normale Potentialgefälle zu erhalten (Exner 1887/Sitzungsberichte Bd. 96: 420). Er selbst trug mit einer Reihe von Beobachtungen, die er größtenteils mit Hilfe eines von ihm selbst konstruierten transportablen Apparates durchführte, wesentlich zur Erforschung der Lufterlektrizität bei.

3.3.3 Franz Exners Beobachtungen

Zunächst war zu klären, ob die reine Luft an und für sich elektrisch ist. Exner geht davon aus, dass dies nicht der Fall ist und stützt sich dabei auf den Versuch von Mascart, der in Kapitel 3.1.3. beschrieben wurde. Auf dieser Annahme basieren alle weiteren Beobachtungen und deren Interpretationen.

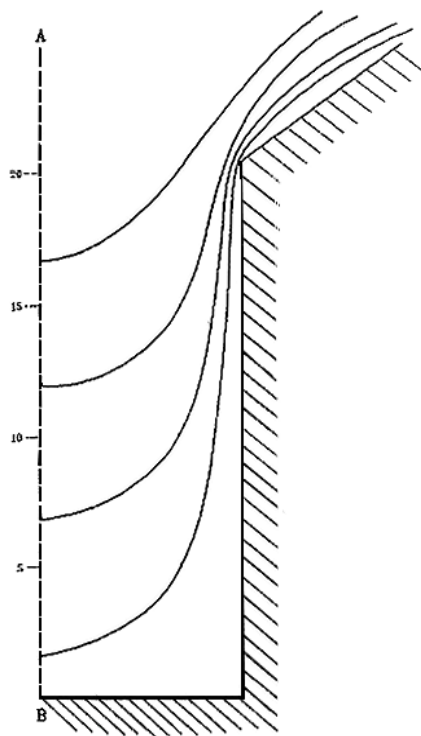


Abbildung 6: Niveauflächenverlauf

Seine ersten Messungen im Jahre 1885 sollen zunächst den Nachweis liefern, dass - sofern die Erde als geladener Leiter betrachtet wird - die Niveauflächen in der Nähe der Erdoberfläche den Gesetzen der Elektrostatik folgen und senkrecht auf die elektrischen Feldlinien stehen. Bei Potentialmessungen in einem rechteckigen Hof fand er dies bestätigt. Er erhielt unterschiedliche Werte für die Mitte des Hofes und in der Nähe der Wände. Abbildung 6 stammt aus Exners Bericht an die Kaiserliche Akademie der Wissenschaften in Wien aus dem Jahre 1886 (Exner 1886: Anhang, Fig. 1). Sie zeigt den von ihm eruierten Verlauf der Niveauflächen, die mit den in Kapitel 6 erwähnten heutigen Anschauungen des Potentialverlaufs übereinstimmen.

Die Gesetze der Elektrostatik besagen aber auch, dass das Potential einer geladenen leitenden Kugel umgekehrt proportional, also mit $\frac{1}{r}$ vom Abstand der Kugeloberfläche abnimmt. Dementsprechend müsste man für eine geladene Erdkugel eine Abnahme des Potentials mit der Höhe feststellen. Allerdings kann das elektrische Feld in nicht allzu großen Höhen als ein homogenes betrachtet werden und das Potentialgefälle sollte demnach ein lineares sein. Exner, der zur damaligen Zeit seine Messungen in relativen Höhen unter 50 m durchführte, konnte die Linearität des Potentialgefälles in Erdnähe durch seine Untersuchungen bestätigen.

Konkret stellte er im August und September des Jahres 1885 am Ufer des St. Wolfgangsees an zehn Tagen Messungen an. Dabei verwendete er kleine mit Wasserstoff gefüllte Ballons, die mit einer Lunte versehen waren und mit Hilfe eines Messingdrahtes in Höhen bis zu 48 m aufsteigen konnten. Der Draht war mit einem Handelektrometer verbunden. Er achtete darauf sämtliche Messungen bei absoluter Windstille und Schönwetter durchzuführen, damit die Ballons auch wirklich vertikal in

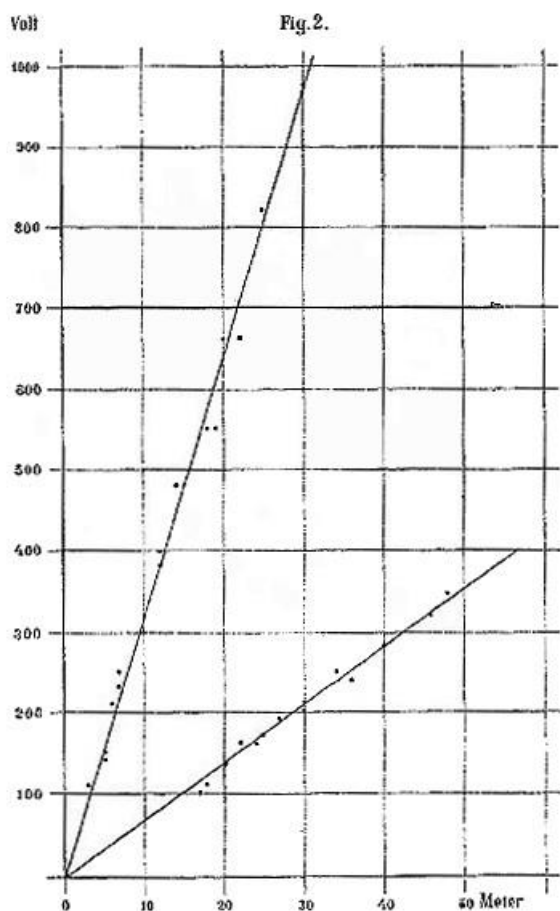


Abbildung 7: Linearität des Potentialgefälles

die Höhe stiegen. Abbildung 7 (Exner 1886: Anhang, Fig. 2) zeigt, dass die insgesamt 16 Einzelbeobachtungen tatsächlich ein lineares Potentialgefälle ergeben.

Exner gibt an, dass „die Messungen mittels Lunte gemacht wurden, die Werthe also [...] noch mit 10 zu multipliciren sind“ (Exner 1886: 259). Abbildung 7 enthält die gemessenen Werte. Die Steigung der rechten Kurve ergibt mit 10 multipliziert also ungefähr $\frac{\partial V}{\partial n} = 68 \frac{V}{m}$ (n , Richtung der Vertikalen). Dieser Wert wird auch von Exner angegeben und galt für ein breites Gebirgstal (Exner 1886: 259).

Weiters findet Exner seine Vermutung, dass die Niveaulflächen über der Spitze eines Berges viel dichter aneinander liegen müssten als in der Ebene, durch Messungen auf dem 1870 m hohen Schafberg am Wolfgangsee bestätigt. Er misst wiederum ein lineares Potentialgefälle, jedoch mit viel höheren Werten. Die Messwerte dazu sind in der linken Kurve in Abbildung 7 dargestellt. Wiederum mit 10 multipliziert, ergibt sich für den Schafberg ein Potentialgefälle von etwa $\frac{\partial V}{\partial n} = 318 \frac{V}{m}$.

Nun geht es für Exner darum die Faktoren, die dieses Potentialgefälle in der Atmosphäre beeinflussen, zu bestimmen (Exner 1888/Vorlesungen: 139). Dazu bedarf es jedoch einer viel größeren Anzahl an Messungen. Zwischen Jänner und April 1885 führt Exner weitere Messungen auf ebenen Feldern in Döbling, das damals noch nicht zu Wien gehörte, durch. Diesmal verwendet er Flammen als Kollektor. Der genaue Aufbau und Funktionsweise seiner Messmethode folgt in Kapitel 7.1.

Er achtet darauf bei besonders klarem Wetter und festgefrorener Schneedecke bei Temperaturen unter Null Grad, also in möglichst reiner Luft, zu messen. Neben dem schon zu erwartenden linearen Potentialgefälle, macht Exner hier aber eine neue Beobachtung. Da er das Phänomen Luftelektrizität eng mit meteorologischen Erscheinungen verknüpft sieht, macht er gründliche Aufzeichnungen über die bei der Messung herrschenden Witterungs- und Temperaturverhältnisse. Zusätzlich bezieht er Daten der meteorologischen Anstalt bezüglich des Wassergehaltes der Luft ein.

Im 93. Band der Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften aus dem Jahr 1886 ist in Exners Bericht folgende Tabelle zu finden (Exner 1886: 262).

Tabelle 1: Abhängigkeit des Potentialgefälles von Temperatur und Wassergehalt der Luft

t in ° C.	$\frac{dV}{dn}$ in $\frac{\text{Volt}}{\text{Meter}}$	H ₂ O in Grammen per Cm.
A. — 6	532	3·1
B. — 5	556	3·3
C. + 4	292	3·7
D. + 10	92	5·3
E. + 15	93	5·7
F. + 16	48	7·8

Wie ersichtlich, ist hier das Potentialgefälle in Abhängigkeit der Temperatur und des Wassergehaltes der Luft ausgewiesen. An diesen Daten erkennt Exner, dass das Potential offenbar stark temperaturabhängig ist und findet als Begründung den von der Temperatur abhängigen Wassergehalt in der Atmosphäre:

„Man ersieht daraus, dass nicht die Temperatur selbst massgebend ist, sondern die durch sie bedingte Feuchtigkeit, denn sonst hätten die Versuche D und E sehr verschiedene Resultate geben müssen, was aber des annähernd gleichen Wassergehaltes wegen nicht der Fall war.“ Und weiter: „Es kann keinem Zweifel unterliegen, dass die Anwesenheit von Wasserdampf in der Luft auch bei vollkommen schönem Wetter das Potentialgefälle stets vermindert [...] Man wird daher erwarten müssen, dass im Allgemeinen auch Wolken einen gleichartigen Einfluss ausüben.“ (Exner 1886: 262-263)

Es scheint nun das Rätsel um die Ursache der Lufterlektrizität gelöst. Das Potentialgefälle hängt für Exner eindeutig mit dem Wasserdampfgehalt in der Luft zusammen. Da sich das Wasser in einem stetigen Kreislauf zwischen Himmel und Erde befindet, ist es naheliegend, dass die Wanderung von Ladungen einem ähnlichen Kreisprozess unterworfen sind. Hier kommen nun die Erkenntnisse aus Mascarts Versuch bezüglich der Konvektion von Elektrizität beim Verdampfen von Wasser an der Erdoberfläche (siehe Kapitel 3.1.3.) ins Spiel.

Die bisherigen Messungen hatten alle gezeigt, dass das normale Schönwetterfeld stets positive Lufterlektrizität aufweist; Exner nennt dies die ‚normale Lufterlektrizität‘. Bei steigender Luftfeuchtigkeit, also Aufziehen von Wolken, Niederschlag oder Gewitter, wird diese jedoch ins Negative gekehrt. Ausgehend von der Idee eines Kreisprozesses, stellt Exner die These auf, dass sich bei der Verdampfung von Wasser ständig Teilchen von der negativ geladenen Erdoberfläche lösen und einen Teil dieser Ladung mit sich in die Atmosphäre führen. Das Potentialgefälle muss dann an Stellen, wo sich solch elektrische Wassermassen in der Luft ansammeln - sprich Wolken - abnehmen und ins Negative übergehen.

Als nächstes macht Exner es sich zur Aufgabe die genaue „Abhängigkeit der atmosphärischen Elektrizität vom Wassergehalt der Luft“ zu ergründen und damit auch seine bisherigen Hypothesen zu untermauern. Ein mit diesem Arbeitstitel eingetragener Beitrag ist in den Sitzungsberichten der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Band 96 des Jahres 1887 zu finden.

Wie bereits in Kapitel 3.3.2. ausgeführt, kritisiert Exner in eben diesem Band, dass das von fixen Stationen gesammelte Material für quantitative Auswertungen wenig brauchbar ist. Er beschließt daher weitere Langzeitmessungen zwischen August 1886 und Mai 1887 sowie im Hochsommer 1887 an drei verschiedenen Beobachtungsorten anzustellen. Neben Döbling und St. Gilgen am Wolfgangsee schließt er nun den Lido von Venedig in seine Messungen ein.

Mit seiner transportablen Messausrüstung macht er insgesamt 133 Messungen an 80 Tagen bei durchwegs schönem Wetter. Mit dieser Anzahl an Messungen glaubt Exner seine Theorie „nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ“ (Exner 1888/Sitzungsberichte: 429) festigen zu können. Dabei stellt er bei allen Messungen übereinstimmend fest, dass das Potentialgefälle mit steigendem Dunstdruck abnimmt wie in Tabelle 2 (Exner 1888/Sitzungsberichte: 434) ersichtlich ist. Sie zeigt die Ergebnisse, die von 110 Messungen bei Schönwetter stammen und zur Auswertung herangezogen wurden. Exner bemerkte, dass die Unsicherheit der

Einzelbeobachtungen unter scheinbar gleichen Bedingungen sehr groß sein kann. Die letzte Spalte in Tabelle 2, $\frac{\Sigma \Delta}{n}$, zeigt diese Messunsicherheit an (Exner 1888: 434).

Tabelle 2: Abhängigkeit von Dunstdruck und Potentialgefälle

Zahl der Beobacht. n	Dunstdruck in Millimeter	$\frac{dV}{dn}$	$\frac{\Sigma \Delta}{n}$
12	2·3	325	92
6	3·8	297	42
11	4·4	197	63
8	5·5	166	53
7	6·8	116	8
14	8·4	106	17
16	9·5	97	12
12	10·4	84	9
14	11·4	74	7
10	12·5	68	10

In Abbildung 8 sind die Zahlen aus obiger Tabelle 2 graphisch dargestellt.

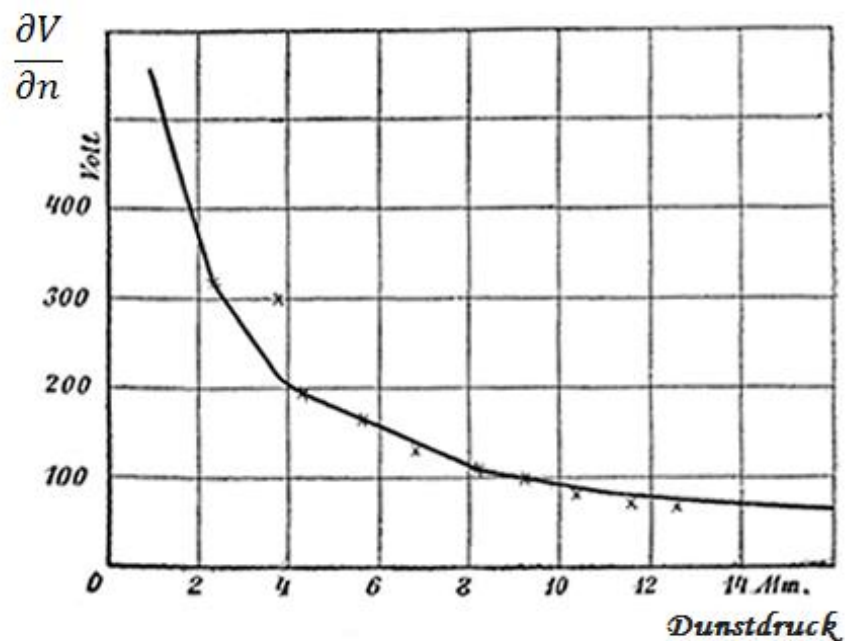


Abbildung 8: Abhängigkeit von Dunstdruck und Potentialgefälle

Die einzelnen Markierungen sind die gemessenen Werte. Die durchgehende Linie stellt die berechneten Werte dar. Die Gleichung der Kurve lautet:

$$\frac{\partial V}{\partial n} = \frac{A}{1 + k \cdot p_0} \quad (1)$$

wobei p_0 der Dunstdruck an der Erdoberfläche, k eine nicht näher definierte Konstante und A jenes Potentialgefälle ist, das an der Erdoberfläche herrschen würde, wenn sich alle elektrischen Ladungen der Erde auf deren Oberfläche befänden. Nach Exners Theorie befindet sich die gesamte Ladung der Erde jedoch zum Teil auf ihrer Oberfläche und zum Teil an Wasserdampf gebunden in der Atmosphäre. Wäre letztere vollkommen wasserfrei, würde sich die gesamte Ladungsmenge auf der Erdoberfläche befinden. Das in diesem Fall dazugehörige Potentialgefälle wird mit der Konstante A bezeichnet.

Gl. (1) ist nur eine Näherungsformel. Nun soll der Dunstdruck p_0 ersetzt werden durch die Wassermenge q_0 in der Volumseinheit am Erdboden. α ist der Ausdehnungskoeffizient, t die Temperatur. Dunstdruck und Wassermenge stehen in folgender Relation:

$$q_0 = p_0 \cdot \frac{1,06}{1 + \alpha t} \quad (2)$$

Gleichung (1) kann nun auch so ausgedrückt werden:

$$\frac{\partial V}{\partial n} = \frac{A}{1 + k \cdot q_0} \quad (3)$$

Aus seinen langjährigen Beobachtungen und mittels Näherungsverfahren ermittelt Exner für die Konstante A den Wert

$$A = 1410 \frac{V}{m}.$$

Der Wassergehalt in der Atmosphäre nimmt als Folge der Temperaturabnahme mit steigender Höhe rasch ab. Gemäß Exners Hypothese, dass die Größe des normalen Potentialgefälles hauptsächlich durch die Menge des in der Luft enthaltenen

Wasserdampfes bedingt ist, muss eine Zunahme des Potentialgefälles mit steigender Höhe zutreffen bis zu einem Maximalwert, wo sich alle negativen Ladungen unterhalb des Beobachtungsortes befinden und bei dem der Wasserdampfgehalt 0 entspricht (Exner 1891: 645). Dort müsste A eben den konstanten Wert von $1410 \frac{V}{m}$ annehmen. Die Relation zwischen Potentialgefälle und Höhe wird durch folgende Formel ausgedrückt:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial n}\right)_h = \frac{A - B}{2,65}(h - 0,123h^2 + 0,005h^3) + B \quad (4)$$

Die linke Seite der Gl. (4) bedeutet das Potentialgefälle per Meter in der Höhe h (in 1000 m). B ist das Potential am Erdboden und A die bereits erwähnte Konstante. Die Kenntnis dieser Konstante ist von großer Bedeutung. Kennt man A, lassen sich die Gesamtladung der Erde und ihr Potential berechnen.

Exner verwendete für seine Berechnungen die damals gebräuchliche Maßeinheit *absolute elektrostatische Einheiten (U.E.)*. Als Umrechnungsfaktor verwendete er:

$$1 \text{ Volt} = 0,00338 \text{ U.E.}$$

Damit kam zu er folgenden Ergebnissen (Exner 1888/Sitzungsberichte: 455-456 und 1890: 649):

Das Potential der Erde wird dem im Außenraum einer homogen geladenen Kugel mit Radius R gleichgesetzt, also:

$$V = \frac{M}{R} \quad (5)$$

wobei Exner mit M die Gesamtladung der Erde bezeichnet.

Gl. (5) abgeleitet ergibt:

$$-\frac{\partial V}{\partial n} = \frac{M}{R^2} \quad (6)$$

Gl. (6) eingesetzt in Gl. (5) ergibt:

$$V = -R \frac{\partial V}{\partial n} \quad (7)$$

Setzt man für $R = 7 \cdot 10^8 \text{ cm}$ und für $\frac{\partial V}{\partial n} = 14,1 \text{ V/cm}$ ein, ergibt sich für das Potential:

$$\mathbf{V = -9 \cdot 10^9 \text{ Volt}}$$

Aus dem Potentialgefälle $\frac{\partial V}{\partial n}$ lässt sich auch die mittlere Flächendichte μ der Erdoberfläche berechnen mit:

$$\mu = -\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\partial V}{\partial n} \quad (8)$$

Für $\frac{\partial V}{\partial n} = 14,1 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ ergibt sich:

$$\mathbf{\mu = - 0,0038 \text{ U.E.}}$$

Letztendlich ergibt sich durch Einsetzen der oben genannten Werte die Gesamtladung M der Erde mit:

$$M = V \cdot R \quad (9)$$

$$\mathbf{M = -2 \cdot 10^{16} \text{ U.E.}}$$

Es ist anzumerken, dass Exner den Wert der Konstanten A im Laufe der Zeit immer wieder nachkorrigiert hat. Auf $A = 1410 \text{ V/m}$ kam er erst durch zahlreiche Messungen über viele Jahre hinweg und in den verschiedensten Teilen der Erde. Es war immer Exners Bestreben, seine Theorie durch Messungen in unterschiedlichen Gebieten zu prüfen und im besten Falle zu festigen. Aus diesem Grunde war er sehr daran interessiert, weitere Beobachtungen in Gebieten mit sehr hohen Dunstdrucken, wie es in den heißen Zonen der Erde der Fall ist, durchzuführen.

Die ersten Resultate über Messungen des normalen Potentialgefälles in solchen heißen Zonen, die Exner für seine Theorie heranzieht, stammen nicht direkt von ihm, sondern von E. Drory, der das Untersuchungsmaterial Exner aber zur Verfügung stellt. Nach eingehenden Studien desselben sieht Exner seine Theorie bestätigt, was er im Bericht von 1887 (Exner 1887/Sitzungsberichte Bd. 96: 471) anmerkt:

„Die Beobachtungen sollten eigentlich nur ein qualitatives Resultat anstreben, nämlich die Frage zur Entscheidung bringen, ob das normale Potentialgefälle in allen Breiten sein positives Vorzeichen behält oder, wie einige Theorien fordern, in der Nähe des Äquators ins Negative übergeht. Es wurde aber nicht nur diese Frage vollkommen gelöst, sondern auch in quantitativer Beziehung eine schöne Übereinstimmung mit der hier vertretenen Theorie erzielt.“

Wieder ergab sich eine Abnahme des Potentialgefälles mit steigendem Dunstdruck, die gut mit den von Exner berechneten Werten übereinstimmte. Insbesondere die Tatsache, dass das normale Potentialgefälle in den heißen Zonen dasselbe Vorzeichen behält ist von Bedeutung, da dies eine Reihe von anderen Theorien ausschließt. Das Auftreten einzelner negativer Elektrizitätswerte ging immer mit der Existenz von Wüstenstaub einher. Exner schließt aus Drorys Beobachtungen, dass die durch seine Formeln berechenbaren Werte nicht nur für seine eigenen Messungen in mitteleuropäischen Breiten stimmen, sondern auch für heiße Gebiete, wo große Luftfeuchtigkeit herrscht, gelten.

Im Winter 1888/89 macht er schließlich eigene Beobachtungen in den Tropen. Es geht vor allem darum das Potentialgefälle in der Luft an Orten mit extrem hohen Dunstdrucken zu messen und so den Zusammenhang von Potentialgefälle und Wassergehalt der Luft weiter zu erforschen. Exner entscheidet sich für Ägypten, Indien und Ceylon, wo Dunstdrucke von bis zu 24 mm herrschen. Im Vergleich dazu wurden die bisherigen Daten in Österreich und Italien bei Werten zwischen 2 und 15 mm gesammelt. Insgesamt stellt er 365 Messungen auf seiner Reise an (Exner 1889: 1005).

Nach seiner Rückkehr verwertet Exner Ergebnisse aus insgesamt 1123 Messungen, die in einem Zeitraum von rund fünf Jahren (1885–1890) und in einem Dunstdruckintervall zwischen 1,7 mm und 23,5 mm gemacht wurden. Zum größten Teil stammten die Messergebnisse von Exner selbst, der in Wien (1885, 1886), St. Gilgen (1885 – 1887), Bombay (1888) und Ceylon (1889) selbst Messungen durchgeführt hatte; der Rest von Elster und Geitel in Wolfenbüttel (1887-1890). Tabelle 3 zeigt eine Zusammenstellung der Auswertungen (Exner 1890: 618). Sie zeigt die an den verschiedenen Beobachtungsorten gewonnenen Mittelwerte der einzelnen Dunstdruckgruppen zwischen $p_o = 1,7$ mm und $p_o = 23,5$ mm; n gibt dabei die Anzahl der Einzelmessungen innerhalb jeder Gruppe an (Exner 1890: 617).

Tabelle 3: Vergleich der Messungen zwischen 1885 und 1890

Mittel der Dunstdruckgruppen von je 1 mm für die einzelnen Beobachtungsorte.

p_0	Wien 1885—1886		Wolfenbüttel 1887—1890		St. Gilgen 1885—1887		Indien 1888—1889	
	$\frac{dV}{dn}$	n	$\frac{dV}{dn}$	n	$\frac{dV}{dn}$	n	$\frac{dV}{dn}$	n
1·7	—	—	431	53	—	—	—	—
1·8	450	2	—	—	—	—	—	—
2·4	360	14	351	61	—	—	—	—
3·4	—	—	325	70	—	—	—	—
3·8	297	6	—	—	—	—	—	—
4·3	—	—	262	88	—	—	—	—
4·4	197	11	—	—	—	—	—	—
5·4	—	—	216	49	—	—	—	—
5·5	166	8	—	—	—	—	—	—
6·3	—	—	191	75	—	—	—	—
7·4	—	—	—	—	124	3	—	—
7·6	—	—	138	62	—	—	—	—
8·2	—	—	109	81	—	—	—	—
8·4	—	—	—	—	107	5	—	—
9·3	—	—	114	27	—	—	—	—
9·5	—	—	—	—	109	12	—	—
10·5	—	—	—	—	98	18	—	—
11·5	—	—	77	12	91	19	—	—
12·4	—	—	—	—	82	33	—	—
13·5	—	—	—	—	84	25	73	16
14·4	—	—	—	—	79	31	—	—
15·4	—	—	—	—	76	25	—	—
16·3	—	—	—	—	69	13	—	—
16·6	—	—	—	—	—	—	68	11
17·3	—	—	—	—	76	15	—	—
17·6	—	—	—	—	—	—	60	22
18·4	—	—	—	—	—	—	62	27
19·5	—	—	—	—	—	—	60	56
20·5	—	—	—	—	—	—	56	60
21·4	—	—	—	—	—	—	56	72
22·3	—	—	—	—	—	—	58	29
23·5	—	—	—	—	—	—	50	12

Wiederum findet er bestätigt, dass je höher die absolute Feuchtigkeit der Luft ist, das Potentialgefälle umso geringer ist. Dieser Zusammenhang scheint universelle Gültigkeit zu haben:

„Die geographische Lage der einzelnen Orte [...] ist eine so verschiedene, dass die allgemeine Verbreitung der Erscheinung über die ganze Erdoberfläche nicht dem geringsten Zweifel unterliegen kann.“ (Exner 1890: 619)

Diese Tatsache schien auch die bislang schon bekannten jahreszeitlichen und täglichen periodischen Schwankungen der Lufterlektrizität zu erklären. Exner hatte seine Versuchsreihen sowohl im Winter und im Sommer durchgeführt. Beim Vergleich der bisher gesammelten Daten waren im Winter stets höhere Werte als im Sommer gemessen worden. Die atmosphärische Elektrizität ist also stärker zu einer Zeit, wo die Verdunstung und somit der Wasserdampfgehalt der Luft geringer ist. Wie auch aus Tabelle 3 ersichtlich ist, deckt sich dies mit den Beobachtungen.

Was den täglichen Gang betrifft, so zeigen die Auswertungen, dass dieser in den Tropen wesentlich schwächer ausgeprägt ist als in unseren Breiten. Exner vermutet, dass die täglichen Schwankungen lokale Ursachen haben. Auffallend ist einzig, dass offenbar ein Zusammenhang zwischen täglichen Variationen und der Plötzlichkeit der Temperaturänderungen im Laufe eines Tages besteht. In den Tropen, wo die Temperaturen weitgehend konstant bei Tag und bei Nacht sind, sind keine deutlichen Maxima des Potentialgefälles zu bemerken. Hingegen treten bei den Messungen im Gebirge immer sehr scharfe Maxima auf, wenn sehr rasche Temperatursprünge zu verzeichnen sind (Exner 1890: 644-645).

Als weiteren Faktor will Exner feststellen, ob auch Staub als Träger elektrischer Ladung eine wesentliche Rolle spielt. Aus diesem Grunde führte er auch Messungen auf hoher See im Indischen Ozean durch, wo angenommen werden kann, dass hier äußerst wenig Staub in der Luft zu finden ist. Die Messungen am Meer stimmten mit jenen an Land vollkommen überein, weswegen Exner dem Staub keine bedeutende Rolle für die Lufterlektrizität zukommen lässt.

Zusammenfassend kam Exner nach mehr als fünfjährigen Messungen in verschiedenen Teilen der Erde zu folgenden Gesetzmäßigkeiten, die hier aus dem Sitzungsbericht (Exner 1890: 649-653) zitiert werden:

- 1) [...] Das Vorzeichen der normalen Luftelektricität ist auf der ganzen Erde und zu allen Zeiten das positive [...] (Exner 1890: 649).
- 2) [...] Das Potentialgefälle bei absoluter Trockenheit der Luft, also bei Abwesenheit aller elektrischen Massen in derselben, bestimmt sich [...] zu $1410 \frac{V}{m}$, und daraus resultirt ein Potential der Erde = $-9 \cdot 10^9$ Volt. Die Gesamtladung der Erde beträgt $-2 \cdot 10^{16}$ absolute elektrostatische Einheiten und endlich die Dichte derselben, im gleichen Masse, 0,0038 (Exner 1890: 649). [...] Über die Provenienz dieser Ladung habe ich die Annahme gemacht, dass dieselbe durch Convection von der Erdoberfläche mitgenommen werde [...] (Exner 1890: 650).
- 3) [...] Bezüglich der täglichen Periode [...] handelt es sich hier offenbar um ganz locale Vorgänge in nächster Nähe des Beobachtungsortes, Vorgänge, die vielleicht durch Temperaturänderungen in der Luft bedingt sind [...] (Exner 1890: 652).
- 4) [...] die Beobachtungen auf offenem Meere in einer Entfernung von circa 500 Seemeilen vom Lande ganz dieselben Resultate ergaben, wie die Landbeobachtungen [...] es beweist dies, dass auch die Landbeobachtungen durch [Verunreinigungen der Luft] nicht merklich gestört waren [...] (Exner 1890: 653).

Die bisherigen Untersuchungen stimmen mit der Theorie zur Gänze überein. Jetzt gilt es nur noch, Daten in besonders hohen Breiten, also in Gebieten mit geringen Dunstdrucken, anzustellen. Sollten sich diese ebenfalls in die bisherigen Erfahrungen eingliedern, wäre das der endgültige Beweis für die Richtigkeit Exners Theorie.

Die entscheidenden Messungen wurden nicht von Exner selbst, sondern von seinem Schüler und späteren Assistenten, Hans Benndorf, durchgeführt. Benndorf führte im Winter 1897/98 auf Wunsch Exners im sibirischen Tomsk luftelektrische Messungen durch. Dabei zeigte sich allerdings nicht der erwartete Zusammenhang zwischen Luftelektrizität und dem Wassergehalt in der Luft und Franz Exners Theorie war damit widerlegt. 1899 wurde Benndorf mit den Ergebnissen dieser Forschungsreise habilitiert. In seiner Gedenkrede an seinen ehemaligen Lehrer, würdigt er dessen Offenheit:

„Seine hohe, stets auf das Große gerichtete Sinnesart, seine unbedingte Gerechtigkeit, seine strenge Sachlichkeit waren es, die uns anzogen. Diese beweist vielleicht nichts schlagender, als die Tatsache, daß ich mich mit seiner Zustimmung auf Grund einer Arbeit habilitieren konnte, deren wesentlichstes Resultat war, daß Exners Theorie des elektrischen Feldes der Erde nicht richtig sein konnte.“ (Benndorf 1937: 15)

Auch wenn sich die Theorie Franz Serafin Exners letztendlich als unrichtig erwies, so trug er doch wesentlich zur Entwicklung des Forschungsgebietes der Luftelektrizität bei, was im folgenden Kapitels genau beschrieben wird.

4 HISTORISCHE ENTWICKLUNG DES FORSCHUNGSGEBIETES DER ATMOSPHÄRENELEKTRIZITÄT

4.1 Luftelektrische Phänomene von der Antike bis zum 18. Jahrhundert

Seit mittlerweile mehr als 200 Jahren wissen wir, dass es beständig Elektrizität in unserer Atmosphäre gibt. Dennoch können wir sie, mangels entsprechender Sinnesorgane, nur in Form von luftelektrischen Erscheinungen direkt wahrnehmen. Die häufigsten und wohl auch beeindruckendsten solcher Naturphänomene treten in Form von Gewittern und Blitzen auf.

Die gewaltigen Machtdemonstrationen der Natur - allem voran Blitze, die die Menschen seit jeher faszinierten und ihnen große Ehrfurcht einflößten – wurden meist als Zeichen göttlicher Macht angesehen. Ob Jupiter, Zeus oder Donar – sie alle waren, laut Mythos, imstande ihre Missgunst gegenüber menschlichen Fehlverhalten durch Schleudern eines Blitzes, begleitet von unheilvollklingendem Donnergeräusch, auszudrücken. Auch in der Bibel finden wir den Donner ‚als Stimme des Herren‘ (Joh. 12,19).

Im Mittelalter wurden Blitze, die Höfe und Häuser verbrannten und Hagelschauer, welche mit Gewittern einhergingen und ganze Ernten zunichte machten, gar als Teufels- oder Hexenwerk angesehen. Allerlei geweihte Gegenstände und Riten sollten vor Unheil durch Gewitter schützen. Die sogenannten Wetterglocken - geweihte Glocken, die Gewitterdämonen abwehren sollten – fanden sogar Eingang in Friedrich Schillers berühmtes Gedicht *Das Lied von der Glocke* (Schiller 1799), das die Inschrift der 1486 gegossenen Glocke des Schaffhauser Münsters verwendet: „Vivos voco, mortuos plango, fulgura frango“ (dt.: „Die Lebenden rufe ich, die Toten beklage ich, die Blitze breche ich“).

Die Tradition des Wetterläutens, also der Warnung vor einem drohenden Gewitter mittels Glockengeläute, wurde ebenso wie das sogenannte Wetterschießen sogar bis ins 19. Jahrhundert vielerorts praktiziert. Letzteres beschreibt der Kirchenhistoriker Adolph Franz 1909 folgendermaßen:

„Bei Wettergefahr zog er (der Pfarrer) mit seinem Küster in Begleitung von Gläubigen aus dem Pfarrorte unter Gesang und Gebet zu der auf der Höhe gelegenen Kapelle des hl. Imier (Himerius), des Apostels des schweizerischen Juragebiets, wo bereits Gläubige aus den umliegenden Orten versammelt waren. Der Küster war überdies mit einer Armbrust und mit Pfeilen bewaffnet, die der Priester segnete. Während dieser die Gebete sprach, setzte der Küster seine Waffe in Bereitschaft, und wenn der Priester zum dritten Male rief: Wiederum beschwöre ich euch, Hagel und Unwetter, so schoß der Küster seinen Pfeil gegen die schwarzen Wolken. Unter Glockengeläute kehrten nun die Gläubigen beruhigt in ihr Heim zurück.“

(Adolph Franz, Die kirchlichen Benediktionen im Mittelalter, 1909)

Erst das Zeitalter der Aufklärung und der Drang der aufstrebenden Naturwissenschaften scheinbar mystische Phänomene wissenschaftlich zu deuten und deren Ursachen wissenschaftlich erklären zu können, führten im 18. Jahrhundert zu einer Entmystifizierung von Gewittererscheinungen.

Eine erste Erwähnung, die das Naturphänomen Blitz mit jener statischen Elektrizität des Bernsteins, die schon seit dem Altertum bekannt war, in Verbindung bringt, findet sich 1708 in einem Beitrag von Dr. Wall in der *Philosophical Transactions of the Royal Society*. Wall beobachtet beim Reiben eines Bernsteinstückes mit einem Wolltuch einen Lichtblitz, der einem Knistern folgt und mutmaßt, dass es sich um ein ähnliches Phänomen handelt, das bei Blitz und Donner auftritt (Wall, 1708: 71). Beeindruckend ist vor allem Winklers Vorschlag 1746, der nicht nur den Zusammenhang zwischen Funkenbildung und Blitzentladung erkennt, sondern sogar Reibung und Kollision verschiedener Partikeln in der Luft als mögliche Ursache sieht. (Chalmers 1967: 2)

Von diesen ersten Vermutungen bis zum heutigen Modell eines globalen elektrischen Stromkreises, war es noch ein langer Weg, der aber schließlich Mitte des 18. Jahrhunderts durch gezielte Experimente seinen Anfang nahm.

4.2 Erstentdeckungen im 18. Jahrhundert

Zu dieser Zeit begann die intensive Untersuchung elektrischer Phänomene und der Gedanke, dass Blitze elektrischer Natur sind, fand bei vielen damaligen Forschern großen Anklang. Einer der bekanntesten, **Benjamin Franklin (1706-1790)**, war davon überzeugt, dass Blitze elektrische Erscheinungen oder vielmehr Entladungen zwischen Wolken beziehungsweise zwischen Wolken und Erde seien. Er war der Erste, der dies experimentell überprüfen wollte und schlug 1749 in seiner Abhandlung *„Opinions and conjectures, concerning the properties and effects of the electrical matter, arising from experiments and observations, made at Philadelphia, 1749“* ein Experiment vor, das diesen Zusammenhang bezeugen sollte.

Den genauen Versuchsaufbau seines sogenannten ‚Sentry-box experiment‘ schilderte er seinem englischen Wissenschaftskollegen und Freund, Peter Collinson, in einem Brief vom 29. Juli 1750:

“To determine the Question, Whether the Clouds that contain Lightning are electrified or not, I would propose an Experiment to be try’d where it may be done conveniently. On the Top of some high Tower or Steeple, place a Kind of Sentry Box big enough to contain a Man and an electrical Stand. From the Middle of the Stand let an Iron Rod rise, and pass bending out of the Door, and then upright 20 or 30 feet, pointed very sharp at the End. If the Electrical Stand be kept clean and dry, a Man standing on it when such Clouds are passing low, might be electrified, and afford Sparks, the Rod drawing Fire to him from the Cloud. If any Danger to the Man should be apprehended (tho’ I think there would be none) let him stand on the Floor of his Box, and now and then bring near to the Rod, the Loop of a Wire, that has one End fastened to the Leads; he holding it by a Wax-Handle. So the Sparks, if the Rod is electrified, will Strike from the Rod to the Wire and not affect him.”

(Franklin 1751: 62-63 in *Experiments and observations on electricity made at Philadelphia in America*)

Collinson war Mitglied der Royal Society in London und trug dort den Vorschlag Franklins vor, welcher zunächst allerdings nicht allzu großen Anklang fand. Es war vor allem dem englische Mediziner, John Fothergill, zu verdanken, dass Franklins Pamphlet veröffentlicht und schließlich in ganz Europa verbreitet wurde. Bis heute ist umstritten, ob Franklin dieses beziehungsweise die berühmte abgewandelte Version mit Drachen und Schlüssel jemals selbst durchführte.

Der französische Wissenschaftler **Thomas-François D'Alibard (1709-1778)** war nachweislich der Erste, der nach den Vorgaben Franklins, am 10. Mai 1752 in Frankreich, erfolgreich zeigen konnte, dass Blitze elektrischer Natur sind. D'Alibards Versuchsaufbau ist in Abbildung 9 dargestellt. Es handelte sich um eine ca. 13 Meter hohe Eisenstange, die vertikal auf einem hölzernen, isolierenden Unterstand befestigt war. Beim Vorbeiziehen von Gewitterwolken gelang es die Aufladung des isolierten Leiters zu zeigen, indem elektrische Funken gezogen wurden (Albrecht 1885: 89).

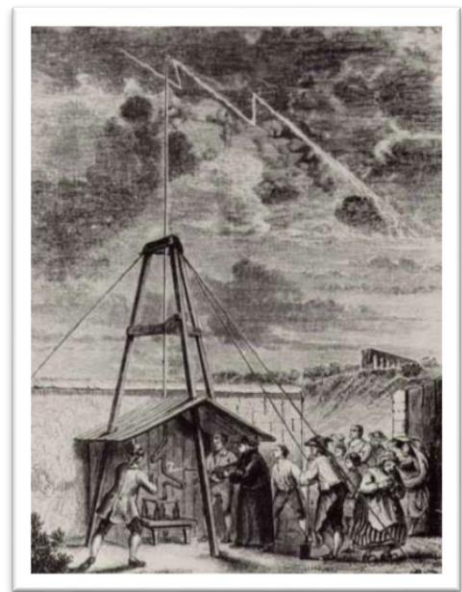


Abbildung 9: Erster Nachweis, dass Blitze elektrische Erscheinungen sind

Dieses beeindruckende Experiment wurde unzählige Male kopiert und schon im Juni 1752 konnte ein weiterer bedeutender Schritt auf dem Weg zur Erforschung der Luftelektrizität gemacht werden. Bis dahin war nämlich alle Aufmerksamkeit ausschließlich auf Geschehnisse während eines Gewitters gerichtet und obwohl Blitzforschung auch heute noch zentraler Bestandteil in der Erforschung des globalen elektrischen Stromkreises ist, bedurfte es der entscheidenden weiteren Erkenntnis, dass Elektrizität in der Atmosphäre nicht nur bei Gewittern vorhanden ist, sondern auch bei Schönwetterverhältnissen.

Diese Entdeckung verdanken wir dem französischen Naturwissenschaftler **Louis-Guillaume Le Monnier (1717-1799)**. Auch er arbeitete, wie D'Alibard, mit einer langen Holzstange, an die ein spitzer Eisenstab glasisoliert befestigt war und von welchem ein langer Draht in ein Gebäude führte. Le Monnier brachte nun Staub in die Nähe des Drahtendes, um dessen elektrostatische Anziehung an den Draht zu beobachten. Interessanterweise stellte er fest, dass diese Anziehung nicht nur bei wolkigem Himmel oder Gewitter bestand, sondern auch bei Schönwetter. Die Schlussfolgerung war, dass in der Atmosphäre stets Elektrizität vorhanden sein musste (Israel 1957: 3-4). Die Untersuchungen weiteten sich ab nun auf die Schönwetterelektrizität aus.

Le Monniers Entdeckung folgend, konnte der Italiener **Giovanni Battista Beccaria (1716-1781)** bald auch schon regelmäßige tageszeitliche Schwankungen des elektrischen Zustandes der Atmosphäre sowie das Vorhandensein unterschiedlicher Arten von Elektrizität feststellen. Bei Schönwetter registrierte er die sogenannte Glaselektrizität, was aus heutiger Sicht einem positiven Feld entspricht; bei Gewitter hingegen vorwiegend Harzelektrizität, was einem negativen Feld gleich kommt (Israel 1957: 4).

Eine weitere bedeutende Entdeckung, die zu jener Zeit von **Charles Augustin de Coulomb (1736-1806)** gemacht wurde, war die Beobachtung, dass auch ein bestens isolierter Leiter in der Luft langsam seine Ladung verlor. Coulomb schloss folgerichtig, dass die Luft offenbar leitfähig ist. Dieses Erkenntnis war damals jedoch mangels Wissen über die noch unbekannten Ionen nicht nachvollziehbar und somit inakzeptabel. Erst rund 100 Jahre später sollte sie durch Hans Geitel und Julius Elster, beide Schüler Franz Exners, wiederentdeckt und entsprechend gewürdigt werden (Israel 1957: 4).

Die neue Erkenntnis, dass Elektrizität ständig in der Atmosphäre besteht und dass verschiedene Arten ihrer auftreten, warf natürlich neue Fragen auf wie beispielsweise was und wo denn die Quelle dieser Elektrizität ist. Das Interesse am Forschungsgebiet Luftelektrizität stieg enorm an und die Wissenschaftler waren sich einig, dass

umfassende Beobachtungen und vor allem Messungen zur Beantwortung dieser Fragen beitragen sollten.

4.3 Die elektrostatische Periode im 19. Jahrhundert

Der Fortschritt auf dem Gebiet dieser Messgeräte geht selbstverständlich einher mit dem jeweiligen Wissenstand auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre und der damit verbundenen Wandlung der luftelektrischen Grundanschauungen. An die ersten Versuchsaufbauten nach Franklins Entwurf, die rein qualitative Ergebnisse lieferten, schloss eine bis spät ins 19. Jahrhundert andauernde Periode an, die atmosphärische Elektrizität als rein elektrostatisches Phänomen betrachtete und folglich eine Reihe von elektrostatischen Messapparaturen hervorbrachte.

Ein Kernstück dieser Diplomarbeit ist dabei das Exnersche Elektroskop. Neben der weiteren chronologischen Darstellung der laufend neuen Erkenntnisse, soll daher insbesondere auf die Entwicklung elektrostatischer Messgeräte bis hin zum Exnerschen Elektroskop näher eingegangen werden.

John Canton (1718-1772), entwarf 1753 eines der ersten Elektroskope, das für luftelektrische Messungen herangezogen wurde. Damit konnte er nachweisen, dass Wolken sowohl positive als auch negative Ladung besitzen. Cantons Konstruktion bestand aus zwei Korkkugeln, die an miteinander verbundenen Leinenfäden aufgehängt waren (s. Abb. 10). Gemäß dem Coulombschen Kraftgesetz, stießen sich die beiden Kugeln bei Aufladung voneinander ab (Canton 1753: 350-58). Exakte Werte dieser Kraftwirkung ließen sich selbstverständlich noch nicht ermitteln. Jedoch konnten geladene

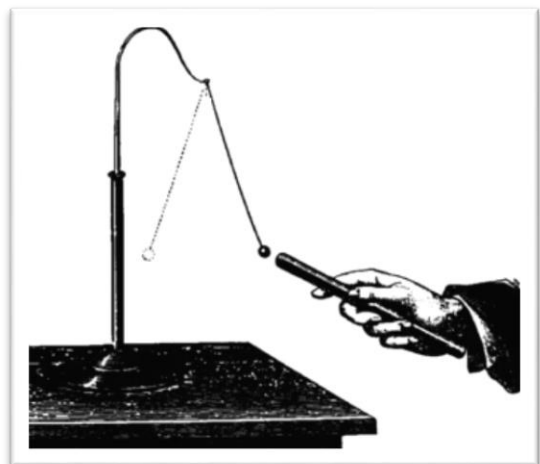


Abbildung 10: Einfaches Fadenelektroskop

Körper gemäß den beiden unterschiedlichen Ladungsarten differenziert werden und zumindest eine qualitative Aussage gemacht werden.

Eine wesentliche Verbesserung der Cantonschen Anordnung ist dem Schweizer Physiker **Horace Benedict de Saussure (1740-1799)** zu verdanken, der erstmals imstande war, quantitativ vergleichbare Resultate zu liefern. Sein Gerät bestand aus zwei an Silberdrähten befestigten Holundermarkkugeln im Inneren eines von einem Metallgehäuse umgebenen Glasgefäßes (s. Abb. 11). Wie auch schon bei Canton waren die Drähte miteinander verbunden und so stießen sich die Kugeln bei Aufladung voneinander ab. Die Verwendung eines schützenden Gehäuses war zu dieser Zeit schon üblich. Neu war jedoch eine Skalierung am Glasgehäuse anhand derer aufgrund des Auslenkungswinkels von der Vertikalen auf die Ladungsmenge rückgeschlossen werden konnte. Ein weiterer Vorteil war, dass seine Apparatur recht kompakt und somit geeignet für Reisen war (Chalmers 1957: 5-7).



Abbildung 11:
Elektroskop von
Saussure

Mit seinem tragbaren Messgerät führte er zwischen den Jahren 1785 und 1788 zahlreiche Messungen in Genf und dem nahegelegenen über 3000 Meter hohen Col du Géant im Mont Blanc Massiv durch. Dabei konnte er nun experimentell zwei wichtige Beobachtungen Beccarias bestätigen (vgl. S. 41). Erstens, dass die Messungen bei Schönwetter ausnahmslos positives Vorzeichen tragen. Und zweitens, dass sowohl tageszeitlich als auch jahreszeitlich periodische Schwankungen auftreten. Im Winter ergaben sich die höchsten Werte, im Sommer die niedrigsten. Der Tagesgang wies in Genf zwei Maxima auf, die jeweils einem Minimum folgten. Die Beobachtungen deuteten darauf hin, dass die Extremwerte mit dem Sonnenaufgang bzw. Sonnenuntergang in Verbindung standen. In den Bergen fand er nur ein Maximum und ein Minimum; die tiefsten Werte gegen vier Uhr morgens, die höchsten am frühen Nachmittag (Israel 1957: 6).

Messtechnisch führte De Saussure erstmals die sogenannte *influenz-elektrische Methode* mittels bewegten Leiters (Israel 1957: 5) ein, bei der das ganze System bewegt wurde. Die Apparatur war nach oben hin von einem Metallstab überragt. Hob er das zuvor am Boden stehende Messgerät im Freien isoliert hoch, so konnte er ein Auseinanderstreben der Kugeln beobachten, das mit zunehmender Höhe immer stärker wurde. Beim Herabsenken ging der Ausschlag wieder zurück. Wurde das Gerät in der Höhe aber geerdet, so konnte man beim Senken abermals ein Auseinanderspreizen sehen, allerdings von ‚entgegengesetzter Elektrizität‘. De Saussure interpretierte seine Beobachtungen schon damals als „Influenzwirkung positiver Ladungen in höheren Luftschichten“ (Israel 1957: 5).

Paul Erman (1764-1851) bezweifelte diese Hypothese und mutmaßte, dass die Erde ursprünglich negativ geladen ist und dies allein die Ursache für die vermeintlichen Influenzerscheinungen durch positive Massen ist. Dreißig Jahre später knüpfte **Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845)** an diese These an und erkannte mit einem etwas umgebauten Saussureschen Elektroskop, dass man nicht sagen konnte, ob die Abstoßungen der Kugeln von positiven Luftladungen oder von einer negativen Erdladung her rührten. Eine absolute Potentialmessung war also nicht möglich. Auf dieser Erkenntnis basierend formulierte er ein neues Bild, das auch den Ursprung der Elektrizität beinhaltet und von Israel zusammenfassend wie folgt beschrieben wird:

„Die Erde ist negativ geladen. Die Luft „weniger negativ“, erscheint also, da nur Differenzen des elektrischen Zustandes gemessen werden können, positiv. Das verdampfende Wasser nimmt negative Ladung von der Erde mit in die Luft, erzeugt so die beobachteten Variationen des atmosphärisch-elektrischen Zustandes und gibt die Erklärung für die Elektrifizierung von Wolken, Nebel, Gewitter usw.“ (Israel 1957: 8)

Diese Sichtweise wird, wie wir noch sehen werden, Franz Serafin Exner als Ausgangspunkt für seine eigene Theorie dienen.

Die Idee, dass die Luftelektrizität an den Wasserkreislauf gekoppelt ist, stammt im Übrigen von **Alessandro Volta (1745-1827)**. Er stellte 1782 die These auf, dass mit

dem Wasserkreislauf in der Atmosphäre, ein Transport von Elektrizität verbunden ist und auf diese Weise elektrische Ladungen in die Atmosphäre gelangen. Seiner Vermutung nach war für den Übergang von flüssigem Wasser zu Wasserdampf eine bestimmte Menge an positiver Elektrizität notwendig. Diese positiven Ladungen verließen beim Verdampfungsvorgang die Erdoberfläche, wodurch die Erde eben negativ geladen zurückblieb und die Luft positiv geladen wird (Chalmers 1967: 82).

Messtechnisch führte Volta eine völlig neue Technik ein. Bislang war ausschließlich mit metallischen Spitzen oder Drähten gearbeitet worden um Ladungen aus der Luft ‚zu sammeln‘. Dieser Vorgang bedurfte natürlich einiger Zeit. Volta beobachtete nun, dass ein Leiter, der in Kontakt mit einer Kerzenflamme oder einer Lunte gebracht wurde, viel schneller Ladungen aus der Luft aufzusammeln vermochte. Damals war die Existenz von Luftionen gänzlich unbekannt. Man glaubte vielmehr, dass Luft ein Isolator war und keinerlei Leitfähigkeit besäße (Volta 1776: 145-198, Volta 1778: 210-237).

Heutzutage weiß man, dass die Flamme als Potentialausgleicher fungiert, die geladene Partikel und Ionen liefert, die den Leiter schnell auf das Umgebungspotential bringen. Die von Volta gefundene Methode ist eine der Kollektormethoden, auf deren Basis Potentialsonden arbeiten. Die neue Technik war also imstande den Messvorgang von mitunter sogar etlichen Stunden auf wenige Minuten zu verkürzen. So konnte nun auch unter sich rasch ändernden Bedingungen gemessen werden.

Alle bisherigen Methoden brachten zwar schon quantitative Ergebnisse, doch es gab noch keine einheitliche Messgröße, die einen direkten Vergleich zwischen den von den einzelnen Forschern ermittelten Messdaten erlaubte. Bedeutende Fortschritte sind in dieser Hinsicht dem britischen Physiker **William Thomson (1824-1907)**, dem späteren Lord Kelvin, zu verdanken. Thomson trug wesentlich zur Erforschung auf dem Gebiet der Elektrostatik bei und wandte dieselben Vorstellungen nun auch auf die Lufterlektrizität an. Er bezeichnete als Erster den elektrischen Zustand der Atmosphäre als Feld und führte 1860 den Begriff des elektrischen Potentials ein (Chalmers 1967:

8). Somit war die Messgröße Potentialgefälle eingeführt, die damals als „Änderung, die das Potential an einem Punkte der Atmosphäre nach oben zu für eine Vertikalzunahme von 1 m erfährt, ausgedrückt in Volt (gewöhnlich bezeichnet mit $(dv)/(dn)$, in Volt/Meter)“ definiert wurde (Meyers 1908: 802-809).

Thomson leitete auch in messtechnischer Hinsicht eine neue Ära ein, indem er die ersten Präzisionsinstrumente entwickelte. Um die gewonnenen Daten optimal verwerten zu können, entstand der Wunsch diese auch aufzeichnen zu können. Thomson trug dabei wesentlich zur Entwicklung neuer Registrierverfahren bei und sorgte im Jahre 1861 für die Einrichtung der ersten Dauerregistrierung des Potentialgefälles in der ältesten luftelektrischen Station, dem Observatorium Kew bei London (Aplin 2013: 7).

Große Anerkennung fand auch das von ihm konstruierte Quadrantenelektrometer. Der große Vorteil war, dass es äußerst präzise Ergebnisse lieferte und zudem keiner aufwändigen Eichkurve bedurfte wie alle bisherigen Elektroskope. Abbildung 12 zeigt schematisch den Aufbau dieses Messinstrumentes. Es besteht aus einer hohlen

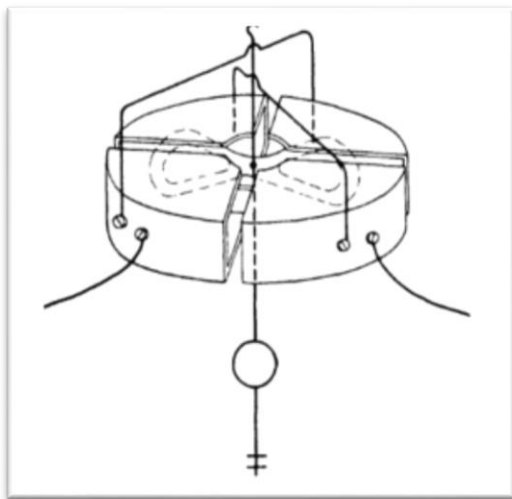


Abbildung 12: Quadrantenelektrometer nach W. Thomson (Lord Kelvin)

zylinderförmigen Messingbüchse, die in vier Quadranten aufgeteilt ist. Jeweils zwei diagonal liegende Quadranten sind leitend miteinander verbunden und auf gleichem Potential. Im Inneren der Quadranten ist eine Aluminiumnadel an einem Torsionsfaden frei schwebend aufgehängt, der durch das Loch in der Mitte geht und am oberen Deckel des ganzen Gerätes befestigt ist. Unterhalb der Messingbüchse ist am Faden ein Spiegel befestigt. Der Nadel und einem Quadrantenpaar wird die Messladung zugeführt. Bei Aufladung

wird die Messladung von einem Paar abgestoßen und vom anderen angezogen. Dabei verdrillt sich der Faden. Der Auslenkungswinkel kann mit Hilfe eines Lichtstrahls, der am Spiegel reflektiert und auf eine Skala umgelenkt wird, abgelesen werden. Er ist der

zwischen den Quadrantenpaaren herrschenden Potentialdifferenz proportional (Kottler 1927: 400-402, Gobrecht 1971: 64-65).

So präzise Thomsons Geräte arbeiteten, hatten sie doch einen entscheidenden Nachteil. Sie waren enorm empfindlich und wurden deshalb hauptsächlich an fixen Messstationen eingesetzt. Als mobile Geräte für Reisen waren sie nicht tauglich. Nun muss man aber bedenken, dass bei fixen Stationen, allein schon durch die Anwesenheit der Gebäude, immer Verzerrungen des luftelektrischen Feldes auftreten. Es war damals nicht üblich Reduktionsmessungen in der freien Ebene durchzuführen, was zur Folge hatte, dass die gewonnenen Daten der Fixstationen nicht miteinander vergleichbar waren und so wenig zu einer auf wissenschaftlichen Grundlagen basierenden Untersuchung des Phänomens Luftelektrizität beitragen konnten.

Dieser Umstand wurde zu Recht von **Franz Serafin Exner (1849 – 1926)** scharf kritisiert und sogleich eine Lösung dafür angeboten (Exner 1887: 1086-1088). Der nächste große Fortschritt am Gebiet der Messtechnik wurde von Franz Serafin Exner erbracht, indem er ein ebenfalls äußerst genaues und zudem noch tragbares und leicht handzuhabendes Elektroskop entwickelte. Nicht nur die geforderten Reduktionsmessungen konnten damit einfach durchgeführt werden. Das robuste Gerät erlaubte es nun überall auf der Welt Präzisionsmessungen nach gleichartigen Kriterien vorzunehmen. Erstmals konnten wirklich vergleichbare Daten gesammelt werden, was die Basis für eine wissenschaftlich fundierte Bearbeitung bildete.

Diese neue Möglichkeit und Exners motivierendem Geiste ist es zu verdanken, dass Ende des 19. Jahrhunderts eine große Menge an qualitativ hochwertigem Material zur weiteren Forschung zur Verfügung stand. Exners Theorie zum Ursprung der Luftelektrizität wurde bereits in Kapitel 3 behandelt. Mit Franz Serafin Exner war gleichzeitig sowohl der Höhepunkt als auch das Ende der elektrostatischen Periode der Luftelektrizität erreicht. Die entscheidenden letzten Messungen, die Exners Theorie bekräftigen sollten, lieferten widersprüchliche Ergebnisse und eine neue Entdeckung hinsichtlich der Eigenschaften der Luft führte schließlich zur endgültigen Abkehr von einer rein elektrostatischen Sichtweise.

4.4 Moderne Periode der Luftelektrizität

Diese neue bedeutende Entdeckung war die Leitfähigkeit der Luft. Luft wurde – wie alle Gase – zu Exners Zeiten generell als Isolator betrachtet. 1887 kam jedoch **W. Linß** durch die Beobachtung von elektrischen Zerstreuungsvorgängen (Entladungsvorgängen) zu der Ansicht, dass Luft elektrisch leitend ist (Linß 1887: 355). Coulomb, der schon etwa 100 Jahre zuvor dieselbe Behauptung aufgestellt hatte, war bei seinen Zeitgenossen auf Unverständnis gestoßen. Auch Linß wurde zunächst wenig Beachtung geschenkt, da es noch keine geeignete Erklärung für die Zerstreuung von Elektrizität in der Luft gab.

Erst als eine Reihe von Analogien zwischen der Elektrizitätsleitung in Flüssigkeiten und in Gasen aufgestellt wurden, war die Zeit reif für eine *Ionentheorie der Atmosphäre*, die mit **Julius Elster (1854–1920)** und **Hans Friedrich Geitel (1855–1923)** ihren Anfang nahm. Ziemlich zeitgleich mit Aufkommen der Ionentheorie in Gasen, kam es zur Entdeckung der Radioaktivität, was Elster und Geitel dazu veranlasste, die Existenz von Luftionen radioaktiven Vorgängen in der Atmosphäre zuzuschreiben (Mühleisen 1974: 155-165). Offenbar war energiereiche Strahlung imstande, aus elektrisch neutralen Atomen und Molekülen, sogenannte Ionen zu bilden; d.h. die neutralen Teilchen werden unter Einwirkung energiereicher Strahlung in positive und negative Ladungsträger aufgespalten. Strahlung, die genügend Energie hat, um einen solchen Ionisierungsprozess einzuleiten, wird seither ionisierende Strahlung genannt. Noch herrschte Unklarheit darüber, woher diese Strahlung eigentlich käme.

Die Erforschung des faszinierenden Phänomens Radioaktivität ging in rasanten Schritten voran und schon bald wusste man über terrestrische Strahlungsquellen gut Bescheid. Es war bekannt, dass beim Zerfall von radioaktivem Gestein, Ionen aus Poren im Erdboden austraten und in die Luft entwichen. Daher wurde anfangs eine Emanation irdischer Quellen als Ursache radioaktiver Spuren in der Luft angenommen

(Israel 1957, Luftelektrizität und Radioaktivität: 104). Man sollte daher annehmen, dass der Ionisationsgrad der Luft mit zunehmender Entfernung vom Erdboden abnimmt.

Es war ein Schüler Franz Serafin Exners, der hier jedoch eine entscheidende neue Entdeckung machte. **Victor Franz Hess (1883 – 1964)**, der zwischen 1910 und 1920 als Assistent am II. Physikalischen Institut der Universität Wien arbeitete, entdeckte bei der letzten seiner insgesamt sieben Ballonfahrten, am 7. August 1912, die kosmische Strahlung, auch Höhenstrahlung genannt, wofür ihm 1936 der Nobelpreis für Physik verliehen wurde. Ausgerüstet mit mehreren Apparaten für die Messung von Beta- und Gammastrahlen, registrierte er ab etwa 3000 m über dem Erdboden mit steigender Höhe ein rasantes Ansteigen der Intensität dieser ionisierenden Strahlung. Die maximale Höhe des Aufstiegs war 5350 m, wo ein Vielfaches der Bodenwerte gemessen wurde. Da die Ionenkonzentration in geringeren Höhen also deutlich kleiner war, war klar, dass die ionisierende Strahlung in großen Höhen extraterrestrischen Ursprungs sein muss (Hess 1912: 2001-2032).

Der Wunsch, immer größere Höhen der Atmosphäre untersuchen zu wollen, wurde immer dringlicher. Schon 1902 wurde vom britischen **Physiker Oliver Heaviside (1850-1925)** und fast zeitgleich vom amerikanischen Ingenieur **Arthur Edwin Kennelly (1861-1939)** gemutmaß, dass sich in großen Höhen der Atmosphäre eine hochleitfähige Schicht befinden soll (Rakov 2003: 435-437). Diese sogenannte ‚Kennelly-Heaviside-Schicht‘ wurde 1924 von **Edward Victor Appleton (1892-1965)** tatsächlich entdeckt (Rakov 2003: 435). Sie wurde als positive Gegenelektrode zur negativ geladenen Erdkugel angesehen. Damit war der Vergleich mit einem Kugelkondensator geboren. Zwischen diesen beiden Elektroden besteht ein elektrisches Feld in welchem, aufgrund der Leitfähigkeit der Luft, stets ein schwacher Vertikalstrom Richtung Erde fließt. Messungen zeigten, dass zwischen den beiden Polen eine Potentialdifferenz von ungefähr 250 kV und ein dauernder Stromfluss von rund 1500 Ampere besteht (Israel 1964: 33).

Diese Anschauung warf ein weiteres Problem auf. Es wurde berechnet, dass ein Ladungsausgleich in weniger als einer halben Stunde stattfinden würde. Da das elektrische Feld der Erde jedoch beständig ist, muss es offenbar irgendeinen Mechanismus geben, der diesem Feldabbau entgegenwirkt. Wurde zu Exners Zeiten ausschließlich von einem statischen Feld ausgegangen, so geht es nunmehr darum, die auf- und abbauenden Prozesse eines dynamischen, aber stationären Feldes herauszufinden.

Licht ins Dunkel brachten die Ergebnisse des Forschungsschiffes Carnegie, eines fast gänzlich aus Holz gebauten Segelschiffes, das zwischen 1909 und 1929 im Auftrag des Carnegie Institutes in Washington eine Reihe geophysikalischer Untersuchungen auf den Weltmeeren unternahm. Auf vier der insgesamt sieben Forschungsreisen wurde unter anderem die atmosphärische Elektrizität untersucht. Auch hier machte



Abbildung 13: Das Forschungsschiff Carnegie

sich die Wichtigkeit passender Messgeräte bemerkbar. Waren auf den ersten Reisen noch gewaltige Probleme bezüglich unruhigem Seegang, Feuchtigkeit, Wasserspritzer und dergleichen präsent, war die Messausrüstung bei der vierten Reise schon so adäquat, dass eine kontinuierliche fehlerfreie Aufzeichnung des elektrischen Feldes

auf dem Ozean klaglos gelang. Das Ergebnis ist die auch heute noch für die Meteorologie bedeutende Carnegie Kurve (Harrison 2013: 209-211), die in Kapitel 6 genauer beschrieben wird. Damit konnte gezeigt werden, dass der Tagesgang des elektrischen Feldes eine weltzeitliche Abhängigkeit aufwies (Harrison 2013: 209-211). Diese Erkenntnis und das Wissen um eine leitende Schicht in höheren Schichten der Atmosphäre waren von äußerster Wichtigkeit für die Entwicklung der heute gültigen Sichtweise eines globalen elektrischen Stromkreises in der Atmosphäre. Das ursprüngliche Konzept eines globalen elektrischen Stromkreises geht auf C.T.R. Wilson (1920, 1929) zurück (Roble 1986: 206).

5 DER GLOBALE ELEKTRISCHE STROMKREIS

Kannte man zur Zeit Franz Serafin Exners einzig das Potentialgefälle zwischen zwei Punkten innerhalb der Atmosphäre zur Beschreibung von Luftelektrizität, brachte die Wissenschaft innerhalb von rund 100 Jahren eine Reihe weiterer elektrischer Parameter hervor, welche die elektrischen Eigenschaften unserer Atmosphäre möglichst vollständig beschreiben sollen. Mit der Abkehr von einer rein elektrostatischen Sichtweise der Elektrizitätsvorgänge in der Atmosphäre verließen die Forscher allerdings auch den Weg, der luftelektrische Ereignisse in engem Zusammenhang mit meteorologischen Vorgängen sah. Es sollte viele Jahrzehnte dauern, bis dieser Zusammenhang wiederentdeckt wurde und schließlich zur heutigen Sichtweise eines globalen Stromkreises führte.

Heute werden sämtliche elektrische Vorgänge und Erscheinungen in der Erdatmosphäre unter dem Begriff *„Globaler Elektrischer Stromkreis“* zusammengefasst. Es handelt sich um ein interdisziplinäres Forschungsgebiet, das Bereiche der Physik (Teilchen-, Atmosphären-, Umwelt-, Aerosol-, Geophysik), Meteorologie, Chemie, Ingenieurwesen, Luft- und Raumfahrttechnik etc. umfasst.

Die genauen Kenntnisse über die Vorgänge in der Atmosphäre sind nicht nur für die Meteorologie wichtig, um präzise Aussagen über Wettervorgänge zu ermöglichen. In den letzten Jahrzehnten erkannte man die enge Verknüpfung mit dem globalen Klimawandel. Aus diesem Grund wurden und werden immer neuere und bessere Modelle entwickelt, die den globalen elektrischen Stromkreis anschaulich zu erklären versuchen. Führend ist zur Zeit die Universität Boulder in Colorado (NSF 2012). Ein Forscherteam von über 100 Mitarbeitern arbeitet derzeit an der Entwicklung eines numerischen Modells, welches Simulationen über die komplexen Vorgänge der vielen Kreisläufe, die in der Atmosphäre stattfinden und miteinander verwoben sind, anschaulich darstellen soll. Es handelt sich dabei um ein fünfjähriges Projekt, das im Laufe des Jahres 2016 abgeschlossen werden soll.

Bevor der derzeitige Stand des globalen elektrischen Stromkreises vorgestellt wird, ist ein Überblick über den Aufbau der Erdatmosphäre sowie eine kurze Einführung in die Ionenphysik notwendig.

5.1 Aufbau der Atmosphäre

Unsere Erde ist aufgrund der Gravitation von einer Lufthülle umgeben, die aus einer Reihe von verschiedenen Gasmolekülen besteht, welche teils elektrisch neutral, teils in ionisierter Form vorliegen. Die Konzentration an Gasmolekülen ist aufgrund der Schwerkraft in den unteren Atmosphärenschichten am größten und verringert sich mit Entfernung von der Erdoberfläche um schließlich in den nahezu materielosen Weltraum überzugehen. Dichte und Druck nehmen daher mit zunehmender Höhe ab. Die Erdatmosphäre kann nach verschiedenen Kriterien in einzelne Schichten gegliedert werden. Zum Verständnis luftelektrischer Phänomene empfehlen sich die folgenden beiden Einteilungen.

5.1.1 Einteilung der Atmosphäre nach ihrem Ionisierungsgrad

Hier werden zwei Hauptschichten unterschieden: die Neutrosphäre und die Ionosphäre. Erstere erstreckt sich bis zu einer Höhe von bis zu 80 km und ist dadurch gekennzeichnet, dass die vorhandenen Atome und Moleküle vorwiegend elektrisch neutral sind. Darüber erstreckt sich die Ionosphäre über mehrere hundert Kilometer, die dadurch charakterisiert ist, dass die Anzahl an elektrisch geladenen Teilchen bis zu einer Höhe von ca. 500 km über dem Erdboden stetig zunimmt. Grundsätzlich gibt es zwei Ionisationsquellen. In den oberen Atmosphärenschichten überwiegt die Bildung von Ionen durch energiereiche Sonnenstrahlung und kosmische Strahlung; im unteren Bereich kommt die Ionisation von Luftmolekülen auch durch terrestrische radioaktive Quellen zustande, vor allem Radon.

5.1.1.1 Neutrosphäre

Von der Erdoberfläche bis in Höhen von etwa 60 – 80 km spricht man von einer elektrisch neutralen Zone (Neutrosphäre). Das bedeutet, dass sich anzahlsmäßig relativ wenig Ionen in der Luft befinden. Hauptsächlich handelt es sich hier um *Kleinionen*. Die Entstehung von Kleinionen läuft folgendermaßen ab (Israel1957/Luftelektrizität und Radioaktivität: 20-21):

Grundsätzlich entstehen Ionen, wie in Kapitel 4.4. bereits erwähnt, wenn einem ursprünglich elektrisch neutralen Atom oder Molekül ein oder mehrere Elektronen entrissen werden und es so zu einem Ladungsungleichgewicht innerhalb des Teilchens kommt. Dies kann beispielsweise durch energiereiche Strahlung geschehen; das Resultat ist dann ein negativ geladenes freies Elektron und ein positiv zurückbleibendes Atom- bzw. Molekül-Ion.

Freie Elektronen können in einem Gas jedoch nicht lange isoliert existieren, es sei denn sie hätten ausreichend kinetische Energie, was aber in der Neutrosphäre praktisch nicht vorkommt. Wird also ein Elektron aus einem Teilchen entrissen, ist es für kurze Zeit frei, wird aber ziemlich schnell von einem anderen bislang neutralen Atom- oder Molekülverband aufgenommen. Dieser weist jetzt ebenfalls ein Ladungsungleichgewicht auf und wird zu einem negativen Ion.

Egal ob es sich um negative oder positive Ionen handelt, beide sind nicht beständig und umgeben sich mit anderen neutralen Molekülen. Bei Komplexgebilden, auch cluster genannt, von etwa 10 – 30 Molekülen, spricht man von Kleinionen. Sie sind es, die hauptsächlich für die Leitfähigkeit der Luft in den unteren Atmosphärenschichten verantwortlich sind. Neben Kleinionen findet man in geringerer Anzahl auch sogenannte Großionen, die durch Anlagerung von Kleinionen an neutrale Teilchen entstehen. Der Unterschied zwischen diesen beiden Ionenarten ist die Größe und ihre Beweglichkeit.

5.1.1.2 Die Ionosphäre

Die Ionosphäre ist ein dynamisches, sich laufend veränderndes System. Jegliche Änderung in der Atmosphäre wirkt sich auf die Ionenverteilung aus; somit kann die Ionosphäre als empfindlicher Indikator für atmosphärische Ereignisse herangezogen werden. Messungen der Ionosphäre werden mittels geostationärer Ionosonden durchgeführt. Die erhaltenen Ionogramme sind wichtige Bestandteile des globalen elektrischen Stromkreises (NSF 2012: 12).

Die Ionisation der höheren Atmosphärenschichten hängt in erster Linie von der Sonne und ihrer Aktivität ab. Die Ionisierung von Luftmolekülen erfolgt hier hauptsächlich durch energiereiche Gamma-, Röntgen- und UV-Strahlung im Sonnenlicht sowie durch Strahlung von den Sonnenwinden und kosmische Strahlung. Die Sonne ist hauptverantwortlich für die Bildung von Ionen, gefolgt von kosmischer Strahlung.

Wie in Abbildung 14 (links) ersichtlich, erstreckt sich die Ionosphäre von ca. 80 km über dem Erdboden beginnend über mehrere hundert Kilometer hinweg. Das Charakteristische ist die große Anzahl an elektrisch geladenen Teilchen, Ionen oder freien Elektronen. Die Existenz dieser großen Anzahl an geladenen Teilchen in den oberen Atmosphärenschichten wirken wie die Gegenelektrode zur Erde, vergleichbar mit einem riesigen Kugelkondensator.

Es gibt eine weitere Unterteilung in D-, E-, und F-Schicht, wobei das Dichtemaximum an geladenen Teilchen in letzterer zu finden ist. Die teils sehr großen Schwankungen in sowohl Dichte als auch Struktur der Teilchen unterliegen den Schwankungen der Sonnenaktivität, welche sich nicht nur in einem 24-Stunden-Rhythmus äußern, sondern auch im äußerst variablen 11-Jahres-Sonnenflecken-Zyklus. Von Einfluss sind außerdem Veränderungen in der Sonnenrotation und Sonneneruptionen (NSF 2012: 7).

Der Zustand der Ionosphäre ändert sich nicht nur zeitlich, sondern hängt auch von der geographischen Lage ab (polare Breiten, Aurorenzone, mittlere Breiten und Äquatorialregionen). Bei Sonneneinstrahlung tagsüber expandiert die Ionosphäre und Ionen werden in die die Erde umgebende umhüllende Magnetosphäre transportiert. Bei Nacht kühlt die Ionosphäre ab und zieht sich zusammen, wodurch Ionen und freie Elektronen wieder zurückgebracht werden. Die Atmosphäre ist so von elektrischen Strömen durchsetzt, die beispielsweise an den Polen durch ein Zusammentreffen mit Plasmaströmen aus den Sonnenwinden für die berühmten Polarlichter sorgen (NSF 2012: 7).

5.1.2 Einteilung der Atmosphäre nach dem Temperaturverlauf

Eine weitere, vor allem in der Meteorologie übliche, Einteilung der Atmosphäre erfolgt nach ihrem vertikalen Temperaturverlauf. Abbildung 14 gibt einen entsprechenden Überblick. In der linken Spalte ist zudem teilweise eine Einteilung nach der Ionisierung der Gasteilchen zu sehen.

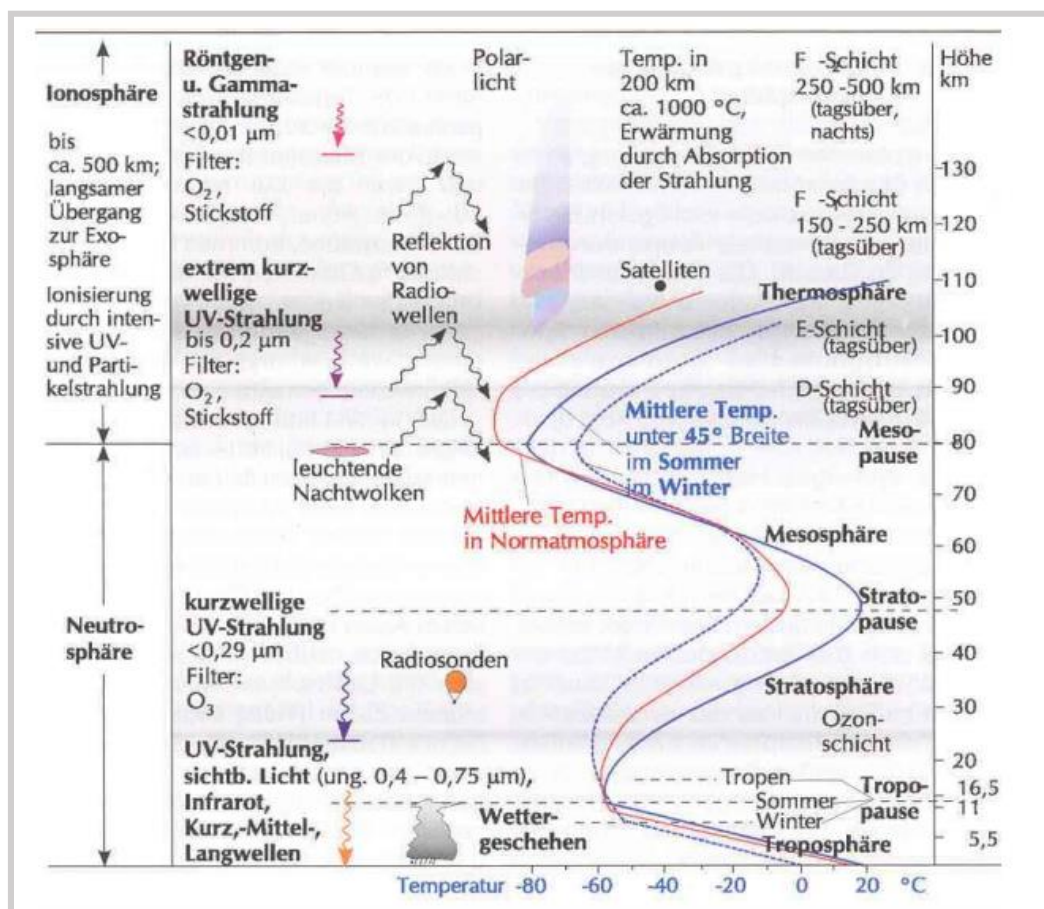


Abbildung 14: Atmosphärenschichten - links: nach Ionisierungsgrad
rechts: nach Temperatur

Die unterste Schicht wird als Troposphäre bezeichnet und beinhaltet rund 80% der gesamten Luftmasse. Sie enthält fast den gesamten atmosphärischen Wasserdampf. Wolkenbildung und fast das gesamte Wettergeschehen finden demnach hier statt. Abhängig vom geographischen Breitengrad erreicht die Troposphäre eine Dicke von etwa 8 km an den Polen und bis zu 17 km am Äquator. Die Temperatur nimmt pro 100 Höhenmeter in wolkenlosen Abschnitten um durchschnittlich 1 °C, in wolken- und nebelreichem Gebiet um rund 0,6 °C ab (Blüthgen 1980: 161).

Als Trennschicht zur Stratosphäre ist die Tropopause in einer durchschnittlichen Höhe von 11 km zu erkennen. Sie ist deshalb bedeutend, da hier sämtliche konvektive Wettervorgänge enden. Da Wasser nahezu ausschließlich konvektiv transportiert wird, ist die Atmosphäre oberhalb dieser Schicht sehr trocken und, bis auf wenige Ausnahmen, wolkenfrei (Kraus 2004: 137-147).

Daran anschließend beginnt die Stratosphäre, die in eine Höhe von circa 50 km reicht. In ihr befindet sich auch die schützende Ozonschicht, die kurzwellige UV-Strahlung des Sonnenlichts absorbiert und in Wärme umwandelt. Es kommt hier daher zu einem Temperaturanstieg. In der Stratosphäre kommt es gelegentlich zu den eher selten vorkommenden elektrischen Entladungen – den Blue Jets. Sie können oberhalb eines Gewitters erscheinen und 40 bis 50 km vom unteren Stratosphärenrand in die Höhe reichen (NSF 2012: 9).

Oberhalb der Stratosphäre findet sich die Mesosphäre, die bis zu 80 km über den Erdboden reicht und eine deutliche Abkühlung aufweist. In dieser Schicht kommt es zu Leuchterscheinungen wie Elfen und Koboide über Gewittern, die kilometerweit entfernt in unteren Schichten stattfinden (NSF 2012: 9).

Darüber erstreckt sich die Thermosphäre in Höhen von bis zu 1000 km. Abhängig von Tageszeit und Sonnenaktivität unterliegen sowohl die obere Grenze dieser Schicht als auch die Temperatur erheblichen Schwankungen. Bei hoher Sonnenaktivität können Temperaturen von bis zu 1700 °C auftreten. Dieser Anstieg ist auf die Absorption von

UV-Strahlung von Wellenlängen unter 200 nm durch Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle bzw. atomaren Sauerstoff zurückzuführen. Diese energiereichen Photonen sind imstande Gaspartikeln zu ionisieren, was aufgrund von Stoßionisation zu beträchtlichen Stromflüssen führen kann (Kraus 2004: 137-147).

Aurora (Nord- und Südlichter) werden hier erzeugt. Dabei kollidieren geladene Partikeln aus dem All mit Atomen und Molekülen und versetzen diese in einen angeregten Zustand. Bei Abregung senden diese dann die typischen Lichter aus, welche sich in den farbigen Auroraerscheinungen wiedergeben (NSF 2012: 5-16).

Mit fortschreitender Höhe wird der Einfluss der Gravitation auf die Gasmoleküle immer geringer bis sie schließlich ins Weltall entweichen können. Die Teilchendichte in der obersten Schicht der Atmosphäre, der Exosphäre, nimmt also zusehends ab und es folgt schließlich der fließende Übergang in den interplanetaren Raum.

5.2 Der globale elektrische Stromkreis

Die Erdoberfläche bildet mit der Ionosphäre annähernd einen Kugelkondensator mit gegensätzlich geladenen Elektroden. Im Schönwetterfall ist die Erdoberfläche normalerweise negativ geladen. Zwischen den beiden Elektroden bildet sich also ein elektrisches Feld von durchschnittlich 150 V/m, dessen Vektoren unter Schönwetterbedingungen nach unten Richtung Erde zeigen. Unterhalb von Gewittern ist die Erdoberfläche in der Regel positiv geladen und es können Feldstärken von einigen Tausend V/m auftreten. Die Ursachen und die Bedeutung dieser zeitweiligen Feldumkehrungen werden im Folgenden näher erläutert.

Luft ist kein perfekter Isolator, sondern hat aufgrund der Existenz von Ionen eine gewisse Leitfähigkeit. Sie wird ermittelt mit (Gringel 1977: 14)

$$\lambda(h) = e \sum_p n_p(h) \cdot k_p(h) \quad (10)$$

λ ... polare Leitfähigkeit

n_p ... Ionenkonzentration eines Vorzeichens unterteilt in Gruppen p konst. Beweglichkeit

k_p ... entsprechende Beweglichkeiten

e ... elektrische Elementarladung, $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Die Gesamtleitfähigkeit λ setzt sich aus den polaren Leitfähigkeiten λ_- und λ_+ zusammen und beträgt in der Nähe der Erdoberfläche (Gringel 1977: 14)

$$\lambda = \lambda_- + \lambda_+ \quad (11)$$

Also $\lambda \approx 0,5 - 2 \cdot 10^{-14} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$

Da die Luft elektrisch leitend ist, fließt ein schwacher Vertikalstrom von der Ionosphäre zur Erdoberfläche. Die vertikale Leitungstromdichte berechnet sich mit

$$j_z = E \cdot (\lambda_+ + \lambda_-) \quad (12)$$

und nimmt üblicherweise Werte folgende mittlere Werte an (Mühleisen 1977/Heft 2: 3):

für Land: $j_{z \text{ Land}} \approx 2 \cdot 10^{-12} \text{ A/m}^2$

für Ozeane: $j_{z \text{ Ocean}} \approx 3 \cdot 10^{-12} \text{ A/m}^2$

Auf die Gesamtoberfläche der Erde umgelegt, ergibt das einen Gesamtvertikalstrom von ungefähr

$$I_z = \int j_z \cdot dA \approx 1300 \text{ A} \quad (13)$$

Also $I_z = 1300 \text{ A}$

Aus jahrelangen Feldstärkemessungen als Funktion der Höhe $E(h)$ weiß man, dass zwischen der Erdoberfläche und der Ionosphäre eine Spannung

$$U_{\text{Erd-Iono}} = \int E(h) dh \quad (14)$$

von $U_{Erd-Iono} \approx 150 - 400 \text{ kV}$

herrscht (Mühleisen 1977/Heft 2: 3).

Ausgehend von einem Mittelwert von 280 kV (Mühleisen 1977/Heft 2: 3) erhält man laut Ohmschen Gesetz

$$R = \frac{U_{E-I}}{I_z} \quad (15)$$

einen Luftsäulenwiderstand R von

$$R = \frac{280 \text{ kV}}{1300 \text{ A}} = 215 \Omega$$

Die Flächenladungsdichte σ berechnet sich mit

$$\sigma = \varepsilon_0 \cdot E \quad (16)$$

$\varepsilon_0 \dots \text{elektrische Feldkonstante: } 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$

Bei einer angenommenen Feldstärke von $E = 150 \text{ V/m}$ ergibt das

$$\sigma \approx 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ C}.$$

Die Gesamtladung Q_{Erde} der Erdoberfläche

$$Q_{Erde} = \sigma \cdot 4\pi \cdot r^2 \quad (17)$$

ergibt somit $Q_{Erde} \approx 6,6 \cdot 10^5 \text{ C}$

Die „Entladezeit t des Kugelkondensators“

$$t = \frac{Q_{Erde}}{I_z} \quad (18)$$

wäre somit $t = \frac{6,6 \cdot 10^5 \text{ C}}{1300 \text{ A}} = 510 \text{ s}$

Das würde bedeuten, dass sich der gigantische Kondensator in weniger als 10 Minuten entladen würde.

Die bisherige Beschreibung der Stärke und der Richtung des elektrischen Feldes war ausschließlich auf den Schönwetterfall beschränkt. Bei Schönwetter fließen der Erde also mehrheitlich positive Ladungen zu. Wie obiger Berechnung zu entnehmen ist, würde dieser Ladungsfluss das E-Feld ziemlich bald abbauen. Welche Vorgänge sind aber nun dafür verantwortlich, dass die Potentialdifferenz und somit das elektrische Feld der Erde, beständig bleibt? Mit der Beantwortung dieser Frage kehren wir in die Anfangszeit der Lufterlektrizitätsforschung zurück, als Blitze und Gewitter voll Faszination untersucht wurden.

Der schottische Physiker **Charles Thomson Rees Wilson** (1869-1959) konnte 1920 erstmals zeigen, dass Gewitter negative Ladungen zur Erde bringen (Roble 1986: 206). Aufgrund dieser Beobachtung war er auch der Erste, der die Idee eines globalen elektrischen Stromkreises vorschlug. Tatsächlich sind es nicht nur Gewitter, die zur Aufladung des Kondensators beitragen. Auch Niederschläge, Blitze und elektrifizierte Wolken fungieren als mächtige Generatoren. Tagtäglich toben weltweit an die 40.000 Gewitter und etwa 100 Blitze gehen pro Sekunde auf die Erde nieder (Feynman 2013/Ch. 9: 5).

Die Verknüpfung zwischen Stärke des E-Feldes und Gewittertätigkeit wurde durch einen Vergleich des weltweiten Tagesganges des Potentialgefälles (Abb. 15 oben) mit der weltweiten Gewittertätigkeit (Abb. 15 unten) offensichtlich. Es zeigt sich die starke Korrelation zwischen den beiden Phänomenen. Die höchsten Werte für das Potentialgefälle decken sich mit der höchsten Gewitteraktivität um etwa 19:00 GMT. Diese Übereinstimmung wurde 1936 von F.J.W. Whipple und F. J. Scrase (Whipple, Scrase 1936: 20) gefunden.

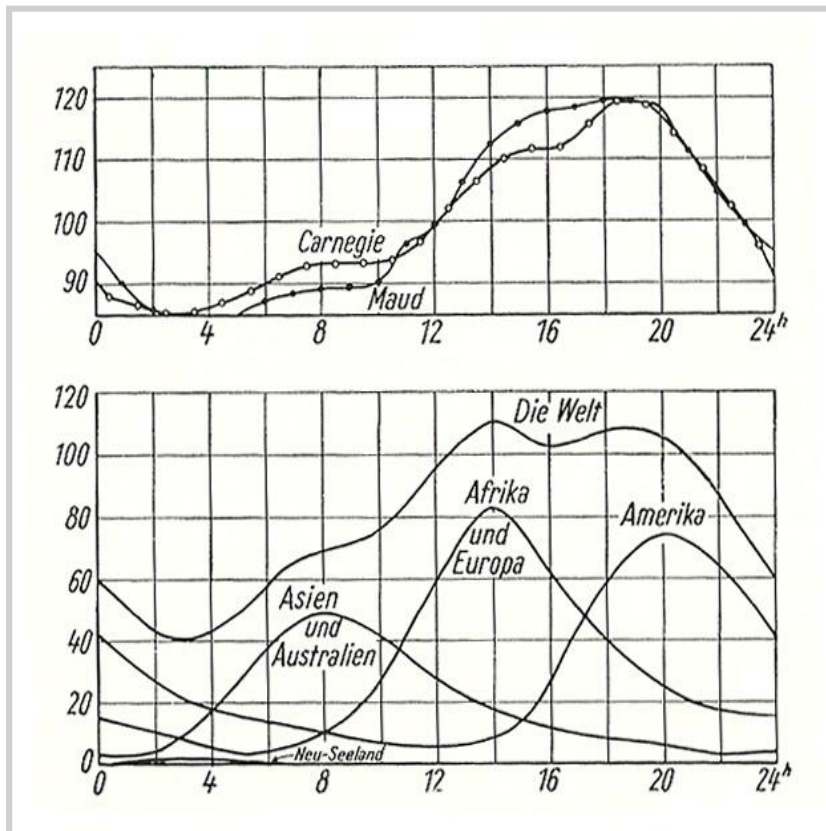


Abbildung 15:
Zusammenhang Potentialgefälle und
Gewitteraktivität (Israel 1961: 67)

Oben: Weltzeitlicher Tagesgang des
atmosphärischen Potentialgefälles
nach arktischen (Maud) und
ozeanischen (Carnegie) Messungen.
Ordinate: E-Feld in V/m
Abszisse: GMT

Unten: Tagesgang der 'Gewitter-
erwartung' für die einzelnen Kon-
tinue und (Hüllkurve) für das gesamte
Festland.
Ordinate: Größe der zum betreffenden
Zeitpunkt von Gewittern bedeckten
Fläche in 10^4 km^2
Abszisse: GMT

Beobachtungen des Potentialgefälles standen schon ganz am Beginn der Erforschung der Lufterlektrizität im Mittelpunkt. Die Stärke des elektrischen Feldes der Erde bzw. des Potentialgradienten stellen bis heute einen wichtigen Parameter lufterlektrischer Messungen dar, weswegen diesem Parameter im Folgenden ein eigenes Kapitel gewidmet ist.

6 FELDSTÄRKE / POTENTIALGRADIENT

Wie bereits bekannt, ist um die Erde ein lufterlektrisches Feld vorhanden. Dieses Feld wird durch die Oberflächenladungen auf der Erde und die in der Atmosphäre verteilten Raumladungen erzeugt. Verglichen mit der angrenzenden Luft, ist die Erde ein sehr guter Leiter, sodass die Ladungsverteilung praktisch einem elektrostatischen Gleichgewicht entspricht (Nippoldt 1929: 332). Zu Franz Exners Zeiten waren die komplexen Zusammenhänge eines globalen elektrischen Stromkreises noch nicht bekannt. Damals wurde das elektrische Feld der Erde als elektrostatisches Coulombfeld, gleich jenem einer geladenen leitenden Kugel, angesehen. Heute weiß man, dass es sich um ein stationäres Feld handelt, in welchem Ströme fließen.

In guter Näherung können die Erdoberfläche und die große Anzahl an geladenen Teilchen in den oberen Atmosphärenschichten als zwei geladene Elektroden eines riesigen Kugelkondensators angesehen werden. Die Erde bildet dabei den negativen Pol; die oberen Schichten, insbesondere die Ionosphäre, den positiven Pol. Dazwischen besteht eine elektrische Spannung und demnach ein elektrisches Feld, das quasi als Radialfeld angesehen werden kann.

Da die Erdoberfläche leitend ist, stehen die Feldlinien normal auf die Oberfläche. Nahe der Erdoberfläche kann das E-Feld als homogen betrachtet werden und es gilt in Näherung zwischen Feldstärke E und Oberflächendichte σ auf einem Flächenelement die folgende Beziehung:

$$\sigma = \varepsilon_0 \cdot E \quad (19)$$

Weiters gilt für ein homogenes elektrisches Feld:

$$E = \frac{U}{d} \quad (20)$$

Das elektrische Feld kann auch als Gradient des elektrischen Potentials ausgedrückt werden:

$$E = -grad V = -\nabla V \quad (21)$$

Der Gradient des Potentials bedeutet eine partielle Ableitung nach allen Raumrichtungen, also:

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} \quad (22)$$

Bei Verwendung des kartesischen Koordinatensystems ist ausschließlich die z-Komponente (z = Höhe über dem Erdboden) ausschlaggebend. In der Lufterlektrizität ist mit positiver Feldstärke also die Komponente des Feldes in der negativen z-Richtung gemeint. Sie hat Werte um +100 V/m mit einer mittleren Schwankungsbreite von +/- 50 V/m, wenn ungestörte Verhältnisse vorherrschen (Mühleisen 1977/Heft 2: 1).

Abbildung 16 skizziert den Feldverlauf in Bodennähe unter Schönwetterbedingungen. Bei Schönwetter zeigen die Vektoren des Feldes in der Regel nach unten Richtung Erdoberfläche. Sämtliche Unebenheiten in der Erdoberfläche wie etwa Berge, Häuser, Menschen etc. führen jedoch zu einer Verzerrung des elektrischen Feldes. Es sind drei Möglichkeiten der Deformation der E-Feldlinien (E) sowie der auf die Feldlinien senkrecht stehenden Äquipotentialflächen (P) – hier zweidimensional als Linien gezeichnet - dargestellt:

1. Leitende Spitze

An der Spitze eines leitenden Stabes sind die Feldlinien und damit auch die Äquipotentialflächen stark zusammengedrängt, was eine höhere Feldstärke an solch exponierten Stellen bedeutet.

2. Freie Raumladung

Weiters ist die Wirkung einer freien negativen Raumladung dargestellt. Aufgrund von Influenzwirkung kommt es oberhalb zu einer Verdichtung, unterhalb zu einer Verdünnung der Feldliniendichte.

3. Flacher Berg

Auch bei einer flachen Erhöhung kommt es zu einem Zusammendrängen der Feldlinien und somit zu erhöhter Feldstärke, jedoch nicht in dem Ausmaß wie bei scharfen Spitzen.

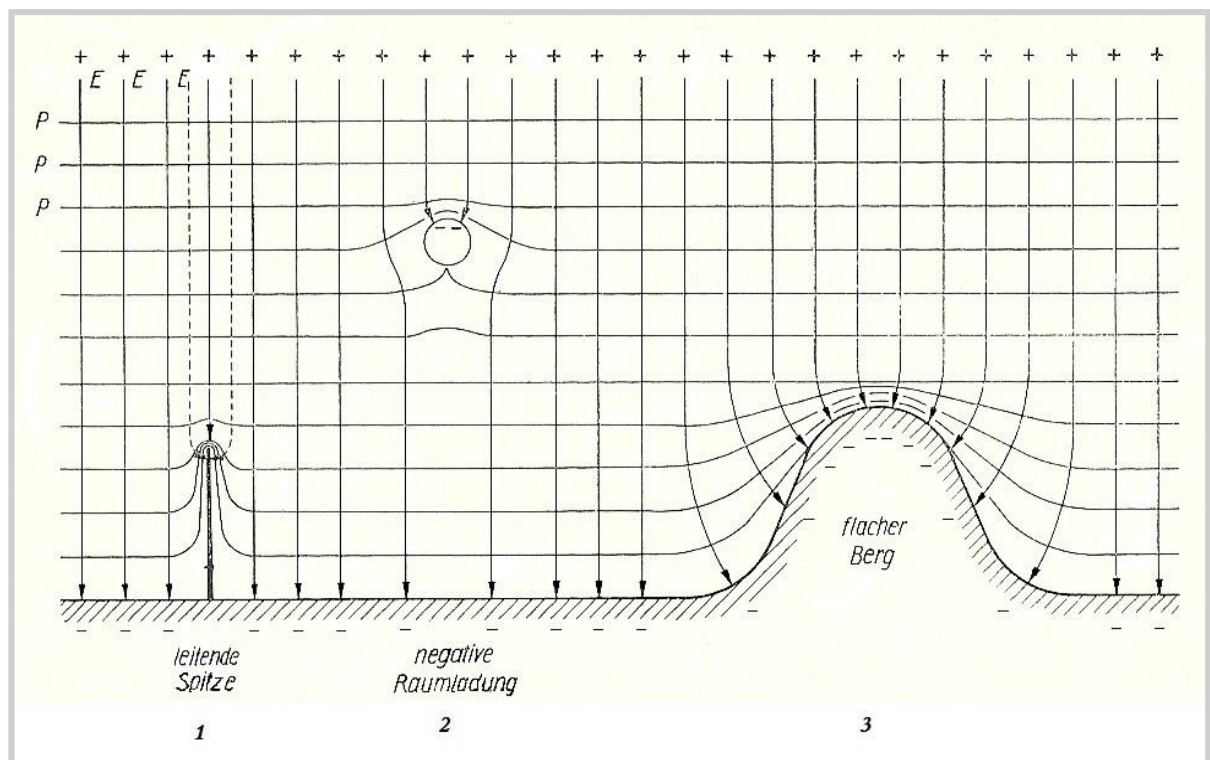


Abbildung 16: Luftelektrisches Feld in Bodennähe bei Schönwetter

Abgesehen von topographischen Störungen unterliegt der durchschnittliche Schönwetterwert der Feldstärke von etwa 130 V/m auch erheblichen periodischen und aperiodischen Schwankungen. Letztere sind unter Anderem stark wetterabhängig. Durch Wolken, Niederschläge oder anthropogene Störungen wie Emissionen, können Werte von +5000 V/m und -5000 V/m auftreten. Diese Schwankungen vollziehen sich meist eher langsam, etwa innerhalb von Stunden. Blitzentladungen hingegen führen zu Änderungen innerhalb von Mikrosekunden (Mühleisen 1977/Heft 2: 2).

Periodische Schwankungen des elektrischen Feldes der Erde treten in Form von Tages- und Jahresgängen auf. Wie bereits in Kap. 4.4. erwähnt, sind die täglichen Schwankungen in gleicher Weise weltweit zu bemerken. Abbildung 17 zeigt die bereits bekannte Carnegie-Kurve. Es lässt sich sehr schön erkennen, dass die Amplitude des Tagesganges ziemlich gleich groß ist, egal ob im Sommer oder im Winter. Der Zeitpunkt jedoch, wann das Maximum auftritt, variiert je nach Jahreszeit zwischen 17.00 und 21.00 GMT (Greenwich Mean Time). Das Minimum hingegen tritt stets zwischen 3.00 und 4.00 GMT auf (Reiter 1992: 130-132). Es ist besonders zu betonen, dass die Schwankungen nicht von der lokalen Zeit an einem Beobachtungsort, sondern von der absoluten Zeit auf der Erde abhängen (Feynman 2013/Ch. 9: 4).

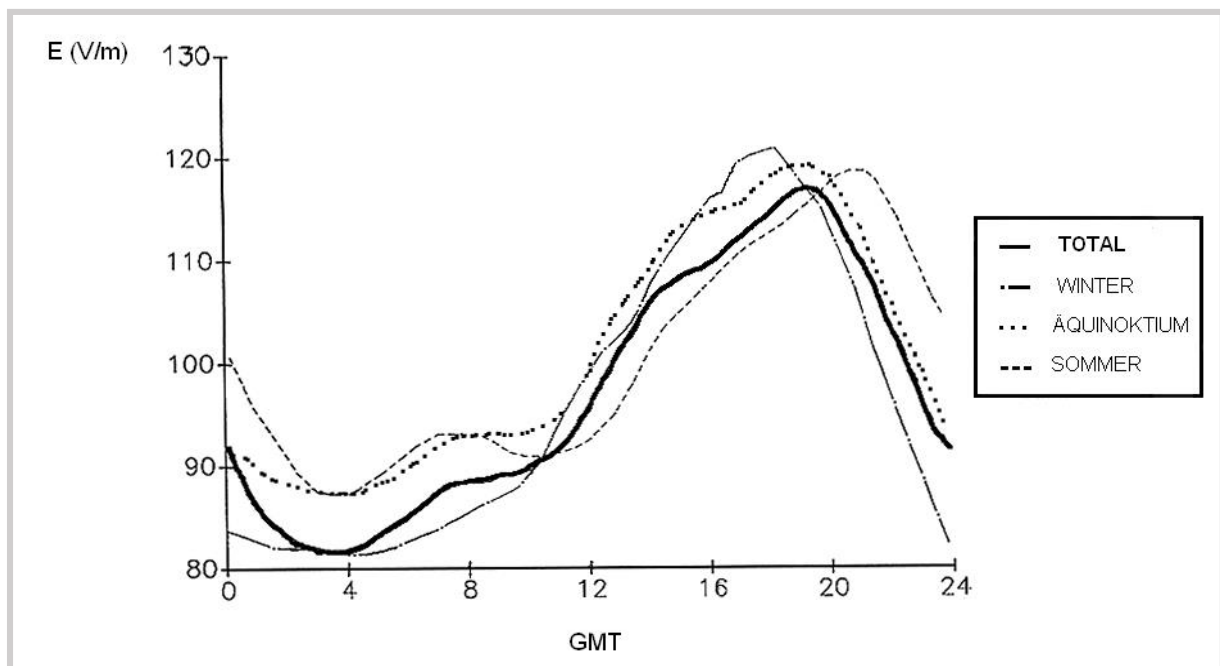


Abbildung 17: Carnegie Kurve

6.1 Messprinzipien

Wie jedes andere Objekt, verändert auch jegliche Messapparatur oder Person das elektrische Feld der Erde bei einer Messung. Es mussten also Methoden gefunden werden, die es erlauben diese Messstörungen auszuschalten, um akkurate Ergebnisse eines bestimmten Punktes in der Atmosphäre zu erhalten.

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Methoden, die zur Messung des luftelektrischen Feldes verwendet werden. Mit Potentialsonden kann die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten in der Atmosphäre ermittelt werden. Mit Influenzsonden wird der Potentialgradient direkt gemessen.

6.1.1 Potentialsonden

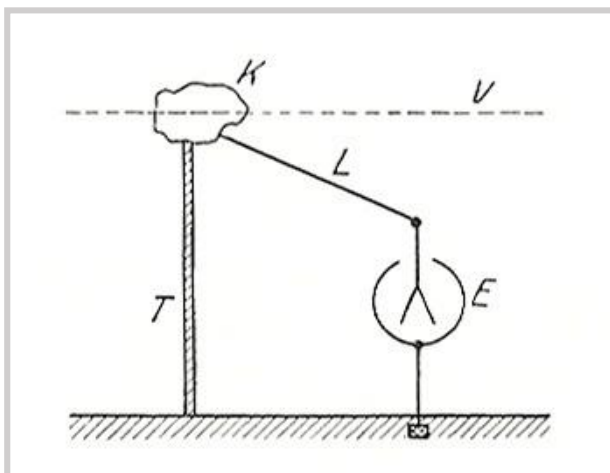


Abbildung 18: Messung mittels Potentialsonde

Die Methode der Ermittlung von Potentialen in bestimmten Höhen und die sich daraus ergebenden Potentialdifferenzen wird oftmals mit Hilfe von Kollektoren gemacht und wird daher auch Kollektormethode genannt. Es wird dabei der Differenzenquotient $\frac{\Delta V}{\Delta h}$ bestimmt.

Das Prinzip ist in Abbildung 18 dargestellt (Nippoldt 1929: 332). K bezeichnet einen Körper, der auf einer isolierenden Stange T sitzt. Dieser Körper ist durch eine dünne, praktisch kapazitätslose Leitung L mit einem Elektrometer E, dessen Gehäuse geerdet ist, verbunden. Das Potential V' im Mittelpunkt von K ist $V' = V + V''$. V ist dabei das ungestörte Potential, das an diesem Punkt ohne Anwesenheit des Körpers K herrscht; also jenes, das man eben ermitteln möchte. Dazu kommt aber noch das Potential $V'' = \frac{Q}{C}$, das durch die Eigenladung Q und der Kapazität C des Körpers zustande kommt. Schafft man es die Oberflächenladungen des Körpers K zu entfernen, also

wenn $Q = 0$ ist, ist auch $V'' = 0$ und somit wäre $V' = V$. Die Differenz $V - V_0$ kann dann am Elektrometer abgelesen werden, wobei V_0 das Potential des Bezugspunktes ist.

Das Entfernen der Oberflächenladungen des Körpers K wird von *Potentialsonden* bewerkstelligt. Die Funktionsweise von Potentialsonden kann auf mechanische Weise, durch Ionenleitung oder auf dem äußeren photoelektrischen Effekt basieren. Grundsätzlich geht es darum, wie die Influenz- und Eigenladungen eines Leiters (wie z.B. Körper K in Abb. 18), der sich in einer bestimmten Höhe über dem Erdboden befindet, abgeleitet werden können. Luftionen sind prinzipiell imstande diese Ladungen fortzutragen, jedoch dauert dieser Vorgang seine Zeit.

Eine Flamme oder ein radioaktiver Strahler ionisiert die umgebende Luft, wodurch die Anzahl der Ionen um ein Vielfaches erhöht wird. Damit steigt die Leitfähigkeit der Luft; es können mehr Ladungen in kürzerer Zeit abgeleitet werden. Dies geschieht solange bis der Leiter jenes höhere Potential angenommen hat, das dem ungestörten Feld entspricht. Eine ausführliche Beschreibung der Flammensonde findet sich in Kapitel 7.1, als wichtiger Bestandteil der von Franz Exner eingeführten Messapparatur.

Flammen oder Luntensonden sind nicht für Dauermessungen geeignet und auch nicht bei jeder Witterung einsatzbereit. Thomson 1859 führte aus diesen Gründen den Wasserkollektor ein, der auch für Dauermessungen in Observatorien genutzt wurde. Dieser bestand aus einem isoliert aufgestellten Gefäß, das mit Wasser gefüllt war. Seitlich befand sich ein Rohr mit feiner Spitze aus welchem das Wasser tröpfchenweise kontinuierlich ausfließen konnte. Das Gefäß war mit einem Elektrometer verbunden. War das Potential der Wassertropfen verschieden von dem der umgebenden Luft, kam es zu einer Polarisation der Wassertropfen. Dies bewirkte einen Ladungstransfer zwischen Wasserfluss und Luft, der solange andauerte bis das Potential des Wassers an jenes der Luft angeglichen war. Anlehnend an Thomsons Erfindung, wurden im Laufe der Zeit viele unterschiedliche Bauarten von Wasserkollektoren entwickelt, deren Grundprinzip das soeben Beschriebene ist. Bei Temperaturen unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ verwendete man Substanzen mit tieferem Gefrierpunkt, zum Beispiel Alkohole (Aplin 2013: 4-5).

Die Messung des E-Feldes mit Potentialsonden erfolgt durch Ermittlung einer Potentialdifferenz. Unter der Annahme eines homogenen Feldes, nimmt man das Erdpotential als 0 an und misst an einem zweiten Punkt in einem bestimmten Abstand d über der Erdoberfläche. Die Potentialdifferenz $\varphi_2 - \varphi_1$ zwischen diesen beiden Punkten entspricht der elektrischen Spannung U_{12} . Die Feldstärke E ergibt sich dann zu:

$$E = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{d} = \frac{U_{12}}{d} \quad (23)$$

Potentialsonden weisen eine gewisse Trägheit bei der Entladungsgeschwindigkeit auf und liefern bei zeitlich rasch veränderlichen Feldstärken nur Mittelwerte.

6.1.2 Influenzsonden

Influenzsonden basieren auf der Influenzwirkung des atmosphärischen elektrischen Feldes. Sie werden zur Bestimmung der Feldstärke an einem bestimmten Ort, also des Differentialquotienten $\frac{\partial V}{\partial x}$, verwendet. Die Funktionsweise wird anhand der Wilson-Platte (s. Abb. 19) erläutert.

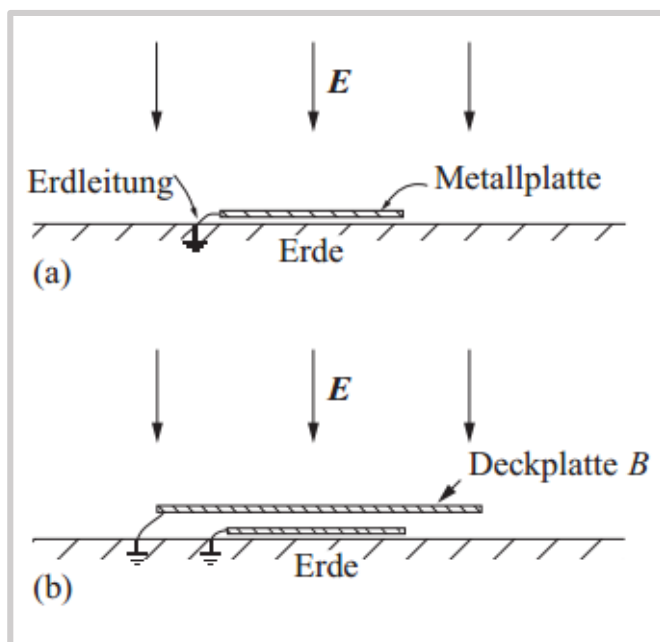


Abbildung 19: Wilson-Platte

Das elektrische Feld der Atmosphäre bewirkt auf der Erdoberfläche Influenzladungen. Zwischen der Feldstärke E und der Flächenladungsdichte σ besteht der Zusammenhang:

$$\sigma = \varepsilon_0 \cdot E = \frac{Q}{A} \quad (24)$$

Platziert man eine Metallplatte auf der Erde und erdet diese (s. Abb. 19 a), dann werden auf ihr ebenso Oberflächenladungen auftreten. Je nach Feldrichtung werden diese Ladungen negativ oder positiv sein.

Wird diese Platte nun mit einer weiteren geerdeten Platte abgedeckt (s. Abb. 19 b), so treten die Ladungen nur mehr in der oberen Platte auf. Von der unteren fließen nun deren Ladungen zur Erde und können zum Beispiel mit einem Galvanometer oder Elektrometerverstärker gemessen werden. Mit obiger Beziehung aus Gl. (24) kann so die Flächenladungsdichte σ und somit auch die Feldstärke E ermittelt werden. Dieses Messprinzip wird in Feldmühlen angewandt, die sich zum Messen langsam veränderlicher Felder eignen.

6.1.3 Reduktionsmessungen

Wie in Abbildung 16 ersichtlich ist, wird die Feldstärke von Unebenheiten aller Art beeinflusst. Werte, die einer idealen Kugelfläche vom Radius der Erde entsprechen, kann man bei einer realen Messung nicht erhalten. Die Ladungsdichte σ wird über erhöhten Gegenständen (Berge, Bäume, Menschen, Häuser, ...) höher; in Vertiefungen und seitlich von Objekten, niedriger sein. Natürlich ist damit auch die bestimmte Feldstärke nur eine relative. Zur Feststellung von Gesetzmäßigkeiten im zeitlichen Verlauf der Feldstärke, reichen diese relativen Werte. Möchte man allerdings absolute Werte, muss man Messungen in der freien Ebene vornehmen. Da dies nicht immer möglich und vor allem bei fixen Stationen von vornherein ausgeschlossen ist, werden sogenannte Reduktionsmessungen durchgeführt. Dabei wird zeitgleich mit Messungen an einer fixen Station eine Simultanmessung in einer möglichst nahe liegenden freien Ebene gemacht und ein Reduktionsfaktor bestimmt, mit dessen Hilfe die relativen Werte dann in absolute umgerechnet werden können (Nippoldt 1929: 335).

7 VERGLEICH DES EXNERSCHEN ELEKTROSKOPS MIT EINER ELEKTRISCHEN FELDMÜHLE

Im praktischen Teil dieser Diplomarbeit wurden Feldmessungen bei Schönwetter durchgeführt. Einerseits wurde die historische Messmethode von Franz Serafin Exner mittels Flammensonde und Blättchenelektroskop durchgeführt. Parallel dazu wurde mit einer heute üblichen elektrischen Feldmühle gearbeitet. Die Diskussion der Ergebnisse findet sich in Kapitel 9. Zunächst sollen beide Methoden ausführlich beschrieben werden.

7.1 Franz Serafin Exners Methode mittels Flammensonde

In seiner Arbeit „Über transportable Apparate zur Beobachtung der atmosphärischen Elektrizität“ aus dem Jahre 1887 betont Exner die Wichtigkeit präziser Messungen des Potentialgefälles (Exner 1887: 1084):

“Die Größe, welche [...] vor Allem von möglichst vielen Beobachtern an möglichst vielen Punkten der Erdoberfläche bestimmt werden sollte ist die Potentialdifferenz zweier Punkte in der Luft, die auf derselben Verticalen über einem möglichst ebenen Stück der Erdoberfläche in ein Meter Distanz von einander liegen; und zwar muss diese Bestimmung zur Vermeidung von Störungen bei möglichst klarer und reiner Luft angestellt werden.”

Im Weiteren gibt er triftige Gründe für die Verwendung transportabler Messapparate an.

Zur Bestimmung des tatsächlichen Wertes des Potentialgefälles sieht es Exner als absolut notwendig an, die Messungen auf einer freien Ebene durchzuführen. Jegliche Unebenheiten, wie Gebäude, Bäume oder sonstige Erhebungen deformieren das elektrische Feld, schieben die Feldlinien näher zueinander und liefern daher verfälschte Ergebnisse. An sämtlichen meteorologischen Stationen können die fix

installierten Apparate, allein schon wegen der Anwesenheit von Gebäuden, keine korrekten Werte liefern. Exner kritisiert, dass an keiner einzigen Station Reduktionsmessungen in der freien Ebene vorgenommen werden und deren Messergebnisse daher auch nicht miteinander vergleichbar wären. Schließlich würden Temperaturmessungen ja auch nicht mit Thermometern mit willkürlichen Skalen durchgeführt werden, so sein Argument (Exner 1887: 1087). Zudem befinden sich die großen Messstationen meist in oder zumindest in der Nähe größerer Städte. Das vermehrte Aufkommen von Rauch und Staub beeinträchtigen die Messungen doch wesentlich.

Exners Argument für die Verwendung von transportablen Messgeräten ist eine praktische Überlegung. Mit tragbarer Ausrüstung lassen sich Untersuchungen jederzeit und überall auf Reisen in allen Teilen der Welt anstellen. Solch transportable Messeinrichtungen müssen natürlich einigen Anforderungen entsprechen. Sie sollen leicht, zuverlässig, robust, von handlicher Größe, bequem und einfach handzuhaben und dürfen schließlich auch nicht zu teuer sein. Exner verwendete für seine Messungen großteils ein von ihm konstruiertes Gerät – das Exnersche Elektroskop, das in Abbildung 20 zu sehen ist.

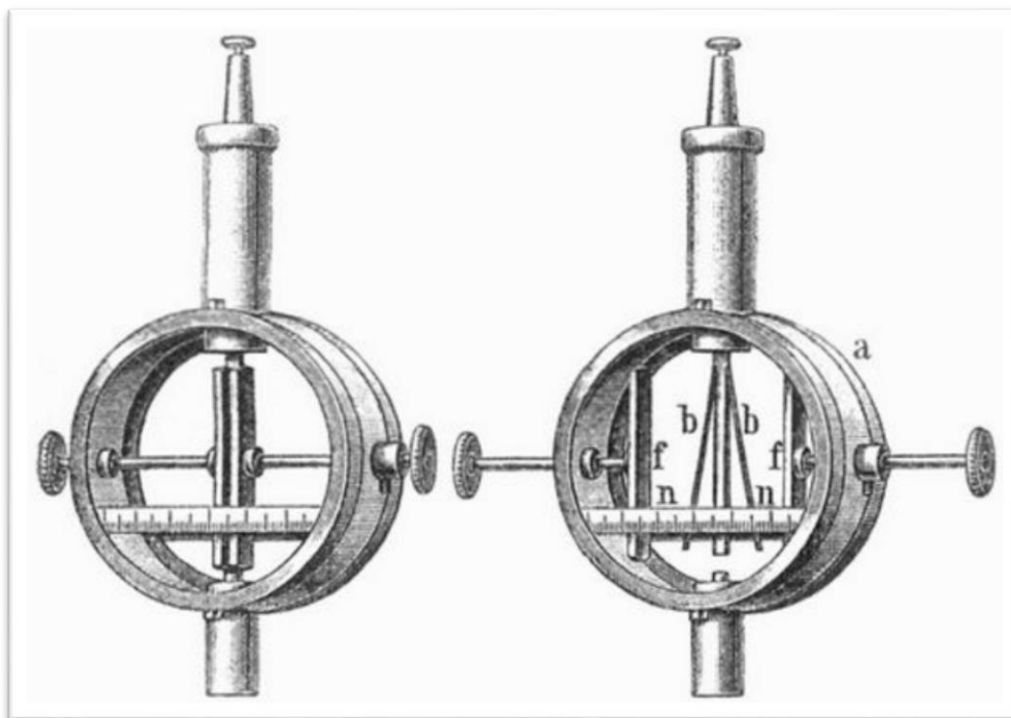


Abbildung 20: Das Exnersche Elektroskop

7.1.1 Der Aufbau

Abbildung 21 ist eine schematische Darstellung des Exnerschen Elektroskops (Exner 1887: 1089-1090).

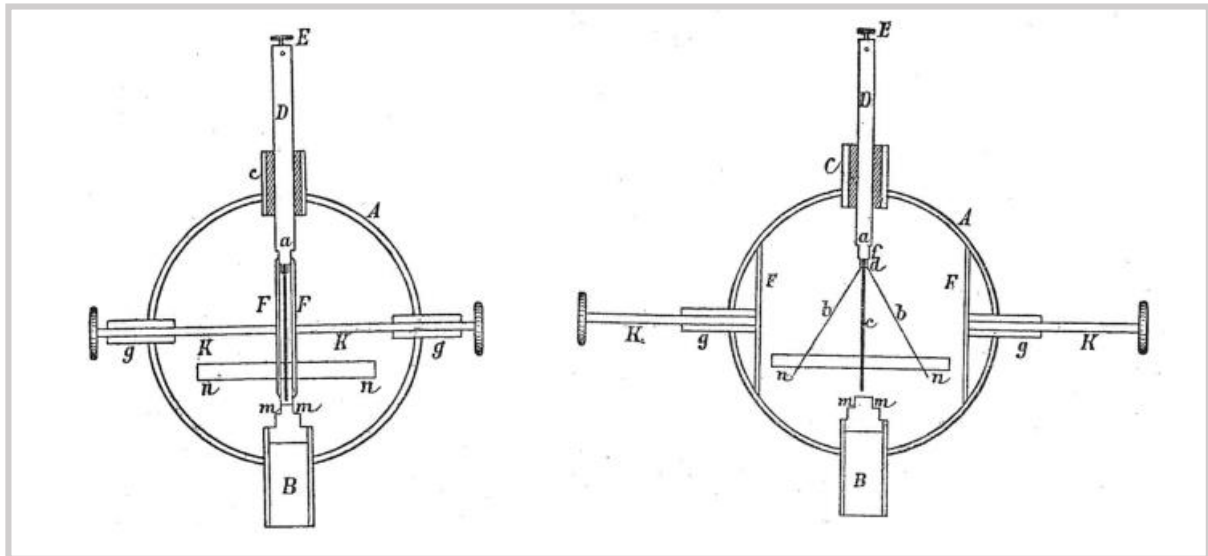


Abbildung 21: Exnersches Elektroskop
links: transportbereit mit geschlossenen Backen rechts: während einer Messung

Das Gehäuse bildet eine ca. 3 cm hohe Messingtrommel (A). Die ganze innere Anordnung ist durch Glasplatten, die an der Vorder- und Rückseite der Trommel angebracht sind, geschützt. Die Messinghülse (B) dient zum Aufsetzen auf einen Stab, der in der Länge variiert werden kann, um in unterschiedlichen Höhen messen zu können.

Auf der oberen Seite befindet sich ebenfalls eine Messinghülse (C), durch welche ein Messingstift (D) läuft. Dieser ist gegenüber dem Gehäuse durch einen Pfropfen Ebonit isoliert. Der Messingstift D trägt die hauchdünnen, etwa 3mm breiten Aluminiumblättchen (b), die in Abb. 21, rechts, in gespreiztem Zustand zu sehen sind.

Abb. 22 zeigt eine vergrößerte Detaildarstellung des Messingstiftes D. Am unteren Ende des Messingstiftes ist ein dünnes Kupferblech (c) eingearbeitet, das etwa dreimal so breit und etwas länger als die Aluminiumblättchen ist. Diese sind links und rechts davon am Messingstift befestigt. Das Kupferblech liegt also zwischen den Alu-Blättchen und vermeidet so ein Aneinanderkleben derselben.

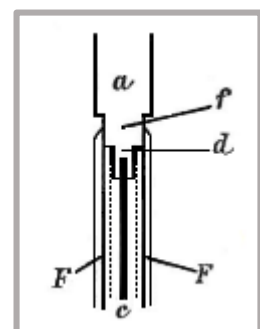


Abbildung 22:
Detailansicht Blättchenträger

Als eigentlichen Schutz der Alu-Blättchen beim Transport dienen die beiden verstellbaren Backen (F). Mit den Stellschrauben (K) kann die Position variiert werden. Zum Transportieren des Gerätes werden sie ganz zusammengeschoben und schützen so die empfindlichen Alu-Blättchen. In der Abbildung 21, links, sind die Backen geschlossen; in diesem Zustand ist es für den Transport geeignet. Abbildung 21, rechts, zeigt das geöffnete Elektroskop mit gespreizten Blättchen während einer Messung.

Die Zuleitung der Ladungen vom Aufsaugapparat auf die Alu-Blättchen erfolgt durch den Messingstift über die Klemmschraube (E). Die Divergenz der Blättchen bei Aufladung kann an einer Millimeterskala (n) auf der Glasplatte abgelesen werden.

Die Aufsaugvorrichtung ist in Abbildung 23 dargestellt. Sie besteht aus einer Messingplatte (a) mit Ummantelung, die auf einem Stab aufgesetzt werden kann. Eine Besonderheit war damals, dass der Stab aus Ebonit in einem Gehstock integriert war und ausgezogen werden konnte wie eine Teleskopstange. So konnte bequem in Höhen bis über 3 m gemessen werden, wo die Deformation des elektrischen Feldes durch das Messgerät und den Beobachter nicht mehr von bedeutendem Einfluss waren. Als Kollektor bevorzugte Exner eine Kerzenflamme, da diese relativ leicht handzuhaben waren, für einen raschen Potentialausgleich mit der Umgebung sorgte und zuverlässige Werte lieferte. Als Verbindung zwischen Flamme und dem Elektroskop diente ein Kupferdraht (d) mit einem Platinfortsatz am Ende (e). Am unteren Ende des Drahtes befand sich eine Öse zur Befestigung des Verbindungsdrahtes mit dem Elektroskop. Das oberste Stück e musste beim Messvorgang in die Flamme hineinragen. Die Höhe konnte mit einer kleinen Stellschraube in der Messingplatte a eingestellt und fixiert werden.

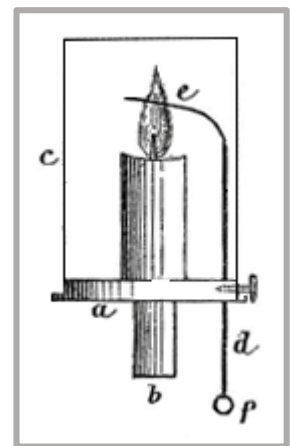


Abbildung 23:
Flammensonde

7.1.2 Das Prinzip der Messung

Exner führte mit seinem Gerät an die 1000 Messungen durch. Dabei bestimmte er jeweils die Potentialdifferenz zwischen der Erde und einem beliebigen Punkt in der Luft. Die Methode war einfach handzuhaben, bedurfte allerdings einiger Übung. In einer Hand hielt er die metallene Hülle des Elektroskops, wodurch dieses geerdet wurde. Gleichzeitig hob er die Flammensonde auf jene Höhe, auf der das Potential gemessen werden sollte. Die Blättchen des Elektroskops waren mit dem obersten aus Platin bestehendem Drahtende leitend verbunden. Über diese Leitung konnten Ladungen von der zu vermessenden Stelle zum Messgerät gelangen. Die Flamme diente nun als Kollektor. Das bedeutet, dass die Kerzenflamme die Luft rundum relativ rasch ionisiert und so die Leitfähigkeit der Luft beträchtlich gesteigert wird. Der Leiter kann demnach in kurzer Zeit auf das Umgebungspotential gebracht werden. Die Blättchen nehmen dann das Potential des Messpunktes in der Luft an. Die beobachtete Divergenz wird von der Skala abgelesen und die gesuchte Potentialdifferenz kann aus einer Kalibrierungstabelle entnommen werden. Die Polarität musste separat festgestellt werden, indem man während der Beobachtung in die Nähe der Klemmschraube E (Abb. 21) einen geladenen Körper bekannter Polarität brachte, wodurch die Divergenz entweder ab- oder zunahm und so auf das Vorzeichen der Messwerte geschlossen werden konnte.

Wie man sieht, bedarf das Exnersche Elektroskop also einer Eichung. Normalerweise werden solche Kalibrierungen, auch heute noch, in Kondensatorfeldern gemacht. Nun konnte es natürlich passieren, dass auf Reisen die Blättchen unbrauchbar wurden. Sie mussten dann ersetzt werden und eine neue Eichung war erforderlich. Für diesen Fall entwarf Exner eine Art ‚Reisekondensator‘ (Exner 1887: 1092-1096).

Elektroskope haben zwar den Vorteil einer leistungslosen Messung, sind jedoch keine Lösung für dauerhafte Messungen, die reproduzierbar und speicherbar sein sollen. Mit elektronischen Hilfsmitteln kann dieses Ziel heutzutage leicht erreicht werden.

7.2 Die elektrische Feldmühle

Feldmühlen, auch Rotationsvoltmeter genannt, sind Instrumente zur leistungslosen Messung von elektrostatischen Feldern. In den letzten Jahrzehnten haben sich elektronisch gesteuerte Feldmühlen bestens für Forschungszwecke aber auch für den kommerziellen Bedarf bewährt. So werden sie von renommierten Institutionen wie der NASA oder dem Langmuir Laboratory for Atmospheric Research in New Mexico zu Forschungszwecken eingesetzt. Auf Flughäfen und meteorologischen Stationen sind sie unverzichtbarer Bestandteil von Systemen zur Wettervorhersage und Gewitterwarnung.

In Österreich gibt es zu diesem Zwecke seit 1991 ein Gemeinschaftsprojekt des OVE (Österreichischer Verband für Elektrotechnik) und der APG (Austrian Power Grid AG) – das Blitzortungssystem ALDIS (Austrian Lightning Detection & Information System). Aufgabe ist es, österreichweit die Gewitteraktivität zu erfassen. Sämtliche Blitzdaten werden gespeichert und dem europäischen Blitzortungssystem EUCLID zugeführt. Auch auf der Blitzforschungsstation am Gaisberg wird eine elektrische Feldmühle zur Feldmessung (s. Abb. 24) eingesetzt (ALDIS: <http://www.aldis.at/>).



Abbildung 24: Feldmühle der Blitzforschungsstation am Gaisberg

Die prinzipielle Funktionsweise einer Feldmühle ist jene der Wilson-Platte wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben. Abbildung 25 zeigt verschiedene Positionen der Plattenstellungen und ihre Bedeutung.

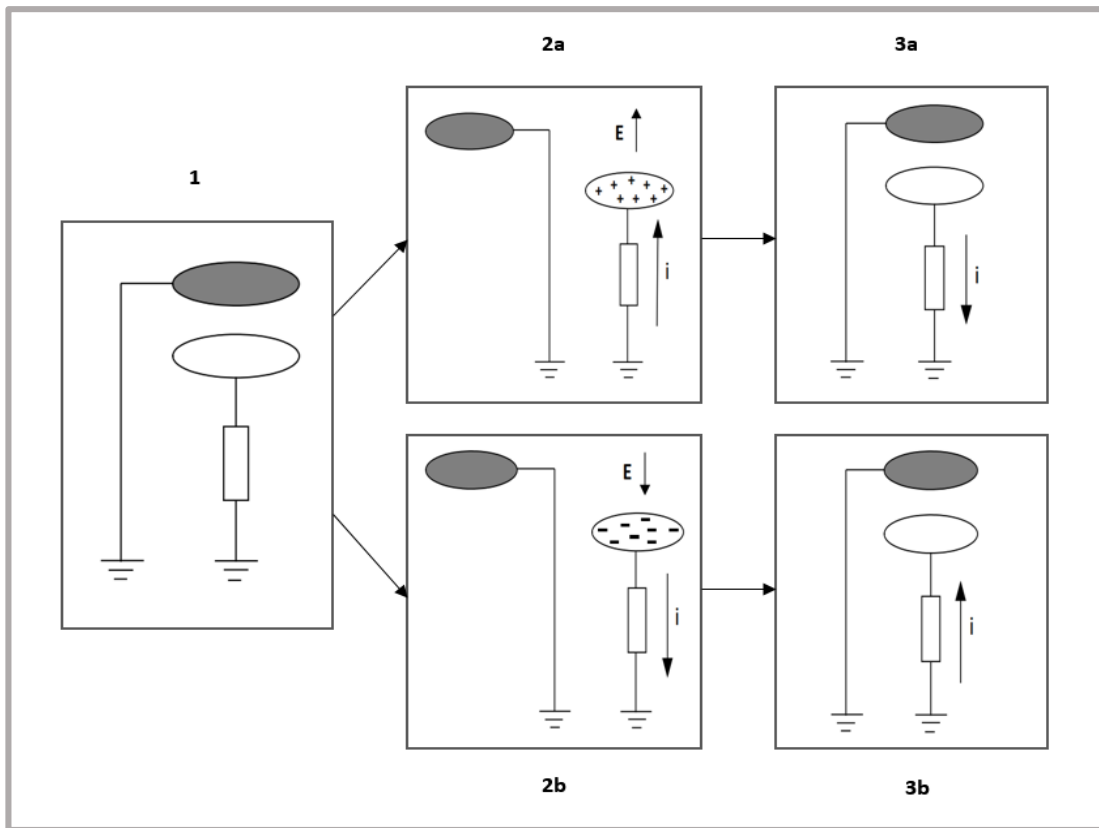


Abbildung 25: Funktionsprinzip einer Feldmühle

Position 1: Die Sensorplatte ist abgedeckt. Es werden keine Ladungen auf der Sensorplatte beeinflusst.

Position 2: Die Sensorplatte ist dem E-Feld ausgesetzt.

- a) Die Vektoren des E-Feldes sind nach oben gerichtet, wie es beispielsweise bei einem Gewitter der Fall sein könnte. Auf der Sensorplatte werden positive Ladungen beeinflusst. Der Stromfluss (technisch) ist von der Erde zur Sensorplatte gerichtet.
- b) Die Vektoren des E-Feldes sind nach unten zur Erde gerichtet, wie es bei Schönwetter der Fall sein ist. Auf der Sensorplatte werden negative Ladungen beeinflusst. Der Stromfluss (technisch) ist von der Sensorplatte zur Erde hin gerichtet.

Position 3: Die Sensorplatte ist wieder abgedeckt.

- a) Der Stromfluss (techn.) ist jetzt umgekehrt, von der Sensorplatte zur Erde.
- b) Der Stromfluss (techn.) ist jetzt umgekehrt, von der Erde zur Sensorplatte.

Es gibt verschiedenste Bauarten von Feldmühlen. Abbildung 26 zeigt eine echte Feldmühle von außen mit Gehäuse und die dazugehörige Innenansicht. Derartige Geräte können sogar bei Regen, Schnee und Hagel betrieben werden (Harrison 2013: 191).

Für luftelektrische Messungen wird sehr häufig jene eingesetzt, deren Aufbau und Funktionsweise im Folgenden detailliert beschrieben wird. Zunächst werden die mechanischen Bauteile und ihre Aufgaben erklärt. Diese eingehende Erklärung ist zum Verständnis der elektronischen Schaltung notwendig. Danach werden die zum Verständnis der Arbeitsweise einer Feldmühle erforderlichen elektrotechnischen Grundlagen erläutert.

Aus persönlichem Interesse und auch um die rasante Entwicklung am Messgerätesektor herauszustreichen, habe ich mich vor allem in die dahinterstehende moderne Elektronik sehr vertieft. In Anlehnung an die Arbeiten von Stefan Kneifel (<http://www.qsl.net/dh1stf/>), habe ich mit Hilfe von Fachliteratur sowie Internetressourcen (Deimel 2010; Czmock, Elektronik Kompendium, HyperPhysics) eine Schaltung entwickelt (s. Kapitel 7.2.2. - 7.2.4.), die das Funktionsprinzip moderner Feldmühlen zeigen soll. Die Schaltung wurde mit einem Simulationsprogramm erfolgreich getestet.



Abbildung 26: Feldmühle Außenansicht



Feldmühle Innenleben

7.2.1 Mechanik der Feldmühle

7.2.1.1 Mechanischer Aufbau einer Feldmühle

Abbildung 27 zeigt die mechanischen Bestandteile einer Feldmühle:

- ein Flügelrad
- eine runde leitende Platte, die in 4 Segmente unterteilt ist, wobei immer zwei diagonal liegende Segmente leitend miteinander verbunden sind (Segmentenpaar A bzw. B)
- ein Lichtschranken-Flügelrad
- ein elektrischer Motor

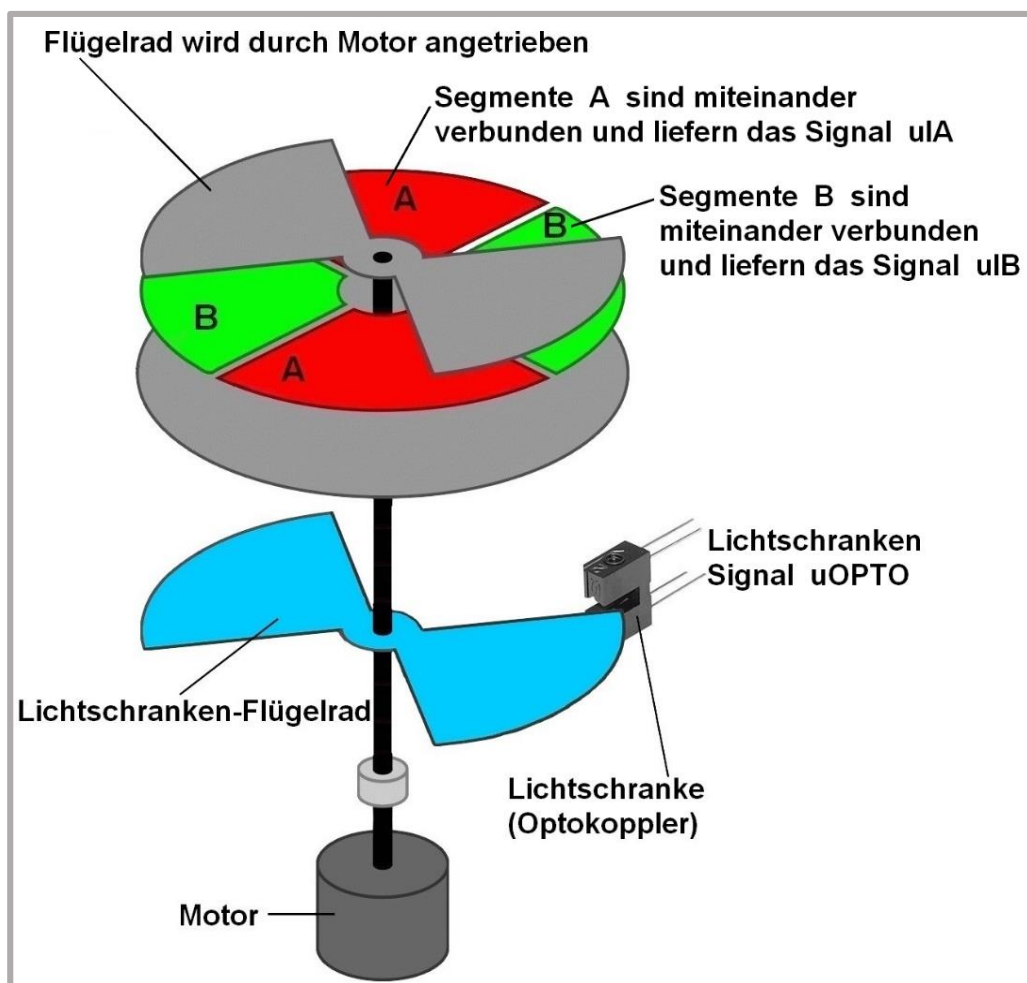


Abbildung 27: Mechanik einer Feldmühle

Dieser Aufbau befindet sich mitsamt elektronischer Schaltung in einem Schutzgehäuse wie beispielsweise in Abbildung 26 dargestellt.

Die Signale, die von den mechanischen Teilen geliefert werden und als Eingang in die elektronische Schaltung dienen, haben folgende Bezeichnungen:

uIA – Eingangsspannung vom Segmentenpaar A

uIB – Eingangsspannung vom Segmentenpaar B

uOPTO – Signal für die Lichtschranke (Optokoppler)

Mit dieser Anordnung wird das zu messende E-Feld in eine Wechselgröße umgewandelt. Beim Betrieb der Feldmühle können elektrische Störeinflüsse auftreten, die beispielsweise vom Motor verursacht werden. Die Konfiguration aus vier Segmenten dient der Störungsunterdrückung, wie in Punkt 7.2.2.2 detailliert beschrieben wird.

7.2.1.2 Das Flügelrad

Das Flügelrad und die beiden Segmentenpaare A und B - mit den Ausgangssignalen uIA und uIB - dienen dazu, die *Stärke des E-Feldes* zu erfassen.

Das Flügelrad wird durch den Motor angetrieben. Je nach Drehposition, schirmt es die Segmente vom E-Feld ab beziehungsweise exponiert die Segmente dem E-Feld.

Auf den exponierten Stellen werden durch das E-Feld elektrische Ladungen influenziert. Diese Ladungen können über einen Lastwiderstand (s. Abb. 33: Widerstände R1 und R4) zur Masse abfließen. Es ergibt sich ein Stromfluss, der folgendermaßen definiert ist:

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}(A \cdot \varepsilon_0 \cdot E) = \varepsilon_0 \cdot E \cdot \frac{d}{dt} \cdot A \quad (25)$$

Bei umgekehrter Polarität des E-Feldes, fließen die Ladungen von der Masse zu den Segmenten, d.h. es ergibt sich lediglich ein anderes Vorzeichen.

Gl. (25) leitet sich aus dem Gaußschen Satz her:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = E \oint dA = E \cdot 4\pi r^2 \quad (26)$$

mit
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad (27)$$

Der Gaußsche Satz ergibt einerseits:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (28)$$

Und andererseits:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = E \oint dA = E \cdot A \quad (29)$$

Daraus folgt:

$$\frac{Q}{\epsilon_0} = E \cdot A \quad (30)$$

Und weiter:

$$Q = \epsilon_0 \cdot E \cdot A \quad (31)$$

Gl. (31) nach der Zeit abgeleitet ergibt den Stromfluss, also Gl. (25)

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}(A \cdot \epsilon_0 \cdot E) = \epsilon_0 \cdot E \cdot \frac{d}{dt} \cdot A \quad (25)$$

Betrachtet man nur ein Segment A der vier Segmente, kann die Abhängigkeit der Fläche von der Zeit mathematisch folgendermaßen formuliert werden:

$$A = \frac{r^2}{2} (\alpha - \sin \alpha) \quad (32)$$

Wie man sieht, ist die Fläche von α und r abhängig. Diese Funktion ist in Abbildung 28 grafisch dargestellt. Dafür wurde als Vereinfachung $\frac{r^2}{2}$ als konstant angenommen, d.h. $\frac{r^2}{2} = 1$ gesetzt. Es folgt $A = \alpha - \sin \alpha$; $0 \leq \alpha \leq \pi$. Die Kurvenform ändert sich dadurch nicht.

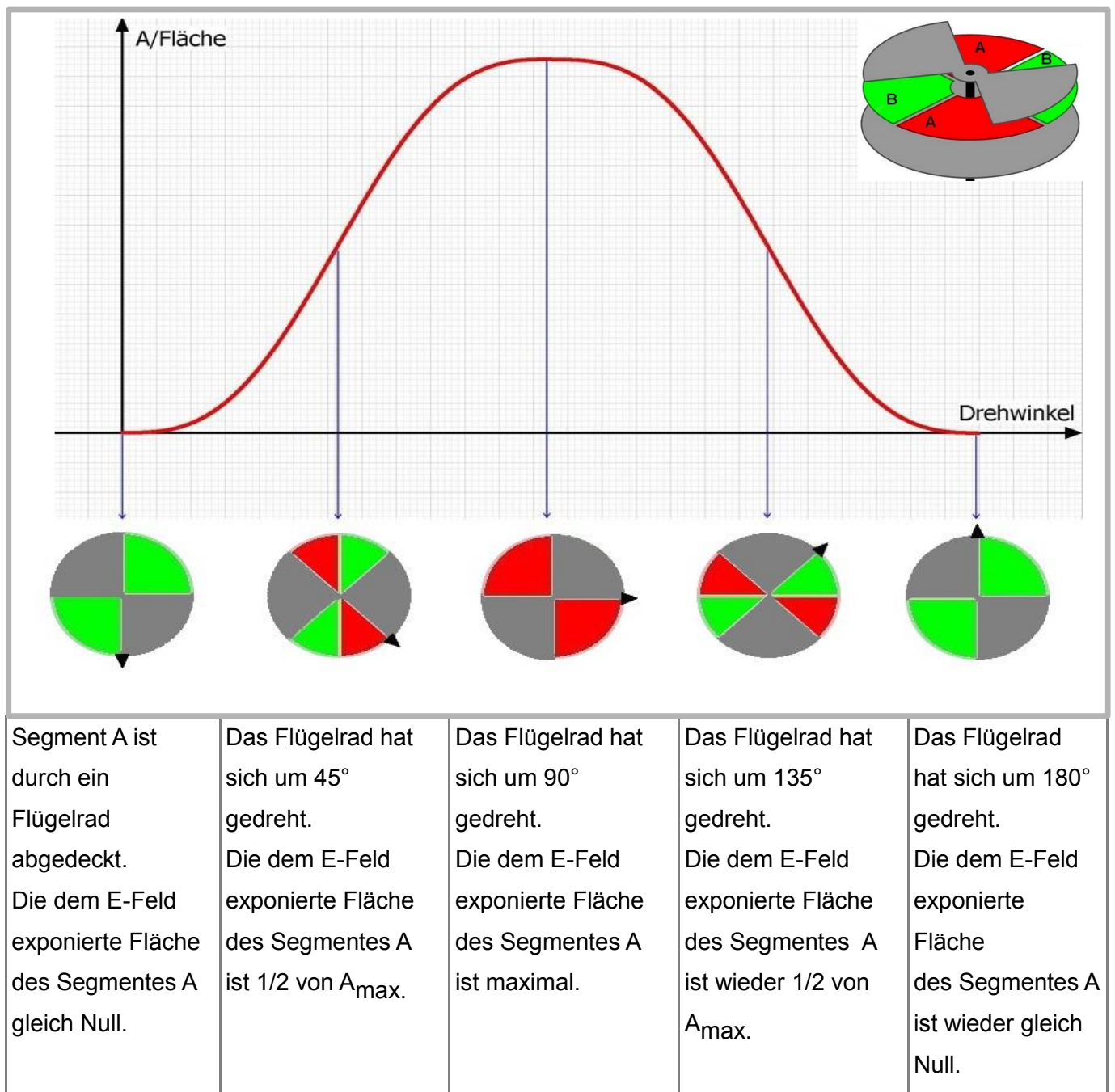


Abbildung 28: Segmentflächenänderung als Funktion des Drehwinkels

Aus Abbildung 28 lässt sich gut erkennen, dass die Änderung der Fläche einen sinusförmigen Verlauf hat.

Möchte man nun den Strom mittels Gl. (25) berechnen, muss für die Segmentflächenänderung A die Kreisfrequenz eingeführt werden. Dies folgt aus der bekannten Beziehung $\omega = \frac{\alpha}{t}$ für eine konstante Kreisfrequenz ω , was hier zutrifft, da der Motor mit konstanter Winkelgeschwindigkeit das Flügelrad antreibt. Daraus folgt

$$\alpha = \omega \cdot t \quad (33)$$

Man erhält aus Gl. (32) dann

$$A = \frac{r^2}{2} (\omega t - \sin \omega t) \quad (34)$$

Eingesetzt in (25) ergibt sich

$$i = \varepsilon_0 \cdot E \cdot \frac{r^2}{2} \frac{d}{dt} (\omega t - \sin \omega t) \quad (35)$$

Differenzieren nach t ergibt:

$$i = \varepsilon_0 \cdot E \cdot \frac{r^2}{2} \cdot (\omega - \omega \cos \omega t) = \varepsilon_0 \cdot E \cdot \frac{r^2}{2} \omega (1 - \cos \omega t) \quad (36)$$

Um rein den zeitlichen Stromverlauf deutlich darzustellen, können die hier auftretenden Konstanten gleich 1 gesetzt werden, da sie für den Zeitverlauf irrelevant sind. Auch die Änderung von ω ist hier nicht von Bedeutung für den $i(t)$ -Verlauf. Gleichung (36) vereinfacht sich somit zu

$$i = 1 - \cos(1s^{-1} \cdot t) \quad (37)$$

Das ist nun der Strom, der von einem Segment (A) der Feldmühle über den Widerstand zur Masse fließt. Mit den Segmenten B verhält es sich ganz genauso. Das zweite Eingangssignal dient, wie bereits erwähnt, lediglich der Störungsunterdrückung.

7.2.1.3 Das Lichtschranken-Flügelrad

Das Lichtschranken-Flügelrad dient, zusammen mit dem Ausgangssignal **uOPTO**, dazu, die Polarität des E-Feldes festzustellen.

Wie in Abbildung 27 ersichtlich, ist auf der Motorwelle noch ein Lichtschranken-Flügelrad (LS-Flügelrad) montiert. Dieses muss die gleiche Form wie das Flügelrad haben, kann aber im Durchmesser auch kleiner sein.



Abbildung 29: Lichtschranke (Optokoppler)

Das LS-Flügelrad dreht sich durch den Schlitz einer Lichtschranke (Optokoppler) (siehe Abbildungen 27, 29 und 30). Es unterbricht bzw. gibt die Strecke zwischen LED und dem Fototransistor des Optokopplers frei.

Der linke Bereich in Abbildung 30 ist die LED, der rechte Teil der Fototransistor. Die Ziffern haben folgende Bedeutung:

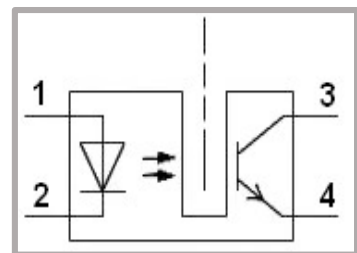


Abbildung 30: Symbol einer Lichtschranke

- | | |
|-----------------|---------------|
| 1 ... Anode | 2 ... Kathode |
| 3 ... Collector | 4 ... Emitter |

Das Signal des Optokopplers kommt aus dem Fototransistor (in der Schaltung, Abb. 33, ist dieses Signal mit **uOPTO** bezeichnet). Die Signalform **uOPTO** ist ein Rechtecksignal. Dies ergibt sich dadurch, dass der Fototransistor sperrt während sich das LS-Flügelrad zwischen LED und dem Fototransistor befindet. Das bedeutet, dass beinahe die gesamte Versorgungsspannung am Fototransistor ist. Ist das LS-Flügelrad nicht zwischen LED und dem Fototransistor, wird dieser angestrahlt. Er ist dann leitend und hat nur die Restspannung $u_{CE(Sat)}$.

Die **uOPTO**-Signalform ist nur von der Position des LS-Flügelrades respektive Lichtschranken abhängig. Sie ist stets rechteckig und ändert sich nicht, egal ob es sich um positive oder negative E-Felder handelt. Die Polarität ergibt sich aus dem Vorzeichen der Spannung u_D .

7.2.2 Die elektronische Schaltung

Die zu verarbeitenden Signale **u_{IA}** und **u_{IB}** sind analog. Für die Schaltung werden daher ebenfalls analoge Bauteile (linear devices), nämlich Operationsverstärker (OP) verwendet.

Operationsverstärker gibt es in vielen verschiedenen Ausführungen und Bauformen. Abbildung 31 zeigt eine häufig verwendete Type. Diese Gehäuseform wird als DIL (Dual In Line Package) bezeichnet und ist ca. 5 x 10 mm groß.



Abbildung 31: Operationsverstärker LM741CN

In elektronischen Schaltungen wird das in Abbildung 32 dargestellte Symbol für Operationsverstärker benutzt. OPs sind aktive Bauteile, d.h. sie benötigen eine Versorgungsspannung. Diese ist mit V_{S+} und V_{S-} gekennzeichnet. Üblicherweise liegt die Versorgungsspannung zwischen 2V und 15V und ist fast immer symmetrisch.

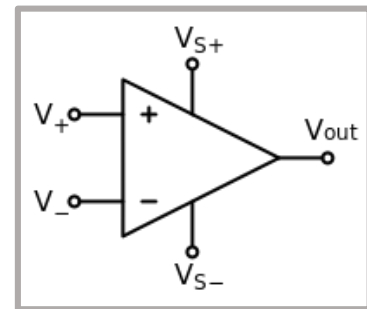


Abbildung 32: Symbol eines Operationsverstärkers

An OPs werden idealerweise gewisse Maximalforderungen gestellt. Bei realen Bauteilen sind die Haupteigenschaften folgende (Czmock 1972: 20).

- Sehr hoher Eingangswiderstand: $> 100 \text{ M}\Omega$
- Sehr niedriger Ausgangswiderstand: 10Ω
- Leerlaufverstärkung: 10^5

Leerlauf bedeutet, dass der OP nicht beschaltet ist; durch Beschaltung sinkt die Verstärkung und ist dann durch die verwendeten Bauteile bestimmt.

- Sehr gute Linearität
- Geringe Temperaturabhängigkeit

Nach der Einführung der wichtigsten Grundbegriffe, soll nun näher auf die Schaltungsentwicklung eingegangen werden. Die fertige Schaltung ist in Abbildung 33 zu sehen. Sie wurde in drei Teile, die farblich gekennzeichnet sind, unterteilt. Jeder dieser Teile erfüllt eine bestimmte Aufgabe, die nachstehend beschrieben wird.

Feldmühle - Schaltung

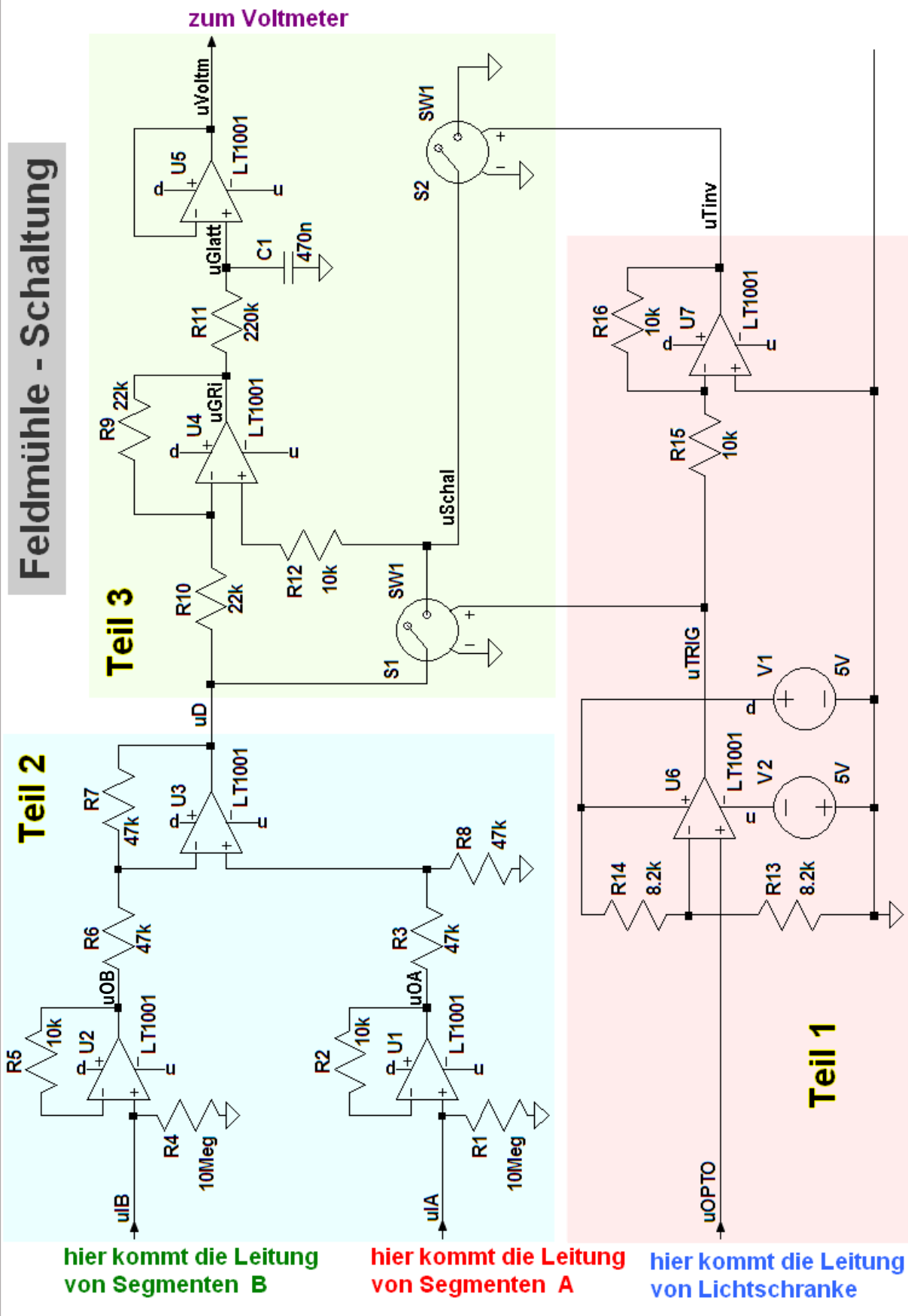


Abbildung 33: Feldmühlenschaltung

7.2.2.1 Teil 1 der Feldmühlenschaltung

liefert die Signale u_{TRIG} und u_{Tinv} , die zur Ansteuerung der Gleichrichter notwendig sind.

Das Lichtschrankensignal u_{OPTO} wird dem Komparator U6 zugeführt.

Am negativen Eingang von U6 liegt eine Triggerspannung von 2,5 V an; diese wird mit der Eingangsspannung von u_{OPTO} verglichen.

Die Spannungsquelle V1 liefert 5 V. Der Spannungsteiler, bestehend aus R13 und R14 (s. Abb. 33) ergibt 2,5 V.

Die Aufgabe des Komparators U6 ist es, die Flanken von u_{OPTO} steiler zu machen (s. Abb. 34). Das ist dann das Signal u_{TRIG} . Mit dem Operationsverstärker U7 wird u_{TRIG} invertiert, hier als u_{Tinv} bezeichnet.

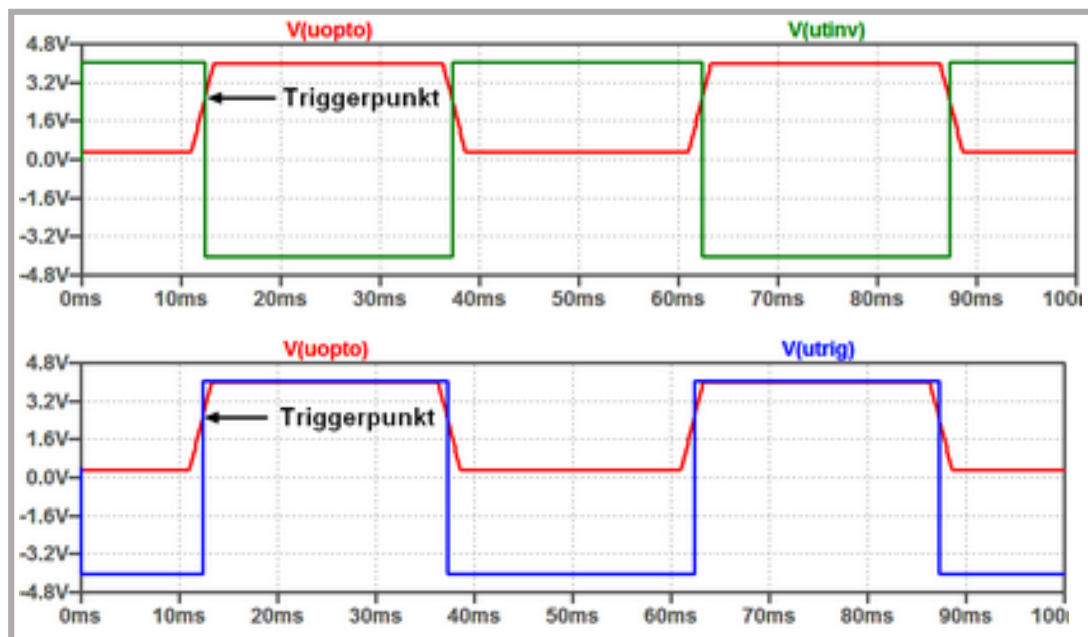


Abbildung 34: Aufgabe der OPs U6 und U7

Beide Signale, u_{TRIG} und u_{Tinv} , sind für die Ansteuerung des Gleichrichters im Teil 3 zuständig.

7.2.2.2 Teil 2 der Feldmühlenschaltung

entkoppelt die Signalquelle und unterdrückt etwaige Störungen.

Die Ladungen, welche sich am Segment A beziehungsweise Segment B aufgrund von Influenzierung durch das E-Feld ansammeln, werden über die Widerstände R1 und R4 zur Masse geleitet.

Durch den Spannungsabfall an R1 und R4 erhält man die Signale u_{IA} und u_{IB} , welche Informationen über die Stärke des E-Feldes liefern.

R1 und R4 müssen hochohmig sein, da sich an den Segmentplatten nicht allzu viele Ladungen ansammeln und dadurch sehr kleine Ströme durch R1 und R4 fließen. Solch kleine Ströme, durch hochohmige Widerstände geleitet, ergeben Spannungen im Bereich von 0,1 - 5 Volt.

Die OPs U1 und U2 fungieren als Entkoppler. Entkoppler werden verwendet, wenn eine Signalquelle (hier sind das die Segmente A und B) nicht belastet werden darf. Das wird dadurch bewerkstelligt, dass sämtliche Widerstände sehr hochohmig sind, wie es sowohl bei R1 und R4 (beide 10 MΩ) als auch beim Eingangswiderstand der OPs (100 MΩ) der Fall ist.

Die Signale aus U1 und U2 werden dann einem Differenzverstärker U3 zugeführt. Da die Beschaltung des Differenzverstärkers aus 4 gleichen Widerständen R3, R6, R7, R8 (alle 47 kΩ) besteht, ist die Ausgangsspannung

$$u_D = u_{OA} - u_{OB} \quad (38)$$

Dies lässt sich auch berechnen. Für die mathematische Herleitung werden folgende der Feldmühlenschaltung entsprechende Bezeichnungen verwendet:

Herleitung	Feldmühlenschaltung
u_A	u_D
u_{EP}	u_{OA}
u_{EN}	u_{OB}

Die Ausgangsspannung u_A wird in Abhängigkeit der Eingangsspannungen u_{EP} und der Beschaltung berechnet, also

$$u_A = f(u_{EP}, u_{EN}, R, C)$$

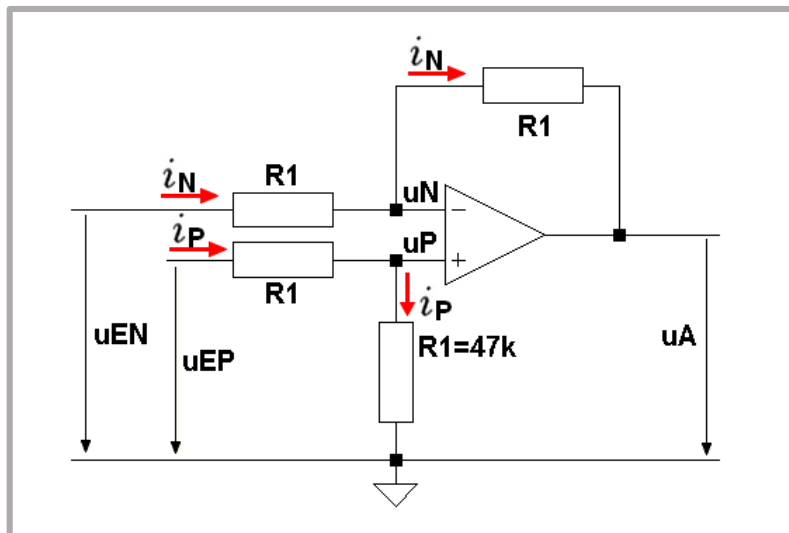


Abbildung 35: Differenzverstärkerschaltung – OP U3

Mit Hilfe des Ohmschen und der Kirchhoffschen Gesetze lässt sich diese Funktion explizit ableiten. Die folgende Berechnung gilt für den hier verwendeten Differenzverstärker (s. Abb. 35) und soll gleichzeitig die Richtigkeit von Gl. (38) zeigen.

Wegen des Spannungsteilers gilt

$$i_P = \frac{u_P}{R1} \quad (39)$$

und

$$i_P = \frac{u_{EP}}{R1 + R1} \quad (40)$$

Gl. (39) und Gl. (40) gleichgesetzt ergibt

$$\frac{u_P}{R1} = \frac{u_{EP}}{R1 + R1} \quad (41)$$

Umgeformt nach u_P ergibt sich

$$u_P = u_{EP} \frac{R1}{R1 + R1} = u_{EP} \frac{R1}{2R1} = \frac{u_{EP}}{2} \quad (42)$$

Da in jedem OP für die Differenzspannung stets gilt

$$u_{Diff} = u_P - u_N = 0 \quad (43)$$

gilt also

$$u_P = u_N = \frac{u_{EP}}{2} \quad (44)$$

Für den OP U3 gilt

$$i_N = \frac{u_{EN} - u_N}{R1} \quad (45)$$

und

$$i_N = \frac{u_N - u_A}{R1} \quad (46)$$

Gleichgesetzt

$$\frac{u_{EN} - u_N}{R1} = \frac{u_N - u_A}{R1} \quad (47)$$

und nach u_A umgeformt ergibt das

$$u_A = 2 u_N - u_{EN} \quad (48)$$

Da lt. Gl. (44) $u_N = \frac{u_{EP}}{2}$, ergibt sich

$$u_A = 2 \frac{u_{EP}}{2} - u_{EN} = u_{EP} - u_{EN} \quad (49)$$

Somit entspricht die mathematische hergeleitete Gl. (49), in der Feldmühlenschaltung der oben erwähnten Gl. (38)

$$u_D = u_{OA} - u_{OB} \quad (38)$$

Störungsunterdrückung

Der Hauptgrund für zwei Eingangssignale und den Differenzverstärker in dieser Feldmühlenschaltung ist, Störungen zu unterdrücken. Abbildung 36 illustriert die Funktionsweise der Störungsbeseitigung. Wenn eine Störung auftritt, so tritt sie bei beiden Eingangssignalen A und B gleichermaßen auf und kann mit Hilfe des Differenzverstärkers eliminiert werden. Eine Feldmühle könnte selbstverständlich auch mit nur einem Segment gebaut werden. Würde man aber mit nur einem Segment, also nur einem Eingangssignal arbeiten, wäre in dieser Schaltung auch kein Differenzverstärker möglich und sämtliche Störungen würden voll durchkommen. Die Konsequenz wäre, dass man sehr ungenaue Messergebnisse erhielte.

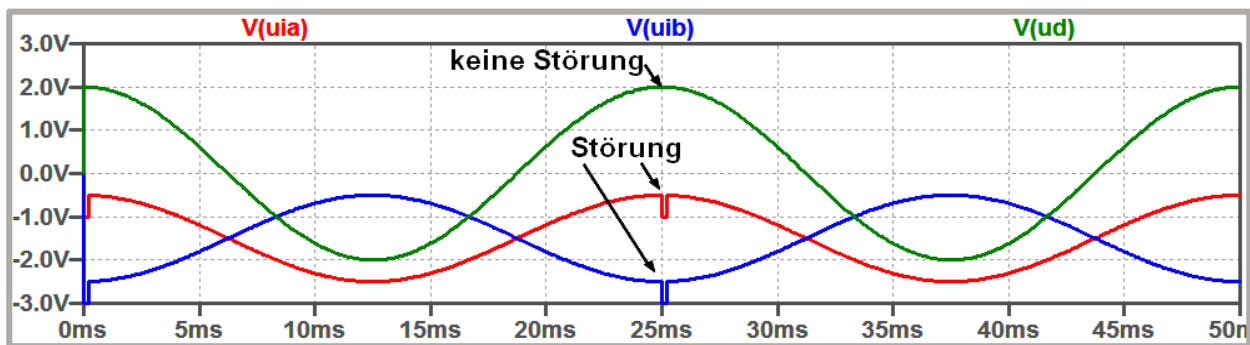


Abbildung 36: Störungselimination

7.2.2.3 Teil 3 der Feldmühlenschaltung

Hier wird das Messsignal gleichgerichtet, geglättet und gebuffert.

Der Operationsverstärker U4 bildet zusammen mit den gesteuerten Schaltern S1 und S2 einen Gleichrichter.

Die beiden Schalter S1 und S2 funktionieren nach einem einfachen Prinzip. Eine positive Spannung am $\oplus$ des Schalters bewirkt, dass der Kontakt geschlossen ist und somit ein Durchgang für analoge Signale gegeben ist. Liegt keine oder eine negative Spannung am $\oplus$ des Schalters an, ist der Kontakt geöffnet und es kann kein Signal geleitet werden.

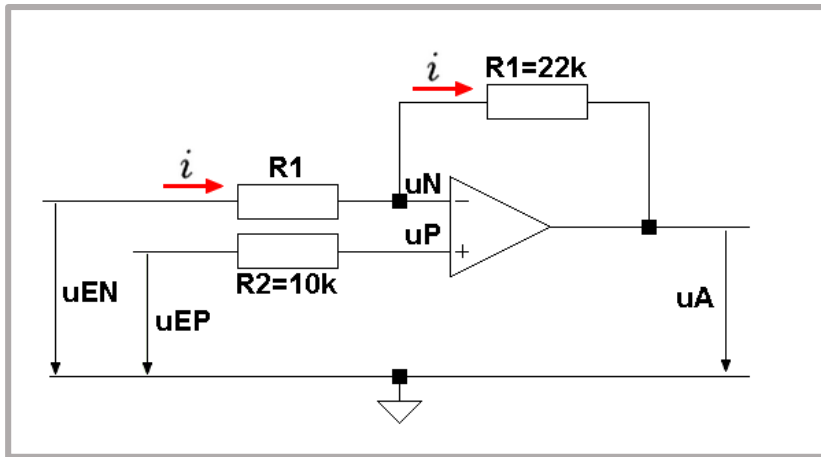


Abbildung 37: Teil des Gleichrichters - OP U4

Da es sich hier nicht um eine Standardschaltung handelt, ist für das Verständnis des Gleichrichters eine Herleitung für den Operationsverstärker U4 (s. Abb. 37) notwendig.

Die Ausgangsspannung u_{Gri} des OP U4 berechnet sich zu

$$u_{Gri} = 2 \cdot u_{Schal} - u_D \quad (50)$$

Für die mathematische Herleitung werden folgende der Feldmühlenschaltung entsprechende Bezeichnungen verwendet:

Herleitung	Feldmühlenschaltung
u_A	u_{Gri}
u_{EP}	u_{Schal}
u_{EN}	u_D

Es gilt

$$u_P = u_N = u_{EP} \quad (51)$$

Weiters gelten wieder Gl. (45) bis Gl. (48)

$$u_A = 2 u_N - u_{EN} \quad (48)$$

Da nun lt. Gl. (51) $u_N = u_{EP}$, ergibt sich

$$u_A = 2 u_{EP} - u_{EN} \quad (52)$$

Somit entspricht die mathematische hergeleitete Gl. (52), in der Feldmühlenschaltung der oben erwähnten Gl. (50)

$$u_{Gri} = 2 \cdot u_{Schal} - u_D \quad (50)$$

7.2.2.3.1 Funktion des Gleichrichters

Die Funktion des Gleichrichters ist in Abbildung 38 ersichtlich. Die Zeit T1 muss exakt die 1/2 Periodendauer der Eingangssignale u_A , u_B sein. Für T2 gilt dasselbe.

Die Periodendauer lässt sich mittels der Drehzahl n des Motors einstellen. In Abb. 38 wurde $n = 20$ U/s gewählt. Die Periodendauer ergibt sich damit zu:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20} \text{ Hz} = 0,05 \text{ s}$$

Daraus folgt: $T1 = T2 = 0,025 \text{ s}$

Während der Zeit T1 ist der Schalter S1 geöffnet und der Schalter S2 geschlossen, da das Signal u_{TRIG} eine positive Spannung und u_{Tinv} eine negative Spannung aufweist. Daher wird das Signal u_D durch S1 geleitet. Es gilt: $u_{Schalt} = u_D$.

Mit Gl. (52): $u_A = 2 u_{EP} - u_{EN}$ folgt

$$u_{Gri} = 2 u_D - u_D = u_D$$

Dies gilt nur während der Zeit T1 bzw. periodischen Wiederholungen davon (s. Abb. 38/2).

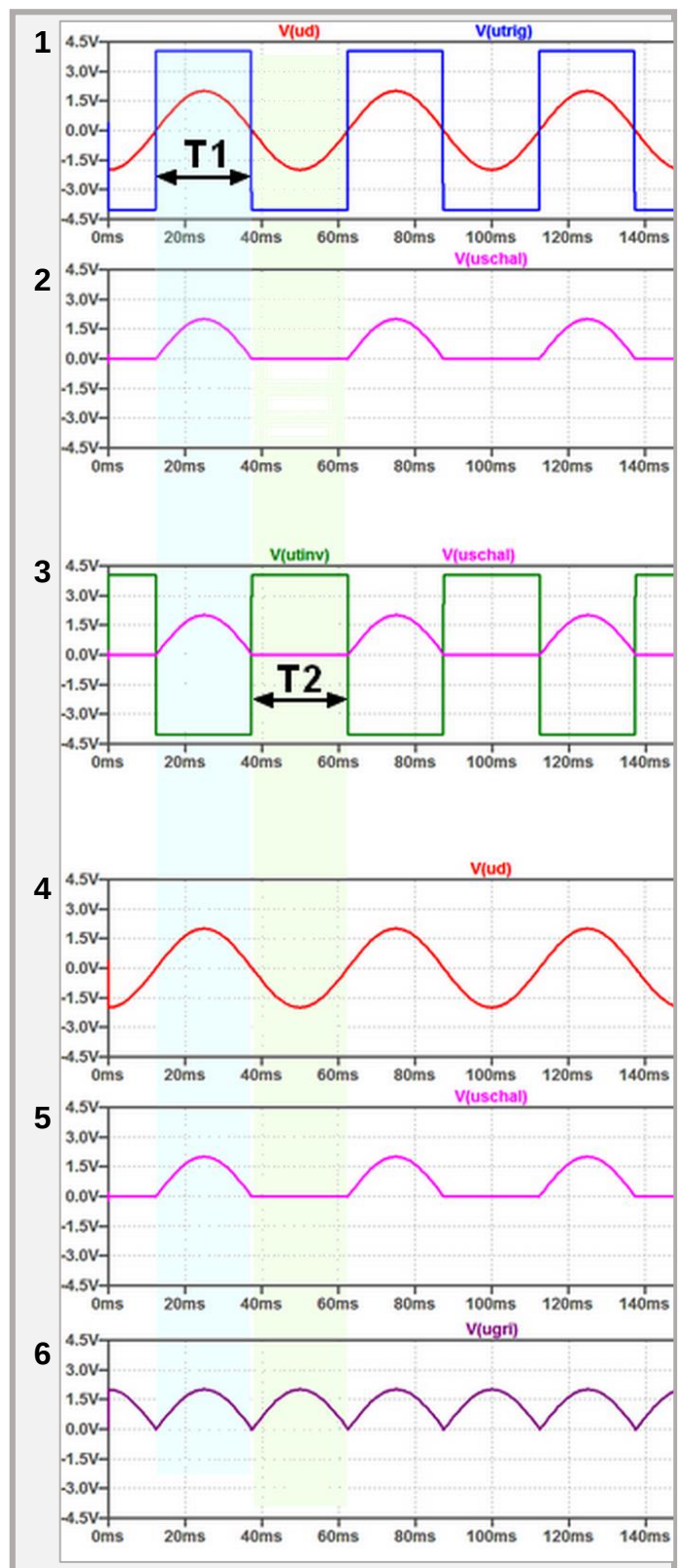


Abbildung 38: Funktion des Gleichrichters

Während der Zeit T2 ist nun der Schalter S1 geschlossen und der Schalter S2 geöffnet, da das Signal u_{TRIG} eine negative Spannung und u_{Tinv} eine positive Spannung hat. Das Signal u_D wird daher nicht durch S1, sondern durch S2 zur Masse geleitet (s. Abb. 38/3). Es gilt:

$$u_{Schalt} = \text{Masse oder } 0$$

Wiederum gilt Gl. (52). Somit ist die Gleichrichterspannung:

$$u_{Gri} = 2 \cdot 0 - u_D = -u_D$$

Dies ist in Abb.38/4-6 zu sehen. Während T2 wird die negative Sinuswelle von u_D invertiert in $-u_D$ und ist am Ausgang des Operationsverstärkers U4 als positive Sinuswelle zu sehen. Das ist nun das Signal u_{Gri} während T2. Auch dies gilt nur während der Zeit T2 bzw. periodischen Wiederholungen davon.

7.2.2.3.2 Glättung

Nach der Gleichrichtung folgt die Glättung mittels eines R-C Gliedes.

Die Zeitkonstante τ berechnet sich mit

$$\tau = R \cdot C \quad (53)$$

Im Falle der Feldmühlenschaltung wäre das:

$$\tau = R \cdot C = 220 \text{ k}\Omega \cdot 470 \text{ nF} = 103,4 \text{ msec} \approx 0,1 \text{ sec}$$

Wie in Abbildung 39 ersichtlich, ist nach 5 Zeitkonstanten (= 0,5 s) ein asymptotischer Wert von der Spannung u_{Glatt} erreicht. Änderungen des E-Feldes werden also schon nach 0,5 s genau angezeigt.

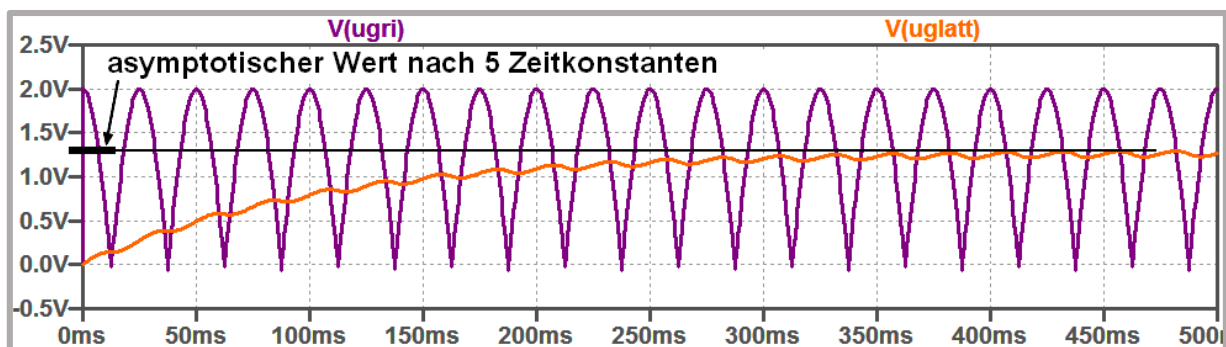


Abbildung 39: Signalglättung

7.2.2.3.3 Buffering

Bevor das Signal endgültig dem Voltmeter zugeführt wird, erfolgt noch eine Impedanzanpassung zwischen RC-Glied und dem Voltmeter (buffering), was durch den Operationsverstärker U5 bewerkstelligt wird. Dies ist notwendig, um das Voltmeter ausreichend versorgen zu können ohne die Quelle (RC-Glied) zu belasten. Dies wird durch den hohen Eingangswiderstand im OP U5 ($> 100\text{M}\Omega$) erreicht. Das Voltmeter wird durch die Versorgungsspannung des OP U5 versorgt. Ohne Buffer würden falsche Messwerte angezeigt werden. Dies ist in Abbildung 40 mittels Simulationsprogramm dargestellt. Abb. 40/1 und Abb. 40/2 zeigen den Fall ohne Buffer, wo das RC-Glied jeweils durch den relativ kleinen Innenwiderstand R_i des Voltmeters belastet wäre und inkorrekte Messwerte angezeigt werden. Abb. 40/3 zeigt den Fall mit Buffer, der dafür sorgt, dass korrekte Messwerte geliefert werden.

Der theoretische Gleichrichtwert einer Sinusspannung $\langle |u| \rangle$ (arithmetischer Mittelwert des Absolutbetrages) berechnet sich zu

$$\langle |u| \rangle = \frac{2}{\pi} \cdot \hat{u} \quad (54)$$

wobei $\hat{u}$ der Spitzenwert der Sinusspannung ist.

Bei einem angenommenen Spitzenwert $\hat{u} = 2\text{ Volt}$, wäre im Falle der Feldmühlenschaltung, der korrekte Wert, der vom Voltmeter angezeigt werden sollte, also :

$$\langle |u| \rangle = \frac{2}{\pi} \cdot 2\text{ V} = 1,273\text{ V}$$

Abb. 40/1:

Ohne Buffer. Voltmeter mit Innenwiderstand R_i von $1\text{ M}\Omega$. Das RC-Glied wäre dadurch belastet. Die gemessene Spannung wäre $1,04\text{ V}$ anstatt $1,27\text{ V}$.

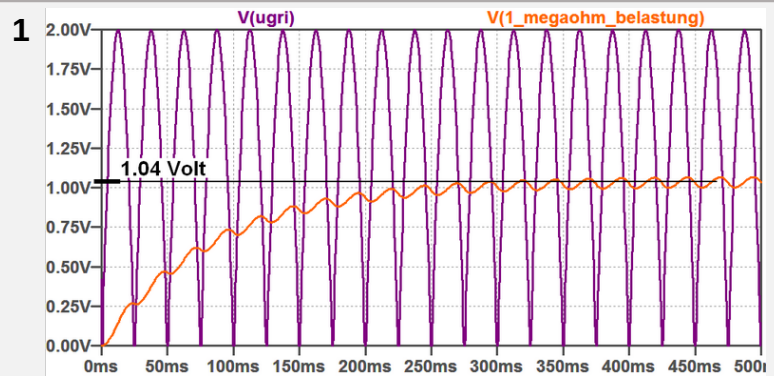


Abb. 40/2 :

Ohne Buffer. Voltmeter mit Innenwiderstand R_i von $10\text{ M}\Omega$. Das RC-Glied wäre dadurch belastet. Die gemessene Spannung wäre $1,24\text{ V}$ anstatt $1,27\text{ V}$.

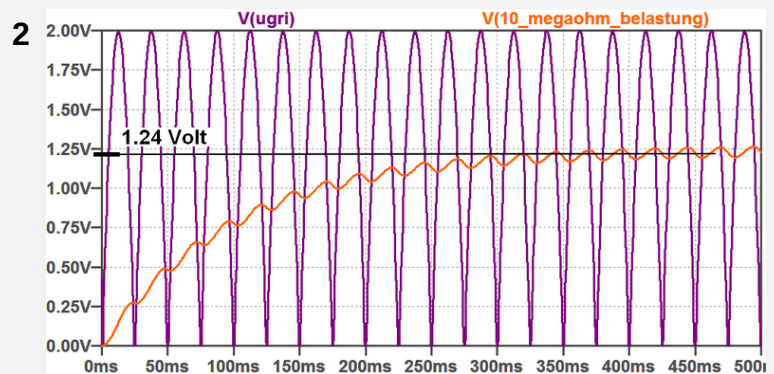


Abb. 40/3:

Mit Buffer. Der OP U5 hat einen sehr hohen Eingangswiderstand ($> 100\text{ M}\Omega$). Es kommt zu keiner Belastung des R-C Gliedes. Die gemessene Spannung wird korrekt mit $1,27\text{ V}$ angezeigt.

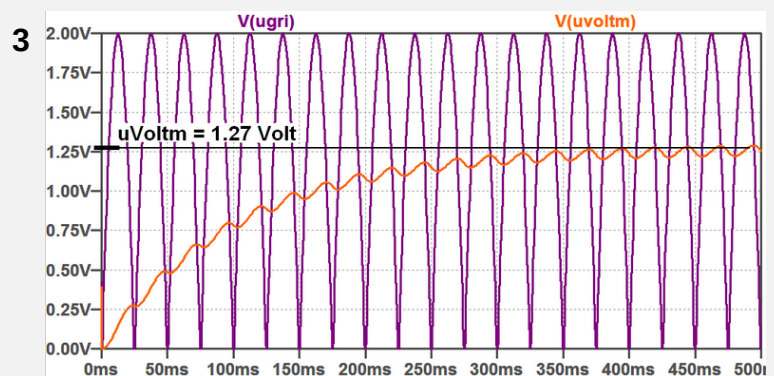


Abbildung 40: Funktionsweise eines Buffers

Man kann deutlich erkennen, dass eine Bufferung unbedingt notwendig ist, da die ohne Bufferung gemessenen Werte sehr ungenau sind.

Damit wären die drei Teilschaltungen ausreichend beschrieben. Nun bedarf es noch einiger Detailinformationen, welche die Arbeitsweise und das Verhalten der Gesamtschaltung betreffen.

7.2.3 Reaktion der Schaltung auf E-Felder unterschiedlicher Polarität

Bei positiven E-Felder ist die Ausgangsspannung **uVoltm** auch positiv (s. Abb. 41).

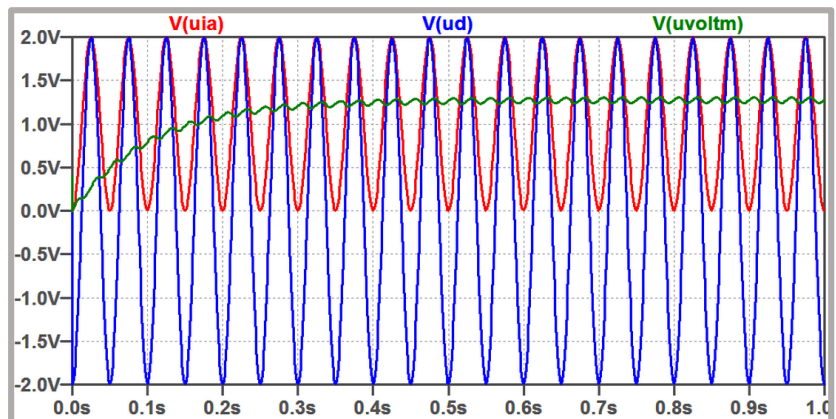


Abbildung 41: Ausgangssignal bei positiven E-Feldern

Bei negativen E-Felder ist die Ausgangsspannung **uVoltm** auch negativ (s. Abb. 42). Nach 0,5 s stehen die genauen Werte zur Verfügung.

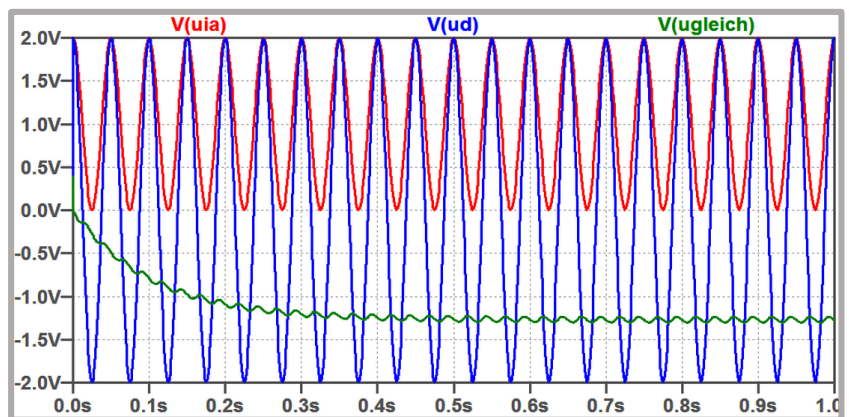


Abbildung 42: Ausgangssignal bei negativen E-Feldern

7.2.4 Linearität der Schaltung und Bereichsumschalter

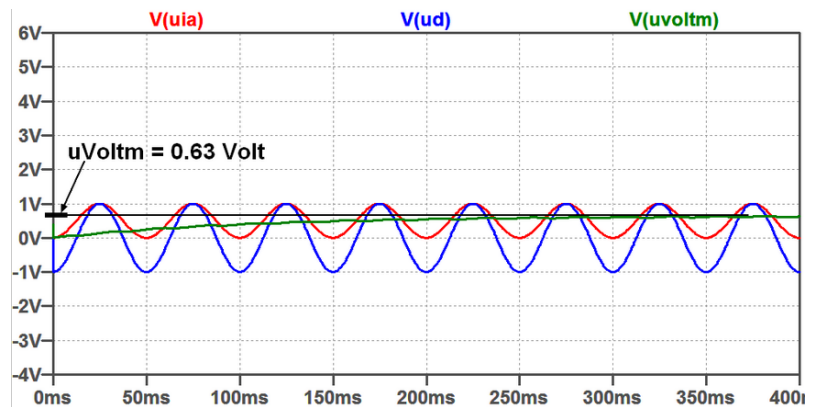
Wie aus Abbildung 43 ersichtlich, liefert die Schaltung proportionale Werte zwischen Eingangsspannungsamplitude **uIA** und Ausgangsspannungsamplitude **uVoltm**; d.h. die Schaltung arbeitet linear.

uIA in V	0,5	1	2
uVoltm in V	0,63	1,27	2,54

Außerdem ist zu erkennen, dass bei **uIA = 3 V**, die Elektronik übersteuert ist, d.h. die Ausgangsspannung ist nicht mehr proportional zur Eingangsspannungsamplitude. Abhilfe schafft hier ein Bereichsumschalter.

Amplitude - $u_A = 0,5 \text{ V}$

$u_{\text{Voltm}} = 0,63 \text{ V}$

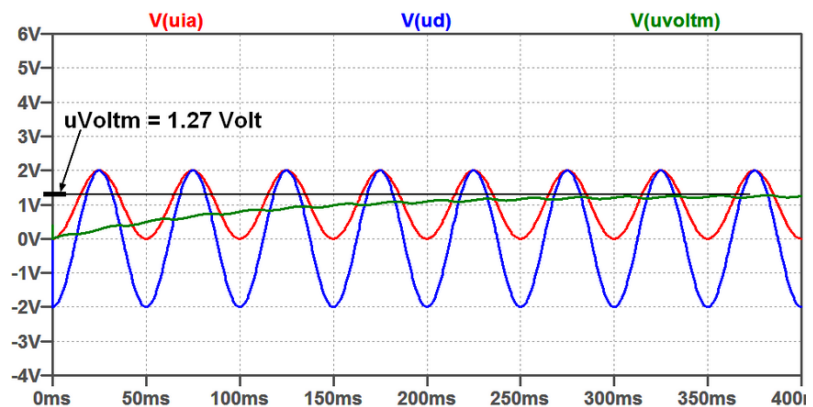


Amplitude - $u_A = 1 \text{ V}$

$u_{\text{Voltm}} = 1,27 \text{ V}$

Die Schaltung arbeitet linear.

Doppelter Eingang $\rightarrow$
Doppelter Ausgang

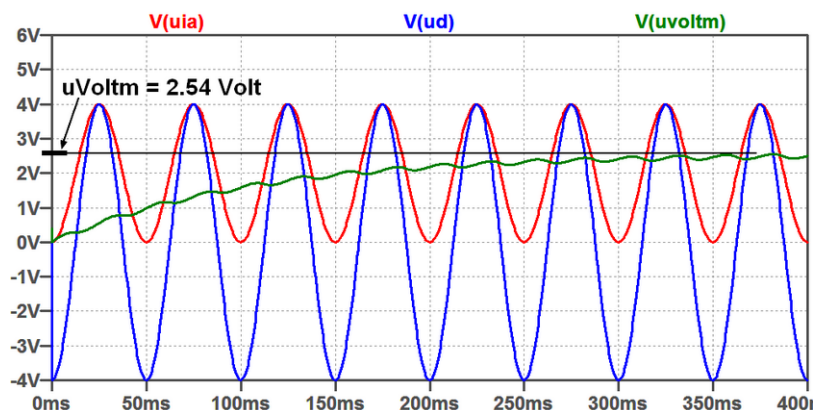


Amplitude - $u_A = 2 \text{ V}$

$u_{\text{Voltm}} = 2,54 \text{ V}$

Die Schaltung arbeitet linear.

Vierfacher Eingang $\rightarrow$
Vierfacher Ausgang



Amplitude - $u_A = 3 \text{ V}$

$u_{\text{Voltm}} = 2,8 \text{ V}$

Die Elektronik ist übersteuert; die Schaltung arbeitet nicht mehr linear.

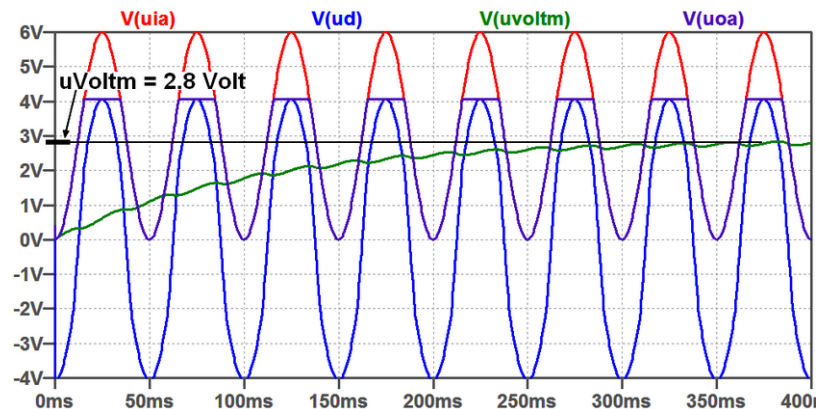


Abbildung 43: Linearität und Übersteuerung der Schaltung

Für den sechsfachen Eingangswert würde man auch die sechsfache Ausgangsspannung $u_{\text{Voltm}} = 3,7 \text{ V}$ erwarten. Gemessen werden aber lediglich $2,8 \text{ V}$. Dass die Schaltung nicht linear ist, erkennt man auch am Signal u_{OA} , dessen Sinusspitzen am Bild abgeschnitten sind.

Die Schlussfolgerung daraus ist, dass eine Messschaltung nur in einem bestimmten Bereich linear funktionieren kann. Für Messgrößen, die zur Übersteuerung und dadurch zu Nicht-Linearität und somit zu falschen Anzeigen führen, muss es Bereichsumschalter geben. Diese sorgen dafür, dass eine für einen Messbereich zu große Größe, im nächsten Messbereich richtig angezeigt wird.

8 FELDMESSUNGEN

Die Messungen des E-Feldes wurden mit folgenden Messgeräte durchgeführt:

- 1) ein ca. 130 Jahre altes historisches Aluminiumblättchenelektroskop VII/89 mit Flammensonde
- 2) einer elektrischen Feldmühle Q 475 A (Fa. Kleinwächter)

8.1 Elektroskop VII/89

Das verwendete Aluminiumblättchenelektroskop ist in Abb. 44 zu sehen.

Messgenauigkeit der Divergenz: $\pm 1 \text{ mm}$

Dieses Elektroskop ist während einer Messung mit der Flammensonde verbunden. Der genaue Aufbau und die Funktionsweise sind Kapitel 7.1.1. zu entnehmen.

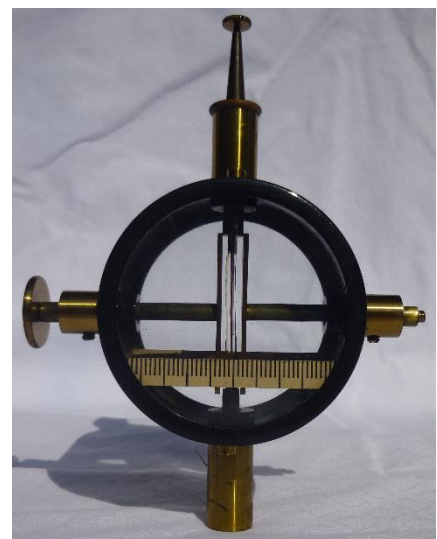


Abbildung 44: Exnersches Elektroskop

8.1.1 Eichung des Elektroskops

Es wurde im Vorfeld eine Eichmessung im Kondensatorfeld durchgeführt (s. Abb. 45). Der Plattenabstand d betrug 30 cm. Als Spannungsversorgung für den Kondensator diente ein Netzgerät, das stufenlos einstellbare Gleichspannung im Bereich 0-5 kV, lieferte. Zusätzlich wurde die Spannung mittels eines analogen Voltmeters kontrolliert. Die Flamme wurde in der Mitte des Feldes aufgestellt und mit dem Elektroskop, links in Abb. 45, verbunden. Es wurden Messungen von 50 V, 75 V, 100 V und dann in jeweils 50 V-Schritten bis 500 V gemacht. Es zeigte sich, dass 50 Volt die Auflösungsgröße ist; unterhalb dieser Spannung war kein genauer Ausschlag mehr möglich.

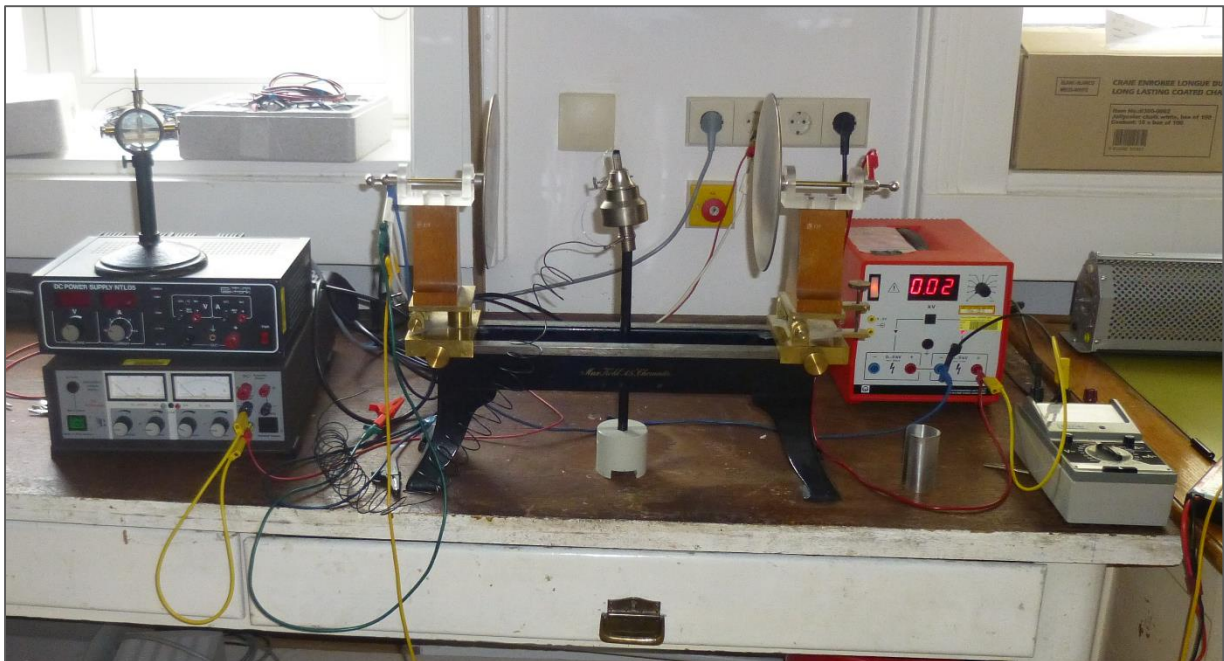


Abbildung 45: Flammensonde im Kondensatorfeld

Abbildung 46 zeigt die Eichkurve des Elektroskops. Die beiden Größen sind die Spannung in Volt und die Divergenz der Aluminiumblättchen in mm. Diese Eichkurve wurde für die Auswertung der Freilandmessungen herangezogen. Ein etwaiger Eichfehler wurde hier nicht berücksichtigt, da es sich um keine Präzisionsmessung handelt, sondern lediglich die Funktionsweise des Elektroskops gezeigt werden sollte. In Kapitel 8.3. findet sich eine detailliertere Fehlerrechnung der Messergebnisse, die die möglichen Abweichungen bei der Messung bekannt gibt.

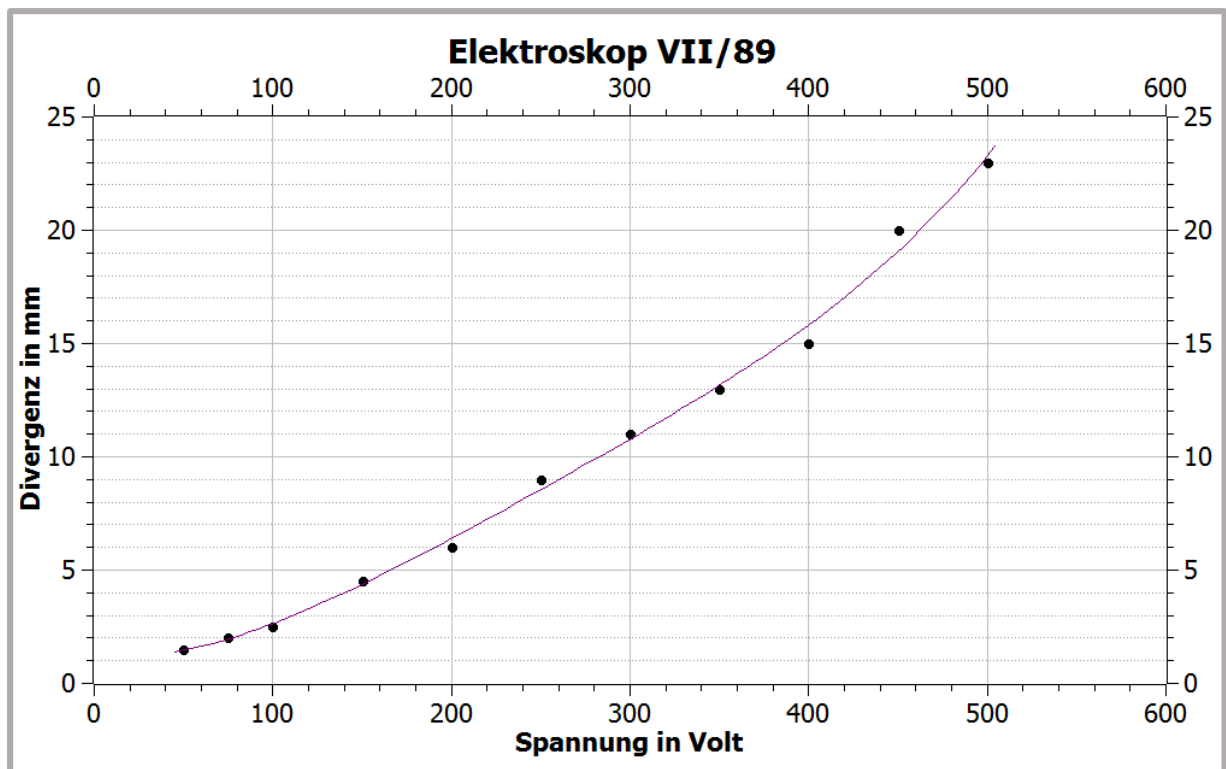


Abbildung 46: Eichkurve Elektroskop VII/89 im Kondensatorfeld bis 500 V

8.1.2 Durchführung der Messung

Insgesamt wurden zwei umfangreichere Messungen durchgeführt. Die erste fand vormittags am 13.02.2016 im Tullnerfeld am Rande des Radweges Tulln – Staasdorf als auch neben einem dort angrenzenden erdigen Feldweg statt. Diese Messung wurde gemeinsam mit Herrn Dr. Sachslehner durchgeführt, wo ich die Handhabe der Geräte und die Messmethode kennenlernte.

Der in Abbildung 47 sichtbare Verlängerungsstab ist 1 m lang. Es gibt noch einen zweiten, der zusätzlich montiert werden kann. Mit Hilfe beider Verlängerungsstäbe kann man Höhen bis über 3,5 m erreichen.



Abbildung 47: Prof. Sachslehner mit historischem Messgerät

Der Flammenkollektor in Abbildung 48 ist ein kleiner Spiritusbrenner. Für das oberste Stück des Drahtes, welches bei Betrieb in der Flamme sein muss, wurde ein Edelstahldraht mit 0,5 mm Durchmesser verwendet; der restliche Leitungsdraht zum Elektroskop bestand aus isoliertem Kupferdraht mit 0,3 mm Durchmesser.



Abbildung 48: Flammensonde mit Windschutz

Das Gehäuse des Elektroskops wurde geerdet und die isolierte Zuleitung auf der Oberseite mit der Flammensonde verbunden. Wegen des Windes musste ein zurechtgebogenes Blech als Windschutz verwendet werden. Während der Messung ist ausdrücklich darauf zu achten, dass die Drahtspitze in der Flammenspitze ist; sie soll glühen. Ist sie zu wenig heiß, funktioniert der Abtransport der Ladungen nicht.

Das Wetter war zunächst sonnig, dann wechselhaft und zog stetig zu. Es wehte mäßiger Wind. Die Temperatur war ca. 10 °C. Wir konnten uns davon überzeugen, dass die Geräte einwandfrei funktionieren. In Abbildung 49 sieht man schön wie sich die Aluminiumblättchen auseinanderspreizen. Auf der Skala ist insgesamt eine

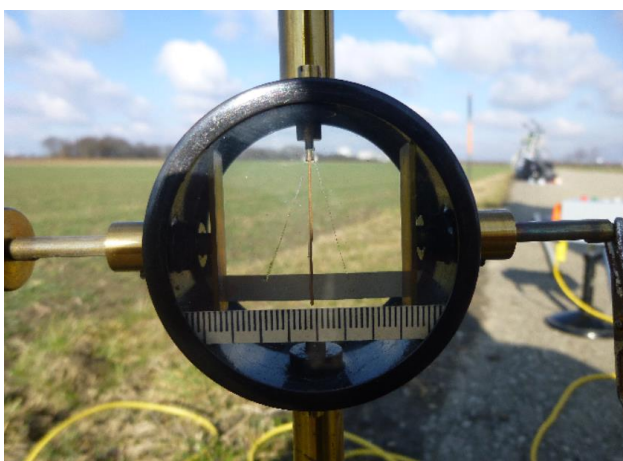


Abbildung 49: Ausschlag der Blättchen beim Anheben der Flammensonde

Divergenz von 17 mm abzulesen. Dieser Wert wurde in einer Höhe von ca. 2,80 m gemessen. Der Eichkurve in Abb. 46 ist somit ein Spannungswert von 420 V zu entnehmen. Dies entspricht einer Feldstärke von 150 V/m, was genau für Schönwetter zutrifft. Einige weitere Werte im Bereich 120 V/m bis 140 V/m konnten festgestellt werden. Als schwarze Wolken aufzogen, wurden die Werte unstetig. Der Einfluss der Wolken

war schließlich auch schon Franz Exner bekannt. Vergleichsmessungen mit der in der

Hand gehaltenen Feldmühle ergaben Werte um 1,5 kV/m. Man muss bedenken, dass das Messgerät selbst das zu messende Feld verzerrt. Aufgrund dieser Feldverzerrungen (s. Abb. 16) misst die Feldmühle bei der normalen Freihandmessung um ca. einen Faktor 10 zu hoch. Wie auch bei Zhou und Diendorfer (2011) von ALDIS zu lesen ist, ist dies auch bei der permanent betriebenen Feldmühle am Gaisberg, welche auf einer vier Meter hohen Plattform installiert ist, der Fall (Zhou 2001:1303). 2011 wurde das Ausmaß der Feldverzerrung am Gaisberg ermittelt; es besteht eine Feldverstärkung um einen Faktor 7,81 (Zhou 2011: 1306).

Um schließlich die einwandfreie Funktion des Exnerschen Elektroskops demonstrieren zu können und die Messdaten gut mit Literaturwerten vergleichen zu können, fand noch eine zweite Messung bei absoluten Schönwetterbedingungen statt. Diese wurde am 14.03.2016 bei durchwegs sonnigem Wetter durchgeführt. Die Wetterverhältnisse ließen eine frühere Messung leider nicht zu. Diesmal wurde bei beiden Messmethoden darauf geachtet, Feldverzerrungen jeglicher Art möglichst zu vermeiden. Die hier gewonnenen Messdaten wurden schließlich einer gründlichen Analyse unterzogen.

Die zweite Messung wurde nachmittags in der Ebene im Marchfeld auf einem Feldweg zwischen Groß-Enzersdorf und Markgrafneusiedl durchgeführt. Es herrschte mäßiger Wind, die Temperatur war um die 10 °C. Die Messung wurde wiederum mit dem Aluminiumblättchenelektroskop VII/89 mit der Flammsonde gemacht. Parallel dazu lief in etwa 60 m Entfernung eine Feldmessung mit einer elektrischen Feldmühle Q 475 A (Fa. Kleinwächter), wobei diese Messung aber mit der im Abschnitt 8.2 beschriebenen Messmethode erfolgte, um die Verdichtung der Potentiallinien möglichst zu vermeiden.

Mit dem Elektroskop wurde beginnend in einer Messhöhe von 1m, die Flammsonde mit Hilfe der Verlängerungsstöcke zunächst immer um 20 cm angehoben und die jeweilige Spreizung der Aluminiumblättchen notiert. Ab 2,20 m bis 3,50 m erfolgte dasselbe dann in teilweise größeren Intervallen. Die genaue Höhe wurde mit Hilfe einer Messlatte bestimmt. Während der gesamten Messung wurde darauf geachtet,

dass möglichst keine Feldverzerrungen entstehen. Eine Hilfsperson hielt flach am Boden liegend die Flammensonde. Nach jeder Einstellung der Höhe der Flammensonde mit Hilfe der Messlatte, wurde letztere sofort entfernt und die Divergenz der Blättchen abgelesen. Die Ablesung erfolgte von mir (ebenfalls am Boden liegend) in einiger Entfernung von der Flammensonde mit Hilfe eines Feldstechers.

8.1.3 Messwerte

Die ersten beiden Spalten der Tabelle 4 zeigen die bei der Messung notierten Daten. Die dritte Spalte ist die Spannung, die im Anschluss aus der Eichkurve (s. Abb. 46) herausgelesen wurde.

Tabelle 4: Messergebnisse - Elektroskop

Messnr.	Höhe in m	Divergenz in mm	Spannung in Volt
1	1,00	3	112
2	1,20	4	140
3	1,40	6	190
4	1,60	8	238
5	1,80	10	282
6	2,00	10	282
7	2,20	11	304
8	2,70	14	367
9	3,00	15	386
10	3,50	17	420

Grafisch dargestellt ergibt sich folgende Kurve (s. Abb. 50).

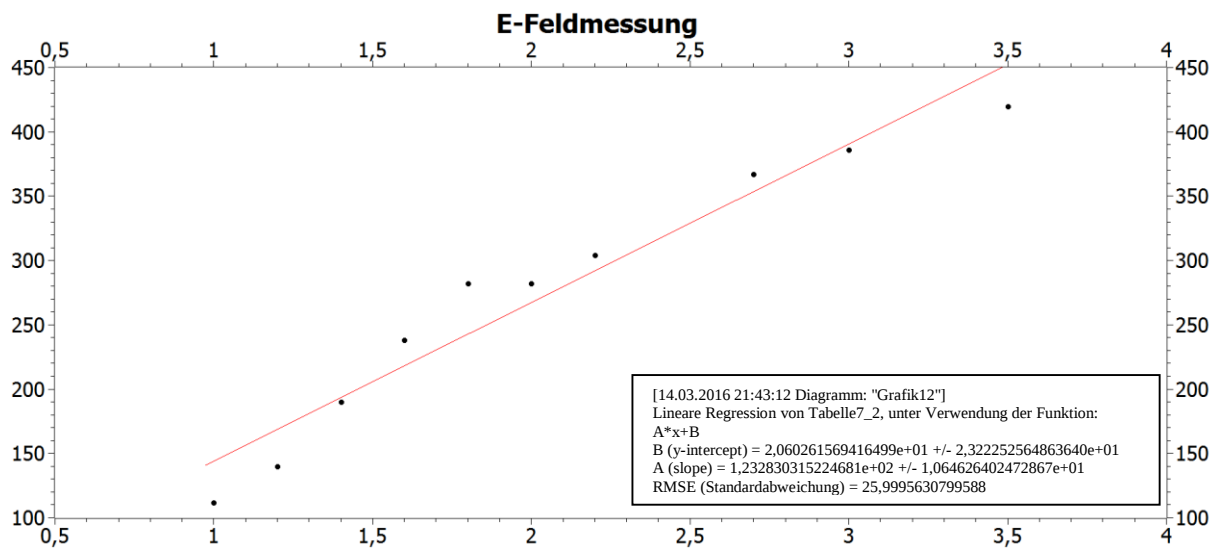


Abbildung 50: E-Feld bei Schönwetterbedingungen

Die einzelnen Punkte sind die gemessenen Werte. Die rote Linie ist die lineare Anpassung an die Messwerte. Die Steigung, die der mittleren E-Feldstärke entspricht ergibt sich somit zu

$$E \approx (123 \pm 11) \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem Literaturwert von ca. 130 V/m bei Schönwetter überein. Eine genaue Fehlerrechnung findet sich in Kapitel 8.3.

8.2 Elektrische Feldmühle Q 475 A

Die Feldmühle Q 475 A besteht aus einem Alublech-Gehäuse, in welches eine Influenzsonde eingebaut ist. Abbildung 51 zeigt das Gerät von vorne. Es ist das sternförmige Elektrodensystem zu sehen. Dieses ist goldplattiert, um galvanische Störfelder zu vermeiden. Im Inneren befindet sich ein Drehspulinstrument.



Abbildung 51: Elektrische Feldmühle

Es handelt sich um ein Analoginstrument Kl. 1,5 (Anzeigefehler $\pm 1,5\%$) mit den Messbereichen: $\pm 2\text{ kV/m}$

$\pm 20\text{ kV/m}$

$\pm 200\text{ kV/m}$

Vor einer Messung, muss ein Nullpunktgleich erfolgen, indem der Zeiger mit Hilfe einer Justierschraube händisch auf Null in der Skalenmitte gestellt wird. Die gemessene Feldstärke ist beim Messen direkt auf der Anzeige in kV/m abzulesen.

Um Feldverzerrungen durch das Messgerät weitgehend auszuschließen, wurde die Feldmühle zur Messung mit dem Flügelrad nach oben zeigend in eine Vertiefung im ebenen Erdboden gelegt, sodass sich das Flügelrad auf Erdbodenniveau befand. Darunter wurde ein Fotoapparat im Video-Aufnahmemodus gelegt, der den Zeigerausschlag permanent filmte. Die Aufnahme dauerte insgesamt etwas mehr als 18 Minuten. Dieser Aufbau war in einem ausreichend großen Abstand von ungefähr 60 m während der gesamten Zeit der Elektroskop-Messungen aktiviert. So wurde sichergestellt, dass beide Messmethoden zeitgleich unter gleichen Wetterbedingungen erfolgten.

Die Messwerte zeigten sich durchwegs stabil im Messbereich 2 kV. Der Zeiger befand sich während des ganzen Videos zwischen 100 – 200 V/m. Ausnahmen waren lediglich durch Störungen von außen zu bemerken; konkret war bei der Auswertung des Videos im Nachhinein deutlich zu sehen, dass die Feldmühle extrem schnell und empfindlich reagierte, wenn man sich annäherte. Sobald die Störung aber vorbei war,



Abbildung 52: Messanzeige der elektrischen Feldmühle bei Schönwetter

pendelte sich der Zeiger wieder auf den o.g. Wert ein. Solche Störungen traten dann ein, wenn probenhalber der Messbereich auf einen höheren Bereich umgeschaltet wurde. Dadurch konnte aber gesehen werden, dass das Gerät einwandfrei funktioniert, da die gemessenen Werte eben nur im Messbereich 2 kV korrekt angezeigt wurden. Abbildung 52 ist ein screenshot des Videos und zeigt die, außerhalb der kurzen Störungen, übliche Anzeige von etwas mehr als 100 V/m und weniger als 150 V/m (Gerät im 2 kV-Bereich).

8.3 Fehlerrechnung und Diskussion

Bei der Elektroskopmessung gibt es nun zwei Messwertreihen:

- die Höhe, in der jeweils gemessen wurde
- die Spannung, die aus der Divergenz der Blättchen mit Hilfe der Eichkurve des Elektroskops abgeleitet wurde

Die Ausgleichung erfolgt nach der Methode der kleinsten Quadrate (Leupold 1968: 492-493).

Nehmen wir für die Höhe die Variable x und für die Spannung y , besteht folgender linearer Zusammenhang:

$$y = ax + b \quad (55)$$

Daraus sind die Konstanten a (Anstieg) und b (Abschnitt) zu bestimmen. Dadurch ist die Ausgleichsgerade (s. Abb. 50, rote Linie) eindeutig bestimmt. Da die einzelnen Messwerte von der Ausgleichsgeraden abweichen, werden folgende Fehlergleichungen aufgestellt:

$$y_i + v_i = ax_i + b \quad (56)$$

bzw. ergibt sich umgeformt

$$v_i = ax_i - y_i + b \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (57)$$

Dabei sind v_i die Abweichungen (Fehler) zwischen der Ausgleichsgeraden und den einzelnen Messwerten y_i . Da die Summe aller Abweichungen $[v]$ Null ergibt, benützt man für die Fehlerangabe v_i^2 . Die eckige Klammer ist die von Gauss eingeführte Summensymbolik und bedeutet Summe aller v_i^2 (Leupold 1968: 478).

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = [vv] \quad (58)$$

Tabelle 5 zeigt die für die weiteren Berechnungen benötigten Werte. Dabei gelten folgende Entsprechungen zu Tabelle 4:

i ... Messnummer

x_i ... Höhe in m

y_i ... Spannung in Volt

Tabelle 5: Werte für die Fehlerberechnung

i	x_i	y_i	x_i^2	$x_i \cdot y_i$	v_i	v_i^2
1	1,00	112,00	1,00	112,00	31,89	1016,69
2	1,20	140,00	1,44	168,00	28,54	814,66
3	1,40	190,00	1,96	266,00	3,20	10,23
4	1,60	238,00	2,56	380,80	-20,14	405,80
5	1,80	282,00	3,24	507,60	-39,49	1559,30
6	2,00	282,00	4,00	564,00	-14,83	219,97
7	2,20	304,00	4,84	668,80	-12,17	148,22
8	2,70	367,00	7,29	990,90	-13,53	183,15
9	3,00	386,00	9,00	1158,00	4,45	19,82
10	3,50	420,00	12,25	1470,00	32,09	1029,98
Spaltensumme	20,40	2721,00	47,58	6286,10		5407,82

Die Koeffizienten a und b sind nun so zu wählen, dass $[vv]$ ein Minimum wird, mit

$$v_i^2 = a^2 x_i^2 + y_i^2 + b^2 - 2ax_i y_i + 2abx_i - 2by_i \quad (59)$$

Summiert über alle i :

$$[vv] = a^2[xx] + [yy] + nb^2 - 2a[xy] + 2ab[x] - 2b[y] = f(a; b) \quad (60)$$

Die partiellen Ableitungen nach a und b setzt man Null:

$$\frac{\partial [vv]}{\partial a} = 2a[xx] - 2[xy] + 2b[x] = 0 \quad (61a)$$

$$\frac{\partial [vv]}{\partial b} = 2nb + 2a[x] - 2[y] = 0 \quad (61b)$$

bzw. lauten als Normalgleichungen:

$$[xx]a + [x]b = [xy] \quad (62a)$$

$$[x]a + nb = [y] \quad (62b)$$

Für die ausgeglichenen Werte der Koeffizienten a und b ergibt sich

$$a = \frac{[xy]n - [x][y]}{[xx]n - [x]^2} \quad (63)$$

$$b = \frac{[xx][y] - [xy][x]}{[xx]n - [x]^2} \quad (64)$$

Setzt man die Werte aus Tabelle 5 ein, ergeben sich folgende Koeffizienten:

$$a = 123,28$$

$$b = 20,60$$

Nun müssen noch die mittleren Fehler von a und b bestimmt werden. Den Einzelwertmessfehler m erhält man aus

$$m = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-2}} \quad (65)$$

Für die vorliegende Messung also $m = 26,00$.

Den mittleren Fehler von a (Anstiegsfehler m_a) berechnet man mit

$$m_a = m \sqrt{\frac{n}{[xx]n - [x]^2}} \quad (66)$$

Für die vorliegende Messung also $m_a = 10,65$.

Den mittleren Fehler von b (Abschnittsfehler m_b) berechnet man mit

$$m_b = m \sqrt{\frac{[xx]}{[xx]n - [x]^2}} \quad (67)$$

Für die vorliegende Messung also $m_b = 23,22$.

Letztendlich ergibt sich die Ausgleichsgerade mit allen Fehlern, nämlich Einzelmesswertfehler (m), Anstiegsfehler (m_a) und Abschnittsfehler (m_b)

$$y_i \pm m = (a \pm m_a) \cdot x_i + b \pm m_b \quad (68)$$

Konkret auf die vorliegende Messung bezogen, ergibt sich somit

$$y_i \pm 26 = (123,28 \pm 10,65) \cdot x_i + 20,60 \pm 23,22$$

Die berechneten Werte entsprechen den mittels Plot-Programm berechneten Daten in Abbildung 50 (rechts unten).

Vergleicht man nun die mittels Elektroskop ermittelte E-Feldstärke von $(123 \pm 11) \frac{V}{m}$ mit dem Literaturwert von ca. 130 V/m bei Schönwetter, so stimmen diese Werte sehr gut überein. Für die Feldmühlenmessung entfällt eine komplexe Fehlerrechnung, da der Hersteller eine Messgenauigkeit von $\pm 1,5\%$ vom Endausschlag angibt. Auch hier entsprachen die gemessenen Werte voll und ganz dem Theoriewert.

9 RESUMEE

Seit der Entmystifizierung von luftelektrischen Naturphänomenen wie Blitzen vergingen viele Jahrhunderte bis zum heutigen Modell eines globalen elektrischen Stromkreises. Eine Vielzahl von namhaften Naturwissenschaftlern trug zur Erforschung der atmosphärischen Elektrizität und ihren Erscheinungen bei. Mit zunehmendem Wissen auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre, wurde besonders ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Forschung enorm vorangetrieben.

Franz Serafin Exner, oftmals als „Begründer der modernen luftelektrischen Forschung“ betitelt, setzte hier ganz wesentliche Akzente. Auch wenn die von ihm aufgestellte Theorie über den Ursprung des luftelektrischen Feldes letztendlich aufgegeben werden musste, leistete er dennoch wertvolle Grundlagenarbeit. Seine Theorie enthielt einen Kreislaufprozess und war eng an meteorologische Erscheinungen gebunden. Diese wichtige Verknüpfung zwischen Meteorologie und elektrischem Feld der Erde geriet nach Abkehr von einer rein elektrostatischen Sichtweise jedoch in Vergessenheit. Erst in den 1920er Jahren wurde diese Wechselbeziehung nach der Bestätigung der Existenz eines weltweiten Tagesganges des luftelektrischen Feldes aufgrund von Messungen auf dem Forschungsschiff Carnegie, wieder entdeckt und so eine erste Theorie eines globalen elektrischen Stromkreises aufgestellt.

Die Fortschritte auf dem Gebiet der Messtechnik waren selbstverständlich entscheidend für die Geschichte der Luftelektrizität. Auch hier lieferte Exner einen wesentlichen Beitrag. Sein Elektroskop unterstützte ihn in seiner systematischen präzisen Arbeitsweise ganz wesentlich und machte die große Anzahl an Messdaten, die er sammelte und analysierte, überhaupt erst möglich. Wie die im Zuge dieser Diplomarbeit durchgeführten Messungen bewiesen haben, liefert das rund 130 Jahre alte Messgerät noch immer verlässliche Werte.



Abbildung 53: Messungen Ende des 19. Jahrhunderts und 2016

Die komplexen elektrischen Vorgänge innerhalb der Atmosphäre sind auch heute nicht restlos geklärt und noch immer Gegenstand der Forschung. Franz Serafin Exners Beitrag auf dem Weg zu unserer heutigen Vorstellung ist jedoch unumstritten. So bleibt nur mit den Worten Egon Schweidlers in seinem Nachruf an Franz Serafin Exner zu schließen (Benndorf 1937: 11-12):

„Das Bleibende an Exners Verdiensten um die luftelektrische Forschung liegt darin, daß er zu einer Zeit, wo sie – man möchte fast sagen – dilettantisch betrieben wurde und in planloser Anhäufung unverstandenen und wissenschaftlich wenig verwertbaren Beobachtungsmaterialies erstarrt war, auf streng wissenschaftliche Grundlage stellte, daß er durch seine einfache Apparatur für das Anfangsstadium ausreichend genaue Beobachtungen ermöglichte, daß er durch sein Theorie bestimmte scharf umrissene Probleme stellte, endlich, daß er als ungemein anregender Lehrer seinem Lieblingsgebiet eine große Zahl von Mitarbeitern zuführte, wie die stattliche Reihe der von ihm und seinen Schülern herrührenden ‚Beiträge zur Kenntnis der atmosphärischen Elektrizität‘ in den Sitzungsberichten der Wiener Akademie zeigt.“

Literaturverzeichnis

- Albrecht, Gustav. 1885. *Elektro-technische Bibliothek. XXVIII. Band. Geschichte der Elektrizität mit Berücksichtigung ihrer Anwendungen*. Wien: A. Hartleben's Verlag.
- Aplin, K.L. Harrison R.G. 2013. "Lord Kelvin's atmospheric electricity measurements". EGU General Assembly 2013, held 7-12 April, 2013 in Vienna, Austria.
Online-Ressource: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1305/1305.5347.pdf> (download 06.01.2016).
- Baur, Franz. 1957. Linkes Meteorologisches Taschenbuch, III. Band. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.
- Benndorf, Hans. 1898. „Beiträge zur Kenntnis der Atmosphärischen Elektrizität II. Messungen des Potentialgefälles in Sibirien“. In: Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. CVIII. Band. Abt. IIa, Heft I bis V. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei: 341-370
- Benndorf, Hans. 1906. „Über gewisse Störungen des Erdfeldes mit Rücksicht auf die Praxis luftelektrischer Messungen“. In: Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. CXV. Band. Abt. IIa, Heft I bis V. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei: 425-456.
- Benndorf, Hans. 1925. „Beiträge zur Kenntnis der atmosphärischen Elektrizität Nr. 67. Grundzüge einer Theorie des elektrischen Feldes der Erde I“. In: Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse 134_2a: 281-315.
- Benndorf, Hans. 1927. „Beiträge zur Kenntnis der atmosphärischen Elektrizität Nr. 68. Grundzüge einer Theorie des elektrischen Feldes der Erde II“. In: Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse 136_2a: 175-194.
- Benndorf, Hans. 1937. *Gedenkrede auf Franz Serafin Exner*. Wien: Universität Wien.
- Birett, H. Helbig, K. Kertz, W. Schmucker U. 1974. *Zur Geschichte der Geophysik. Festschrift zur 50jährigen Wiederkehr der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*. Berlin: Springer Verlag.
- Bittner, Lotte. 1949. „Geschichte des Studienfaches Physik an der Universität Wien in den letzten hundert Jahren“. Dissertation, Universität Wien.

- Blechl, Guido. Gorraiz, Juan. Kieseewetter, Roland. Kromp, Brigitte. Nezbeda, Erich. Tuscher, Engelbert. Atzmannstorfer, Julia. Schlögl, Reinhard. 2004. *Österreichische Zentralbibliothek für Physik - Geschichte, Dokumente, Dienste*. Wien: Algoprint Verlags AG, „Information Assistant“, Ver. f. Informationsmanagement. Online-Ressource: https://phaidra.univie.ac.at/detail_object/o:35 (download 30.03.2016)
- Blüthgen, Joachim. 1966. *Allgemeine Klimageographie*. (2. Auflage). Berlin: Walter De Gruyter & Co.
- Bud, Robert. Warner, Deborah Jean. 1998. *Instruments of Science. An Historical Encyclopedia*. London: The Science Museum, London. Garland Publishing, Inc.
- Canton, John. 1753. “Electrical Experiments, with an Attempt to Account for Their Several Phaenomena; Together with Some Observations on Thunder-clouds, by John Canton, M. A. And F. R. S.”. *Philosophical Transactions (1683-1775)* 48. The Royal Society: 350–58. Online-ressource: <http://www.jstor.org/stable/105167> (download 24.01.16).
- Chalmers, J. Alan. 1967. *Atmospheric electricity*. (2. Auflage). Oxford: Pergamon Press.
- Coen, Deborah R. 2007. *Vienna at the Age of Uncertainty*. Chicago: University Press.
- Czermak, Paul. 1903. „Über Elektrizitätszerstreuung in der Atmosphäre“. Denkschrift der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, math.-naturw. Classe, Bd. LXXIV. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei.
- Czmock, Günther. 1972. *Operationsverstärker*. Würzburg: Vogel-Verlag.
- De Saussure, Horace Bénédict. 1803. *Voyages dans les alpes*. Neuchatel: Louis Fauche-Borel. Online-Ressource: <https://archive.org/details/voyagesdanslesa17sausgoog> (download 17.10.2015).
- Deimel, Franz. Hasenzagl, Andreas. 2010. *Grundlagen Elektrotechnik*. (14. Auflage). Linz: Veritas.
- Die Bibel. Nach der Übersetzung Martin Luthers. Bibeltext in der revidierten Fassung von 1984. Hg. v. d. Evangel. Kirche in Deutschland. Deutsche Bibelgesellschaft, Stuttgart, 1999.

Diendorfer, Gerhard. Schulz, Wolfgang. 2008. „ALDIS Austrian Lightning Detection and Information System 1992-2008“. In: Elektrotechnik & Informationstechnik (2008) 125/5: 209-213.

Online-Ressource: http://www.aldis.at/fileadmin/user_upload/aldis/publication/2008/1_eui2008_Diendorfer.pdf (download 15.12.2015).

Eichenwald, A. 1928. *Vorlesungen über Elektrizität*. Berlin: Julius Springer Verlag.

Exner, Franz Serafin. 1886. „Über die Ursache und die Gesetze der atmosphärischen Elektrizität“. In: Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. XCIII. Band. Abt. IIa, Heft I bis V. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei. 222-285.

Exner, Franz Serafin. 1887. „Über transportable Apparate zur Beobachtung der atmosphärischen Elektrizität“. In: Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. XCV. Band. Abt. IIa, Heft I - V. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei. 1084-1097.

Exner, Franz Serafin. 1887. „Über die Abhängigkeit der atmosphärischen Elektrizität vom Wassergehalte der Luft“. In: Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. XCVI. Band. Abt. IIa, Heft I bis V. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei. 419-475.

Exner, Franz Serafin. 1888. *Vorlesungen über Elektrizität*. Wien: Franz Deuticke.

Exner, Franz Serafin. 1888. „Weitere Beobachtungen über atmosphärische Elektrizität“. In: Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. XCVII. Band. Abt. IIa, Heft I bis X. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei. 277-300.

Exner, Franz Serafin. 1889. „Beobachtungen über atmosphärische Elektrizität in den Tropen, I“. In: Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. XCVIII. Band. Abt. IIa, Heft I bis X. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei. 189-233.

Exner, Franz Serafin. 1890. „Beobachtungen über atmosphärische Elektrizität in den Tropen, II“. In: Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. XCIX. Band. Abt. IIa, Heft I bis X. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei. 601-653.

Exner, Franz. 1890. „Über unsere Atmosphäre“. Vortrag, gehalten am 19. November 1890. In: Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien 31: 127-163.

Online-Ressource: http://www.zobodat.at/pdf/SVVNWK_31_0127-0163.pdf (download 09.10.2015)

Exner, Franz Serafin. 1900. „Über neuere Untersuchungen auf dem Gebiete der atmosphärischen Elektrizität“. In: Meteorologische Zeitschrift, 17. Jg. XXXV. Bd. 529-543.

Exner, Franz Serafin. 1900. „Summary of the results of recent investigations in atmospheric electricity“. In: Terrestrial magnetism and atmospheric electricity. Vol. 5, 167-174.

Exner, Franz Serafin. 1908. *Über Gesetze in Naturwissenschaft und Humanistik : Inaugurationsrede gehalten am 15. Oktober 1908*. Wien: Hölder.

Exner, Franz Serafin. 1919. *Vorlesungen über die physikalischen Grundlagen der Naturwissenschaften von Prof. Franz Exner*. (1. Auflage). Wien: Franz Deuticke.

Feynman, Richard. Leighton, Robert. Sands, Matthew. 2013. *The Feynman Lectures on Physics, Volume II*. (3. Auflage). California Institute of Technology.
Online resource: http://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_09.html (download 15.10.2015).

Fischer, H. J. 1977. „Das luftelektrische Feld in Abhängigkeit von Wetterlage und Luftverunreinigungen“. In: Promet Meteorologische Fortbildung, 7. Jahrgang, Heft 2, 4-13.

Jenkin, Henry Charles Fleeming. Exner, Franz Serafin. 1880. *Elektricität und Magnetismus*. Braunschweig: Vieweg.

Franklin, Benjamin. Collinson, Peter. 1751. *Experiments and observations on electricity made at Philadelphia in America*. London: E. Cave.
Online-Ressource: <https://archive.org/details/experimentsobser00fran> (download 29.09.2015).

Franz, Adolph. 1909. *Die kirchlichen Benediktionen im Mittelalter*. Freiburg im Breisgau: Herder.

Frisius, Joachim. Heydt, G. Pelz, J. 1977. „Atmospherics und Gewitterortung“. In: Promet Meteorologische Fortbildung, 7. Jahrgang, Heft 3, 12-19.

Elektronik-Kompendium. Online-Ressource: <http://www.elektronik-kompendium.de> (download 11/2015-03/2016)

Elster, Julius. Geitel, Hans. 1891. „Über einige Ziele und Methoden luftelektrischer Untersuchungen“. Wissenschaftliche Beilage zum Jahresbericht des Herzoglichen Gymnasiums zu Wolfenbüttel. Wolfenbüttel: Verlag Heckner.
Online-Ressource: <http://digisrv-1.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/>

MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00029606/2260-9683.pdf;
jsessionid=F53F20438182E28441269CAECEF789F4 (download 10.12.2015)

Elster, Julius. Geitel, Hans. 1893. „Beobachtungen der normalen atmosphärischen Elektrizität auf dem Sonnblick“.

Online-Ressource: http://www.zobodat.at/pdf/SBAWW_102_2a_1295-1316.pdf
(download 09.10.2015)

Gehler, J.S.T. 1790. Eintrag „Luftelektrometer“. In: *Physicalisches Wörterbuch*. Band 3. Leipzig: Natur und Philosophie.

Gobrecht, Heinrich. Bergmann-Schaefer. 1971. *Lehrbuch der Experimentalphysik. Band II. Elektrizität und Magnetismus*. Berlin: Walter de Gruyter Verlag.

Gringel, Wolfgang. 1977. „Luftionen, Luftleitfähigkeit und ihr Zusammenhang mit Aerosolteilchen“. In: *Promet Meteorologische Fortbildung*, 7. Jg., Heft 2, 13-16.

Gringel, Wolfgang. 1977. „Die elektrischen Ströme in der Atmosphäre“. In: *Promet Meteorologische Fortbildung*, 7. Jahrgang, Heft 2, 16-20.

Gockel, Albert. 1908. *Die Luftelektrizität. Methoden und Resultate der neueren Forschung*. Leipzig: Verlag von S. Hirzel.

Online-ressource: <https://archive.org/details/dieluftelektriz02gockgoog> (download 31.10.2015)

Hallo, H.S. Land, H.W. 1906. *Elektrische und magnetische Messungen und Messinstrumente*. Heidelberg: Springer Verlag.

Hann, J. Hellmann. G. (eds.). 1906. *Meteorologische Zeitschrift*. 23. Band. Zeitschrift der K.K. Österr. Gesellschaft für Meteorologie im Auftrage der K.K. Österr. Gesellschaft für Meteorologie und der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft. Wien, Berlin.

Harrison, R. Giles. 2013. „The Carnegie Curve“. In: *Surveys in Geophysics* March 2013, Volume 34, Issue 2, 209-232.

Harrison, R. Giles. 2014. *Meteorological Measurements and Instrumentation*. Chichester: John Wiley & Sons.

Hess, Victor Franz. 1912. „Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten“. In: *Mitteilungen aus dem Institut für Radiumforschung, Sitzungsberichte der mathematisch-naturw. Klasse der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, Band CXXI, Abteilung IIa, Jahrgang 1912, Heft VIII bis X, zweiter Halbband, Wien, 1912, S. 2001-2032

Hess, Victor Franz. 1926. *Die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre und ihre Ursachen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien

HyperPhysics. 2016. Georgia State University.
Online-Ressource: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electronic/etroncon.html#c1>(download 03/2016)

Israël, Hans. 1950. „Zur Entwicklung der luftelektrischen Grundanschauungen“. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie A 3 (1950), Vol. 3, Issue 1 (607 – 634)

Israël, Hans. 1957. *Atmosphärische Elektrizität, Teil 1, Grundlagen, Leitfähigkeit, Ionen*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.

Israël, Hans. 1957. *Luftelektrizität und Radioaktivität*. Berlin: Springer Verlag.

Israël, Hans. 1961. *Atmosphärische Elektrizität, Teil 2, Felder, Ladungen, Ströme*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.

Israël, Hans. 1964. *Probleme der Gewitterforschung: I. Das Gewitter in heutiger Sicht*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Karlik Berta, Schmid, Erich. 1982. *Franz S. Exner und sein Kreis*. Wien: Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Keithley, Joseph. 1999. *The story of electrical and magnetical measurements. From 500 BC to the 1940s*. New York: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.).

Kleinwächter, H. 1970. „Das Influenz-E-Feldmeter als elektromechanischer Verstärker extrem hohen Verstärkungsfaktors und seine Anwendung als empfindliches Meßgerät“. In: ATM, Lfg. 413 (1970), R 62-R64.

Kleinwächter. Betriebsanleitung Elektrofeldmeter. Online-Ressource: http://www.kleinwaechtergmbh.de/cms/upload/downloads/handbuecher/elektrofeldmeter/EFM_2xx_HB_D-E-F.pdf (download 20.01.2016).

Klose, Brigitte. 2016. *Meteorologie: Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. Berlin: SpringerSpektrum.

Kloss, Albert. 1987. *Von der Electricität zur Elektrizität: Ein Streifzug durch die Geschichte der Elektrotechnik, Elektroenergetik und Elektronik*. Basel: Springer Verlag.

- Kneifel, Stefan. Website zum Thema „Elektrostatisches Feld der Erde und Feldmühle“.
Online-Ressource: <http://www.qsl.net/dh1stf/> (download 15.10.2015).
- Kottler, Friedrich. 1927. „Theorie der Elektrometer“. In: Handbuch der Physik, Bd. XII, Theorien der Elektrizität, Elektrostatik. Berlin: Verlag v. Julius Springer. 397-406.
- Kottler, Friedrich. 1927. „Elektrostatische Meßinstrumente“. In: Handbuch der Physik, Bd. XVI, Apparate und Messmethoden für Elektrizität und Magnetismus. Berlin: Verlag von Julius Springer. 225-252.
- Kraus, Helmut. 2004. *Die Atmosphäre der Erde*. (3. Auflage). Berlin: Springer Verlag.
- Lecher, Ernst. 1889. „Über atmosphärische Elektrizität“. Vortrag, gehalten den 21. Februar 1889. Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien 29: 389-413.
Online-Ressource: http://www.zobodat.at/pdf/SVVNWK_29_0389-0413.pdf (download 09.10.2015)
- Leupold, W. Conrad. R. Najuch, H., Hösel S. 1968. *Analysis*. Leipzig: VEB.
- Linß, W. 1887. In: Meteorologische Zeitschrift Volume 4, S. 355
- Meyers Großes Konversations-Lexikon, Band 12. Leipzig 1908, Lexikoneintrag: Lufterlektrizität. S. 802-809.
Online-ressource: <http://www.zeno.org/Meyers1905/A/Lufterlektrizit%C3%A4t?hl=lufterlektrizitat> (download 28.09.2015)
- Mühleisen, Richard. Fischer, H. J. 1974. „Erste lufterlektrische Messungen in der freien Atmosphäre“. In: Zur Geschichte der Geophysik. Berlin, Heidelberg: Springer. 155-165.
- Mühleisen, Richard. 1977. „Die lufterlektrischen Parameter“. In: Promet Meteorologische Fortbildung, 7. Jahrgang, Heft 2, 1-2.
- Mühleisen, Richard. 1977. „Der globale lufterlektrische Stromkreis“. In: Promet Meteorologische Fortbildung, 7. Jahrgang, Heft 2, 2-4.
- Mühleisen, Richard. 1977. „Entstehung der Gewitterelektrizität“. In: Promet Meteorologische Fortbildung, 7. Jahrgang, Heft 3, 7-9.
- Mühleisen, Richard. Fischer, H. J. 1977. „Globale Strombilanz und extraterrestrische Einflüsse“. In: Promet Meteorologische Fortbildung, 7. Jahrgang, Heft 3, 19-20.

Nippoldt, A. Keränen, J. Schweidler, Egon. 1929. *Naturwissenschaftliche Monographien und Lehrbücher. Erdmagnetismus und Polarlicht. Wärme und Temperaturverhältnisse der obersten Bodenschichten. Luftelektrizität. Einführung in die Geophysik II*. Berlin: Julius Springer Verlag.

NSF National Science Foundation. Brochure FESD. 2012. Earth's Global Electric Circuit. University of Colorado at Boulder.

Poggendorf, J.C. Carl, Friedrich Albrecht. 1839. *Annalen der Physik*. Johann Ambrosius Leipzig: Barth Verlag.

Rakov, Vladimir. Uman, Martin A. 2003. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press.

Reiter, Reinhold. 1960. *Meteorobiologie und Elektrizität der Atmosphäre*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.

Reiter, Reinhold. 1964. *Felder, Ströme und Aerosole in der Unteren Troposphäre*. Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopff Verlag.

Reiter, Reinhold. 1977. „Ergebnisse luftelektrischer Forschungen im Hochgebirge“. In: Promet Meteorologische Fortbildung, 7. Jahrgang, Heft 3, 1-7.

Reiter, Reinhold. 1992. *Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity*. Amsterdam: Elsevier.

Roble, Raymond G. Tzur, Israel. 1986. "The Global Atmospheric-Electrical Circuit". In: The Earth's Electrical Environment. Washington DC: National Academy Press. 206-230.

Schiller, Friedrich. 1799. *Das Lied von der Glocke*. Spiegel online Kultur, Projekt Gutenberg. Online-Ressource: <http://gutenberg.spiegel.de/buch/friedrich-schiller-gedichte-3352/32> (download 03.01.2016)

Schonland, B.F.J. 1953. *Atmospheric electricity*. (2. Auflage). London: Methuen & Co. Ltd.

Schulz, Wolfgang. Lackenbauer, Bettina. Pichler, Hannes. Diendorfer, Gerhard. 2005. „LLS Data and correlated continuous E-field measurements“. VIII International Symposium on Lightning Protection from 21st-25th November 2005 in Sao Paulo, Brazil.
Online-Ressource: http://www.aldis.at/fileadmin/user_upload/aldis/publication/2005/1_SIPDA2005_Schulz.pdf (download 15.12.2015).

Schweidler, Egon. Mache, H. 1909. *Die atmosphärische Elektrizität. Methoden und Ergebnisse der modernen luftelektrischen Forschung*. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn.

Siegmund, Günther. 1899. *Handbuch der Geophysik. Zweiter Band*. Stuttgart: Verlag von Ferdinand Enke.

Singh, A.K. Siingh, Devendraa. Singh, R.P. Sandhya, Mishra. 2011. „Electrodynamical Coupling of Earth's Atmosphere and Ionosphere: An Overview“. In: *International Journal of Geophysics*, Vol. 2011, article ID 971302, 13 pages. Online-Ressource: <http://www.hindawi.com/journals/ijge/2011/971302> (download 28.12.2015).

Siingh, D., Gopalakrishnan, V., Singh, R. P., Kamra, A. K., Singh, S., Pant, V., Singh, A. K. 2007. „The atmospheric global electric circuit: An overview“. In: *Atmospheric Research*, 84(2), 91-110.

Spiegel, Murray R. 1972. *Theory and problems of statistics*. New York: McGraw-Hill International Book Company.

Stöltzner, Michael. 2000. „Vienna Indeterminism II: From Exner to Frank and von Mises“. In: SFB F012 Forschungsmiteilungen der Universität Salzburg

Székelly, Angelika. 1953. Nachruf: Universitätsprofessor Dr. Hans Benndorf. Oberöster-reichisches Landesmuseum. Online-ressource: http://www.zobodat.at/biografien/Benndorf_Hans_MittNatVerSt_83_0005-0008.pdf (download 07.10.2015)

Tuma, Josef. 1892. Beiträge zur Kenntniss der atmosphärischen Elektrizität III. Luftelektrizitätsmessungen im Luftballon. Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. XCVII. Band. Abt. IIa, Heft I bis X. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei. 227-260.

Volta, Alessandro. 1776. “Lettera no. 4”. In: Collezione dell’opere del Cavaliere Conte Alessandro Volta. Ed. Comasco, Patrizio, 1816. Firenze: Stamperia di Piatti. Online-Ressource: <https://books.google.at/books?id=RzwwQxx7FUYC&pg=PA145&lpg=#v=onepage&q&f=false> (download 11.12.2015)

Volta, Alessandro. 1778. “Lettera no. 6”. In: Collezione dell’opere del Cavaliere Conte Alessandro Volta. Ed. Comasco, Patrizio, 1816. Firenze: Stamperia di Piatti. Online-Ressource: <https://books.google.at/books?id=RzwwQxx7FUYC&pg=PA145&lpg=#v=onepage&q&f=false> (download 11.12.2015)

Volta, Alessandro. 1799. „Meteorologische Beobachtungen besonders über die atmosphärische Electricität“. In: Meteorologische Briefe. Leipzig: Müller.
Online-Ressource: http://zs.thulb.uni-jena.de/receive/jportal_jparticle_00019331 (download 18.12.2015).

Volta, Alessandro. 1835. *Lettere inedite di Alessandro Volta*. Pesaro: Stamperia Nobili.
Online-Ressource: <https://books.google.at/books?id=6E64AAAAIAAJ&pg=PA25&lpg=PA25&dq=alessandro+volta+fiamma&source=bl&ots=jG6IBCGLXV&sig=uNq8Lt30P3ivKHjEDMuPhOc4Hls&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwjFm5CanpvKAhXE9w4KHeEBBooQ6AEILzAE#v=onepage&q=alessandro%20volta%20fiamma&f=false> (download 11.12.2015)

Wall. 1708. “Experiments of the Luminous Qualities of Amber, Diamonds, and Gum Lac”, In: Philosophical Transactions, Vol. 26 (1708 - 1709), 69-76.

Weidman, Chuck. 2015. “Atmospheric Electricity. Lecture 1-26”. Atmospheric sciences, University of Arizona.

Whipple, F.J.W. Scrase, F.J. 1936. „Point discharge in the electric field of the earth: an analysis of continuous records obtained at Kew observatory“. In: Geophysical Memoirs (Great Britain. Meteorological Office), Vol. 7, Nr. 68. London: H. M. Stationery.

Wilson, C.T.R., 1920. “Investigations on lightning discharges and the electric field of thunderstorms”. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, Vol. 221 (1921), pp. 73-115 Published by: The Royal Society, London.

Zhou, Helin. Diendorfer, Gerhard. Thottappillil, Rajeev. Pichler, Hannes. 2011. „Fair-weather Atmospheric Electric Field Measurements at the Gaisberg Mountain in Austria“. In: PIRS Online, Vol. 7, No. 2, 181-185.
Online-Ressource:
http://www.aldis.at/fileadmin/user_upload/aldis/publication/2011/8_PIRS2011_Zhou.pdf (download 15.12.2015).

Abbildungsnachweis

<i>Abbildung 1: Franz Serafin Exner (1849-1926)</i>	4
http://www.oeaw.ac.at/biblio/Archiv/Archiv.html	
<i>Abbildung 2: Physikalisches Institut in Wien IX</i>	6
https://phaidra.univie.ac.at/view/o:169444	
<i>Abbildung 3: Habilitationsfeier von Friedrich Hasenöhl und Stefan Meyer (1899)</i>	9
Karlik Berta, Schmid, Erich. 1982. <i>Franz S. Exner und sein Kreis</i> . S. 101	
<i>Abbildung 4: Physikalische Institute - 1912</i>	11
http://geschichte.univie.ac.at/de/artikel/physik-wien-im-19-jahrhundert	
<i>Abbildung 5: Relief von M. Powolny im Arkadenhof der Universität Wien</i>	12
Benndorf, Hans. 1937. <i>Gedenkrede auf Franz Serafin Exner</i> . S. 1	
<i>Abbildung 6: Niveauflächenverlauf</i>	22
Exner, Franz Serafin. 1886. „Über die Ursache und die Gesetze der atmosphärischen Elektrizität“. Anhang/Fig. 1	
<i>Abbildung 7: Linearität des Potentialgefälles</i>	23
Exner, Franz Serafin. 1886. „Über die Ursache und die Gesetze der atmosphärischen Elektrizität“. Anhang	
<i>Abbildung 8: Abhängigkeit von Dunstdruck und Potentialgefälle</i>	27
Exner, Franz Serafin. 1886. „Über die Ursache und die Gesetze der atmosphärischen Elektrizität“. S. 262	
<i>Abbildung 9: Erster Nachweis, dass Blitze elektrische Erscheinungen sind</i>	40
http://seaus.free.fr/spip.php?article842	
<i>Abbildung 10: Einfaches Fadenelektroskop</i>	42
http://hipstwiki.wikifoundry-mobile.com/page/Charles+d%FA+Fay+-+Erkl%E4ren+und+Beschreiben+von+elektrischen+Ph%E4nomenen	
<i>Abbildung 11: Elektroskop von Saussure</i>	43
http://reddi.wdfiles.com/local--files/atmospheric-electricity/Saussure_pith-ball_electroscope.png	
<i>Abbildung 12: Quadrantenelektrometer nach W. Thomson (Lord Kelvin)</i>	46
Kottler, Friedrich. 1927. „Elektrostatische Meßinstrumente“. S. 240	
<i>Abbildung 13: Das Forschungsschiff Carnegie</i>	50
Harrison, R. Giles. 2013. „The Carnegie Curve“. S. 211	
<i>Abbildung 14: Atmosphärenschichten nach Ionisierungsgrad und nach Temperatur</i>	55
http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/wegscheider/gebhardt_files/skripten/Druckundtemperatur.Ribow.pdf	
<i>Abbildung 15: Zusammenhang Potentialgefälle und Gewitteraktivität</i>	61
Israel, Hans. 1961. <i>Atmosphärische Elektrizität, Teil 2, Felder, Ladungen, Ströme</i> . S. 67	
<i>Abbildung 16: Luftelektrisches Feld in Bodennähe bei Schönwetter</i>	64
Reiter, Reinhold. 1960. <i>Meteorobiologie und Elektrizität der Atmosphäre</i> . S. 54	
<i>Abbildung 17: Carnegie Kurve</i>	65
adaptiert nach Reiter, Reinhold. 1992. <i>Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity</i> . S. 130	
<i>Abbildung 18: Messung mittels Potentialsonde</i>	66
Nippoldt, A. Keränen, J. Schweidler, Egon. 1929. <i>Einführung in die Geophysik II</i> . S. 332	
<i>Abbildung 19: Wilson-Platte</i>	68
http://www.qsl.net/dh1stf/messprinzipien/messprinzipien.htm	

<i>Abbildung 20: Das Exnersche Elektroskop.....</i>	<i>71</i>
http://www.zeno.org/Meyers-1905/A/Luftelektrizit%C3%A4t	
<i>Abbildung 21: Exnersches Elektroskop transportbereit und während einer Messung</i>	<i>72</i>
Exner, Franz Serafin. 1887. „Über transportable Apparate zur Beobachtung der atmosphärischen Elektrizität“. S. 1089, 1090	
<i>Abbildung 22: Detailansicht Blättchenträger.....</i>	<i>72</i>
Exner, Franz Serafin. 1887. „Über transportable Apparate zur Beobachtung der atmosphärischen Elektrizität“. S. 1091	
<i>Abbildung 23: Flammensonde.....</i>	<i>73</i>
Exner, Franz Serafin. 1887. „Über transportable Apparate zur Beobachtung der atmosphärischen Elektrizität“. S. 1097	
<i>Abbildung 24: Feldmühle der Blitzforschungsstation am Gaisberg</i>	<i>75</i>
http://www.aldis.at/forschung/blitzforschungsstation-gaisberg/feldmessung/	
<i>Abbildung 25: Funktionsprinzip einer Feldmühle</i>	<i>76</i>
eigenes Bild	
<i>Abbildung 26: Feldmühle Außenansicht / Feldmühle Innenleben</i>	<i>77</i>
Harrison, R. Giles. 2014. <i>Meteorological Measurements and Instrumentation</i> und http://www.missioninstruments.com/	
<i>Abbildung 27: Mechanik einer Feldmühle.....</i>	<i>78</i>
adaptiert nach https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrofeldmeter	
<i>Abbildung 28: Segmentflächenänderung als Funktion des Drehwinkels</i>	<i>81</i>
eigenes Bild	
<i>Abbildung 29: Lichtschranke (Optokoppler).....</i>	<i>83</i>
http://de.rs-online.com/web/p/gabel-lichtschranke/4550868/	
<i>Abbildung 30: Symbol einer Lichtschranke.....</i>	<i>83</i>
http://www.festo-didactic.com/at-de/services/symbole/elektrotechnik/halbleiter-und-elektronenroehren/optokoppler-mit-schlitz-fuer-lichtsperre,dargestellt-mit-mechanischer-sperre-lichtschranke.htm?fbid=YXQuZGUuNTMzLjEzLjMyLjEyODEuNzMxNQ	
<i>Abbildung 31: Operationsverstärker LM741CN</i>	<i>84</i>
https://de.wikipedia.org/wiki/Operationsverst%C3%A4rker	
<i>Abbildung 32: Symbol eines Operationsverstärkers.....</i>	<i>84</i>
https://de.wikipedia.org/wiki/Operationsverst%C3%A4rker	
<i>Abbildung 33: Feldmühlenschaltung.....</i>	<i>86</i>
eigenes Bild - erstellt mit LT Spice	
<i>Abbildung 34: Aufgabe der OPs U6 und U7</i>	<i>87</i>
eigenes Bild - erstellt mit LT Spice	
<i>Abbildung 35: Differenzverstärkerschaltung – OP U3.....</i>	<i>89</i>
eigenes Bild - erstellt mit LT Spice	
<i>Abbildung 36: Störungselimination.....</i>	<i>91</i>
eigenes Bild - erstellt mit LT Spice	
<i>Abbildung 37: Teil des Gleichrichters - OP U4</i>	<i>92</i>
eigenes Bild - erstellt mit LT Spice	

<i>Abbildung 38: Funktion des Gleichrichters</i>	93
eigenes Bild - erstellt mit LT Spice	
<i>Abbildung 39: Signalglättung</i>	94
eigenes Bild - erstellt mit LT Spice	
<i>Abbildung 40: Funktionsweise eines Buffers</i>	96
eigenes Bild - erstellt mit LT Spice	
<i>Abbildung 41: Ausgangssignal bei positiven E-Feldern</i>	97
eigenes Bild - erstellt mit LT Spice	
<i>Abbildung 42: Ausgangssignal bei negativen E-Feldern</i>	97
eigenes Bild - erstellt mit LT Spice	
<i>Abbildung 43: Linearität und Übersteuerung der Schaltung</i>	98
eigenes Bild - erstellt mit LT Spice	
<i>Abbildung 44: Exnersches Elektroskop</i>	99
eigenes Bild	
<i>Abbildung 45: Flammensonde im Kondensatorfeld</i>	100
eigenes Bild	
<i>Abbildung 46: Eichkurve Elektroskop VII/89 im Kondensatorfeld bis 500 V</i>	101
eigenes Bild	
<i>Abbildung 47: Prof. Sachslehner mit historischem Messgerät</i>	101
eigenes Bild	
<i>Abbildung 48: Flammensonde mit Windschutz</i>	102
eigenes Bild	
<i>Abbildung 49: Ausschlag der Blättchen beim Anheben der Flammensonde</i>	102
eigenes Bild	
<i>Abbildung 50: E-Feld bei Schönwetterbedingungen</i>	105
eigenes Bild - erstellt mit Qti-Plot	
<i>Abbildung 51: Elektrische Feldmühle</i>	105
eigenes Bild	
<i>Abbildung 52: Messanzeige der elektrischen Feldmühle bei Schönwetter</i>	106
eigenes Bild	
<i>Abbildung 53: Messungen Ende des 19. Jahrhunderts und 2016</i>	112
Karlik Berta, Schmid, Erich. 1982. <i>Franz S. Exner und sein Kreis</i> . S. 71	
und eigenes Bild	

Tabellennachweis

Tabelle 1: Abhängigkeit des Potentialgefälles von Temperatur und Wassergehalt der Luft 25

Exner, Franz Serafin. 1886. „Über die Ursache und die Gesetze der atmosphärischen Elektrizität“. S. 262

Tabelle 2: Abhängigkeit von Dunstdruck und Potentialgefälle 27

Exner, Franz Serafin. 1887. „Über die Abhängigkeit der atmosphärischen Elektrizität vom Wassergehalte der Luft“. S. 434

Tabelle 3: Vergleich der Messungen zwischen 1885 und 1890 33

Exner, Franz Serafin. 1890. „Beobachtungen über atmosphärische Elektrizität in den Tropen, II“. S. 618

Tabelle 4: Messergebnisse - Elektroskop..... 104

eigene Tabelle

Tabelle 5: Werte für die Fehlerberechnung..... 108

eigene Tabelle

A. Abstract

Nach ersten Beobachtungen im 18. Jahrhundert, dass die Erde von einem luftelektrischen Feld umgeben ist, kam es vor allem im 19. Jahrhundert zu einem wahren Aufblühen des Forschungsgebietes der atmosphärischen Elektrizität, nicht zuletzt aufgrund der rasanten Entwicklung geeigneter Messgeräte.

Franz Serafin Exner (1849 – 1926), einer der führenden Forscher der Universität Wien der damaligen Zeit, wurde oftmals auch als „Begründer der modernen luftelektrischen Forschung“ bezeichnet. Er führte zahlreiche Beobachtungen durch und stellte eine wissenschaftlich gut fundierte Theorie über die Ursachen der atmosphärischen Elektrizität auf. Obwohl sich diese letztendlich als unrichtig herausstellte, trug er doch mit seinen Arbeiten über Luftelektrizität entscheidend zur Entwicklung des Forschungsgebietes bei.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die Bedeutung seiner Arbeiten für die weitere Forschung aufzuzeigen. Von besonderem Interesse ist auch die von ihm entwickelte Messapparatur - das Exnersche Elektroskop. Um den enormen Fortschritt auf dem Gebiet der Messgerätetechnik darzustellen, beinhaltet die Arbeit auch einen Überblick über die historische Entwicklung elektrostatischer Messgeräte. Zudem wurde eine elektronische Schaltung für eine Feldmühle entwickelt und deren Funktionsprinzip dem Exnerschen Elektroskop gegenübergestellt.

Im praktischen Teil der Arbeit wurden Messungen mit einem historischen und einem modernen elektrischen Gerät durchgeführt. Dabei wurde die elektrische Feldstärke bei Schönwetterbedingungen ermittelt. Die Analyse der Daten zeigt, dass beide Methoden ziemlich genaue Werte liefern, die um $(120 \pm 30) \frac{\text{V}}{\text{m}}$ liegen.

Early observations in the eighteenth century showed that the earth is surrounded by an electric field. Subsequently, qualitative, and later on quantitative, studies of atmospheric electricity boomed, especially in the nineteenth century when newly developed measuring devices allowed for more accurate measurements.

Franz Serafin Exner (1849 – 1926) was one of the leading researchers at University of Vienna at that time, and is often referred to as ‘the father of modern atmospheric electricity’. His works contributed considerably to the development of this field of research, even though his *theory of the causes of atmospheric electricity* was finally proved to be wrong.

The purpose of this diploma thesis is to demonstrate the importance of Exner’s work in this area of research. In order to illustrate the enormous progress in the field of measuring devices, an overview of the history of electrostatic measuring instruments is included with special focus on Exner’s electroscope. Furthermore, an electronic circuit for a modern field mill has been developed in order to compare the two different underlying operating principles.

The practical part comprises measurements with both methods. The atmospheric electric field was measured under fair weather conditions with an original Exner electroscope and simultaneously with an electric field mill. The analysis of the data showed that both methods provide fairly accurate results of the order $(120 \pm 30) \frac{\text{V}}{\text{m}}$.

B. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Betreuern, Herrn Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf und Herrn Ass.-Prof. Mag. Dr. Franz Sachslehner bedanken, die mir die Möglichkeit geboten haben, dieses interessante Thema trotz Vollzeitbeschäftigung zu bearbeiten. Besonders möchte ich mich bei Herrn Dr. Sachslehner für die tatkräftige Unterstützung, vor allem bei der Vorbereitung und der Durchführung der Messungen, bedanken. Die historischen Geräte mussten teilweise repariert werden und es bedarf schon einiges an Wissen und Geschick solch alte Apparaturen in Gang zu bringen. Außerdem weiß ich das Vertrauen zu schätzen, dass er mir die wertvollen Geräte für die zweite Messung überlassen hat. Zudem hatte ich die Gelegenheit einen Einblick in die historische Sammlung der Universität Wien zu bekommen, was mich persönlich sehr faszinierte.

Weiters möchte ich mich auch bei meinen Kollegen und Kolleginnen sowie besonders bei meinem Abteilungsvorstand, Herrn DI Schuhmann, bedanken, der stets viel Rücksicht auf mein Studium nahm. Außerdem sei noch meine sehr geschätzte Klasse erwähnt, die mir stets viel Freude bereitet und mir klargemacht hat, dass der Schritt den Lehrberuf zu ergreifen der richtige war.

Schließlich und endlich gebührt mein größter Dank meiner Familie – meinen Kindern, meinen Eltern, meinen beiden Schwestern und meiner Hündin Lunki – die mich während meiner gesamten Studienzeit in jeder Beziehung stets großartig unterstützt haben.

C. Curriculum vitae

Name	Erika Kulik
Geburtsdaten	1972 in Wien
1991	Reifeprüfung
1991 – 2011	Privatwirtschaft (Branchen: Chemie, Maschinenbau)
seit 2011	Bundesdienst (HTL Hollabrunn)
2009 - 2016	Studium Physik und Englisch an der Universität Wien
Sprachen	Deutsch, Englisch, Italienisch, Serbisch/Kroatisch/Bosnisch