

Geräuschemissionen und Energieverluste an Freileitungen

Diplomarbeit

im Studiengang
Elektrische Energietechnik

an der

Fachhochschule für Technik
und Wirtschaft

vorgelegt von

Mohamed EL GOURZNI

Berlin, 20.10.2001

Berlin 2001, © Copyright FGEU mbH.

Alle Angaben und Daten dieser Diplomarbeit sind vertraulich. Vervielfältigung, Reproduktion und Weitergabe an dritte Personen, Unternehmen und Institutionen, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung der FGEU mbH gestattet.
Die Diplomarbeit ist nur den Korrektoren sowie den Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich zu machen.

Inhaltsverzeichnis

I	
Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Diagrammverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	2
2 Gesetzliche Vorschriften für Geräuschemission an Freileitungen	3
2.1.1 Arbeitsgebiet Schallimmissionen, Lärmberechnung	3
2.1.2 Schalltechnische Orientierungswerte	4
3 Theoretische Grundlagen	9
3.1 Elektrische Randfeldstärke an Leiterseilen	9
3.1.1 Einleitung	9
3.1.2 Elektrische Felder, Allgemeines	10
3.2 Hochspannungsfreileitungen	12
3.3 Feldlinien der Freileitungen	13
3.4 Randfeldstärken	15
3.4.1 Definition der Randfeldstärke	15
3.4.2 Potentialkoeffizienten von Freileitungen	17
3.4.3 Bündelleiter	19
3.4.4 Durchhangberechnung	20
3.5 Koronaentladung an Freileitungen	22
3.5.1 Der Entladungsvorgang	22
3.5.2 Optimieren der Koronaentladungen	23
4 Geräuschemissionen durch Koronaentladung	24
4.1 Abhandlung der Bonneville Power administration über Vorhersageformeln für Koronageräusche [1],[7]	24
4.1.1 Einführung	24
4.2 Grundlegenden Leitlinien für die vorhersagen von Hörbaren Geräuschen	28

4.3	Kumulative Warscheinlichkeitsverteilungen	28
4.4	Frequenzspektrn	31
4.5	Tonverteilung und Verminderung	33
4.6	Herleitung der Gleichung um die Akustischen Kraftebene für eine Leitungsquelle zu Berechnen	33
4.6.1	Definition der benötigten mathematischen Größen	33
4.7	Luftabsorption	35
4.7.1	AC Leitungen	36
4.7.2	Untersuchungen in der schalllosen Kammer	37
4.7.3	Berechnung der akustischen Kraftebene für 3 Phasenleitungen	38
4.7.4	Die Allgemeine Wechselstromgleichung	41
4.7.5	Gleichstromleitungen [1], [2]	43
4.7.6	Leitersteigerung	44
4.7.7	Leiterdurchmesser	45
4.7.8	Anzahl der Leiter	46
4.7.9	Allgemeine Gleichstromgleichung	48
4.8	Schlußfolgerung und Diskussion	49
<u>5 Erstellung eines Programms</u>		<u>51</u>
5.1	Einleitung	51
5.2	Programmablauf der Berechnung	52
5.3	Programm starten	53
5.3.1	Dateneingabe	54
5.3.2	Berechnungsergebnisse	56
5.3.3	Protokoll	57
5.4	Auswertung	58
<u>6 Berechnung realer Freileitungsanordnung mit Winfield</u>		<u>58</u>
<u>7 Zusammenfassung:</u>		<u>59</u>
Anhang		I
Literaturverzeichnis		XI

Abkürzungsverzeichnis

BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BimSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
DIN	Deutsches Institut für Normung
AL	Aluminium
St	Stahl
Aldrey	Aluminiumlegierung
AC	Wechselspannung
DC	Gleichspannung
AN	AUDIBLE NOISE (hörbare Geräusche)
BPA	Bonneville Power Administration
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
UHV	ULTRA HIGH VOLTAGE
AEP- ASEA	American Electric Power (Prüfstation)
deq	Durchmesser eines Leiters
EPRI	Electric Power Research Institute

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 : Kurve A (A-Filter)	5
Abbildung 3.1: Typischer Leiterquerschnitt AL-Stahl-Seilen mit einem Querschnitt ab 240/40 mm ²	9
Abbildung 3.2: Freileitungsseile : Einfachleiter, AL-Stahl-Seil, und Aldrey	10
Abbildung 3.3: Bündelleiter: Zweierbündel, Dreierbündel, Viererbündel.....	10
Abbildung 3.4: Feldlinien eines Leiters	11
Abbildung 3.5: Freileitung wird in ein ebenes Koordinatensystem (xz-Ebene) gelegt.	12
Abbildung 3.6: Feldlinien ein einzelnen Leiters.....	13
Abbildung 3.7:Feldlinien Zweierbündelleiter	13
Abbildung 3.8: Feldlinien Dreierbündelleiter	14
Abbildung 3.9: Feldlinien Viererbündelleiter.....	14
Abbildung 3.10: Ersatzradius ein Teilleiter.....	16
Abbildung 3.11: Spiegelbildverfahren	17
Abbildung 3.12: Berechnung der Potentialkoeffizienten von Leiter.....	18
Abbildung 3.13:Durchhang der Hochspannungsfreileitung.....	21
Abbildung 3.14: Entladungsform bei Freileitungen	22
Abbildung 3.15: Koronaentladungen an Freileitungen.....	23
Abbildung 4.1: Testkäfig	25
Abbildung 4.2: Beispiele zu A-gewichteten Verteilungen von hörbaren Geräuschen bei Regenwetter in einer Entfernung von 15 m von den Außenphasen an 2 AC-Leitungen	29
Abbildung 4.3: Verteilung der A-gewichteten und 8kHz Schönwetter-AN mit Abstand von 15 Metern zum positiven Pol an +533KV, The Dallas Gleichstromleitungen, mit 2-46,2mm Leiterdurchmesser	30
Abbildung 4.4: zeigt die neuerlichsten Daten, erst kürzlich beim The Dallas von einem 2-Leiterbündel erhoben wurden.	31
Abbildung 4.5: Breitbandfrequenzspektren beim einzelnen 63,5 mm-Leiter auf den BPA 500 KV Wechselstromleitungen.....	32
Abbildung 4.6: Laterale Verbreitungsprofile der Schönwetter-A-gewichteten hörbaren Geräusche auf der The Dallas Testleitung mit einem n=2 ,d= 46,2mm-Leiter	36
Abbildung 4.7: Schwankung (Abweichung) der A-gewichteten hörbaren Geräusche mit maximaler Leiteroberflächensteigung AC- Leitungen	37
Abbildung 4.8: Variierung von A-gewichteten und 8kHz Geräuschemissionen	

für DC-Leitung.....	45
Abbildung 5.1: Makro Dialogfenster	53
Abbildung 5.2: Begrüßungsbild von CoronaV01	54
Abbildung 5.3: Oberfläche des Berechnungsprogramms CoronaV01	55
Abbildung 5.5 : Protokoll Formular.....	57

Diagrammverzeichnis

Diagramm 4.1: Vergleich von gemessenen und gerechneten Werten.....	39
Diagramm 4.2: Differenzen zwischen gemessenen und gerechneten von	39
Diagramm 5.1:Randfeldstärke und Geräuschemission von 110 kV Wetterfichte	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 : Der gesamte Hörbereich des Menschen.....	6
Tabelle 3.1 : Ersatzradien r_e von Bündelleitern mit einen Leiterradius von.....	16
Tabelle 4.1 : Vergleichende Formeln zu den hörbaren Geräuschen für	27
Tabelle 4.2 : zeigt die A-gewichteten Daten zu den hörbaren Geräuschen,.....	40
Tabelle 4.3 : Berechneten gleichwertigen Durchmessers im Verhältnis zum	42
Tabelle 4.4 : Berechnete Gleichwertige Durchmesser für Gleichstromleitungen.....	47
Tabelle 5.1 : Ausdruck der Berechnungsergebnisse	57

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
Q	Fläche	m ²
s	Abstand zwischen zwei Elektroden	m
U	Spannung	kV
E _{max}	Randfeldstärke	KV/cm
r	Radius eines Leiters	cm
R _b	Radius eines Kreises vom Bündelleiter	cm
r _e	Ersatzradius	cm
α _{aa}	Potenzialkoeffizient	
h	Höhe	m
d, d', D, D', D''	Abstand eines Leiters vom Spiegelbild des anderen	m
C'	Betriebskapazität eine Drehstromleitung	F
U _m	Betriebsspannung	kV
n	Anzahl der Teilleiter	
a _t	Teilleiter Abstand	cm
a	Spannweite	.m
J	Kraftintensität	W/m ²
A	Kraft (Arbeit)	W
R _d	Radialentfernung	m
PWL	Akustische Kraftlevel (Power Level)	dB(A)
SLA	Sound Level A-weighted (Tonebne A-gewichtet)	dB(A)
deq, de	Durchmesser eines Leiter	mm, cm
Z	Anzahal der Phasen	
L _p	Schalldruckpegel	dB
f	Frequenz	Hz

1 Einleitung

In der Energietechnik zählen Freileitungen zu den wichtigsten, Bindegliedern zwischen dem Ort der Stromerzeugung und dem Ort des Verbrauchs an elektrischer Energie.

Mit der fortschreitenden Technisierung unseres Lebens und der damit verbundenen Zunahme an Geräten steigt der Bedarf an Elektroenergie. Dadurch werden Freileitungstrassen mehr oder weniger nahe an bewohnte Gebiete herangeführt werden, auf die sie einen optisch und akustisch störenden Einfluß haben können.

Das Thema der Diplomarbeit sind Geräuschemissionen, die dann auftreten, wenn die Randfeldstärke der Luft durchbrochen wird, können durch die Verwendung von Bündelleitern verringert werden.

Die folgenden Ausführungen befassen sich mit der Untersuchung von Geräuschemissionen und Koronalärm, da dieses Thema bisher im deutschsprachigen Raum defizitär abgehandelt wurde, anders als im angloamerikanischen Raum, wo Außenuntersuchungen an Freileitungen durchgeführt und deren Meßergebnisse mit denen aus Käfigtests und Tests in einer schalllosen Kammer verglichen wurden.

Die Berechnung von Koronaphänomenen hat eine Bedeutung von Bauplanungsvorhaben, um Kosten für Fehlplanungen zu vermeiden.

Mit zunehmender Liberalisierung und Dezentralisierung des Energiemarktes haben die Energieversorgungsunternehmen ein wesentliches Interesse an günstigen Energieübertragungswegen.

Damit stellt sich die Frage, wie Koronaphänomene wie akustische Geräusche über eine empirisch gültige Formel bestimmt werden können. Die Antwort soll die vorliegende Diplomarbeit liefern, in der die akustischen Geräusche, die durch Wechselstromkorona auf dem Leiter hervorgerufen werden, an verschiedenen Masttypen untersucht werden [1].

Dazu wird die Randfeldstärke von Einzelbündel-, Zweierbündel-, Dreierbündel- und Vierbündelleitern als auch die dadurch entstehenden Geräusche berechnet. Zum Schluß werden die so entstandenen Ergebnisse in einer Programmerweiterung von Winfield implementiert.

1.1 Zielsetzung

Mit der Software Winfield werden die elektrischen Randfeldstärken an Hochspannungsleitern berechnet und soll nun um ein Verfahren zur Bestimmung der Geräuschemissionen erweitert werden. Theorien zur Geräuschemissionen sind hierzu auf die Praxistauglichkeit in numerischen Berechnungsprogrammen zu überprüfen.

2 Gesetzliche Vorschriften für Geräuschemission an Freileitungen

2.1.1 Arbeitsgebiet Schallimmissionen, Lärmberechnung

Lärm läßt sich definieren als unerwünschtes Geräusch , welches zu einer Belästigung des Menschen, zu einer Störeinwirkung der Leistungsfähigkeit von sowohl Mensch als auch Technik und insbesondere Gesundheitsschäden (Ohren, Zentralnervensystem, Herz) führt [2].

Zur Ermittlung von Lärm beziehungsweise Geräuschen wird der jeweils vom Lärm beziehungsweise von den Geräuschen ausgehende Schalldruckpegel mit einem Schallmesser bestimmt. Angegeben werden die Meßwerte in der Einheit Dezibel (dB)

Lärm stellt eine wesentliche Umweltbelastung dar. Bei nahezu allen baulichen Planungsvorhaben spielt die zu erwartende Lärmbelastung für die betroffene Bevölkerung eine wesentliche Rolle. Der Gesetzgeber verlangt für Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) und im Rahmen der Bauleitplanung die Vorlage von Prognosen der Lärmbelastung.

In zahlreichen Richtlinien und Regelwerken sind die Methoden der Ermittlung und Berechnung der bestehenden und zu erwartenden Lärmbelastungen festgelegt, die analog für Freileitungen gelten.

Die Berechnung und Beurteilung verkehrsbedingter Schallemissionen erfolgt für den Straßenverkehr, den Schienenverkehr und für Freileitungen nach den unten aufgeführten Richtlinien

Straßenverkehr:

RLS 90	Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen
DIN 18005	Schallschutz im Städtebau
16. BImSchV	Verkehrslärmschutzverordnung Parkplatzlärmstudie Bayern

Schieneverkehr:

Schall 03	Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen
DIN 18005	Schallschutz im Städtebau
16. BImSchV	Verkehrslärmschutzverordnung

Gewerbelärm:

VDI 2571	Schallabstrahlung von Industriebauten
VDI 2714	Schallausbreitung im Freien
VDI 2720	Schallschutz durch Abschirmung im Freien
VDI 2058	Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft
DIN 18005	Schallschutz im Städtebau

2.1.2 Schalltechnische Orientierungswerte

Bei der Bauleitplanung nach dem Baugesetzbuch und der Baunutzungsverordnung (BauNVO) sind in der Regel den verschiedenen schutzbedürftigen Nutzungen (z.B. Bauflächen, Baugebiete, sonstige Flächen) folgende Orientierungswerte für den Beurteilungspegel zuzuordnen.

Ihre Einhaltung oder Unterschreitung ist wünschenswert, um die mit der Eigenart des betreffenden Baugebietes oder der betreffenden Baufläche verbundenen Erwartung auf angemessenen Schutz vor Lärmbelastigungen zu erfüllen.

Die Dezibelskala (dB) ist logarithmisch aufgebaut, dadurch gelingt es, die Schallintensität vom relativen Wert 1 (siehe Gleichung 2.1 (Hörschwelle) bis zum Wert (= 10 Billionen = Schmerzgrenze bei $P_s = 20 \text{ Pa}$) in Werten von 0 bis 130 dB zu erfassen (siehe Tabelle 2.1). Für die Dezibel-Skala gelten damit aber auch besondere Rechenregeln: Erhöht man einen Schallpegel um 10 dB, so entspricht das einer Verzehnfachung der Schallintensität. Eine Erhöhung um 20 dB entspricht einer hundertfachen und eine Erhöhung um 30 dB einer tausendfachen Vergrößerung der Schallintensität. Addiert man die Schallpegel, so ergeben 50 dB + 50 dB nicht 100 dB, sondern 53 dB. Eine Erhöhung (Verminderung) des Schallpegels um 3 dB entspricht einer Verdoppelung (Halbierung) der Schallintensität.

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) \text{dB} \quad \text{Gleichung 2.1}$$

Wobei

L_p	Schalldruckpegel
P	Gemessener Schalldruck
$P_0 =$	$2 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}$ (Hörschwelle)

International wird vor allem die Kurve A siehe Abbildung 1.1 angewandt. Pegelwerte, die nach der Kurve A bewertet sind, werden in dB(A) angegeben. Sehr leise Geräusche von 0 bis 20 dB(A) kann man praktisch nur unter Laborbedingungen hören.

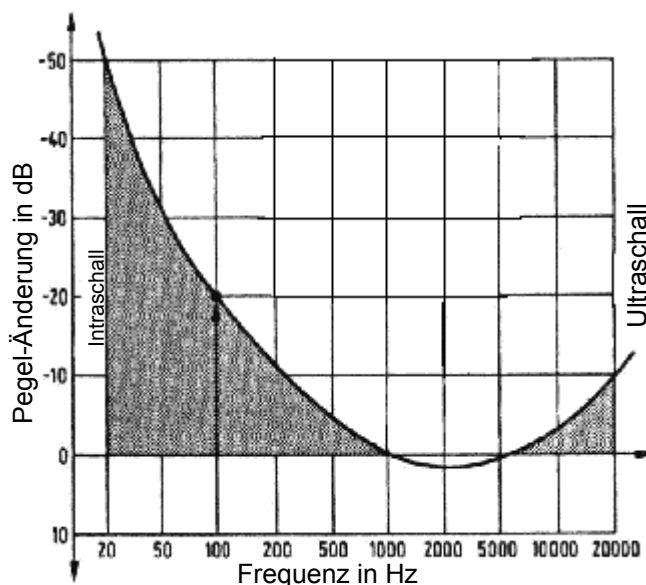


Abbildung 2.1 : Kurve A (A-Filter)

Geräuschequelle	Schallpegel
Düsentriebwerk (unmittelbare Nähe)	130 dB(A)
Schmerzschwelle	120 dB(A)
Preßlufthammer	110 dB(A)
Winkelschleifer, Rockkonzert	
Webmaschinenensaal	100 dB(A)
Bohrmaschine, Diskothek	90 dB(A)
Fahrradklingel (1 m Abstand)	80 dB(A)
Staubsauger	70 dB(A)
Hauptverkehrsstraße (Straßenrand)	60 dB(A)
Gespräch, Fernsehen (Zimmerlautstärke)	
Waschmaschine, Geschirrspüler	50 dB(A)
Klimaanlage	40 dB(A)
Flüstersprache	30 dB(A)
Wecker (1 m Abstand)	20 dB(A)
Tonstudio	10 dB(A)
Hörschwelle	0 dB(A)

Tabelle 2.1: Der gesamte Hörbereich des Menschen

- Bei reinen Wohngebieten (WR), Wochenendhausgebieten, Ferienhausgebieten:

Tags	50 dB
Nachts	40 dB bzw. 35 dB

- Bei allgemeinen Wohngebieten (WA), Kleinsiedlungsgebieten (WS) und Campingplatzgebieten:

Tags	55 dB
Nachts	45 dB bzw. 40 dB

- Bei Friedhöfen, Kleingartenanlagen und Parkanlagen:

Tags und Nachts	55 dB
-----------------	-------

- Bei besonderen Wohngebieten (WB):

Tags	60 dB
Nachts	45 dB bzw. 40 dB

- Bei Dorfgebieten (MD) und Mischgebieten (M):

Tags	60 dB
Nachts	50 dB bzw. 45 dB

- Bei sonstigen Sondergebieten, soweit sie schutzbedürftig sind, je nach Nutzungsart:

Tags	45 dB bis 65 dB
Nachts	35 dB bzw. 65 dB

Bei zwei angegebenen Nachtwerten soll der niedrigere für Industrie-, Gewerbe- und Freizeitlärm sowie für Geräusche von vergleichbaren öffentlichen Betrieben gelten.

Von den aufgelisteten Werten sind keine für Freileitungen vorgesehen. Koronageräusche werden insbesondere für überwiegend geistige Tätigkeiten als erheblich störend empfunden, wenn sie 55 dB(A) und mehr erreichen, was bei ungünstigen Wetterbedingungen und Hochspannungsfreileitungen mit 380 kV Nennspannung eintreten kann [3].

Anmerkung:

Bei Beurteilungspegeln über 45 dB ist selbst bei nur teilweise geöffnetem Fenster ungestörter Schlaf häufig nicht mehr möglich.

Schlußfolgerung :

Bau und Betrieb von Hochspannungsfreileitungen hängen oftmals zusammen mit der Frage des Erwerbs von Grundstücken, da die oben aufgeführten Orientierungswerte bereits auf den Rand der Bauflächen oder überbaubaren Grundstücksflächen in den jeweiligen Baugebieten bezogen werden sollen. Rechtlicher Maßstab für die Beurteilung des Betriebs ist jedoch § 22 BImSchG. Diese Vorschrift ist auch hier einschlägig, da die Freileitungen keine genehmigungsbedürftigen Anlagen nach § 4 BImSchG i.V.m. und § 1 der 4.BImSchGV darstellen und die Beschränkung auf Abwehr von Luftverunreinigungen und Geräuschen nach § 22 Abs.1. S . 3 BImSchG nicht gereift, weil die Anlagen gewerblichen Zwecken dienen und im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden.

In Zusammenhang mit Lärm und Geräuschen gibt es allerdings noch einen weiteren Aspekt. Die durch 50 Hz Wechselspannung verursachten elektrischen Wechselfelder und die durch den Strom hervorgerufenen magnetischen Felder haben einen störenden und schädigenden Einfluß auf Mensch und Natur. In jüngster Zeit wurden dazu Verordnungen erlassen, deren Anliegen die gesetzliche Einschränkung des Ausmasses an Beeinträchtigung durch festgelegte Grenzwerte und damit der Schutz der betroffenen Bevölkerung ist

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Elektrische Randfeldstärke an Leiterseilen

3.1.1 Einleitung

Dieses Kapitel befaßt sich mit den grundlegenden physikalischen Prinzipien zur Erfassung elektrische Felder. Leiterseile bestehen hauptsächlich aus Al-Seilen, Al-Stahl-Seilen und Al-Stahl-Seilen (bei neuen Leitungen ist Kupfer seltener). In der Abbildung 3.2 werden die Freileitungsseile graphisch dargestellt. In Abbildung 3.1 ist im AL-St Leiter der verdrehte Stahlkern erkennbar. Farblich schwarz gekennzeichnet ist der Stahlteil und weiß abgehoben ist der Aluminiumanteil, der außen um den Stahlteil herum angeordnet ist und ebenfalls verdreht und mit einer sogenannten „Schlagrichtung“ ausgestattet ist. Aufgabe der Stahlseele ist die Erhöhung der Zugfestigkeit des Leiters. Der Stromtransport ist die Aufgabe der Aluminiumdrähte, die einen 25mal geringeren Widerstand als die Stahlseile haben [4].

Ab 220 kV werden normalerweise Bündelleiter eingesetzt. Diese bestehen aus mehreren Seilen (Teilleiter) wie in Abbildung 3.3 veranschaulicht was zu Vergrößerung Ersatzradius führt. Außerdem können durch die Leiterteilung auch bei größeren Leistungen Normquerschnitte verwendet werden. Trotz der größeren Kapazität (Ladung) bleibt die Randfeldstärke wegen des günstigeren Feldbildes in den zulässigen Grenzen.

Dies ist bei den höchsten Spannungen wegen der Entladungserscheinungen (Korona : leuchtender Kranz) von Bedeutung.

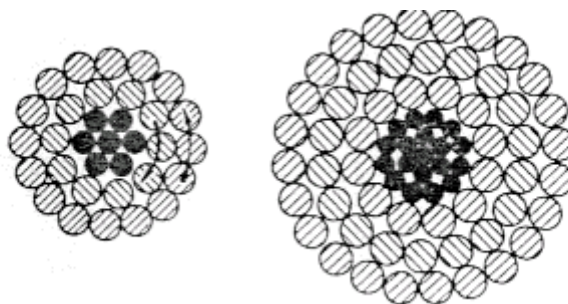


Abbildung 3.1: Typischer Leiterquerschnitt AL-Stahl-Seilen mit einem Querschnitt ab 240/40 mm²



Abbildung 3.2: Freileitungsseile : Einfachleiter, AL-Stahl-Seil, und Aldrey

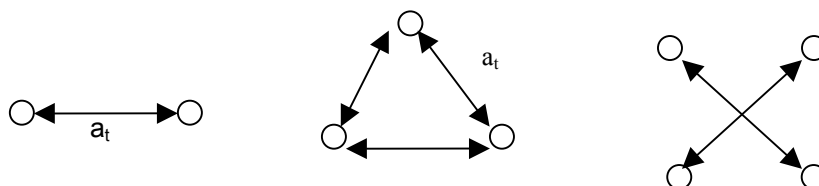


Abbildung 3.3: Bündelleiter: Zweierbündel, Dreierbündel, Viererbündel

3.1.2 Elektrische Felder, Allgemeines

Das elektrische Feld wird von elektrischen Ladungen verursacht. Elektrisch geladene Körper entstehen immer dann, wenn sich ein neutraler Körper in einen positiven und negativen Teil auf trennt.

Ähnlich, wie sich die Erdanziehung durch Kräfte, die auf Körper ausgeübt werden, bemerkbar macht, äußert sich das elektrische Feld durch Kraftwirkungen auf elektrische Ladungen.

Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige Ladungen ziehen sich an. Das elektrische Feld ist ein Kraftfeld, in dem die elektrische Feldstärke \vec{E} durch die Kraft \vec{F} angegeben wird, die auf eine elektrische Ladung q ausgeübt wird.

Als Formel ausgedrückt:

$$\vec{F} = \vec{E} * q \quad \text{Gleichung 3.1}$$

$$E = \frac{dU}{ds} \quad \text{Gleichung 3.2}$$

mit

E	Elektrische Feldstärke [kV/cm]
\vec{E}	Vektor der Elektrischen Feldstärke
\vec{F}	Kraft der elektrischen Ladung
U	Spannung [V]
s	Abstand [m]

Die Feldstärke E ist abhängig von der Elektrodenform, dem Abstand s zwischen den Elektroden, wobei U die Spannung ist. Diese Kraftwirkung beruht auf einer Eigenschaft des Raumes - eben dem Feld - und existiert deshalb auch im Vakuum. Zur Darstellung der Feldstärke sind der Betrag und die Richtung der Kraft erforderlich.

Die Einheit der elektrischen Feldstärke ist 1 Volt pro Meter (V/m). Die elektrische Feldstärke ist definitionsgemäß von der positiven zur negativen Ladung gerichtet siehe Abbildung 3.4. Die räumliche Verteilung des elektrischen Kraftfeldes wird durch sogenannte Feldbilder dargestellt, in denen der Verlauf der Feldlinien durch Vektorpfeile, deren Betrag und Richtung die elektrische Feldstärke im betrachteten Punkt angeben, dargestellt wird. [5]

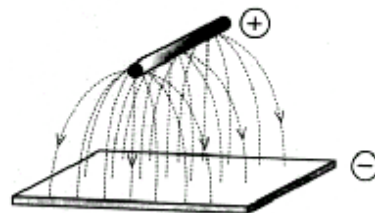


Abbildung 3.4: Feldlinien eines Leiters

3.2 Hochspannungsfreileitungen

Von Hochspannungsleitungen Abbildung 3.5 gehen elektrische und magnetische Felder im 50 Hz-Bereich aus. Die Stärke des elektrischen Wechselfeldes in jeder Entfernung zum Boden hängt von der Betriebsspannung, der Anzahl und Anordnung der Leiterseile (Phasenbelegung), der Leiterhöhe, der jeweiligen Mastkonstruktion, der Form der Erdoberfläche und vom Abstand zur Trasse ab. Alle geerdeten Anordnungen (z.B. Bäume, Erdwälle oder Häuser), die in den Feldraum hineinragen, wirken in ihrer Umgebung als Abschirmung. So fällt das elektrische Wechselfeld einer Hochspannungsfreileitung 1 bis 5 m hinter einem Baum auf 10 bis 50% seiner Stärke ab. Die höchsten Feldstärken treten an der Stelle des größten Durchhanges, in der Regel in Spannfeldmitte, in einem bestimmten seitlichen Abstand zur Freileitungstrasse auf.

Der seitliche Abstand von der Trasse hängt von der Anzahl und Anordnung der Leiterseile ab. In Abbildung 3.5 wird das Profil der Feldverteilung graphisch dargestellt, welches sich ergibt, wenn man die y-z-Ebene in der Spannfeldmitte normal zur Leitungsachse positioniert. Diese Koordinaten haben eine Bedeutung für die Erstellung von Winfield, auf die später detailliert eingegangen werden wird.

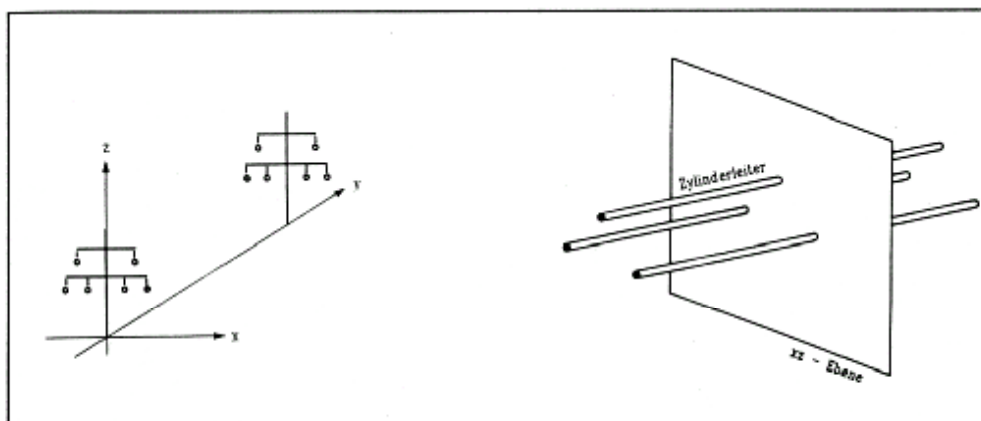


Abbildung 3.5: Freileitung wird in ein ebenes Koordinatensystem (xz-Ebene) gelegt.

3.3 Feldlinien der Freileitungen

Die Feldstärkenverteilung des einzelnen Leiterseils kann wie in Abbildung 3.6 dargestellt werden :

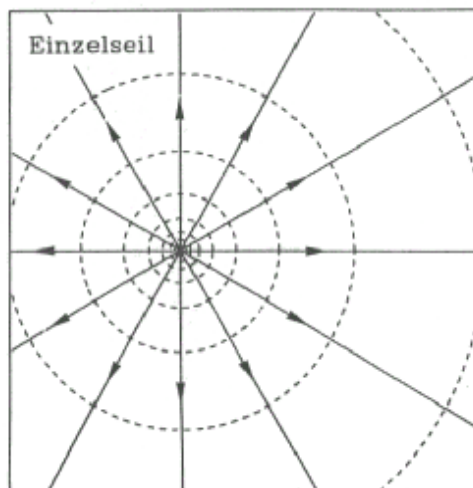


Abbildung 3.6: Feldlinien ein einzelnen Leiters

Die Feldstärkenverteilung der Zweierbündelleiter kann wie in Abbildung 3.7 dargestellt werden :

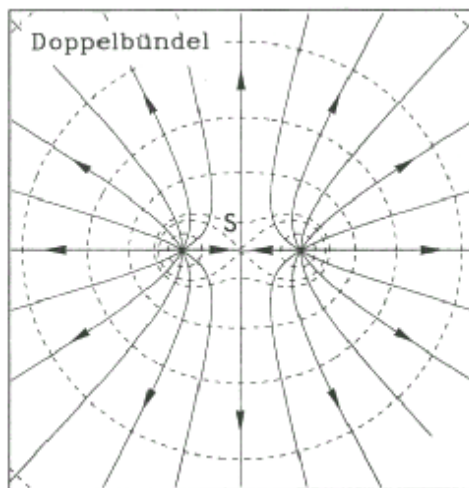


Abbildung 3.7: Feldlinien Zweierbündelleiter

Die Feldstärkenverteilung der Dreierbündelleiter kann wie in Abbildung 3.8 dargestellt werden.

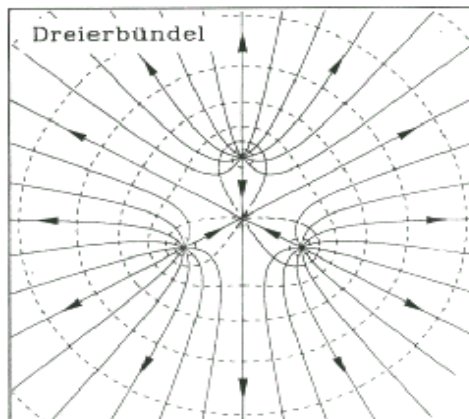


Abbildung 3.8: Feldlinien Dreierbündelleiter

Die Feldstärkenverteilung der Viererbündelleiter kann wie in Abbildung 3.9 dargestellt werden:

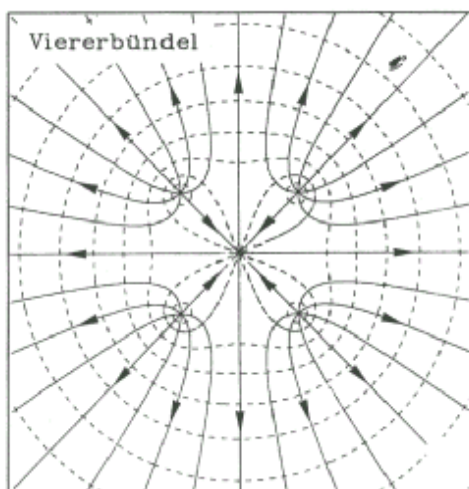


Abbildung 3.9: Feldlinien Viererbündelleiter

Die Abbildungen 3.6 bis 3.9 zeigen die Feldverteilungen von Bündelleitern mit unterschiedlicher Anzahl von Bündeln.

Über die Vergrößerung des elektrischen Ersatzradius des Bündelleiters kann die Oberflächenfeldstärke bei konstanten Gesamtleiterquerschnitt verringert werden .

3.4 Randfeldstärken

3.4.1 Definition der Randfeldstärke

Die folgenden Berechnungen gelten nicht nur für Dreiphasen-, sondern allgemein für m-Phasensysteme. Zwischen Leiterspannung U_L (Spannung zwischen benachbarten Leitern in symmetrischer Anordnung U eines m-Phasen-Systems) gilt die Formel:[5]

$$U_L = U \cdot 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \quad \text{Gleichung 3.3}$$

Was üblicherweise als Einphasenleitung bezeichnet wird, ist in diesem Kontext nur dann ein echtes Einphasensystem, wenn der Rückleiter der Erde (oder der geerdete Nullleiter) ist. Andernfalls ist die Leitung als Zweiphasensystem zu interpretieren.

Für mehrere Leiter kann die Formel beliebig verallgemeinert werden, wie bereits von Maxwell gezeigt und bedeutet g_{11} der mittlere geometrischer Abstand des Leiters von sich selbst. Dieser Abstand ist definiert als geometrisches Mittel aller möglichen Abstände von zwei Punkten innerhalb der Leiterfläche. Es läßt sich zeigen, daß für Kreisflächen $g_{11} = r \cdot e^{-0.25}$ gilt.

Besteht der Bündelleiter aus n Teilleitern mit Radius r , die gemäß Abbildung 3.10 auf einer Kreislinie mit Radius R_b angeordnet sind, dann gilt:

$$g_{11} = r \cdot e^{-0.25} \quad \text{Gleichung 3.4}$$

$$g_{11} = \sqrt[n]{r \cdot e^{-0.25} \cdot a_1 \cdot a_2 \cdots a_{n-1}} \quad \text{Gleichung 3.5}$$

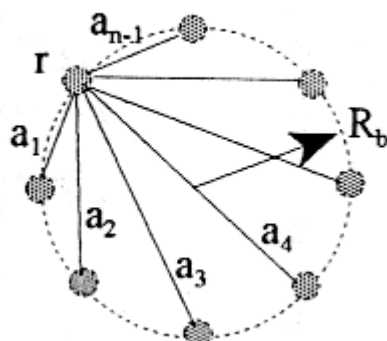


Abbildung 3.10: Ersatzradius ein Teilleiter

Aus einer elementaren Eigenschaft des im Kreis mit Radius R_b eingeschriebenen Polygons, ergibt sich für :

$$g_{11} = \sqrt[n]{r \cdot e^{-0.25} \cdot n \cdot R_b^{n-1}} \quad \text{Gleichung 3.6}$$

dadurch erhält man einen äquivalenten Radius r_e des Bündels :

$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot n \cdot R_b^{n-1}} \quad \text{Gleichung 3.7}$$

Leiteranordnung	r (cm)	a _t = 40 cm		a _t = 50 cm	
		R _b (cm)	r _e (cm)	R _b (cm)	r _e (cm)
Zweierbündel	1,0950	20	6,60	25	7,40
Dreierbündel	1,0950	23,1	12,06	28,9	13,99
Viererbündel	1,0950	28,3	19,35	35,4	22,87
Sechserbündel	1,0950	40,0	29,60	35,4	35,65

Tabelle 3.1 : Ersatzradien r_e von Bündelleitern mit einem Leiterradius von 1,095 cm und einen Abstand von 40/ 50 cm

3.4.2 Potentialkoeffizienten von Freileitungen

Die Erde sei eine horizontale Ebene. Nach dem Spiegelbildverfahren Abbildung 3.11. kann man sie durch die Spiegelladungen $-Q'_a, \dots, -Q'_m$ ersetzen (in Abbildung 3.12 ist $m=2$). Unter der Annahme, alle Ladungen außer der des Leiterseiles seien Null, lauten die beiden ersten Gleichungen des Phasensystem, die auch als Matrix gilt:

$$U_a = \alpha_{aa} Q_a \quad \text{Gleichung 3.8}$$

$$U_b = \alpha_{ab} Q_a \quad \text{Gleichung 3.9}$$

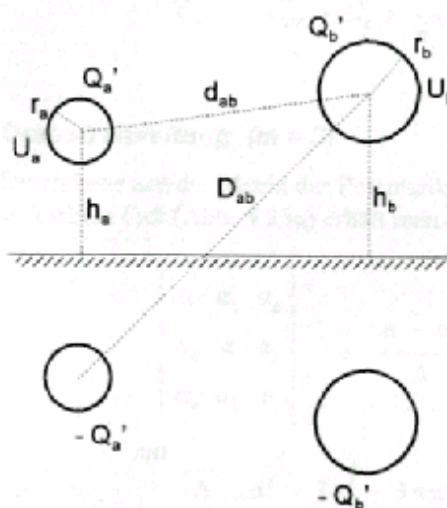


Abbildung 3.11: Spiegelbildverfahren

Der Potentialkoeffizient α_{aa} lässt sich als Reziprokwert der Kapazität Leiter a-Erde interpretieren. Man erhält somit

$$\alpha_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_a}{r_a} \quad \text{Gleichung 3.10}$$

Ist die Leitung symmetrisch, so gilt $\alpha = \alpha_{aa} = \alpha_{bb} = \alpha_{cc} = \dots$. Ist die Leitung unsymmetrisch, aber verdrillt, erhält man ein 3-Phasensystem dann gilt:

$$\alpha_{aa} = \frac{1}{3} (\alpha_{aa} + \alpha_{bb} + \alpha_{cc}) \quad \text{Gleichung 3.11}$$

Setzt man die Werte gemäß (3.12) ein, folgen die Diagonalkoeffizienten der Potentialkoeffizientenmatrix:

$$\alpha = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h}{r} \quad \text{Gleichung 3.12}$$

$$h = \sqrt[3]{h_a \cdot h_b \cdot h_c} \quad \text{Gleichung 3.13}$$

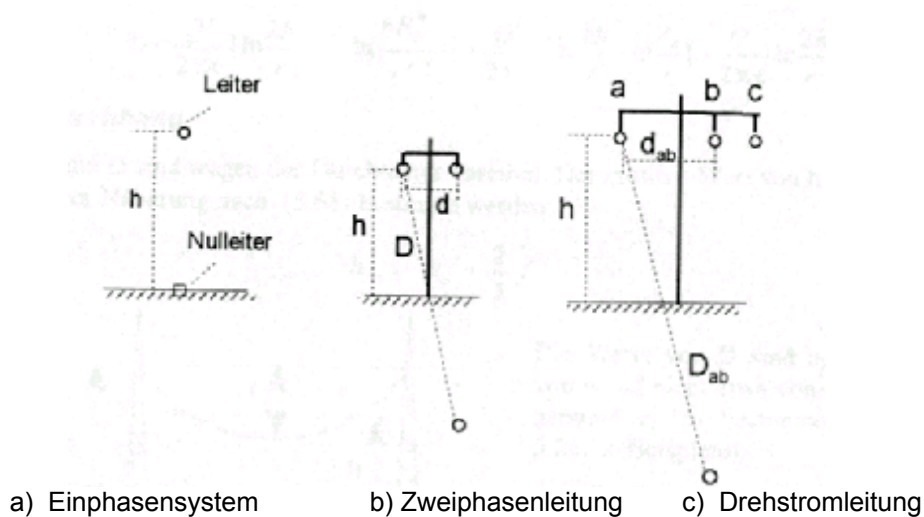


Abbildung 3.12: Berechnung der Potentialkoeffizienten von Leiter

Das Potential U_b kann als Summe der von den Ladungen $-Q'_a$ und $-Q'_m$ erzeugten Teilpotentiale berechnet werden:

$$U_b = (-\varphi_a) \frac{-Q'_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{ab}}{r_a} + (-\varphi_a) \frac{-Q'_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{ab}}{r_a} = \frac{Q'_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{ab}}{d_{ab}} \quad \text{Gleichung 3.14}$$

Der Vergleich mit Gleichung 3.8 und 3.9 liefert für die Nichtdiagonalkoeffizienten der Matrix C'_1 . Ist die Leitung symmetrisch, so gilt (für $m=3$) $\alpha_k = \alpha_{ab} = \alpha_{bc} = \alpha_{ca}$. Ist die Leitung unsymmetrisch, aber verdrillt, erhält man

$$\alpha_k = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{d} \quad \text{Gleichung 3.15}$$

Worin

$$d = \sqrt[3]{d_{ab} d_{bc} d_{ca}} \quad \text{Gleichung 3.16}$$

und

$$D = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}} \quad \text{Gleichung 3.17}$$

D ist das geometrische Mittel der Abstände eines Leiters zum Spiegelbild des Leitungssystems.

3.4.3 Bündelleiter

Bei Bündelleitern ist r durch r_e zu ersetzen nach Gleichung 3.6. Diese läßt sich wie folgt begründen. Das Potential eines Teilleiters wird mit folgendem Ausdruck wiedergegeben :

$$U = \frac{Q'}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h}{r} - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q'}{n2\pi\epsilon} \ln \frac{a_i}{r} \quad \text{Gleichung 3.18}$$

Der erste Term entspricht dem Potential des Teilleiters für den Fall, daß die ganze Ladung auf dem Teilleiter konzentriert wäre.

Der zweite Term berücksichtigt die Potentialminderung, die durch die Dezentralisierung der Ladungen erzeugt wird. Ersetzt man die Teilleiterabstände durch den Erstradius folgt:

$$\alpha_{aa} = \frac{Q'}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h}{r_e} \quad \text{Gleichung 3.19}$$

3.4.4 Durchhangberechnung

h und D sind wegen des Durchhangs variabel. Der mittlere Wert von h kann mit guter Näherung nach (3.20) bestimmt werden [6] :

$$h = h_0 - \frac{2}{3} f_{\max} \quad \text{Gleichung 3.20}$$

Die Werte von D sind ausgehend von h und nicht etwas vom Aufhängepunkt von h_0 (h_{Mast}) zu bestimmen.

Mit einer Näherung kann man für die Berechnung der Randfeldstärke an Freileitungen annehmen, daß die Tangentenneigung an der Durchhangsline klein ist. Die Vernachlässigung der Tangentenneigung entspricht der Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Seilmasse längs der Spannweite, daraus wird die Parabelgleichung :

$$f(x) = f_{\max} - \frac{G'}{2 \cdot F_H} \cdot x^2 \quad \text{Gleichung 3.21}$$

dabei

$$f_{\max} = \frac{G'}{2 \cdot F_H} \cdot a^2 \quad \text{Gleichung 3.22}$$

Wobei

f_{\max}	Durchhang in Spannungsfeld Mitte
G'	Seillast
F_H	Zugkraft des Seiles
a	Spannweite

Dabei ist der Durchhang an der Stelle $x=0$, gleich h_{\min} .

In einem optimalen Fall kann man $h_{\min} = 10$ m als Spannmittle der Freileitung annehmen. Dabei läßt sich f_{\max} b.z.w $f(x)$ für beliebige Punkt entlang des Freileitungsseil bestimmen. (siehe Anhang)

Für die Berechnung des Durchhangs siehe [5] (Abschnitt 11.3.3)

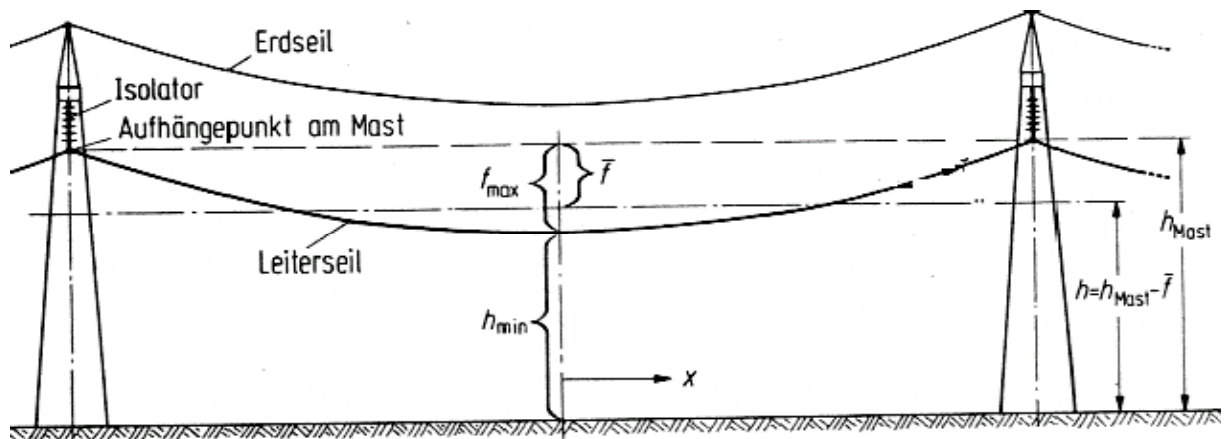


Abbildung 3.13: Durchhang der Hochspannungsfreileitung

Für den Fall einer Doppelfreileitung gilt dann :

$$D' = \sqrt[3]{D_{ab'} D_{bc'} D_{ca'}} \quad \text{Gleichung 3.23}$$

$$D'' = \sqrt[3]{D_{aa'} D_{bb'} D_{cc'}} \quad \text{Gleichung 3.24}$$

D' und D'' stellen die entsprechenden Ausdrücke für die Abstände eines Leiters vom Spiegelbild des anderen dar.

Man erhält schließlich die Beziehungen 3.17, 3.23, 3.24 wobei die Näherungsausdrücke

$D \approx 2h$, $D'' \approx D'$ bezüglich der Genauigkeit meist genügen.

Dem zufolge ergibt sich die Kapazität für eine Drehstromleitung C'_1 gemäss 3.25 ist wie folgt

$$C'_1 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d \cdot 2h}{r \cdot D}} \quad \text{Gleichung 3.25}$$

Kapazitätsbelag von Drehstromdoppelfreileitungen lautet dann wie folgt:

$$C'_1 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d \cdot d'}{r_e \cdot d''}} \quad \text{Gleichung 3.26}$$

Die Randfeldstärke für Bündelleiter lautet allgemein formuliert :

$$E_{\max} = \frac{C'_b \cdot U_m}{n \cdot \epsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3}} \left(\frac{1}{r} + \frac{n-1}{R_b} \sin \frac{\pi}{n} \right) \quad \text{Gleichung 3.27}$$

3.5 Koronaentladung an Freileitungen

3.5.1 Der Entladungsvorgang

Beaufschlagt man Gase mit geringen Feldstärken, liegt ein scheinbar statischer Zustand vor. Bei höheren Feldstärken beobachtet man eine Strömung von Ladungen.

Diesen Vorgang nennt man Entladungen. Dabei unterscheidet man die vollständige und die Teilentladung.

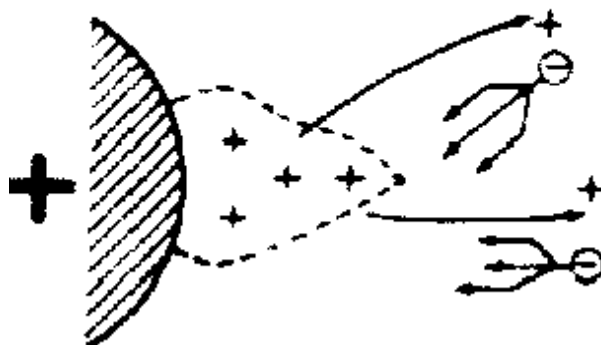


Abbildung 3.14: Entladungsform bei Freileitungen

Die Teilentladung kann sich durch Glimmen, intensives Sprühen, Streifenentladungen, Büschelentladungen oder Korona bemerkbar machen.

Die Korona ist eine Form der selbständigen Entladungen in Gasen bei stark inhomogenen Feldern (siehe Abbildung 3.28).

Bei Energiefreileitungen kann man unter bestimmten Voraussetzungen, besonders bei naßkaltem Herbst- und Winterwetter,

Entladungserscheinungen an der Oberfläche der Leiter beobachten, die sich durch Geräusche und Leuchterscheinungen bemerkbar machen.

Es sind dies die Koronaentladungen [7].

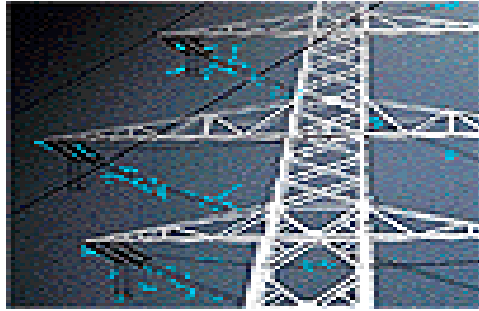


Abbildung 3.15: Koronaentladungen an Freileitungen

3.5.2 Optimieren der Koronaentladungen

Um Koronaentladungen zu vermeiden, bietet sich an

- der Einsatz von Bündelleitern
- Mit Fett eingeschmiert, damit die Wasser Tropfen an den Leitern nicht haften, und somit die Leiteroberfläche bei Regen glatt ist. Somit vermindert sich Koronaentladungen und Koronageräusche
- Beim Lackieren mit einem speziellen Lack werden die Freileitungseile eingesprüht, und das gilt als Isoliermaterial, das von Wassertropfen und Luft die Seile isolieren soll, was zu keine Koronaverluste (Koronageräusche) mehr gibt, aber nur solange wie diese Lack besteht.

4 Geräuschemissionen durch Koronaentladung

4.1 Abhandlung der Bonneville Power administration über Vorhersageformeln für Koronageräusche [1],[7]

Analytische Formeln für die Vorhersage von akustischen Geräuschen an Wechsel- und Gleichstrom-Hochspannungsleitungen wurden bisher nur in der Literatur aus Daten abgeleitet. Wechsel- und Gleichstromspannung werden im weiteren als AC und DC bezeichnet. In dieser Quelle werden allgemeine Formeln beschrieben, um die A-gewichteten (d.h. die auf die Fläche bezogenen Gewichtungsmethoden für die Bestimmung des Korrelationskoeffizienten) akustischen oder auch hörbaren Geräusche während des Regens für und bei schönem Wetter für AC- und DC-Leitungen, vorhersagen zu können, die aus Daten über ausführliche Skalen, für Leitungen entwickelt wurden. Ausgehend von dieser Grundberechnung können kumulative Verteilungen für hörbare Geräusche, deren Frequenzspektren geschätzt werden.

4.1.1 Einführung

Die Korona-Entladung von Hochspannungsübertragungsleitungen ist ein sehr komplizierter Prozess für sowohl AC als DC auch Hochspannungsübertragungsleitungen. Wegen dieser Erschwernis konnten keine analytischen Formeln entwickelt werden, um Vorhersagen für eines der Koronaphänomene wie hörbare Geräusche (AUDIBLE NOISE kurz AN), Radiolärm, Fernsehstörung, Ozon und Koronaverluste zu datieren. Deswegen wurden alle diese Formeln, um diese Koronaphänomene vorherzusagen, aus Daten abgeleitet. Die meisten der bestehenden Formeln über Geräuschemissionen für die AC-Leitungen wurden von Daten abgeleitet, die das Ergebnis von Tests an einer ausführlichen Zahl von Leitern in Testkäfigen sind Abbildung 4.1. Formeln, um den DC-AN vorherzusagen, gibt es fast überhaupt nicht, abgesehen von der einen in [7] beschrieben.

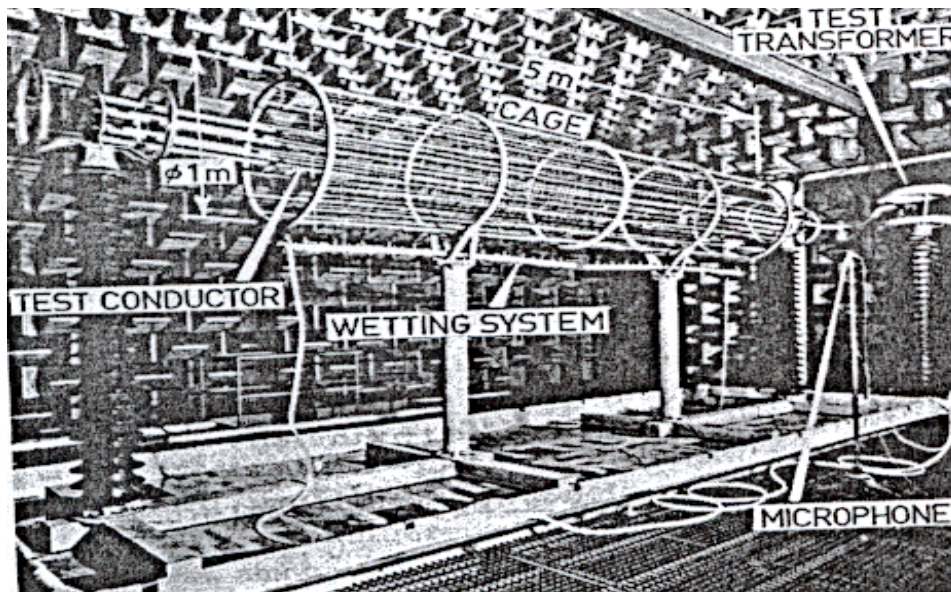


Abbildung 4.1: Testkäfig

Die Anwendung von Fällen, um entweder direkt hörbare Geräusche vorherzusagen, oder aber um Formeln für hörbare Geräusche vorherzusagen, haben ihre Defizite, die in der Literatur ziemlich unzureichend diskutiert werden. Die Frage, die von der Literatur aufgeworfen und diskutiert wird ist, ob elektrische Verhältnisse und/oder ob die Wetterverhältnisse richtig in einem Testkäfig simuliert werden können.

Die meisten Wissenschaftler stimmen darin überein, daß die Leitungen in Testkäfigen zu kurz sind, um Schönwettertests zu ermöglichen. Für die AC-Geräuschemissionen ist dieses Defizit nicht so bedeutend, da es sich vorrangig um ein Phänomen handelt, das bei stürmischem Wetter auftritt. Jedoch ist es für die DC -Geräuschemission von Bedeutung, welche hauptsächlich ein Phänomen ist, das bei schönem Wetter auftritt. Das andere Wetterdefizit ist die Unfähigkeit, eine Leitung auf eine frühere Zeit zurückzustellen, bevor sie getestet wird. Das Projekt UHV hat Techniken entwickelt, um einige dieser Probleme zu bewältigen, jedoch sind diese Techniken nicht zu großer Akzeptanz gelangt.

Es stellt sich auch die Frage, ob Testkäfige das elektronische Umfeld um Leitungen herum richtig simulieren können, da einige Beobachter fühlen, daß ein Sättigungseffekt eintritt, der nicht bei den Leitungen vorkommt. Es zeigt sich, daß das Gefälle des hörbaren Lärms oder anderer Koronaphänomene gegenüber der Leistungssteigerung bei Leitungen, die in Testkäfigen getestet wurden, geringer ist. Alle diese Formeln für hörbare Geräusche, die entwickelt wurden, um zu datieren, können auch als vergleichende (verhältnismäßige) Formeln benutzt werden.

Unter den vergleichenden Formeln, siehe Tabelle 4.1 die in der Literatur für AC-Leitungen entwickelt wurden, befinden sich auch die von Westinghouse und BPA entwickelten. Die Westinghouse-Formel wird von Chartier und Dietrich in ihrer Diskussion beschrieben. [8]. Die frühe BPA-Formel, von Perry entwickelt, wird in seinen Diskussionen beschrieben und eine revidierte Version der Formel wird in [9] abgehandelt.

Der hauptsächliche Unterschied zwischen diesen vergleichenden Formeln besteht in dem bestimmten Wert für den Einfluß der Leitungsoberflächensteigung und der Anzahl von Leitern auf die hörbaren Geräusche.

Tabelle 4.1 listet alle bekannten AN-verhältnismäßigen Formeln und veranschaulicht diese Unterschiede. Der Wert für den Einfluß der Leitungsoberflächensteigung ist bei den Westinghouse und BPA-Formeln größer als bei den Formeln, die bei Käfigtests entwickelt wurden.

Da der Erhöhungsdauereinfluß bei der Westinghouse und BPA-Formeln mehr von Leitungsdaten als von Käfigdaten entwickelt wurden, besteht einige Validität für das Sättigungswirkungsargument.

Da mehr Daten für die voll skalierten Leitungen geliefert wurden, ist klar geworden, daß es keine einfache Beziehung für den Einfluß der Anzahl von Leitern auf hörbare Geräusche für entweder AC oder DC- Leitungen gibt.

Varringig wegen dieser Beobachtung sahen die Autoren,daß ein Bedarf an der Entwicklung von allgemeinen Formeln für die Vorhersage von A-gewichteten AN für beide, AC als auch DC- Hochspannungsleitungen bestand, bei deren Entwicklung die Daten für die vollskalierten Leitungen benutzt werden. Deshalb ist es die Absicht dieses Aufsatzes nicht nur zu zeigen, wie die allgemeinen Formeln, die jetzt vom BPA benutzt werden, entwickelt wurden, sondern auch die Grundphilosophie vom BPA für die Vorhersage von

A-gewichteten hörbaren Geräuschen, kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Frequenzspektren geschätzt werden.

Die Formeln, die dargestellt werden, gelten für normale Leitungen, d.h. wenn eine Leitung Bündelleiter benutzt, dann sind die Leiter symmetrisch angeordnet und befinden sich in einem Abstand etwa zwischen 30 und 50 cm entfernt von dort, wo die Leiteroberflächensteigung sich nicht sehr ändert.

Methode	Steigung	Leiterdurchmesser	Anzahl der Leiter	Radialer Entfernung
BPA (4,11)	$130 \log \frac{E}{E_0}$	$44 \log \frac{d}{d_0}$	$10 \log \frac{n}{n_0}$	$10 \log \frac{R}{R_0}$
Westinghouse (10)	$120 \log \frac{E}{E_0}$	$60 \log \frac{d}{d_0}$	$10 \log \frac{n}{n_0}$	$11,4 \log \frac{R}{R_0}$
ENEL (4)	$85 \log \frac{E}{E_0}$	$45 \log \frac{d}{d_0}$	$18 \log \frac{n}{n_0}$	$10 \log \frac{R}{R_0}$
IREQ (5)	$72 \log \frac{E}{E_0}$	$45,8 \log \frac{d}{d_0}$	$22,7 \log \frac{n}{n_0}$	$11,39 \log \frac{R}{R_0}$
EDF (3)	$2,5 (E - E_0)^*$ $1,5(E - E_0)^{**}$	$4,5 (d - d_0)$	$15 \log \frac{n}{n_0}$	$10 \log \frac{R}{R_0}$

Tabelle 4.1 : Vergleichende Formeln zu den hörbaren Geräuschen für Wechselstromleitungen

Mit:

* $15 < E < 20$

** $20 < E < 25$ E in kVeff/cm, wobei E_0, n_0, R_0, d_0 jeweils die Gesamtgrößen darstellen. Bei AC-Leitungen scheinen die Formeln ihre Gültigkeit für Steigungen (gemeint sind die Randfeldstärken) für 12 und 25 kVeff/cm zu besitzen. Für DC-Leitungen scheinen die Formeln gültig für Steigungen zwischen 17 und 29 kV/cm zu sein.

4.2 Grundlegenden Leitlinien für die vorhersagen von Hörbaren Geräuschen

Wenn die Geräuschemission oder andere Koronaphänomene für zukünftige Leitungen berechnet werden müssen, dann besteht BPA's Grundaussage darin, daß langfristige Daten, die über eine bestehende Leitung gewonnen wurden, deren Aussehen und sie umgebende klimatische Bedingungen ähnlich denen unter Betrachtung (in Testkäfigen) sind, daß diese Daten in Verbindung mit einer vergleichenden Formel benutzt werden sollten. Chartier und Stearns nennen Beispiele für diese Grundaussage, jedoch gibt es das Beispiel in Abbildung 4.2, wo eine 500 kV - Leitung benutzt wird, um die hörbaren Geräusche für eine 1200 kV Leitung vorherzusagen, in einem Fall, in dem sich das Aussehen der Leitungen unterscheidet, aber in diesem Fall sind die Wetterverhältnisse nahezu identisch.

Diese Leitlinie gibt dem Eindruck der beiden Autoren eine genauere Berechnung der Geräuschemission und es ist leichter bei gerichtlichen Anhörungen oder bei Klagen, dieses Verfahren zu verteidigen als es bei Voraussagen von allgemeinen Formeln ist. Jedoch kommt es häufig vor, daß für Leitungen, für die langfristige Daten über gleiches Aussehen und in ähnlichen Wetterverhältnissen nicht erhältlich sind, Berechnungen angestellt werden müssen. Oft kommt es auch vor, daß ein Ingenieur kein Wissen von der Existenz solcher langfristigen Daten hat oder es schwierig ist, diese Daten zu erhalten. In solchen Fällen ist eine allgemeine Formel offensichtlich nützlicher. Aus diesen Gründen wurden allgemeine Formeln auch vom BPA entwickelt.

Die allgemeinen Formeln, die in diesem Aufsatz beschrieben werden, werden von verfügbaren langfristigen Daten abgeleitet und sind vorrangig dazu dienlich, das A-gewichtete Niveau der hörbaren Geräusche während regnerischen Wetters für AC-Leitungen zu bestimmen und bei schönem Wetter für DC-Leitungen. Ausgehend von dieser Basisrechnung können auch langfristige statistische Verteilungen, und deren Frequenzbereich mit hohem Maß an Genauigkeit vorhergesagt werden.

4.3 Kumulative Warscheinlichkeitsverteilungen

Bei normalen DC-Leitungen hat die kumulative Häufigkeitsverteilung für nasse Leiter, die man für die Datierung erhielt, im allgemeinen eine gemeinsame Gestalt.

Beispiele für solche Verteilungen werden in Abbildung 4.2 veranschaulicht. Die obere Verteilung entspricht den Regenbedingungen, wohingegen die untere Verteilung ein Mittelding zwischen schönem Wetter und Regen ist, wie z.B. Tau, Nebel oder Nachregenverhältnisse.

Die Vorhersageformel für AC-Leitungen, die später in diesem Aufsatz abgehandelt wird, macht eine Vorhersage für den L_{50} (50Hz) Level während regnerischen Wetters. Sobald man einmal dieses L_{50} Niveau vorausgesagt hat, kann die Verteilungskurve, wie sie sich zeigt, dazu benutzt werden, die totale Gesamtverteilung, für alle klimatischen Bedingungen zu entwickeln.

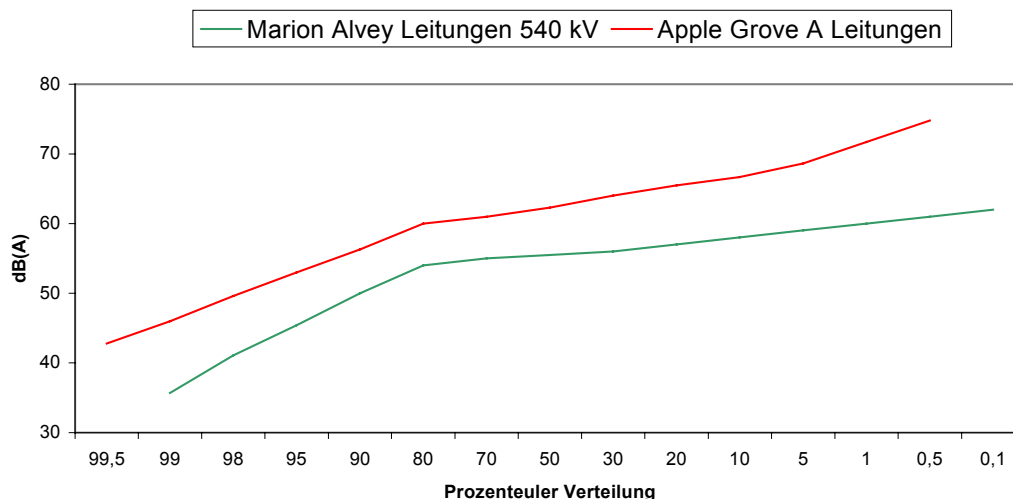


Abbildung 4.2: Beispiele zu A-gewichteten Verteilungen von hörbaren Geräuschen bei Regenwetter in einer Entfernung von 15 m von den Außenphasen an 2 AC-Leitungen

Die Regenverteilung ist die bedeutende Verteilung für Vorhersagezwecke, da die Verteilung der nassen Leiter vom Klima abhängt, von umgebenden Geräuschen, denen die Leitung ausgesetzt ist, und von der Heizwirkung der Stromladung.

Die Konstanz der Regenverteilung für alle Leitungen wird zur Zeit kontrovers abgehandelt.

Jedoch sind die Autoren der Auffassung, daß falls die langfristigen Daten mit einem Luftkondensatormikrophon gesammelt werden, welches trocken und warm gehalten wird, daß dann diese Konstanz wirklich zu existieren scheint. Offensichtlich gibt es einige leichte Unterschiede, wie Abbildung 4.2 zeigt, aber wir vertreten nicht die Auffassung, daß der Unterschied bei normalen Leitungen groß genug ist, daß man noch präzisere Berechnungen versuchen müßte.

Diese Verteilung, die Autoren von IEEE in einer zweiwöchigen Testperiode mit einem B&K 4921 Allwettermikrophonsystem erhielten, wobei das 4165 12,7 mm Mikrophon zugleich trocken und warm gehalten wurde, kann nicht als eine genaue langfristige Verteilung eingestuft werden.

Bei dieser Schönwetterverteilung, korrigiert um die sie umgebenden Geräusche steiler Teil der Kurve, handelt es sich um eine Normalverteilung. Es gibt nicht genug Daten über hörbare Geräusche, von DC-Leitungen, um zu bestimmen, ob alle statistischen Verteilungen des Schönwetters eine konstante Gestalt haben. Abbildung 4.3 zeigt solche Verteilungen für 3 DC-Testleitungen.

Allerdings wurden die langfristigen Daten in diesem Aufsatz sehr von sie umgebenden Geräuschen beeinflusst. Bis mehr Daten über die DC-Leitungen beschaffte werden können, wurde empfohlen, daß die A-gewichtete Verteilung in Abbildung 4.2 als Grundlage zur Herleitung des Verlaufs der DC-Kumulativverteilung bei Schönwetter benutzt werden soll.

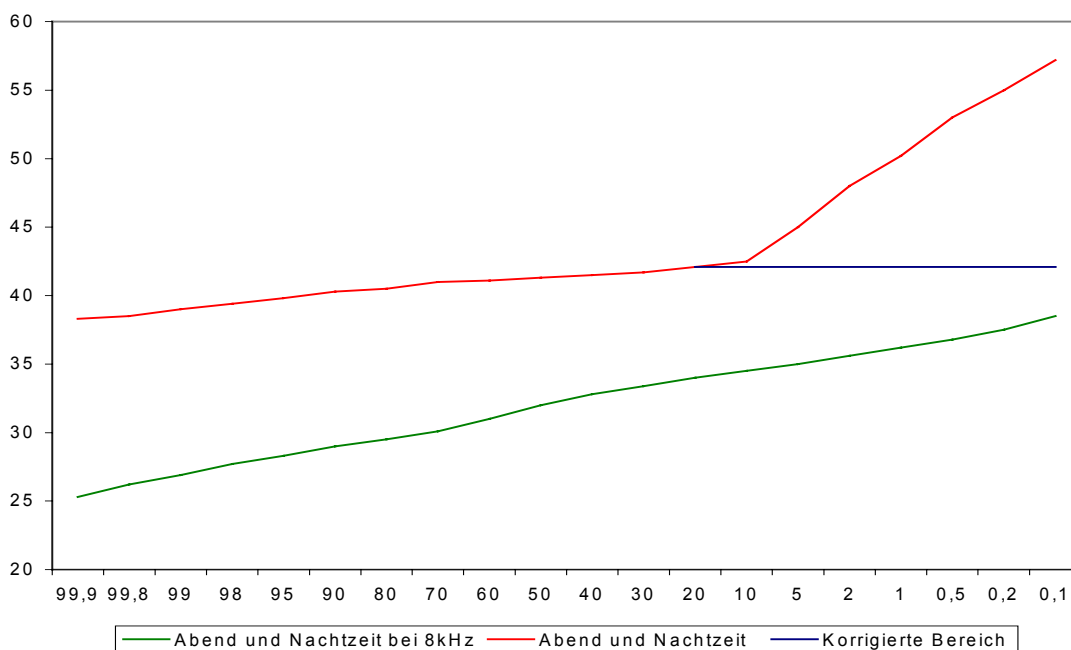


Abbildung 4.3: Verteilung der A-gewichteten und 8kHz Schönwetter-AN mit Abstand von 15 Metern zum positiven Pol an +533KV, The Dallas Gleichstromleitungen, mit 2-46,2mm Leiterdurchmesser

4.4 Frequenzspektren

Tatsächlich gibt es in der Literatur nicht genug Daten, um zu bestimmen, ob es sich bei der Gestalt des Häufigkeitsspektrums für beide, AC und DC-Leitungen, um einen konstanten Verlauf handelt, die unabhängig vom Aussehen der Leitungen oder der Spannung ist.

Allerdings haben die meisten Messungen des Oktavbandfrequenzspektrums (Oktavbänder) über 500 Herz in 15 Meter Höhe bei der Leitung gezeigt, daß für Vorhersagezwecke jenes Frequenzspektrum als flach angenommen werden kann, welches über 8 kHz liegt. Keines der Frequenzspektren ist vollständig niedrig, aber es wurde festgestellt, daß sie ziemlich ähnlich aussehen, wenn man einmal Korrekturen für die Mikrophonschwankungen berücksichtigt. Bei AC-Leitungen tritt diese Abflachung während des Regens auf. Unter nicht-regnerischen, aber nassen Leiterbedingungen scheint das Spektrum einen anderen Verlauf anzunehmen. Für DC-Leitungen gibt es sehr niedrige Werte für Frequenzspektren in der Literatur. Abbildung 4.4 zeigen einige Daten, die bei 2 und 4 -Bündelleitern vom The Dallas DC Test Center gesammelt wurden.

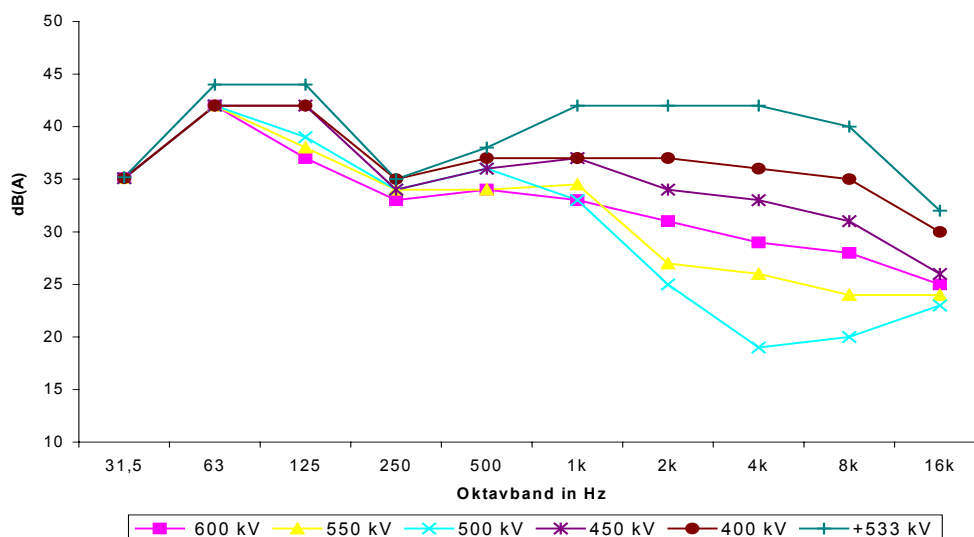


Abbildung 4.4: zeigt die neuerlichsten Daten, erst kürzlich beim The Dallas von einem 2-Leiterbündel erhoben wurden.

Es ist interessant, daß sogar Daten über DC hörbare Geräusche, die bei trockenen Wetterverhältnissen erhoben wurden, eine flache Frequenzantwort von 1 kHz bis zu circa 8 kHz bei einer höheren Spannung geben.

Die reinen Klänge für AC-Leitungen unter 1kHz sind sehr schwer vorherzusagen und nach der Auffassung der Autoren stehen sie in Verbindung mit dem Alter der Leiter. Für ältere Leitungen wurde herausgefunden, daß sogar der 120 Hz-Klang schwer zu messen ist, sogar in relativ ruhigen Gebieten. Ein Beispiel dafür kann in Abbildung 4.5 gesehen werden, welches einen Vergleich zwischen einem Frequenzspektrum, das von Perry stammte und zwar auf einer BPA 500 kV-Leitung, indem man einen 1-63,5 mm Leiterdurchmesser während der ersten Betriebsjahre benutzt hat, und mit den Daten 9 Jahre später vornimmt .

Das 120 Hz-Summen ist um 10-14 dB gesunken, während das Spektrum von 1kHz bis 8kHz das gleiche geblieben ist. Basierend auf diesen und anderen, daß die Vorhersage reiner Klänge eine fruchtlose Übung ist. Auch zeigen psychoakustische Experimente, daß der ärgerliche Aspekt des Koronalärms mehr an dem Knistergeräusch bei Hochfrequenz liegt als an reinen Klängen

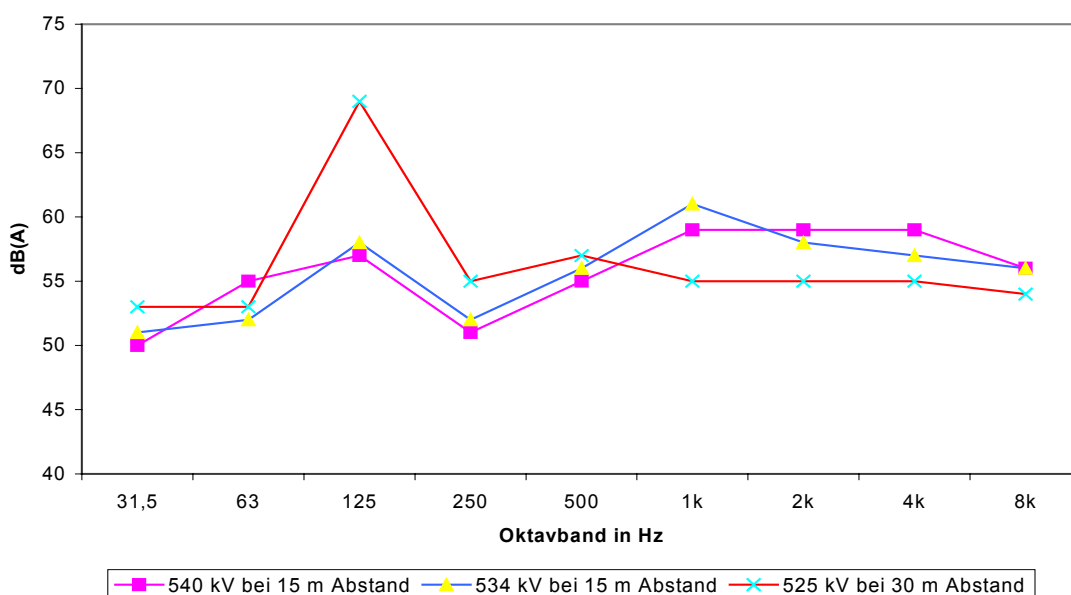


Abbildung 4.5: Breitbandfrequenzspektren beim einzelnen 63,5 mm-Leiter auf den BPA 500 KV Wechselstromleitungen

4.5 Tonverteilung und Verminderung

Der akustische Kraftlevel im folgenden (PWL) für jede Phase einer Leitung ist der Wert, der benötigt wird, um Tonhöhen zu berechnen, und er kann für jeden Abschnitt von jeder Leitung aus den Tonhöhedaten berechnet werden.

Allerdings müssen drei Parameter berücksichtigt werden, bevor diese PWL Werte berechnet werden können.

- Beziehung zwischen PWLs und Tonebene (-level)
- Wirkung der Luftabsorption auf die Verminderung
- Leiterhöhe, die benutzt werden muß, um radiale Entfernungen vom Leiter zum Mikrofon zu berechnen.

4.6 Herleitung der Gleichung um die Akustischen Kraffebene für eine Leitungsquelle zu Berechnen

4.6.1 Definition der benötigten mathematischen Größen

Um die akustischen Kraffebenen aus Labor, Käfig, Leitung in Betrieb oder Testleitung zu berechnen, benötigt man die Herleitung einer Formel, um gemessene Tonebenedaten in akustische Kraffebene umzuwandeln.

Die allgemeine Gleichung zur Berechnung der akustischen Kraffenergie (Intensität) für eine gegebene Quelle beträgt :

$$J = \frac{A}{s} \qquad \text{Gleichung 4.1}$$

wobei:

J	Kraftintensität (W/m ²)
A	Kraft (Arbeit) erzeugt durch Quelle (W)
s	Oberflächengebiet umgebend Quelle (m ²)

Nehmen wir eine Zielquelle ohne hohes Hindernis, dann ist das Oberflächengebiet kugelförmig. Dann wird Gleichung 4.1 zu :

$$J = \frac{A}{4\pi \cdot R_d^2} \quad \text{Gleichung 4.2}$$

wobei:

R_d Radialentfernung von Quelle (m)

Unter der Annahme eine Leitungsquelle werde von einer Sammlung unabhängiger Spitzenquellen beschrieben, dann wäre die akustische Kraftenergie (Intensität) für die Leitungsquelle die Summe der individuellen Kraftenergien von den Zielquellen. Dann wird Gleichung 4.2 für eine Zielquelle (und unter Berücksichtigung der Widerspiegelung der Ebene des Bodens) zu:

$$J = \int \frac{A dx}{4\pi(R_d^2 + x^2)} + k \int \frac{A dx}{4\pi(Z^2 + x^2)} \quad \text{Gleichung 4.3}$$

wobei:

Z Entfernung vom gemessenen Punkt zum Bild der Leitung (m)

x Variable Entfernung entlang des Leiters (m)

Nun erfolgt eine Schätzung von Gleichung 4.4 und nehmen an, daß der gemessene Punkt (Mikrofon) sich nahe am Boden befindet (d.h. $R_d = Z$)

$$J = \frac{A(k+1)}{2\pi \cdot R_d} \tan^{-1} \frac{L}{2R_d} \quad \text{Gleichung 4.4}$$

wobei:

K Widerspiegelungskoeffizient (näher sich 1 , der Untergrund verhält sich wie eine vollkommen reflektierende Ebene)

L Länge der Leitung (m)

4.7 Luftabsorption

Der vorausgehende Abschnitt zeigt, daß sich theoretisch hörbare Geräusche bei einer Leitungsquelle von $10\log R_d$ vermindern, wobei R_d die Radiale Entfernung zwischen Leiter und Mikrophon darstellt.

Messungen an AC-Leitungen, die am BPA , Apple Grove , und Hydro Quebec durchgeführt wurden, haben gezeigt, daß die A-gewichtete Verminderung zwischen 3 und 4 dB pro Verdoppelung der Entfernung liegt, oder $10\log(R_d)$ bis $13,3\log(R_d)$.

Die besondere Verminderung kann an atmosphärischer Absorption, Lichtbrechung, Bodenstörung liegen. Wenn allerdings die Messungen über einem offenen Feld an einem wenig windigen Tag durchgeführt werden, dann liegt die besondere Verminderung vorrangig an der atmosphärischen Absorption. Molekulare Absorption ist der wichtigste der Faktoren, die den Ton in der Atmosphäre absorbieren, und sie bezieht sich auf die Höhe von Wasserdampf in der Luft.

In der weiterführenden Literatur wird der Absorptionskoeffizient für eine Reihe von umgebenden Temperaturen und relativen Feuchtigkeit gezeigt. Diese Daten zeigen, daß in den meisten Fällen die Absorption α zunimmt bei einer abnehmenden Menge von Wasserdampf in der Atmosphäre.

Für die Zeit der A-gewichteten Tonebene für den Spektrumsverlauf des Leitungsübertragungslärms liegt die zunehmende Verminderung aufgrund der Luftabsorption bei 1 bis 7 dB(A) pro 300 m . Dies würde den $10\log R_d$ -Wert umändern in irgendwo zwischen 10,3 und 12,3.

Für die A-gewichteten Berechnungen wurden den Wert von $11,4\log R_d$ benutzt, der mit Messungen vereinbar ist, und halb zwischen dem 10,3 und 12,3-Wert liegt.

Bei einer höheren Frequenz der Oktaven Gruppenebene wird die Zunahme durch die Luftabsorption größer und sollte dazu benutzt werden, um diese Zunahme zu bestimmen.

Abbildung 4.6 zeigt einige neue Verminderungsebenen, die beim The Dallas DC Test Center durchgeführt wurden. Diese Daten zeigen A-gewichtete Verminderungsraten zwischen 11,9 und 13,5, was ein bißchen höher ist als die Raten für die AC-Leitungen. Zu dieser Zeit gibt es keine offenkundige Erklärung für die höheren Verminderungsraten für DC gegenüber AC-Leitungen.

Da es wenig DC Daten gibt, empfehlen Chartier und Stearns, daß die Rate des $11,4\log(R_d)$ auch für die DC-Leitungen angewendet werden sollte.

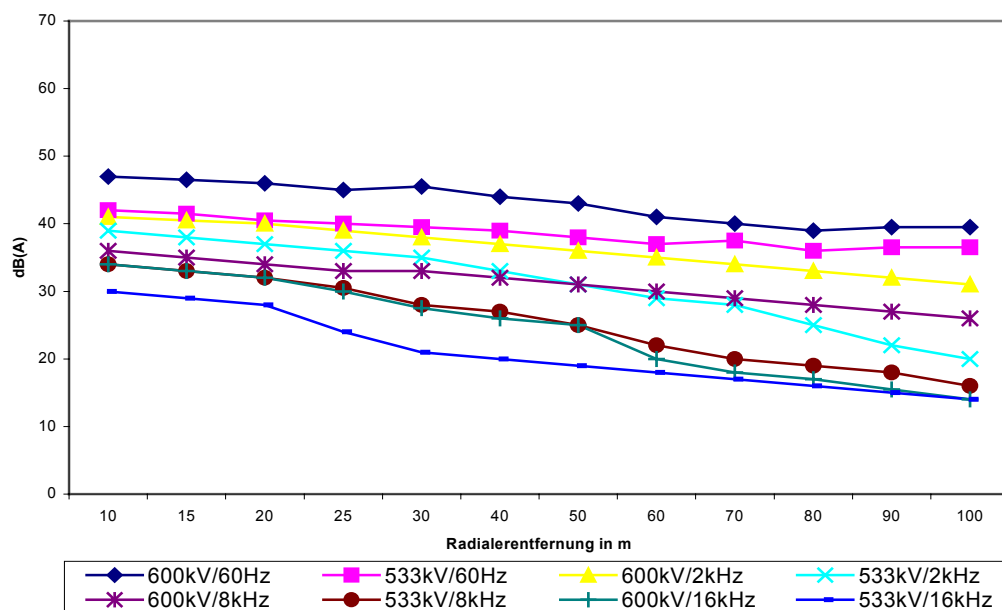


Abbildung 4.6: Laterale Verbreiterungsprofile der Schönwetter-A-gewichteten hörbaren Geräusche auf der The Dallas Testleitung mit einem $n=2$, $d=46,2$ mm-Leiter

4.7.1 AC Leitungen

Daten zu hörbaren Geräuschen über vollskalierte betriebene Leitungen oder Testleitungen erhält man für gewöhnlich auf zwei Arten:

- kurzfristige Daten aus manuellen Messungen
- langfristige Daten aus durchgängigen Beobachtungsstationen

Die am meisten gewünschten Daten sind offensichtlich langfristige Daten, da Überschreitungsebenen (L_x) erhalten werden können. Allerdings hat die Erfahrung gezeigt, daß manuelle Meßwerte, die man unter Dauerregenbedingungen erhält, besonders dann, wenn es schon vor Beginn der Messungen mehr als eine Stunde geregnet hatte, wenn es wenig oder keinen Wind gab, wenn der Hintergrundlärm gering war, dann hat sich gezeigt, daß diese manuellen Messungen sehr reproduzierbare Daten liefern, die nahe bei denen der L_{50} ebene liegen, die man aus langfristigen ununterbrochenen Messungen erhielt siehe Abbildung 4.7

Im Pazifischen Nordwesten, westlich der Wasserfälle, gibt es in den Herbst- und Wintermonaten ideales Regenwetter, um solche manuellen Daten zu hörbaren Geräuschen zu erhalten. Die Regenfälle sind mittelschwer mit wenig oder gar keinem Wind.

Diese Regenfälle dauern Stunden oder manchmal mehrere Tage. Es hat sich herausgestellt, daß Daten über hörbare Geräusche, die man während solcher Regenfälle erhielt, sehr reproduzierbar sind und nahe an der L_{50} Ebene liegen

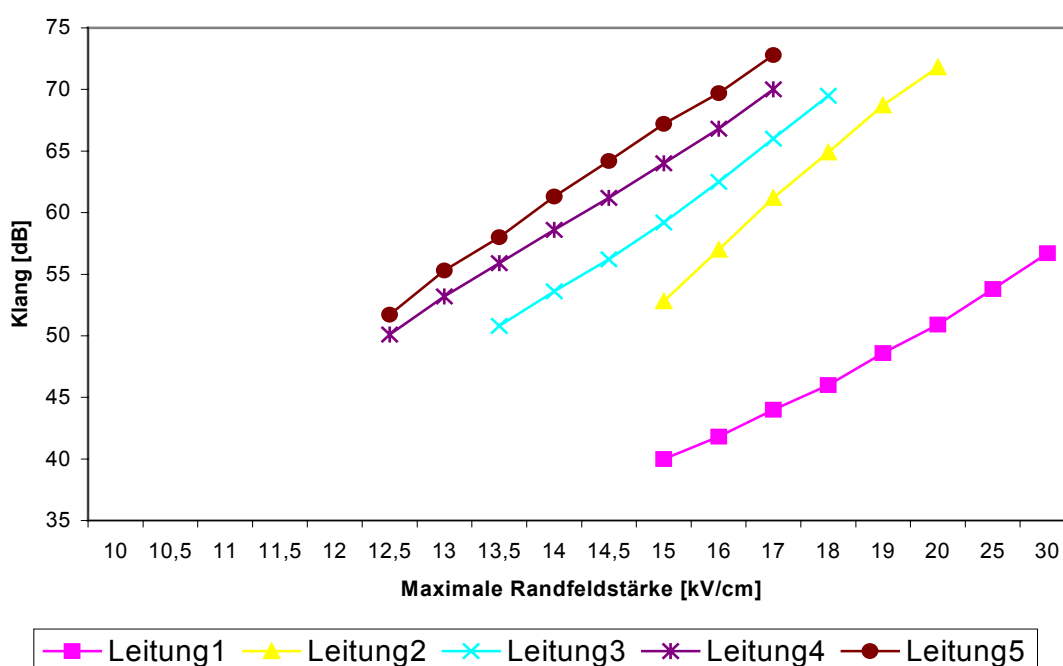


Abbildung 4.7: Schwankung (Abweichung) der A-gewichteten hörbaren Geräusche mit maximaler Leiteroberflächensteigung AC- Leitungen

4.7.2 Untersuchungen in der schalllosen Kammer

Sforzini u.a. haben in einer sogenannten schalllosen Kammer die akustischen Geräusche, die auf dem Leiter durch AC-Korona hervorgerufen werden, untersucht.

In dieser Literaturquelle wird die Akzeptanz von Koronageräuschen unter physikalischen und physiologischen Merkmalen untersucht und es wird ein Vergleich von Tests in einer sogenannten schalllosen Kammer und an realen Freileitungen vorgenommen. Aufgrund der Tatsache, daß Koronageräusche nur in unmittelbarer Nachbarschaft von Leitungen mit ziemlich hoher Intensität auftreten, ist es notwendig, den Einfluß der Meßentfernung bei der Festsetzung von Akzeptanzgrenzen zu berücksichtigen. Folglich ist es nicht zulässig im besonderen Fall der Koronageräusche a priori Gewichtungsmethoden und

Toleranzgrenzen zu setzen, die sich für andere Typen von Lärm als zweckmäßig erwiesen haben. Bei Tests in einer schalllosen Kammer konnte man die Koronageräusche ohne den Hintergrundlärm untersuchen.

Die ausführlichen Tests an trockenen und mittels eines speziellen Sprühverfahrens künstlich benetzten Leitern in der schalllosen Kammer, die mit Testpersonen durchgeführt wurden, welche den Koronalärm mit einem Referenzlärm zu vergleichen hatten, sollten zu dem Ergebnis führen, welche Gewichtungsmethoden von insgesamt vier untersuchten Methoden am nahesten mit der Lautstärkeebene der Koronageräusche korreliert. Dabei wurde herausgefunden, daß es verschiedene Typen von Koronageräuschen gab, bei sehr dünnen Röhren andere als bei Röhren mit Oberflächenbehandlung. Auch bei diesen Experimenten konnte ein Einfluß der Planparameter als da wären: Spannungssteigung, Leiterdurchmesser und die Anzahl der Hilfsleiter in einem Bündel auf den Wechselstromkorona nachgewiesen werden. Als Abhilfen, um die hörbaren Geräusche der Leiter zu vermindern, werden Oberflächenbehandlungen aufgeführt.

4.7.3 Berechnung der akustischen Kraffebene für 3 Phasenleitungen

Die A-gewichtete akustische Kraffebene (PWL) kann pro Phase in dB(A) für jede Leitung berechnet werden wie Tabelle 4.2 zeigt.

Angenommen wird, daß die gemessene Geräuschemission von einer Phase auf der Leitung hervorgerufen wird. In einer zweiten Stufe werden die berechnete PWL benutzt, um die PWLs für andere Phasen zu errechnen. Sobald alle diese vorläufigen PWLs für alle Phasen berechnet sind, werden sie dann benutzt, um die A-gewichtete Klangebene für die Leitung in der Meßentfernung zu berechnen.

Diese Ebene wird um einige dB(A) höher ausfallen, als die ursprüngliche Meßebe und aus dem Grund wird die Differenz zwischen der berechneten und der gemessenen Klangebene von den berechneten PWLs substrahiert siehe Diagramm 4.1

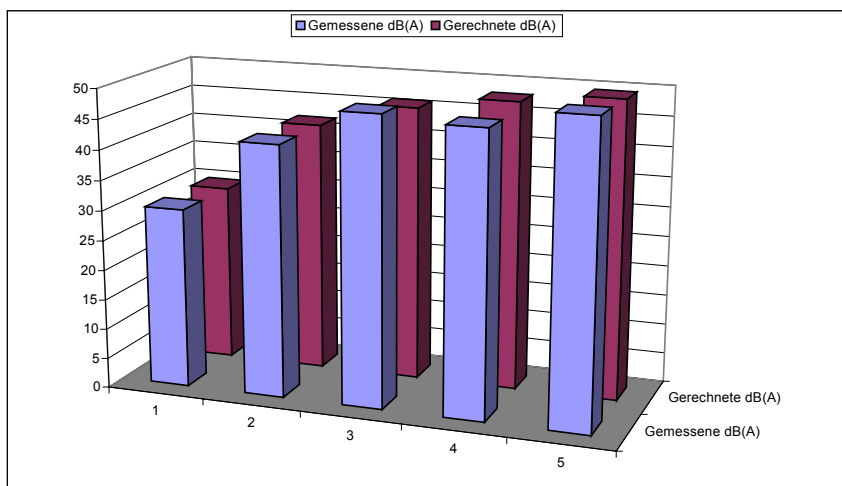


Diagramm 4.1: Vergleich von gemessenen und gerechneten Werten Für Wechselstrom

Darstellung der Differenzen

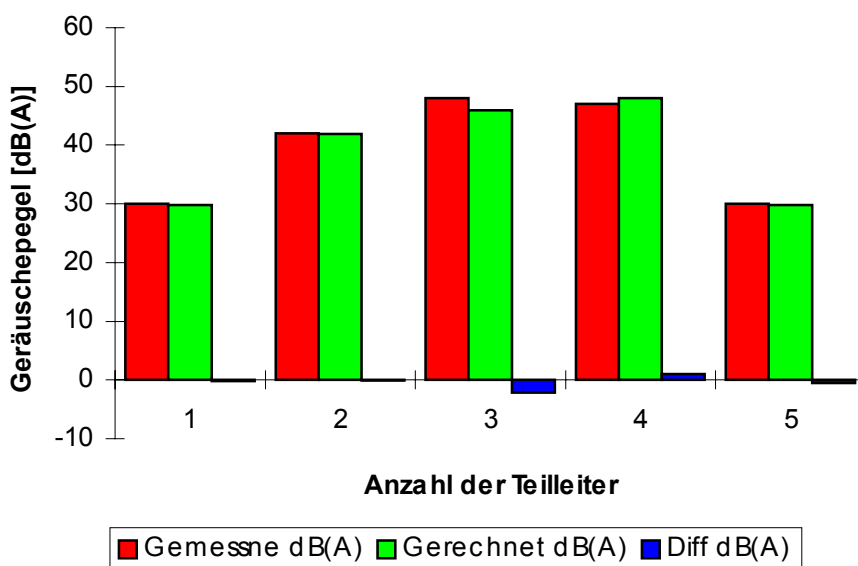


Diagramm 4.2: Differenzen zwischen gemessenen und gerechneten von Koronageräuschen für verschiedene Anzahl der Leiter

Leitungen	n	d (mm)	U (kv)	Klangebene	
				G.Entfernung. (m)	dB(A)
BPA Ostrander	1	63,6	525	20,1	61,4
BPA Ostrander	2	40,7	525	20,1	54,4
BPA Ostrander	3	33,1	525	20,1	45,3
Apple A	4	35,1	775	15	56,2
Apple B	4	30,4	775	15	57,2
Apple C	4	25,4	775	15	62,2
BPA Langfristig	7	40,7	1200	15	54,1
BPA Langfristig	8	40,7	1200	15	59
AEP-ASEA	18	30,5	2079	15	50
Projet UHV	8	33,1	1050	15	50,2
Projet UHV	12	33,1	1300	15	55,8
Projet UHV	16	33,1	1450	15	50,8
BPA-Marion –Alvey-lane	2	40,7	540	15	60,5
AEP	4	29,6	760	15	57,5
BPA McNary-Ross	1	40,7	356	15	51
BPA-Lexington-Ross	1	28,1	240	0	40,5
BPA Oregon City-Keeler	3	30,9	535	15	50
BPA AN Boot	1	101,6	540	15	56

Tabelle 4.2.: zeigt die A-gewichteten Daten zu den hörbaren Geräuschen

Wobei

G.Entfernung

Gemessene Entfernung

4.7.4 Die Allgemeine Wechselstromgleichung

Auch wenn die Autoren die Auffassung vertreten, daß die beste Vorhersage der hörbaren Geräusche von Übertragungsleitungen daher kommt, daß man gute langfristige Daten über eine Leitung zu einer anderen benutzt, die bei der vergleichenden Formel benutzt wird, so ziehen viele Ingenieure doch eine einfache Gleichung vor, die so genau wie möglich die hörbaren Geräusche für jede Leitung berechnen kann. Dies liegt zum Teil an der Tatsache, daß nur Experten Zugang zu allen langfristigen Daten haben oder daß Laien nicht unbedingt wissen, woher sie die Daten erhalten.

Dieser Abschnitt des Aufsatzes beschreibt die Herleitung einer solchen allgemeinen Gleichung.

Da alle erhobenen Daten darauf hinweisen, daß die mathematische Beziehung

$120 \log \frac{E}{E_0}$ und $55 \log \frac{d}{d_0}$ einen guten Zusammenhang für die

Leiteroberflächensteigung beziehungsweise den Durchmesser erklären, haben Chartier und Stearns sich dazu entschlossen, die Daten aus dem $n=1$ $d_e=63,5$ mm BPA-Leiter zu verwenden, um einen gleichwertigen Durchmesser für gebündelte Leiter zu bestimmen.

Ein Beispiel, wie man den gleichwertigen Durchmesser im weiteren d_{eq} für den ($n=2$ $d=40,7$ mm) Leiter berechnet, indem man die Mittelpunktsphase verwendet, wird hier gezeigt:

$$81,7 + 120 \log \frac{17,91}{16,84} + 55 \log \frac{d_{eq}}{63,5} = 74,3 \text{ dB}(A)$$

$d_{eq} = 40,7$ mm

Es sollte betont werden, daß diese deq -Werte von symmetrischen Bündeln mit normalen Hilfsleiterabständen zwischen 30 und 50 cm, wo der Wechsel der Leiteroberflächensteigung gering ausfällt, stammen. Die Rate des $\frac{deq}{d}$ wird in Tabelle 4.3 veranschaulicht .

Als Ergebnis dieser Bemühungen wurden ähnliche Resultate erzielt, das heißt bei weniger als 4 Leitern hat n wenig Einfluß auf deq oder auf die hörbaren Geräusche vorausgesetzt, daß die Leitersteigung und der Durchmesser konstant bleiben. Allerdings besteht bei n größer als 3 ein völlig verschiedener Zusammenhang. Nach Meinung der Autoren stimmen die L_{50} Daten aus anderen Literaturquellen nicht mit den Daten für hörbare Geräusche aus anderen UHV-Projekten überein. Diese mangelnde Übereinstimmung konnte von den Autoren nicht in Einklang gebracht werden, da es sich bei einem vorläufigen Bericht handelt.

Leiter	N	d(mm)	deq(m)	deq/d
Square Butte	1	50,4	50,87	1,0
The Dalles	4	30,5	54,96	1,8
AREQ	4	40,7	61,22	1,5
AREQ	6	40,7	86,79	2,1
AREQ	8	45,7	109,71	2,4

Tabelle 4.3: Berechneten gleichwertigen Durchmessers im Verhältnis zum Leiterdurchmesser $\frac{deq}{d}$ gegenüber der Anzahl der Leiter

Es wurde eine Gleichung geschrieben, die die neueste Quadrat-Methode (squares method) für $n \geq 3$ benutzte. Die Verfasser tun dies, indem der durchschnittliche PWL für 18-Leiterbündel, benutzt wird. Die entstehende Gleichung lautet dann:

$$\frac{deq}{d} = 0,58 \cdot n^{0,48}, n \geq 3 \quad \text{Gleichung 4.6}$$

Dann kann die endgültige allgemeine Gleichung für hörbare Geräusche geschrieben werden als

$$PWL = 81,7 + 120 \log \frac{E}{16,84} + 55 \log \frac{deq}{63,5} \quad \text{Gleichung 4.7}$$

Es folgt dann

$$PWL = -164,6 + 120 \log E + 55 \log deq \quad \text{Gleichung 4.8}$$

Wobei

$deq = d$ bei $n \leq 2$. d ist Durchmesser des Leiters

Die gesamte Klangebene für Mehrphasenleitungen, mit z =Anzahl der Phasen, kann nun wie folgt berechnet werden:

$$SLA = 10 \log \sum_{i=1}^z \text{anti log} \left(\frac{PWL(i) - 11,4 \log R(i) - 5,8}{10} \right) \quad \text{Gleichung 4.9}$$

Vergleich der berechneten und gemessenen hörbaren Geräusche von Wechselstromleitungen siehe Daigramm 4.1

4.7.5 Gleichstromleitungen [1], [2]

Es gibt in der Literatur nicht so viele Daten über hörbare Geräusche für Gleichstromleitungen wie für Wechselstromleitungen. Tabelle 4.5 zeigt die Daten, die erhoben wurden, und die Parameter für Gleichstromleitungen. Diese Daten können auf Formeln in der weiterführenden Literatur angewendet werden, um direkt die Gleichstromebenen von hörbaren Geräuschen für ähnliche Leitungen zu berechnen, allerdings haben die Autoren sich dazu entschlossen, die Wechselstromleitungsmethode zu benutzen, um eine allgemeine Formel für Gleichstromleitungen herzuleiten. Solche allgemeinen Formeln sollten mit Vorsicht benutzt werden, da sie von wenig Informationen abgeleitet wurden.

4.7.6 Leitersteigerung

Am The Dallas DC Testbaugelände, nahmen die Autoren auf einem Abschnitt der Testleitung, die ein $n=2$ $d=46,2$ mm Hilfsleiterbündel mit einem Hilfsleiterabstand von 0,456 m und einem Polabstand von 12,2 m mehrere Spannungsreihen vor.

Es gab eine einzelne Bodenleitung, die sich circa 10 m über den Leitern befand. Der lichte Abstand zum Boden betrug 11,9 m bei dem positiven Pol bzw. 12,2 m bei dem negativen Pol.

Die Ergebnisse dieser Spannungsläufe, die in Abbildung 4.8 dargestellt werden, wurden während der Nachtstunden gesammelt, als die A-gewichteten umgebenden Ebenen niedrige Werte von weniger als 32 dB(A) betragen. Es war unmöglich, diese Daten zur Tageszeit zu erheben.

Jede Koordinate in Abbildung 4.8 ist ein Durchschnitt von 2000 Proben, die während einer fünfminütigen Periode genommen wurden, wobei ein B&K 4426 Ebeneanalysegerät in Verbindung mit einem B&K 4921 Allwettermikrofon 15 Meter horizontal vom positiven Pol entfernt angebracht wurde.

Bei diesem System wurde ein B&K 4165 12,7mm Luftkondensatormikrofon zur Anwendung gebracht. Die Neigungen dieser A-gewichteten Kurvenverläufe der hörbaren Geräusche variieren von $82-88 \log \frac{E}{E_0}$. Ein durchschnittlicher

Verlauf von $86 \log \frac{E}{E_0}$ ist wahrscheinlich ein sinnvoller Wert, um den Einfluß von der Leiteroberflächensteigung auf die hörbaren Geräusche voraussagen zu können, zumal dieser Wert ziemlich gut mit dem durchschnittlichen Verlauf der beiden Kurven, Abbildung 4.7 stellt außerdem die 8kHz Oktavbandmessungen gegenüber der Spannung dar.

Der Anstieg dieser Kurven ist steiler als der der A-gewichteten Kurven, was darauf hindeutet, daß eine perfekte Korrelation zwischen den 8kHz und den A-gewichteten hörbaren Geräuschen nicht für Gleichstromgeräuschemissionen existiert.

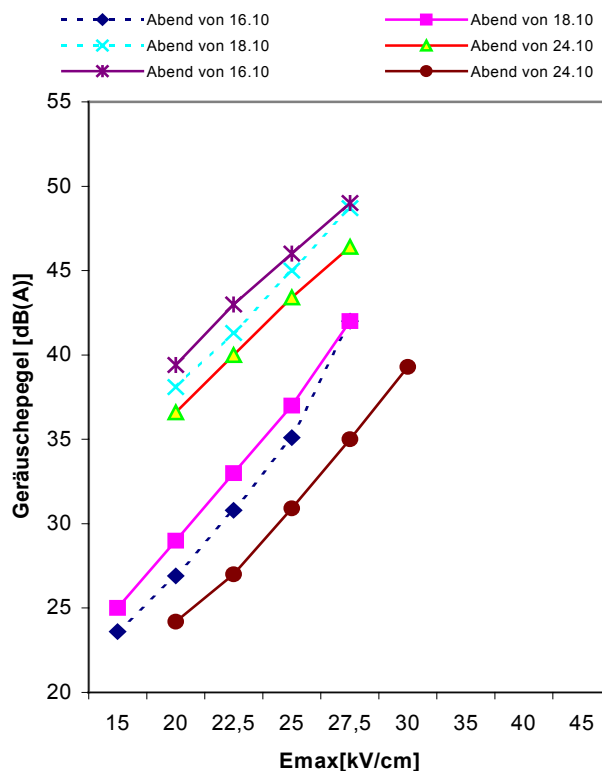


Abbildung 4.8: Variierung von A-gewichteten und 8kHz Geräuschemissionen für DC-Leitung

4.7.7 Leiterdurchmesser

Es gibt nicht genug Daten über eine Vielzahl von Gleichstromleitern, um einen Eigenen mathematischen Zusammenhang für den Einfluß auf die Leiteroberflächensteigung herzuleiten, deshalb wird der Wert, der gemeinhin für hörbare Geräusche, $40 \cdot \log \frac{d}{d_0}$ in diesem Aufsatz benutzt.

4.7.8 Anzahl der Leiter

Da ein einfacher Definitionswert nicht für den Einfluß der Zahl der Leiter auf die hörbaren Geräusche bei Wechselstromleitungen entwickelt werden konnte, konnten ähnliche Ergebnisse für die Gleichstromleitungen erwartet werden. Deshalb wurde die Methode, die in dem Abschnitt über Wechselstromleitungen beschrieben wurde, auch für Gleichstromleitungen angewendet. Die Schönwetterdaten für die hörbaren Geräusche, dargestellt in Tabelle 4.3 wurden verwendet, um diesen gleichwertigen Durchmesser herzuleiten.

Die durchschnittlichen A-gewichteten Daten zu hörbaren Geräuschen sind entweder Herbst- oder Frühlingsdaten; durchschnittliche Ebenen scheinen während der Sommermonate 2 bis 4 dB höher zu sein als entweder Herbst- oder Frühlingsdaten (6,30). In Tabelle I (siehe Anhang) werden auch die berechneten PWL's für jede dieser Leitungen aufgeführt.

Diese PWLs gibt es für den positiven Pol der Gleichstromleitungen, da der negative Pol sehr wenig Geräusche erzeugt.

Die entsprechenden Durchmesser wurden unter Bezugnahme auf die Herbst L_{50} Daten, erhoben am The Dallas $n=2$ $d=46,2$ mm Leiter berechnet. Die benutzte Gleichung lautet:

$$PWL = 62,4 + 86 \log \frac{E}{27,2} + 40 \log \frac{deq}{64,2}$$

Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in Tabelle 4.5 für jede dieser Gleichstromleitungen aufgeführt. Die Rate für die $\frac{deq}{d}$ wird in Tabelle 4.4

dargestellt und die Ergebnisse sind dem Zusammenhang, der für die Wechselstromleitungen herausgefunden wurde, ziemlich ähnlich.

Für Wechselstromleitungen gilt, daß im Wesentlichen ein gleichgerichteter Zusammenhang zwischen $\frac{deq}{d}$ gegen 1 besteht, wenn $n \leq 3$.

Für Gleichstromleitungen scheint dies richtig zu sein, wenn gilt: $n \leq 2$. Allerdings muß man sich klarmachen, daß es keine Daten über 2-Leiterbündel auf Gleichstromleitungen gibt.

Leitung	n	D (mm)	U (kV)	R _d	E(kv/cm)	dB(A)	PWL	Jahreszeit n
SquireButte	1	50,4	250	11	17,5	30	47,6	Herbst
The Dallas	2	46,2	533	12	27,2	42	62,4	Herbst
The Dallas	4	30,5	600	13	28	48	66,5	Sommer
IREQ	4	40,7	750	14	27,5	47	67,7	Herbst
IREQ	6	40,7	900	12	25,2	50	70,5	Herbst
IREQ	8	45,7	1050	12	22	49	69,5	Frühling

Tabelle 4.4: Berechnete Gleichwertige Durchmesser für Gleichstromleitungen aus der Gleichung

Wobei

N	Anzahl der Teilleiter
D	Durchmesser des Leiter in (mm)
R _d	Radialerentvernung in (m)
E(kv/cm)	Maximaler Randfeldstärke in kV/cm
dB(A)	Hörbare Koronageräusche in dB(A)
PWL	Schallintensität

Wie schon bei den Wechselstromdaten angewandt, wurde die lineare Regressionsanalyse angewendet, um eine Gleichung für den d_{eq}/d gegen n Zusammenhang herzuleiten, bei der gilt : $n \leq 2$. Die Endgleichung lautet:

$$\frac{d_{eq}}{d} = 0,66n^{0,64} \quad \text{Gleichung 4.10}$$

$d_{eq} = d$ falls $n = 1$ oder 2

4.7.9 Allgemeine Gleichstromgleichung

Indem wir die Ergebnisse der vorherigen Diskussion heranziehen, kann eine allgemeine Gleichstromformel für die Vorhersage der L_{50} A-gewichteten hörbaren Geräuschebenen bei schönem Wetter in den Herbstmonaten entwickelt werden.

$$PWL = 62,4 + 86 \log \frac{E}{27,2} + 40 \log \frac{deq}{64,2}$$

$$PWL = -127,6 + 86 \log E + 40 \log(deq) \quad \text{Gleichung 4.11}$$

Wenn man diesen Wert in die Gleichung für die A-gewichtete Klangebene einsetzt, ergibt sich:

$$SLA = PWL - 11,4 \log R - 5,8$$

$$SLA = -1334 + 86 \cdot \log E + 40 \cdot \log(deq) - 11,4 \cdot \log(R_d) \quad \text{Gleichung 4.12}$$

Jeder Parameter bezieht sich auf den positiven Pol, da der Beitrag vom negativen Pol an hörbaren Geräuschen vernachlässigbar gering ist.

Gleichung 4.12 wurde aus Daten abgeleitet, die hauptsächlich während der Herbstmonate bei schönem Wetter erhoben wurden.

Gleichzeitig regen die Verfasser an, daß diese Gleichung dazu benutzt werden soll, um die L_{50} ebene der hörbaren Geräusche für entweder Herbst- oder Frühlingsmonate bei Schönwetter zu berechnen.

Um die Berechnung für Sommer und Winter zu korrigieren, sollten jeweils 2dB(A) addiert beziehungsweise subtrahiert werden.

Daten haben zeigen, daß die durchschnittlichen hörbaren Geräuschebenen bei stürmischem Wetter um 6 - 11 dB(A) niedriger liegen als die durchschnittlichen Ebenen bei schönem Wetter.

4.8 Schlußfolgerung und Diskussion

Die allgemeinen Formeln, die in diesem Aufsatz bewiesen werden, um Vorhersagen über hörbare Geräusche an Gleichstrom- und Wechselstromhochspannungsleitungen zu treffen, wurden entwickelt, indem sie sich auf eine Anzahl von Annahmen stützten. Alle diese Annahmen müssen mit noch mehr Daten verifiziert werden. (Die Gültigkeit dieser Annahmen muß an noch mehr Daten überprüft werden)

Allerdings können einige allgemeine Kommentare abgegeben werden. Die Werte, die für den Einfluß der Leiteroberflächensteigung auf die hörbaren Geräusche bei je Gleichstrom- und Wechselstromleitungen entwickelt wurden, sind ganz gut, da die Daten zu hörbaren Geräuschen, die an einer großen Auswahl an Leitungen erhoben wurden, weitgehend mit diesen Werten übereinstimmen.

Spezielle Tests, die an Wechselstromleitungen am BPA durchgeführt wurden unter Verwendung eines ausgerichteten Mikrophons (array) um den Beitrag der hörbaren Geräusche an den einzelnen Phasen der horizontalen (configured) Leitungen (BPA Ostrander $d = 63,5$ mm Leiter) zu messen, haben auch die Gültigkeit des $120 \log \frac{E}{E_0}$ verifiziert.

Für ein zukünftiges Treffen der IEEE/PES wird gerade ein Aufsatz über dieses ausgerichtete Mikrophon vorbereitet.

Der Wert für den Einfluß des Leiterdurchmessers auf Wechselstromleitungen wurde auf der Basis von Daten zu hörbaren Geräuschen entwickelt, die an einzelnen Leitern erhoben wurden. Zur Zeit ist noch nicht klar, ob der aus Messungen hergeleitete $55 \log \frac{d}{d_0}$ Zusammenhang auch für Leiterbündel gültig

ist. Offensichtlich sind zusätzliche Daten über einen großen Umfang von Leitergrößen in einem Bündel erforderlich. Über Gleichstromleitungen gibt es zu wenig Datenmaterial, um einen Zahlenwert für den Einfluß des Leiterdurchmessers auf die hörbaren Geräusche zu entwickeln.

Aus diesem Aufsatz geht offensichtlich hervor, daß ein einfacher Zusammenhang für den Einfluß der Leiteranzahl auf die hörbaren Geräusche entweder bei Wechselstrom- oder bei Gleichstromleitungen nicht existiert. Bei weniger als 4 Leitern gibt es keinen klaren Zusammenhang. Für 4 oder mehr Leiter mag es einen Zusammenhang von ungefähr $25 \log \frac{n}{n_0}$ geben.

Wegen dieses Problems wurden die bestehenden Daten über hörbare Geräusche an vollskalierten Leitungen verwendet, um einen gleichwertigen Durchmesser für Leiterbündel zu berechnen.

Dieser Aufsatz schlägt vor, daß die kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung und die Frequenzspektrumsprofile eine gemeinsame Gestalt bei Wechselstromleitungen und auch eine gemeinsame Gestalt bei Gleichstromleitungen annehmen.

Deshalb kann jede dieser Kurven so entwickelt werden, indem man zunächst die A-gewichteten hörbaren Geräusche für die betrachtete Leitung berechnet und dann entweder das Frequenzspektrum oder die kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung schätzt. Offensichtlich bedarf die Annahme, daß sie einen gemeinsamen Verlauf hätten, noch weiterer Gültigkeitsüberprüfung. Die hörbaren Geräusche für jeweils Wechselstrom- und Gleichstromleitungen können berechnet werden, indem man die BPA-Grundaussage oder die allgemeinen Formeln anwendet.

Da die PWLs in Tabellen I aus Datenmaterial berechnet werden, können die PWLs-Werte in eine vergleichende Fassung der BPA-Allgemeinformel

$$PWL = PWL_0 + 120 \log \frac{E}{E_0} + 55 \log \frac{d}{d_0} \quad \text{für Wechselstromleitungen}$$

$$PWL = PWL_0 + 86 \log \frac{E}{E_0} + 40 \log \frac{d}{d_0} \quad \text{für Gleichstromleitungen}$$

eingetragen werden. Die Vergleichswerte der PWLs aus entweder Tabelle I oder Tabelle II (siehe Anhang) sollten von Leitungen stammen, die gleiche Anzahl von Leitern in einem Bündel haben. Sobald der PWL-Wert berechnet wurde, können die A-gewichteten hörbaren Geräusche berechnet werden, indem man Gleichung 4.8 beziehungsweise 4.12 benutzt.

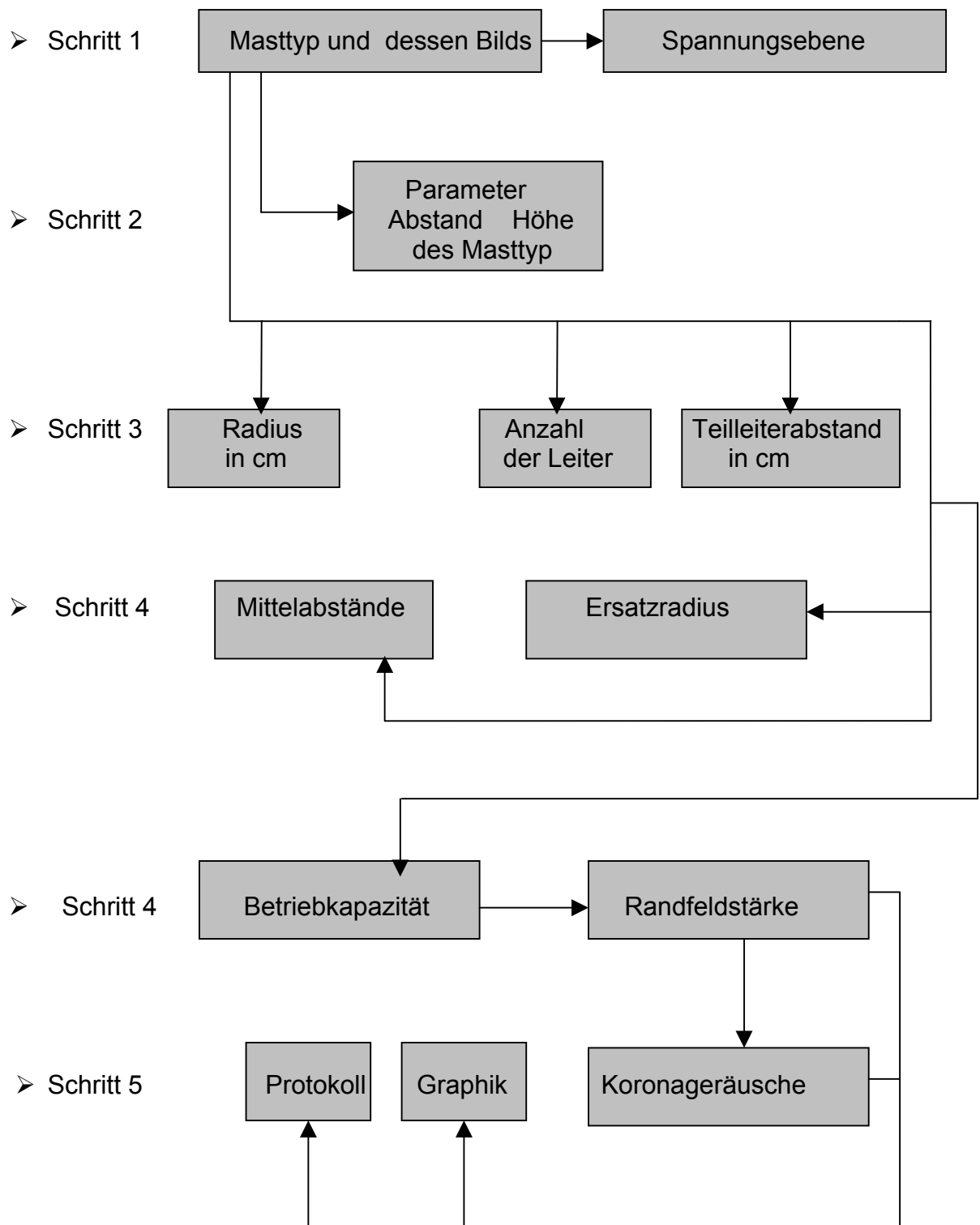
5 Erstellung eines Programms

5.1 Einleitung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde das Programm (Corona V01) entwickelt, um damit die maximale Randfeldstärke und die Koronageräusche an verschiedenen Meßpunkten entlang der Hochspannungsfreileitung zu berechnen.

Die Formeln, die die Grundlage für dieses Programm bilden, stammen aus der Literatur, die bereits in Kapitel 3 und 4 eingehend abgehandelt wurde.

5.2 Programmablauf der Berechnung



5.3 Programm starten

Sie starten Excel mit dem Befehl „Öffnen“ aus dem Menü „Dateien“ durch Auswahl des Programms im „CD-Laufwerk“ „CoronaV01.xls“. Falls der Makrovirus-Schutz aktiviert ist, erscheint beim ersten Aufruf des Programms ein Dialogfeld mit den folgenden Schaltflächen siehe Abbildung:5.1

- Makros deaktivieren
- Makros aktivieren
- Nicht öffnen

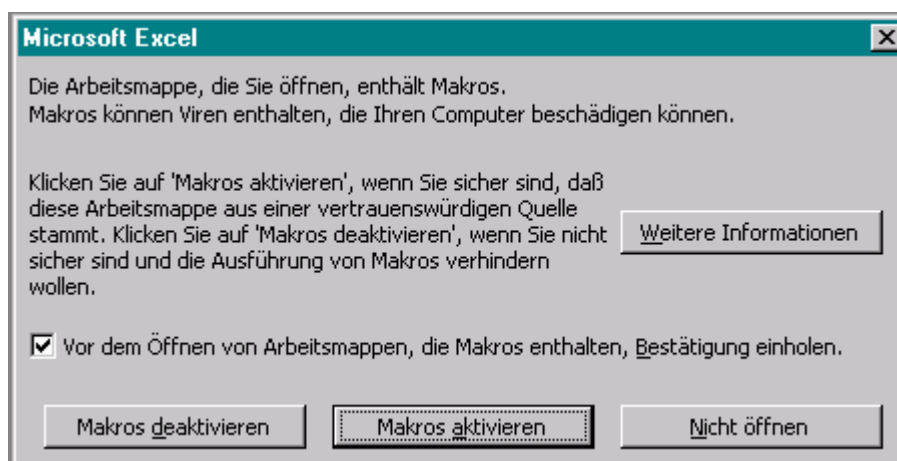


Abbildung 5.1: Makro Dialogfenster

Nachdem man das Kontrollkästchen einmal aktiviert hat, braucht man beim nächsten Programmstart diese Dialogfelder nicht mehr zu aktivieren, sondern das Programm wird sofort gestartet.

Dieses Kontrollkästchen ist zu deaktivieren und danach ist die Schaltfläche „Makros aktivieren“ anzuklicken.

Ohne diese Vorgehensweise ist die Arbeit mit dem Programm nicht möglich, da die Makros benötigt werden. Danach erscheint eine Begrüßungsbild siehe Abbildung 5.2.

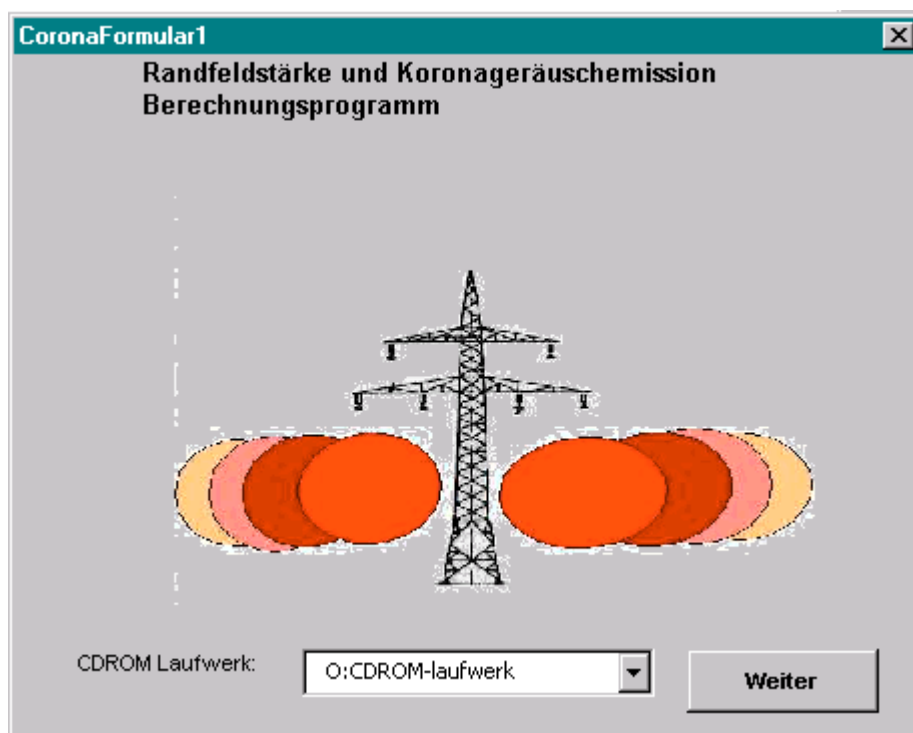


Abbildung 5.2: Begrüßungsbild von CoronaV01

5.3.1 Dateneingabe

Wie Abbildung 5.2 zu entnehmen ist gibt es eine Schaltfläche „Weiter“. Diese ist anzuklicken, um zum Hauptfenster zu gelangen. Dort sind die bekannten Werte einzugeben.

Nachdem das Programmformular, bzw. das Fenster auf dem Bildschirm erschienen ist, kann man zunächst mit der Eingabe folgender Daten beginnen:

- Bestimmung der Spannungsebene, dabei stehen drei Ebenen zur Auswahl: 110 kV, 220 kV und 380 kV
- Bestimmung der Masttypen, die in einer Liste je nach Spannungsebene geordnet sind
- Eingabe des Radius (in cm)
- Anzahl der Leiter, dabei nimmt man in Deutschland in der Regel bei Spannungen, die 220 kV übersteigen, Zweierbündel
- Auswahl des Teilleiterabstands aus einer Liste (erhältlich in 40 cm)

Im unten gezeigten Fenster wird neben verschiedenen Bestimmungsgrößen und Parametern der Zusammenhang auch graphisch dargestellt. Dabei werden in Corona V01 der gemeinhin als L1, L2 und L3 bezeichnete Abstand eines Meßpunktes auf dem Leiter zur Mastmitte (der horizontale Abstand) hier als Parameter $a(a')$, $b(b')$ und $c(c')$ und die Höhe der Meßpunkte auf dem Leiter zum Boden (der vertikale Abstand) als h_a , h_b und h_c bezeichnet und in Abbildung 7 veranschaulicht.. Nachdem man alle Daten eingegeben hat, kann man die Schaltfläche „Berechnen“ anklicken. Jede Schaltfläche ist mit einem Titel und einem kleinen Hilfstext versehen. Sobald man mit dem Cursor die Taste anklickt, erscheint zusätzlich ein kurzer Hilfstext zur näheren Information.

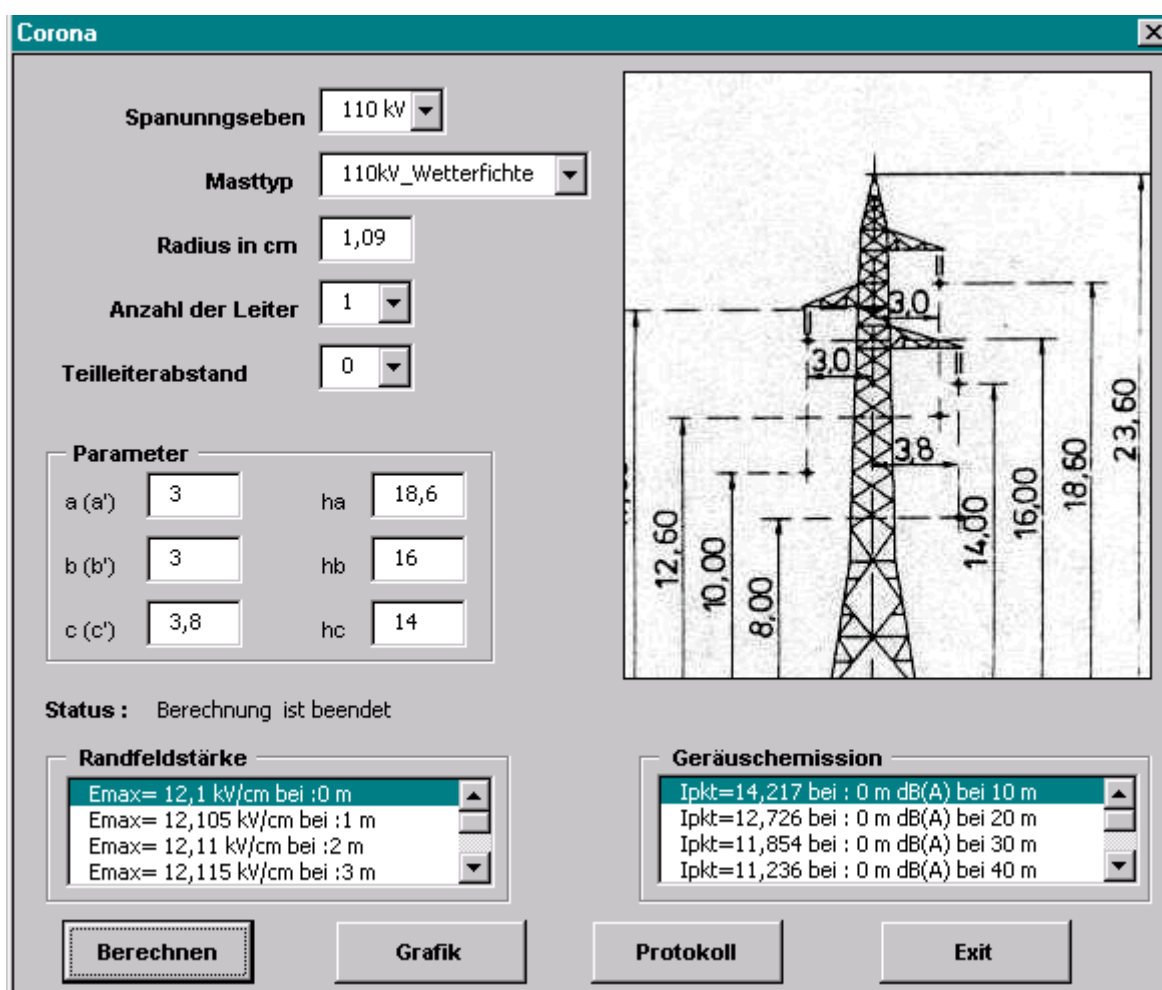


Abbildung 5.3: Oberfläche des Berechnungsprogramms CoronaV01

5.3.2 Berechnungsergebnisse

Wenn man die Schaltfläche „Graphik“ anklickt, dann werden die Ergebnisse in einem Diagramm „Diagramm“ zusammengefasst. Das Diagramm stützt sich auf Tabelle 1 und Tabelle 2. (in das Programm CoronaV01) Die Daten zu den Randfeldstärken entlang der Spannweite sind in Tabelle 1 verzeichnet. Die Werte für die Koronageräusche liefert Tabelle 2. Im Diagramm werden die Daten aus beiden Tabellen dargestellt; auf der linken Achse befinden sich die Informationen über die Randfeldstärken und auf der rechten Achse über die Geräuschemissionen. Abbildung 5.4:

Randfeldstärke und Geräuschemission der 110 kV-Wetterfichte

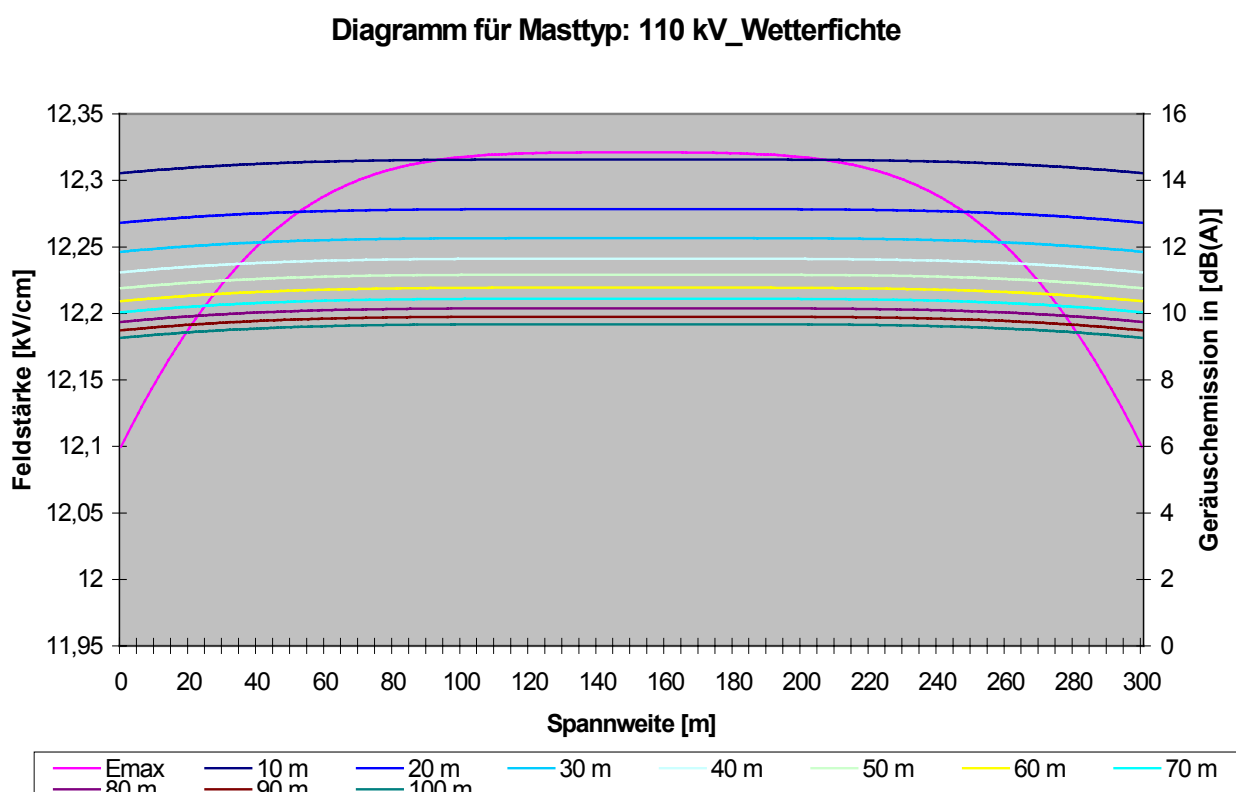


Diagramm 5.1: Randfeldstärke und Geräuschemission von 110 kV Wetterfichte

5.3.3 Protokoll

Um die Ergebnisse weiter zu bearbeiten, muß man auf die Schaltfläche " Protokoll " drücken , dann erscheint " Formular Protokoll " Abbildung ,wobei man von 1 bis 300 m entlang der Spannweite und in einer Radialer Entfernung von 10 bis 100 m in 10 Meter Schritte die Geräuschemission auswählen kann . Ausgewählte Ergebnisse würden in einer Tabelle zusammengefaßt mit allen dazu gehörenden Daten sehe Tabelle unten.

Abbildung 5.4 : Protokoll Formular

Protokoll zum Coronaberechnungsprogramm		
Dienstag 09. Okt 2001		
Masttyp:	Wetterfichte	
Nennspannung :	110 kV	
Radius :	1,09 [cm]	
Anzahl der Leiter:	1	
Teilleiter Abstand :	0 [cm]	
Geräuschverlauf bei :	10 [m]	
Grenzwerte :	Tag 45 dB(A) Nacht 35 dB(A)	
Randfeldstärke		Immissionsberechnung
X[m]	E_{max}[kV/cm]	Ipkt[dB(A)]
1	12,0998434	14,216543
2	12,10495586	14,22610411
3	12,10999913	14,23553186
4	12,11497299	14,24482602
5	12,11987727	14,25398643
6	12,12471182	14,26301296
7	12,1294765	14,27190552
8	12,1341712	14,28066406
9	12,13879584	14,28928858
10	12,14335035	14,29777912
11	12,14783471	14,30613575

Tabelle 5.1 : Ausdruck der Berechnungsergebnisse

5.4 Auswertung

Beispielshalber wurde eine 110 kV-Wetterfichte ausgewählt und für den Fall wurden die Randfeldstärke und die Koronageräusche berechnet. Es hat sich herausgestellt, daß die Koronageräusche unter der Toleranzgrenze von 35 dB liegen. Dennoch kann man die Koronastörgeräusche in unmittelbarer Nähe der Freileitungen akustisch wahrnehmen.

6 Berechnung realer Freileitungsanordnung mit Winfield

6.1 Implementation des Verfahrens in Winfield

Das Defizit der alten Version von Winfield besteht darin, daß man mit dieser Version die Koronageräusche noch nicht berechnen kann. Um Koronageräusche zu berechnen zu können muß die Randfeldstärke direkt am Leiter bestimmt werden.

Wie allgemein bekannt errechnet Winfield die Randfeldstärke sofort für eine bestimmte Höhe in Bodenentfernung unter Verwendung eines horizontalen Rasters. Eine andere Vorgehensweise, die Winfield ermöglicht, sieht so aus, daß die Raster nicht mehr horizontal entlang des Bodens, sondern nun vertikal entlang der Freileitung benutzt werden, damit die Randfeldstärke direkt am Leiter berechnet werden kann, was allerdings die Berechnungszeit verlängert. Deshalb wurde in der neuen Version von Winfield dieser Berechnungsweg erspart, indem man intern im Programm Winfield einen eigenständigen Programmablauf eingebaut. Dieser Programmablauf führt selbständig die Berechnung direkt am Leiter durch, was die Berechnungszeit nicht beeinträchtigt. Die Ergebnisse werden als externe Datei unter dem Verzeichnis „naisc.log“ zur Verfügung gestellt.

In dieser Datei „naisc.log“ wird die elektrische Randfeldstärke am Leiter auf 100 Punkte des Segmentumfangs genau berechnet und zusammen mit dazugehörigen Kenngrößen wie Minimalwert, Maximalwert und Mittelwert aufgeführt.

Ferner beinhaltet die Datei „naisc.log“ die Schallintensität (NPSI) als auch die Koronageräuschemission.

Das ermöglicht die Berechnung des Koronageräuschpegels.

Das Verfahren wurde für Wechselstrom und für Gleichstrom implementiert.

Um die Ergebnisse zu veranschaulichen, wird aus dem Menü „Berechnung“ das Untermenü „Schallpegel“ angeklickt. Ergebnisse, wie beispielsweise die elektrische Feldstärke oder die magnetische Flußdichte, werden graphisch als Isolinien im 2-D-Raum sowie im 3-D-Raum dargestellt.

7 Zusammenfassung:

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde die Literatur über Koronageräuschemissionen aus dem deutschen Sprachraum, die eher theoretischer Natur ist, und die angloamerikanische Fachliteratur bearbeitet. Es wurden dabei zwei englischsprachige Aufsätze herangezogen, die aus in Messungen erhobenen statistischen Daten und sich daraus ergebenden Korrelationen eine allgemeine Formel hergeleitet haben.

Basierend auf dieser Formel wurde ein Computerprogramm in der Programmiersprache VBA (Visual Basic Application) unter Excel 97 entwickelt, um die Koronageräusche zu berechnen.

Dabei wurde ein besonderer Schwerpunkt auf die Berechnung der maximalen Randfeldstärke gelegt.

Dieses Verfahren wurde in die bestehende Version von Winfield implementiert. Die sich daraus ergebende Synthese, die neue Version von Winfield, erlaubt die Berechnung des Geräuschpegels von Freileitungen.

Ausblick:

Die Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit, des Reflexionseffektes und der Luftabsorption bleibt eine Aufgabenstellung für zukünftige Arbeiten.

Anhang

Tabelle I

	n	d (mm)	U(kv)	Horizontale Phasen(m)			Leiterhöhe (m)		
				1	2	3	1	2	3
BPA Ostrander	1	63,3	525	-10,4	0	10,4	18,3	18,3	18,3
BPA Ostrander	2	40,7	525	-10,4	0	10,4	12,2	12,2	12,2
BPA Ostrander	3	33,1	525	-10,4	0	10,4	12,2	12,2	12,2
Apple A	4	35,1	775	-13,7	0	13,7	13,7	13,7	13,7
Apple B	4	30,4	775	-13,7	0	13,7	15,2	15,2	15,2
Apple C	4	25,4	775	-11	0	13,7	14,3	14,3	14,3
BPA Langfristig	7	40,7	1200	-11	0	11	24,4	24,4	24,4
BPA Langfristig 8	8	40,7	1200	-11	0	11	24,4	24,4	24,4
AEP-ASEA 18	18	30,5	2078,5		0			23	
Projet UHV 8	8	33,1	1050	-19,8	0	19,8	18,6	18,6	18,6
Projet UHV 12	12	33,1	1300	-19,8	0	19,8	16,9	16,9	16,9
Projet UHV 16	16	33,1	1450	-19,8	0	19,8	18,3	18,3	18,3
BPA-Marion –Alvey-lane	2	40,7	540	-6,1	0	6,1	12,2	12,2	12,2
AEP	4	29,6	760	-13,7	0	13,7	15,2	15,2	15,2
BPA McNary-Ross	1	40,7	356	-9,8	0	9,8	16,5	16,5	16,5
BPA-Lexington-Ross	1	28,1	240	-8,2	0	8,2	12,2	12,2	12,2
BPA Oregon City-Keeler	3	30,9	535	-10,2	0	10,2	15,2	15,2	15,2
BPA AN Boot	1	101,6	540	-10,7	0	10,7	13,1	13,1	13,1

	Leitersteigung			Klangebene	
	Phasen Nr.	E [kV/cm]	Mittelphase	Entfernung	A-gewichtet. L50 level
BPA Ostrander	3	15,82	16,84	20,1	61,4
BPA Ostrander	3	16,79	17,91	20,1	54,4
BPA Ostrander	3	15,69	16,86	20,1	45,3
Apple A	3	17,56	18,77	15	56,2
Apple B	3	19,58	21,03	15	57,2
Apple C	3	22,81	24,41	15	62,2
BPA Langfristig	3	14,48	14,5	15	54,1
BPA Langfristig	3	15,87	15,9	15	59
AEP-ASEA	1		14,94	15	50 /57
Projet UHV	3	14,46	15,42	15	50,2
Projet UHV	3	13,66	14,58	15	55,8
Projet UHV	3	12,41	13,34	15	50,8
BPA-Marion –Alvey-lane	6*	--	--	15	60,5
AEP	3	19,77	21,13	15	57,5
BPA McNary-Ross	3	15,74	16,66	15	51
BPA-Lexington-Ross	3	14,94	15,75	0	40,5
BPA Oregon City-Keeler	3	16,97	18,25	15	50
BPA AN Boot	3	11,03	11,85	15	56

Wobei

n= Anzahl der Teilleiter

d= Durchmesser des Leiters

Tabelle II

	n	d(mm)	deq(mm)	deq/d
BPA (Ostrander)	2	40,7	40,7	1,000
BPA (Ostrander)	3	33,1	32,0	0,967
Appele Grove A	4	35,1	39,3	1,120
Appele Grove B	4	30,4	32,2	1,059
Appele Grove C	4	25,4	28,5	1,122
BPA (Lyons)	8	40,7	61,1	1,501
BPA (Lyons)	7	40,7	61,4	1,508
AEP – ASEA	18	30,5	54,9/73,6	1,80/2,413
Project UHV	8	33,1	48,8	1,474
Project UHV	12	33,1	69,4	2,097
Project UHV	16	33,1	69,2	2,091
AEP	4	29,6	32,2	1,088
BPA (Marion-Alvey&Lane)	2	40,7	43,3	1,064
BPA (Oregon City-Keeler)	3	30,9	32,4	1,049

Tabelle III

	Gemessene dB(A)	Gerechnet dB(A)	Differenzen dB(A)
BPA (Ostrander) (n=1 d=63,5)	61,4	61,3	-0,1
BPA (Ostrander) (n=2 d=40,7)	54,4	54,3	-0,1
BPA (Ostrander) (n=3 d=33,1)	45,3	46	+0,7
Appele Grove A	56,2	56,3	+0,1
Appele Grove B	57,2	58,6	+1,4
Appele Grove C	62,2	62,2	0,0
BPA (Lyons) (n=8 d=40,7)	54,1	55	+0,9
BPA (Lyons) (n=7 d=40,7)	59	58,3	-0,7
AEP – ASEA (n=18 d=30,5)	57	56	-1,0
Project UHV (n=8 d=33,1)	50,2	51,7	+1,5
Project UHV (n=12 d=33,1)	55,8	53,6	-2,2
Project UHV (n=16 d=33,1)	50,8	51,9	+1,1
BPA (Marion-Alvey&Lane)	60,5	59	-1,5
AEP (n=4 d=29,6)	57,5	58,4	+0,9
BPA McNary-Ross	51	51	0,0
BPA Lexington Ross	40,5	43,1	+2,6
BPA (Oregon City-Keeler)	50	51,3	+1,3
BPA AN Boot	56	55,7	-0,3

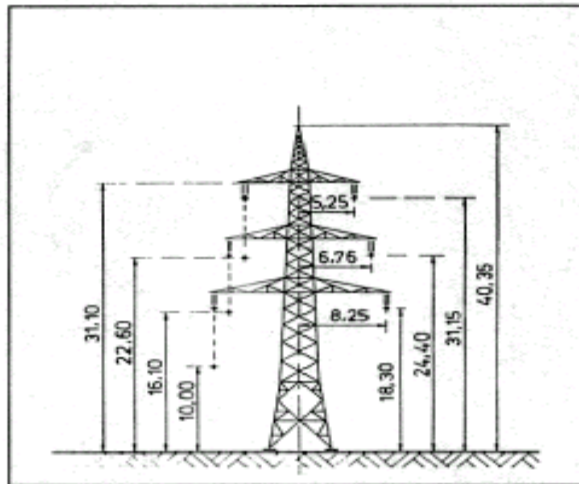
Tabelle IV

	Horizontale bei den Phasen(m)		
	1	2	3
BPA Ostrander (n=1 d=50,4)	78,5	81,7	78,5
BPA Ostrander	71	74,3	71
Apple A	61,7	65,4	61,7
Apple B	72,4	75,9	72,4
Apple C	73,4	77,1	73,4
BPA Langfristig 8	78	81,9	78,4
BPA Langfristig 7	--		--
AEP-ASEA 18		72/79	
Projet UHV 8	67,4	70,8	67,4
Projet UHV 12	72,9	76,3	72,9
Projet UHV 16	67,8	74,1	77,2
			76,4
BPA-Marion -Alvey-lane	76,4	74,1	73,8
AEP	77,2	77,3	67,3
BPA McNary-Ross	67,3	70,3	53,3
BPA-Lexington-Ross	53,3	56,1	65,3
BPA Oregon City-Keeler	65,5	69,8	65,5
BPA AN Boot	71,7	75,3	71,7

Beispiel

Für die Drehstromdoppelleitung 220 kV, 50 Hz, von Bild 1 (Tanne 2) sind alle Leitungsparameter für 50 Hz zu bestimmen. Der Phasenleiter besteht aus einem Zweierbündel Al-Stahl mit Teilleiternradius $r = 1,095 \text{ cm}$. Der Teilleiterabstand ist $a_t = 40 \text{ cm}$. Der Durchhang beträgt 10 m.

- a) Man bestimme ferner die Randfeldstärke, Koronageräusche in 10 m Entfernung. für $x = 0 \text{ m}$ (Direkt unter den Hochspannungsmast)



Mastbild

Graphische Darstellung einer 220 kV einschließlich ihrer Höhe und der Abstände der Leiterseile

Mittelabstand d :

$$d_{bc} = 8,38 \text{ m}$$

$$d_{ac} = 6,91 \text{ m}$$

$$d_{ab} = 5,46 \text{ m}$$

$$d = 8,51 \text{ m}$$

Höhe:

$$h_a = 31,15 \text{ m} ; \quad h_b = 24,40 \text{ m} ; \quad h_c = 18,30 \text{ m}$$

$$h = \sqrt[3]{h_a h_b h_c} \quad \text{erfolgt}$$

$$h = 24,05 \text{ m}$$

Nächste Mittelstand

$$d_{ab'} = 13,76 \text{ m}$$

$$d_{bc'} = 16,2 \text{ m}$$

$$d_{ca'} = 18,6 \text{ m}$$

Ergebnis:

$$d' = \sqrt[3]{13,76 \cdot 16,2 \cdot 18,63}$$

$$d' = 16,07m$$

Nächster Schritt zur Berechnung von d'' :

$$d_{aa'} = \overline{aa'} = 2 \cdot a$$

$$d_{aa'} = 10,5m$$

$$d_{bb'} = 2 \cdot b$$

$$d_{bb'} = 13,5m$$

$$d_{cc'} = 2 \cdot c$$

$$d_{cc'} = 16,5m$$

Ergebnis:

$$d'' = \sqrt[3]{10,5 \cdot 16,5 \cdot 13,5}$$

$$d'' = 13,27m$$

Nächste Schritt zur Berechnung von D :

$$D_{ab} = \sqrt{(h_a + h_b)^2 + (b - a)^2}$$

$$D_{ab} = \sqrt{(31,15 + 24,4)^2 + (6,75 - 5,25)^2} = 55,57m$$

$$D_{bc} = \sqrt{(h_b + h_c)^2 + (c - b)^2}$$

$$D_{bc} = \sqrt{(24,4 + 18,3)^2 + (8,25 - 6,75)^2} = 42,72m$$

$$D_{ac} = \sqrt{(h_a + h_c)^2 + (c - a)^2}$$

$$D_{ac} = \sqrt{(31,15 + 18,3)^2 + (8,25 - 5,25)^2} = 49,54m$$

Ergebnis:

$$D = \sqrt[3]{55,57 \cdot 42,72 \cdot 49,54}$$

$$D = 49m$$

Nächste Schritt zur Berechnung von D' :

$$D_{ab'} = \sqrt{(h_a + h_b)^2 + (b' + a)^2}$$

$$D_{ab'} = \sqrt{(31,15 + 24,4)^2 + (8,25 + 5,25)^2} = 56,83m$$

$$D_{bc'} = \sqrt{(h_b + h_c)^2 + (c' + a)^2}$$

$$D_{bc'} = \sqrt{(24,4 + 18,3)^2 + (8,25 + 5,25)^2} = 45,25m$$

$$D_{ca'} = \sqrt{(h_a + h_c)^2 + (c + a')^2}$$

$$D_{ca'} = \sqrt{(31,15 + 18,3)^2 + (8,25 + 5,25)^2} = 51,26m$$

Ergebnis:

$$D' = \sqrt[3]{56,83 \cdot 45,25 \cdot 51,26}$$

$$D' = 50,89m$$

Nächste Schritt zur Berechnung von D'' :

$$D_{aa'} = \sqrt{(h_a)^2 + (a)^2}$$

$$D_{aa'} = \sqrt{(31,15)^2 + (5,25)^2} = 31,59m$$

$$D_{bb'} = \sqrt{(h_b)^2 + (b)^2}$$

$$D_{bb'} = \sqrt{(24,4)^2 + (6,75)^2} = 25,31m$$

$$D_{cc'} = \sqrt{(h_c)^2 + (c)^2}$$

$$D_{cc'} = \sqrt{(18,3)^2 + (8,25)^2} = 20,07m$$

Ergebnis :

$$D'' = \sqrt[3]{31,59 \cdot 25,31 \cdot 20,07}$$

$$D'' = 25,23m$$

Nun wird der Ersatzradius berechnet :

$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot n \cdot R_b^{n-1}}$$

$$r_e = 6,60cm$$

Die Randfeldstärke für Bündelleiter lautet allgemein formuliert :

$$E_{\max} = \frac{C'_b \cdot U_m}{n \cdot \epsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3}} \left(\frac{1}{r} + \frac{n-1}{R_b} \sin \frac{\pi}{n} \right)$$

mit

$$C'_b = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{d \cdot 2 \cdot h \cdot D'' \cdot d'}{r_e \cdot D \cdot D' \cdot d''}}$$

In dem Fall daß $n=2$ beträgt, folgt daraus :

$$C_b = \frac{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} F}{\ln \frac{8,51 \cdot 2 \cdot 24,05 \cdot 25,23 \cdot 16,07}{6,60 \cdot 10^{-2} \cdot 49 \cdot 50,89 \cdot 13,27}}$$

$$C_b = 12,83 nF$$

Die in diesem Fall entsprechenden Randfeldstärken lauten :

$$E_{\max} = \frac{12,83 \cdot 245 \cdot nF \cdot kV}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 8,854 \cdot \sqrt{3} \cdot nF} \left(\frac{1}{1,1cm} + \frac{1}{40cm} \sin \frac{\pi}{2} \right)$$

$$E_{\max} = 15,79 \frac{kV}{cm}$$

Aus der Randfeldstärke lässt sich der Koronageräusche in 10 m Radailerentfernung errechnen.

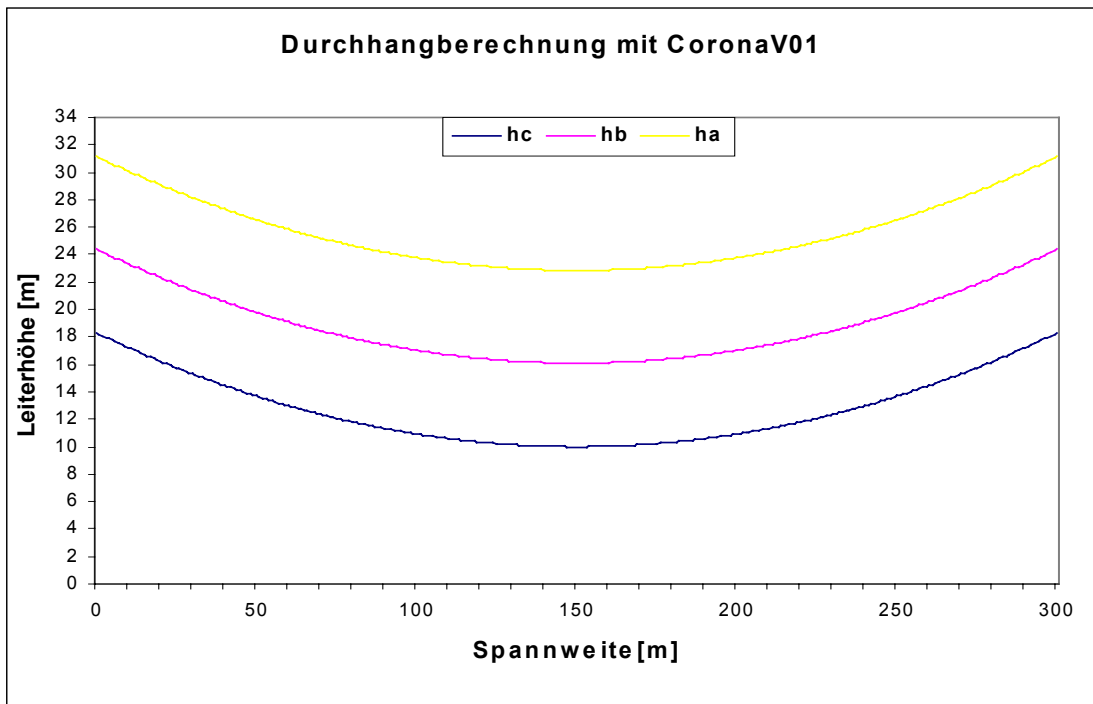
$$PWL = -1646 + 120 \cdot \log(1,59) + 55 \cdot \log(2 \cdot 1,095)$$

$$PWL = 52,84 dB$$

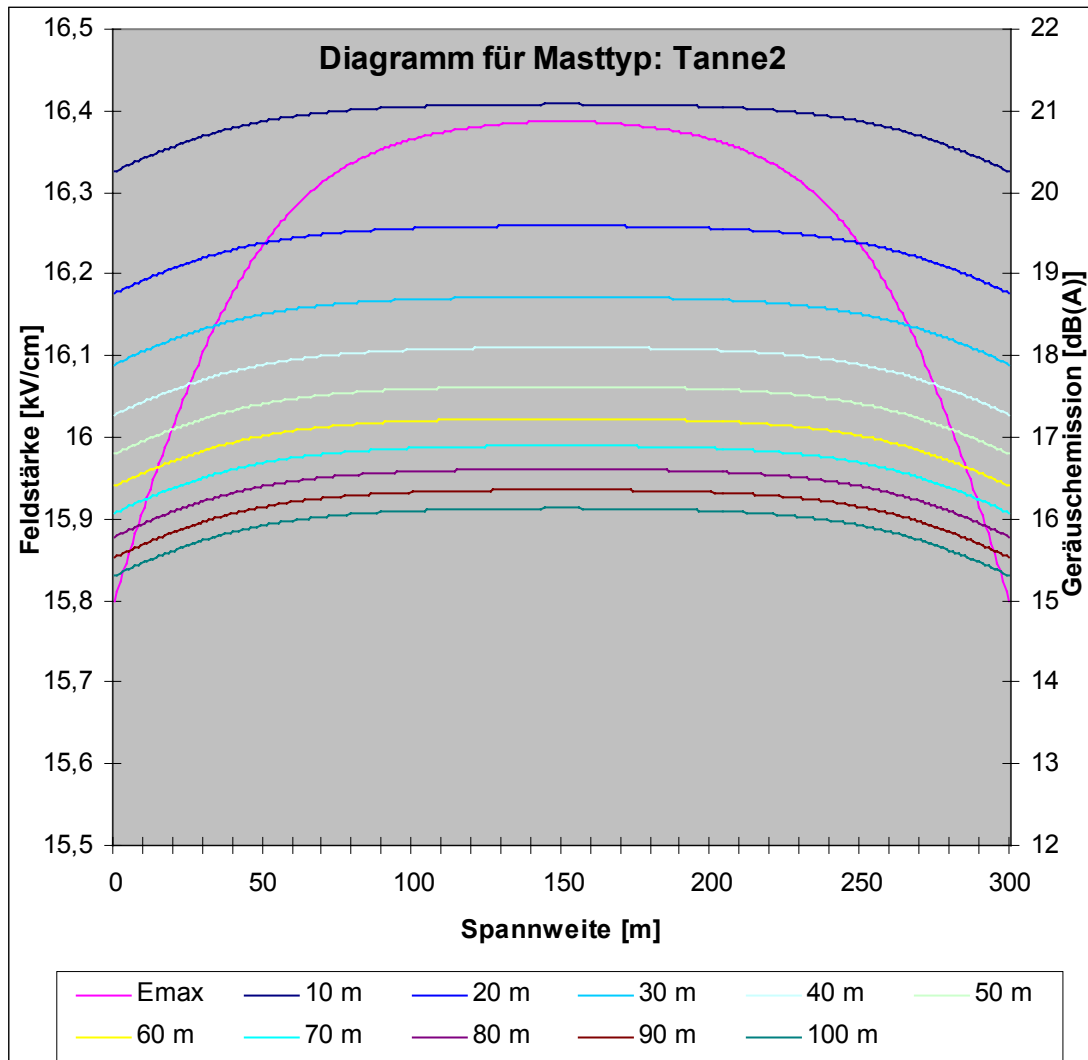
$$SLA = 10 \log \sum_{i=1}^6 \text{anti} \log \left(\frac{24 - 11,4 \log(10) - 5,8}{10} \right)$$

$$SLA = 20,25 dB(A)$$

Die Durchhangsberechnung mit CoronaV01 lautet für dieses Beispiel



Ergebnisse von CoronaV01 lauten



Protokoll davon lautet

Protokoll zum Coronaberechnungsprogramm		
Freitag 12. Okt 2001		
Masttyp:	Tanne2	
Nennspannung :	220 kV	
Radius :	1,09 [cm]	
Anzahl der Leiter:	2	
Teilleiter Abstand :	40 [cm]	
Geräuschverlauf bei :	10 [m]	
Grenzwerte :	Tag 45 dB(A) Nacht 35 dB(A)	
Randfeldstärke		Immissionsberechnung
X[m]	E_{max}[kV/cm]	I_{pkt}[dB(A)]
10	15,90409044	20,40414949
11	15,91517645	20,4199207
12	15,92612009	20,4354786
13	15,93692017	20,45082192
14	15,94757553	20,46594947
15	15,9580851	20,48086013
16	15,96844784	20,49555288
17	15,9786628	20,51002676
18	15,98872908	20,52428092
19	15,99864585	20,53831459
20	16,00841233	20,5521271
21	16,01802784	20,56571785
22	16,02749175	20,57908636
23	16,03680351	20,59223224
24	16,04596262	20,60515519
25	16,0549687	20,61785502
26	16,06382139	20,63033162
27	16,07252046	20,642585
28	16,08106572	20,65461528
29	16,08945707	20,66642266
30	16,09769449	20,67800747

Literaturverzeichnis

- [1] V. L. Chartier, L. D. Stears: „Formulas for predicting audible noise from overhead high voltage ac and dc lines“ erschienen in „IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems“, Band: vol. PAS-100, No. 1, Januar 1981
- [2] "0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 " Dezibel Einführung in die Grundbegriffe und die quantitative Erfassung des Lärms 7.Auf. ESV Erich schmidt Verlag
- [3] R. Fischer, F.Kießling, Freileitungen Planung, Berechnung, Ausführung, 4. Auflage Springer Verlag Berlin Heidelberg 1993
- [4] Crastan, Valentin: Elektrische Energieversorgung 1, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000
- [5] Bauhofer, Peter: Handbuch für Hochspannungstechnik, Verband der Elektrizitätswerke Österreichs
- [6] Hasenpusch, Otto: Hochspannungstechnik, Franzis Verlag, München, 1991
- [7] M.Sforzini, R. Cortina, G. Sacerdote, R. Piazza: „Acoustic noise caused by a.c. corona on conductors: results of an experimental investigation in the anechoic chamber“ erschienen in „IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems“, Band: vol. PAS-94, no. 2, März/April 1975
- [8] United States Department of Energy, Bonneville Power Administration, Branch of labor
- [9] Interference produced by corona effect of electrical systems.
Part 3 :Interference others than radio CIGRE 1974)81-97
- [10] D.E.Perry, “ An analysis of transmission Line audible noise levels based upon field three-Phase test line measurements“ IEEE Trans. (Power Apparatus and Systems) vol. 91

Erklärung zur Diplomarbeit

Ich versichere, daß ich meine Diplomarbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Berlin, den 20.10.2001

Mohamed EL Gourzni