Refraktionseinflüsse durch elektrische Gleichstromfelder

Influence of Current Power Line Electric Field on Refraction

Henryk Bryś

Vorliegender Beitrag stellt die modelltheoretischen Grundlagen der systematischen Einwirkung der heterogenen Atmosphäre in unmittelbarer Umgebung von Gleichstromleitungen vor. Es werden mathematisch-physikalische Formeln zur Bestimmung von refraktiven Effekten, die bei Vertikal- und Horizontalwinkelmessungen auftreten, aufgestellt, und an Berechnungsbeispielen präsentiert. Bei ingenieurgeodätischen Verfahren, wie theoretische und experimentelle Untersuchungen bewiesen haben, übersteigt der sogenannte elektrooptische Refraktionseffekt vielfach die instrumentell erreichbare Genauigkeit der Winkelmessungen bei diversen Messausführungen in der Industrievermessung.

Schlüsselwörter: Elektrooptische Refraktion, mathematisch-physikalische Grundlagen, partielle Refraktionswinkel, Berechnungsbeispiele.

This paper presents the model-theoretical foundations of an electric field in vicinity of a direct current power line. Mathematical and physical formulas for the determination of refractive effects that occur with vertical and horizontal angle measurements are established. We also presented examples of calculations. In the engineering and industry geodesy methods such as theoretical and experimental refraction influences prove that error often exceeds high accuracy of the instrument in angle measurements in various measurement tasks.

Keywords: Electrooptics refraction, mathematics and physical principles, partial refractive angle, calculation example

1 EINFÜHRUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Gegenwärtig spielen verschiedene Ursachen der Zielstrahlablenkung wegen sehr hoher messtechnischer Genauigkeitsanforderungen eine bedeutende Rolle und zwar, die astronomische, kosmische, ionosphärische, nivellitische, terrestrische, photogrammetrische und geodätische Refraktion. Zur Eliminierung bzw. Reduzierung des refraktiven Störeinflusses wurden in den letzten 140 Jahren verschiedene wesentliche grundlegende Theorien, Refraktionsmodelle und Vermessungsstrategien auf diesem Gebiet bearbeitet, entwickelt und vervollkommnet (/Jordan 1876/, /Fischer 1884/, /Jütner 1928/, /Schendler 1933/, /Sokob 1936/, /Kukkamäki 1938/, /Näbauer 1942/, /Brocks 1948/, /Eger 1962/, /Deumlich 1963/, /Moritz 1962/, /Michalcak 1966/, /Bryś 1983/, /Heister 1997/, /Beluch u.a. 2010/, /Hennes, Böckem, Flach 1998/, /Hennes 2002/ und andere mehr). Die Geometrie der Lichtstrahlen ist äquivalent mit der Geometrie des Rieman´schen Raums. An die Stelle der komplizierten Lichtkurven treten die geodätischen Linien, und aus der Laufzeit der Lichtwelle wird die Bogenstrecke der betrachteten geodätischen Linien /Moritz 1962/, lautet die Grundthese.

Gegenstand dieses Beitrags ist ein umweltrelevanter Aspekt der Beeinflussung des Verlaufes eines Zielstrahls durch das Messmedium des elektrischen Feldes in der nahen Umgebung von Gleichstromleitungen. Wie physikalische und experimentelle Forschungen bewiesen haben, kann eine systematische Lichtstrahlablenkung nicht nur durch ein vorhandenes meteorologisches Feld, sondern ebenfalls durch ein elektrisches Feld verursacht werden. Die elektrische Spannung in Einfachfahrleitungen beträgt einige hundert Volt bei Straßenbahnen sowie Oberleitungsbussen. Im Bahnbetrieb in Europa haben sich zahlreiche Oberleitungsspannungen durchgesetzt (Tab. 1):

Immer häufiger werden weltweit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Freileitungen (H-G-Ü-F) beispielsweise mit 15 kV *(in der Schweiz)* und bis zu 500 kV (Wasserkraftwerk des *DREISCHLUCHTENDAMMS in China*), betrieben. Die H-G-Ü-F ist eine

Nr	EU-Mitgliedstaat	Bahnstromsystem – Netzspannung Stand: Juli 2007
1	Belgien	GS 3 kV
2	Bulgarien	WS 25 kV 50 Hz
3	Dänemark	WS 25 kV 50 Hz
4	Deutschland	WS 15 kV 16,7 Hz
5	Estland	GS 3 kV
6	Finnland	WS 25 kV 50 Hz
7	Frankreich	NORD: WS 25 kV 50Hz, Süd: GS 1,5 kV
8	Griechenland	WS 25 kV 50Hz
9	Irland	Nicht elektrifiziert
10	Italien	GS 3 kV
11	Lettland	GS 3 kV
12	Litauen	WS 25 kV 50 Hz
13	Luxemburg	WS 25 kV 50 Hz und GS 3 kV
14	Malta	Nicht elektrifiziert
15	Niederlande	GS 1,5 kV
16	Österreich	WS 15 kV
17	Polen	GS 3 kV
18	Portugal	WS 25 kV 50 Hz
19	Rumänien	WS 25 kV 50 Hz
20	Schweden	WS 15 kV 16,7 Hz
21	Slowakei	GS 3 kV
22	Slowenien	WS 25 kV 50 Hz
23	Spanien	GS 3 kV
24	Tschechien	GS 3 kV
25	Ungarn	WS 25 kV
26	Vereinigtes Königsreich	WS 25 kV
27	Zypern	Nicht elektrifiziert

Tab. 1 | Bahnstromsysteme in den EU-Staaten
GS – Gleichstrom; WS – Wechselstrom

Wirkleistung-Energieübertragung von über 100 kV, wie z.B. die 1700 km lange Gleichstromleitung in *Kongo*. Im Beitrag werden Formeln zur Bestimmung der elektrooptischen Refraktion und ihre Auswirkung auf präzise Winkelmessungen präsentiert. Das gegenständliche Problem kann bei verantwortlichen Vermessungsaufgaben, wie z.B. bei langen Verkehrstunneln, Kranbahnen, Eisen- und U-Bahnen, Linearbeschleunigern, Produktionshallen mit elektrischen Freileitungen zu erheblichen Messfehlern führen.

Im Zusammenhang mit dem oben angesprochenen Phänomen erhebt sich die Frage: Wie verläuft ein Zielstrahl in einem durch Ein- und Doppeldraht-Gleichstromleitung erzeugten elektrischen Feld und wie groß sind die angularen Refraktionseffekte? Die folgende Neubearbeitung ist eine vervollkommnete modelltheoretische Lösung des interdisziplinären und vielparametrischen Problems.

2 ELEKTROOPTISCHER EFFEKT UND LUFTBRECHUNGSINDEXGRADIENT IN DER UMGEBUNG VON GLEICHSTROMLEITUNGEN

Im Raum eines planparallelen elektrischen Gleichstromfeldes treten Einwirkungen auf, die die optischen Eigenschaften des Messmediums wesentlich ändern. Die Abhängigkeit des Brechungsindexes eines Mediums von einem äußeren elektrischen Feld beschreibt der quadratisch-elektrooptische Effekt. Gemäß den Formeln der molekularen Optik /Volkenstejn 1951/, besteht zwischen dem Luftbrechungsindex und der elektrischen Feldstärke eines Mediums (nach Vernachlässigung des unbedeutenden letzten Gliedes (Kerr-Effekt)) folgende Beziehung, deren Gleichung lautet:

$$n(E) = n_L + \frac{B}{8\pi}\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)_{T,E} E^2 \qquad (1)$$

worin:
n_L – Brechungsindex der neutralen Atmosphäre bei Abwesenheit eines elektrischen Feldes.

Bei angenommenen mittleren meteorologischen Parametern:
$T = 288{,}14$ K – Lufttemperatur
$p = 1013{,}25$ hPa – Luftdruck
$e = 20{,}00$ hPa – Partialdruck des atmosphärischen Wasserdampfes
erhält man /Bryś 1983/:

$$n_L = 1{,}00028569 \qquad (2)$$

und für den Ausdruck:

$$B = \left(n_L^4 + n_L^2 - 2\right)\cdot\left(6n_L\right)^{-1} = 0{,}28569 \cdot 10^{-3} = n_L - 1 \qquad (3)$$

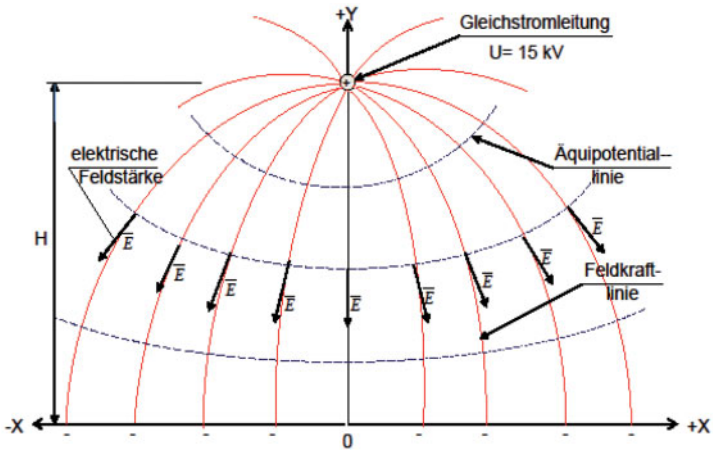


Abb. 1 | Schematische Darstellung des planparallelen elektrischen Feldes in der Umgebung einer Gleichstrom-Einfachoberleitung

Der Koeffizient der relativen Dielelektrizitätskonstantenänderung auf die Luftdruckeinheit bei konstanten T und E im Medium beträgt /Romanjuk 1969/:

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho}\right)_{T,E} = 6 \cdot 10^{-8} \left[\frac{F \cdot m}{N}\right] \tag{4}$$

Das elektrische Feld, als Vektorfeld, wird durch elektrische Feldstärke repräsentiert. Solch ein Raum kann als ein Medium mit variablem Luftbrechungsindex betrachtet werden. Der Wert der elektrischen Feldstärke im Punkt X,Y des Raumes wird für eine Einfachoberleitung aus der Formel:

$$|E| = \frac{2HU\left[4x^2y^2 + \left(x^2 - y^2 + H^2\right)^2\right]^{1/2}}{\frac{ln(2H-r)}{r}\left[x^2 + (y+H)^2\right]\left[x^2 + (y-H)^2\right]} \tag{5}$$

bestimmt.

In Gl. (5) bedeuten:

E - elektrische Feldstärke $\left[\frac{V}{m}\right]$

H - Aufhängungshöhe der Freileitung [m]

U - elektrische Spannung [V]

r - Radius des Stromleiter [m]

Die elektrische Feldstärke für eine Doppel-Oberleitung beschreibt die Gleichung /Bryś 1983/:

$$|E| = \frac{2U}{ln\frac{2H-r}{r}}\left\{\left[\frac{2yH(x+d)}{\left[(x+d)^2 + (y-H)^2\right]\left[(x+d)^2 + (y+H)^2\right]} + \frac{2yH(x-d)}{\left[(x-d)^2 + (y+H)^2\right]\left[(x-d)^2 + (y-H)^2\right]}\right]^2 + \left[\frac{H(x^2-y^2) + Hd^2 + 2Hdx + H^3}{\left[(x+d)^2 + (y-H)^2\right]\left[(x+d)^2 + (y+H)^2\right]} + \frac{H(x^2-y^2) + Hd^2 - 2Hdx + H^3}{\left[(x-d)^2 + (y-H)^2\right]\left[(x-d)^2 + (y+H)^2\right]}\right]^2\right\}^{0,5} \tag{6}$$

wobei:

d – Entfernung der einzelnen Oberleitungen symmetrisch von der YZ-Ebene des lokalen Koordinatensystems (Abb. 3).

Die exakte Bestimmung der Gradienten der elektrischen Feldstärke längs des Zielstrahls kann nach Differenzieren der Gl. (5) bzw. Gl. (6) mit dem *NABLA-Operator:*

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} \tag{7}$$

erfolgen. Der Gradient des Luftbrechungsindexes wird also nach der folgenden Gleichung bestimmt:

$$\nabla^E_{X,Y} n = \frac{\partial n}{\partial E} \cdot \frac{\partial E}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial n}{\partial E} \cdot \frac{\partial E}{\partial y}\vec{j} \tag{8}$$

Die Luftbrechungsindexgradienten sind von entscheidender Bedeutung für die Beschreibung der im elektrischen Feld sich verändernden Geometrie der Refraktionskurve. Für die Gradientenkomponenten des Brechungsindexes der Luft im refraktiven Koordinatensystem XYZ erhält man:

$$\nabla^E_x n = \frac{\partial n}{\partial E} \cdot \frac{\partial E}{\partial x}\hat{x} = \frac{B}{4\pi}\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho}\right) E \frac{\partial E}{\partial x}\hat{x} \tag{9}$$

$$\nabla^E_y n = \frac{\partial n}{\partial E} \cdot \frac{\partial E}{\partial y}\hat{y} = \frac{B}{4\pi}\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho}\right) E \frac{\partial E}{\partial y}\hat{y} \tag{10}$$

und nach Differenzierung der letzten Glieder:

$$E \cdot \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{(2HU)^2}{\left(ln\frac{(2H-r)}{r}\right)^2} \cdot \frac{\left[4x^2y^2 + \left(x^2 - y^2 + H^2\right)^2\right]^{0,5}}{\left[x^2 + (y+H)^2\right]\left[x^2 + (y-H)^2\right]} \cdot \frac{2x\left(x^2 + y^2 + H^2\right)}{\left(x^4 + 2x^2y^2 + 2x^2H^2 + y^4 - 2y^2H^2 + H^4\right)^{3/2}} \tag{11}$$

$$E \cdot \frac{\partial E}{\partial y} = \frac{(2HU)^2}{\left(ln\frac{(2H-r)}{r}\right)^2} \cdot \frac{\left[4x^2y^2 + \left(x^2 - y^2 + H^2\right)^2\right]^{0,5}}{\left[x^2 + (y+H)^2\right]\left[x^2 + (y-H)^2\right]} \cdot \frac{2y\left(x^2 + y^2 - H^2\right)}{\left(x^4 + 2x^2y^2 + 2x^2H^2 + y^4 - 2y^2H^2 + H^4\right)^{3/2}} \tag{12}$$

In die Gl. (9) und (10) sind entsprechend die Beiwerte aus den Gl. (3) und Gl. (4) einzuführen; dann ergibt sich die folgende Konstante:

$$C = 1{,}364 \cdot 10^{-12}\left[\frac{F \cdot m}{N}\right] \tag{13}$$

und letztendlich schreibt man für die Komponenten der Luftbrechungsindexgradienten im elektrischen Feld:

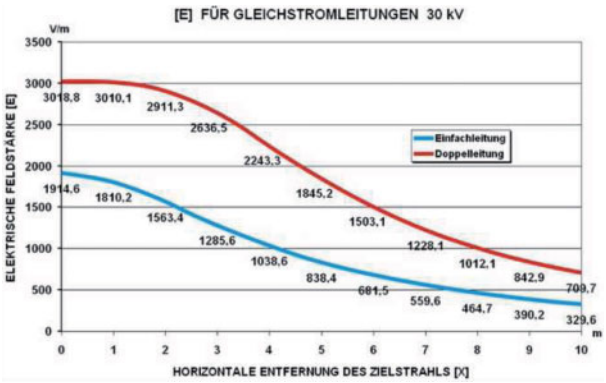


Abb. 2 | Graphische Darstellung der Werte der elektrischen Feldstärke für die Einzel- und Doppelleitungen von 30 kV für die Entfernung X und die Zielstrahlhöhe Y = 1,75 m im elektrischen planparallelen Gleichfeld

$$\nabla_x^E n = C \cdot E \frac{\partial E}{\partial x} \hat{x} \text{ und} \tag{14}$$

$$\nabla_y^E n = C \cdot E \frac{\partial E}{\partial y} \hat{y} \tag{15}$$

Für die ausführlichen Ableitungen der oben zusammengestellten Formeln, Parameter und Daten sei auf die Abhandlung /Bryś 1983/ verwiesen.

3 GRUNDLEGENDE FORMELN DER ELEKTROOPTISCHEN REFRAKTION

Die unten zusammengestellten Formeln der elektrooptischen Refraktion sollen folgende Grundvoraussetzungen und Bedingungen erfüllen:

- Längs des Zielstrahls treten keine meteorologischen Refraktionseinflüsse auf, d.h. die Faktoren T, p und e sind gleich und konstant im Raum des elektrischen Feldes.
- Die abgeleiteten Formeln gelten nur für ein planparalleles elektrisches Feld in der Umgebung von Gleichstrom-Freileitungen.
- Bei Stromfreiheit treten keine Refraktionseffekte auf.
- Die Ziellinie verläuft im Raum beliebig gegenüber der Einfachgleichstromleitung bzw. einer Doppelfreileitung.
- Alle Formeln, Größen, Daten und Konstanten wurden im einheitlichen SI-System beschrieben.

Nach diesen Vorbemerkungen gehen wir zur mathematischen Darstellung über. Für die partiellen Refraktionswinkel gilt bei dem in Abb. 3 definierten lokalen Koordinatensystem folgende praktische Gebrauchsformel:

$$\delta = \sin(R) \cdot \frac{\Delta D}{D} \sum_{i=1}^{N} \nabla_x^E n_i (D - L_i) \cdot \rho [mgon] \tag{16}$$

worin bedeuten:

ΔD – Distanzintervall [m],
D – Länge der Ziellinie [m],
L_i – Distanz vom Instrumentenstandpunkt A zum Mittelpunkt des Berechnungsintervalls [m]
Z – Zenitwinkel [gon],
R – Richtungswinkel [gon],
$\nabla_x^E n_i$ – Gradient des Brechungsindexes der Luft im Raum des elektrischen Feldes perpendikulär zur Ziellinie [m^{-1}],
N – Anzahl der äquidistanten Berechnungsintervalle

Die Ablenkung des Zielstrahls von der Sehne δ wird im einheitlichen Koordinatensystem beschrieben. Nach Einsetzen der Gradienten aus Gl. (14) und (15) in die Gl. (16) erhält man für die modellierten partiellen Horizontal-Refraktionswinkel (Abb. 3):

$$\delta_A^H = -\sin(R) \cdot C \cdot \frac{\Delta D}{D} \sum_{i=1}^{N} E_i \frac{\partial E_i}{\partial x} \cdot (D - L_i) \rho [mgon] \tag{17}$$

Da die horizontalen und vertikalen Refraktionswinkel kovariant sind, erhält man nach Drehung des Koordinatensystems um die Z-Achse für den vertikalen Refraktionswinkel:

$$\delta_A^V = -\sin(Z) \cdot C \cdot \frac{\Delta D}{D} \sum_{i=1}^{N} E_i \frac{\partial E_i}{\partial y} \cdot (D - L_i) \rho [mgon] \tag{18}$$

Die unter der Summe in Gl. (17) und (18) auftretenden Größen der Summanden werden mittels der EDV mit Autor-Computer-Programmen für eine beliebige Anzahl von Punkten im Raum des elektrischen Feldes ausgewertet und in Tabellen für weitere Berechnungen zusammengestellt.

4 BERECHNUNGSBEISPIELE

Beim Verlauf des Zielstrahls gegenüber der Eindrahtstromleitung auf der ganzen Messstrecke, wie in Abb. 4, ergibt sich bei den unten angenommenen Daten:

H – Höhe der Freileitung: 5,00 m
U – Stromspannung: 30 kV
N – Anzahl der Berechnungsintervalle: 10
D – Ziellinie: 300 m

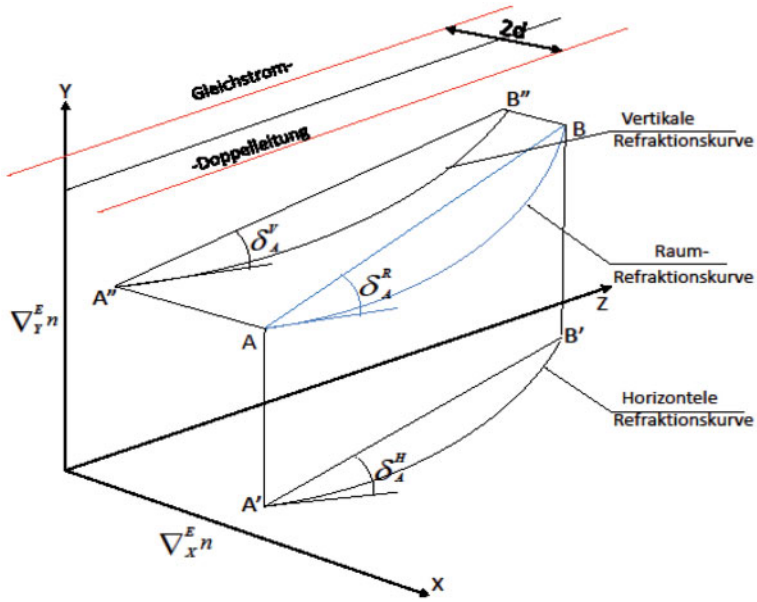


Abb. 3 | Graphisch anschauliche Projektion der räumlichen, horizontalen und vertikalen Refraktionskurve

Berechnungs-intervall	Lokale Koordi-naten X_i	Y_i	Vektor der elektri-schen Feldstärke $\vec{E}\left[\frac{V}{m}\right]$	Gradient-komponente der elektri-schen Feld-stärke $\frac{\partial E}{\partial X}\left[\frac{V}{m^2}\right]$	L_i [m]	$D - L_i$ [m]	ΔD_i [m]	$(D - L) \cdot E \cdot \frac{\partial E}{\partial X}$ $\left[\frac{V}{m^2}\right]$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	5,00		839,2	180	15	285		45510416
2	4,75		884,2	191	45	255		43064910
3	4,50		931,9	202	75	225		42354900
4	4,25		982,3	212	105	195		40608360
5	4,00	1,50	1035,4	223	135	165	30	38097510
6	3,75		1091,1	233	165	135		34320510
7	3,59		1149.4	242	195	105		29206275
8	3,25		1210,0	251	225	75		22778250
9	3,00		1272,7	257	255	45		14718780
10	2,75		1337,0	261	285	15		5234355

Tab. 2 | Daten für die Berechnung des partiellen Horizontal-Refraktionswinkels auf dem Instrumentenstandpunkt A nach Gl. (17), Einfachoberleitung 30 kV

r – Radius des Stromleiters: 0,0079 m
für die horizontalen Refraktionswinkel (Abb. 3, Tab. 2 und Tab. 3):
$\delta_A = +2{,}71$ [mgom] und $\delta_B = -3{,}63$ [mgom]

Verläuft ein Zielstrahl mit der Länge von 300 m vom Punkt A (X = +4,50 m, Y = 1,50 m) zum Punkt B (X = -4,50 m, Y=1,50 m) quer und symmetrisch unter der Stromleitung, bekommt man aus Gl. (17) die gleichen partiellen Refraktionswinkel $\partial_A^H = \partial_B^H = +1{,}74$ mgon. Aus der Tab. 4 ist für die parallelen Ziellinien die Zone des elektrischen Feldes mit den refraktiven Messfehlern von $\sigma_{\delta^H,\delta^V} > 0{,}2$ mgon ersichtlich, die die erreichbare Winkelmessgenauigkeit mit präzisen Tachymetern wesentlich überschreiten.

Beim Verlauf einer Ziellinie D = 300 m gegenüber einer Doppelleitung von 15 kV bekommt man für den Standpunkt A: $\partial_A^H = +2{,}32$ mgon und für den Standpunkt B: $\partial_B^H = -1{,}84$ mgon.

Es ist zu beachten, dass in Polygonzügen die horizontalen Refraktionswinkel sowohl in den *Rückblick* als auch in den *Vorblick* eingehen, und das hat eine relevante Bedeutung, z.B. bei der Richtungsübertragung in untertägigen Tunnel-Vortriebsnetzen und bei diversen Polygonzügen.

5 SCHLUSSBETRACHTUNGEN UND AUSBLICK

Das Phänomen der Lichtstrahlablenkung – die geodätische Refraktion – kann nicht nur durch ein meteorologisches Feld, sondern ebenfalls durch andere physikalische Erscheinungen und Störparameter im Messmedium, wie das elektrische Gleich- und Wechselstromfeld, verursacht werden. Diese Einwirkungen auf präzise Vermessungen wurden bisher nicht ausreichend erforscht. Auf der Basis eines mathematisch-physikalischen Modells und aufgrund von Formeln der nichtlinearen Optik wurde der funktionelle Zusammenhang zwischen der elektrischen Feldstärke, der Aufhängungshöhe des Freistromleiters und der Länge der gegenüber der Gleichstromleitung beliebig verlaufenden Ziellinie sowie der Einfluss auf die an-

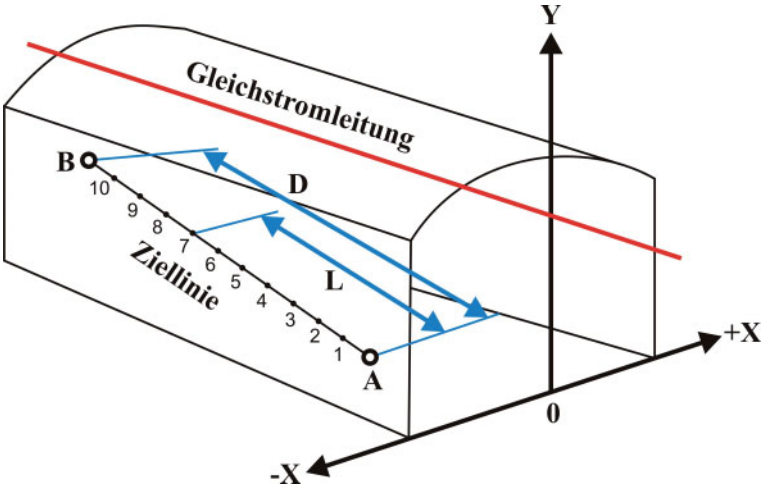


Abb. 4 | Die in Berechnungsintervalle aufgeteilte Ziellinie

Berechnungs-intervall	Lokale Koordi-naten X_i	Y_i	Vektor der elektri-schen Feldstärke $\vec{E}\left[\frac{V}{m}\right]$	Gradient-komponente der elektri-schen Feld-stärke $\frac{\partial E}{\partial X}\left[\frac{V}{m^2}\right]$	L_i [m]	$D - L_i$ [m]	ΔD_i [m]	$(D - L) \cdot E \cdot \frac{\partial E}{\partial X}$ $\left[\frac{V}{m^2}\right]$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2,75		1337,0	261	15	285		99452745
2	3,00		1272,7	257	45	255		83406420
3	3,25		1210,0	251	75	225		68334750
4	3,50		1149,4	242	105	195		54240225
5	3,75	1,50	1091,1	233	135	165	30	41947290
6	4,00		1035,4	223	165	135		31170690
7	4,25		982,3	212	195	105		21866040
8	4,50		931,9	202	225	75		14118300
9	4,75		884,2	191	255	45		2533230
10	5,00		839,2	180	285	15		2265840

Tab. 3 | Daten für die Berechnung des partiellen Horizontal-Refraktionswinkels auf dem Instrumentenstandpunkt B nach der Formel (17), Einfachoberleitung 30 kV

Koordinaten $X_A = X_B$ [m]	$Y_A = Y_B$ [m]	Horizontale Refraktions-winkel [mgon] $\partial_A^H = \partial_B^H$	Vertikale Re-fraktions-winkel [mgon] $\partial_A^V = \partial_B^V$
0		0	+1,47
1,00		+0,98	+1,13
2,00		+1,27	+0,57
3,00		+1,05	+0,20
4,00		+0,78	+0,04
5,00	1,50	+0,48	-0,024
6,00		+0,31	-0,016
7,00		+0,20	-0,015
8,00		+0,15	-0,013
9,00		+0,09	-0,008
10,00		+0,06	-0,005

Tab. 4 | Partielle Refraktionswinkel bei parallelem Verlauf der Ziellinien mit der Länge AB = 300m gegenüber einer Einfach-Gleichstrom-Freileitung mit 15 kV

gularen Refraktionseffekte beschrieben. In Abhängigkeit von den o.a. Größen muss mit Refraktionseinflüssen von bis zu einigen *mgon* gerechnet werden. Die steigende Tendenz zur Errichtung moderner und ökonomischer Gleichstrom-Hochspannungs-Leitungen in vielen Ländern bewirkt, dass die gegenständliche Problematik zunehmend aktuell erscheint und nicht bei präzisen Winkelmessungen in der heutigen Ingenieurgeodäsie zu übergehen ist. Experimentelle Untersuchungen, die in der nahen Umgebung unter einer 330 kV-Hochspannungsleitung (bei an- und abgeschaltetem Strom) bei mittlerer Stromstärke von 30 – 50 A durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass systematische horizontale Richtungsablenkungen von 2,7" ≡ -0,81 mgon auftreten /Kmetko, Kravcov, Litinskij 1988/ und Zenitwinkeldifferenzen von +14,4" ≡ +4,32 mgon beobachtet wurden /Kmetko, Pandul, Litinskij 1984/. Die Beeinflussung des elektrischen Feldes auf geodätische Messungen wurde somit unbestritten bestätigt. Die im Beitrag aufgestellten Formeln der refraktiven Winkeleffekte berücksichtigen lediglich die elektrooptischen Erscheinungen im Messmedium. In einigen Fällen der realen Atmosphäre, wie z.B. u.a. in Tunneln mit Gleichstrom-Freileitungen, ist in der Tat auch mit temperaturinduzierten Luftbrechungsindexfeldern zu rechnen /Hennes 1998/. In diesem Falle resultieren die Refraktionseffekte aus der Superposition von summarischen Einwirkungen der einzelnen physikalischen Einflüsse. Die in der Nähe einer Stromfreileitung auftretenden elektrooptischen Refraktionseffekte übersteigen wesentlich die durch die meteorologischen Parameter hervorgerufenen Refraktionserscheinungen. In dieser Richtung muss noch weiter und intensiver geforscht werden. Die gestiegene Genauigkeit der modernen Messinstrumente erfordert immer genauere Modell- und Parameterannahmen, aber selbst relativ komplizierte Refraktionsformeln bleiben schließlich nur mathematische Annäherungen, da während des Betriebes zufällige Spannungsabfälle auftreten können und es deswegen auch nicht zweckmäßig ist, die Refraktions-Modelle zu sehr auszubauen.

LITERATUR

Jordan, W. (1876): Theorie der Strahlenbrechung. In: Vermessungskunde. Metzlerscher Verlag, Stuttgart, 534-538.

Fischer, A. (1884): Der Einfluss der Lateralrefraktion auf das Messen von Horizontalwinkeln. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), 13(1884), 79-81.

Jütner, G. (1929): Über die bei optischen Distanzmessungen auftretenden Fehler, unter besonderer Berücksichtigung der Refraktion. Diss. TH Breslau 1928, Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), 58(1920), 475.

Berechnungs-intervall	Lokale Koordi-naten X_i	Y_i	Vektor der elektri-schen Feldstärke $\vec{E}\left[\frac{V}{m}\right]$	Gradient-komponente der elektri-schen Feld-stärke $\frac{\partial E}{\partial X}\left[\frac{V}{m^2}\right]$	L_i [m]	$D - L_i$ [m]	ΔD_i [m]	$(D - L) \cdot E \cdot \frac{\partial E}{\partial X}$ $\left[\frac{V}{m^2}\right]$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	5,5		830,35	166,5	15	285		39402183,4
2	5,0		917,25	180,5	45	255		42218724,4
3	4,5		1010,40	190,8	75	225		43376472,0
4	4,0		1107,10	194,0	105	195		41881593,0
5	3,5	1,50	1203,05	186,8	135	165	30	37080407,1
6	3,0		1292,30	166,8	165	135		29100011,4
7	2,5		1368,30	134,5	195	105		19323816,8
8	2,0		1425,85	95,0	225	75		10159181,3
9	1,5		1463,50	56,9	255	45		3747291,8
10	1,0		1483,95	27,7	285	15		616581,2

Tab. 5 | Daten für die Berechnung des partiellen Horizontal-Refraktionswinkels auf dem Instrumentenstandpunkt A nach der Formel (17), Doppel-Oberleitung 15 kV

Berechnungs-intervall	Lokale Koordi-naten X_i	Y_i	Vektor der elektri-schen Feldstärke $\vec{E}\left[\frac{V}{m}\right]$	Gradient-komponente der elektri-schen Feld-stärke $\frac{\partial E}{\partial X}\left[\frac{V}{m^2}\right]$	L_i [m]	$D - L_i$ [m]	ΔD_i [m]	$(D - L) \cdot E \cdot \frac{\partial E}{\partial X}$ $\left[\frac{V}{m^2}\right]$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,0		1483,95	27,7	15	285		11715043,4
2	1,5		1463,50	56,9	45	255		21234653,3
3	2,0		1425,85	95,0	75	225		30477543,8
4	2,5		1368,30	134,5	105	195		35887088,2
5	3,0	1,50	1292,30	166,8	135	165	30	35566680,6
6	3,5		1203,05	186,8	165	135		30338514,9
7	4,0		1107,10	194,0	195	105		22551627,0
8	4,5		1010,40	190,8	225	75		14458824,0
9	5,0		917,25	180,5	255	45		7450363,1
10	5,5		830,35	166,5	285	15		2073799,1

Tab. 6 | Daten für die Berechnung des partiellen Horizontal-Refraktionswinkels auf dem Instrumentenstandpunkt B nach der Formel (17), Doppel-Oberleitung 15 kV

Schedler, A. (1933): Zum Problem der Seitenrefraktion. In: Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen (ÖZfV), 31(1933), 81-87.

Sokop, E. (1936): Die Seitenrefraktion im Temperaturfeld von sonnenbestrahlten Wänden. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), 65(1936), 275-292, 657-665, 689-701.

Kukkamäki, T.J. (1938): Über die nivellitische Refraktion. Veröffentl. des Finnischen Geod. Instituts, Heft 25, Helsinki.

Näbauer, M. (1942): Seitliche Strahlenbrechung im homogenen Refraktionsfeld. Nachr. aus dem Reichsvermessungsdienst (Mitgl. des Reichsamts für Landsaufname), 18. Jg, 248-256.

Brocks, R: (1948): Die terrestrische Refraktion ein Grenzgebiet der Meteorologie und Geodäsie. Annalen der Meteorologie, 1948, 329-336.

Volkenstejn, M.V. (1951): Molekularnaja optika. *Molekularoptik, Moskva.*

Stille, U. (1961): Messen und Rechnen in der Physik. *Vieweg u. Sohn, Braunschweig, 1961.*

Eger, R. (1962): Untersuchungen des Einflusses der Refraktion beim Feinnivellement mit Kompensatornivellierungsinstrumenten. In: Vermessungstechnik, 10(1962)10, 159-161.

Moritz, H. (1962): Zur Geometrie der Refraktion. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen (ÖZfV), Heft 50(1962), Baden b. Wien, 3-13.

Deumlich, F. (1963): Zum Einfluss der bodennahen Refraktion bei der optischen Streckenmessung mit Vertikallatte. Diss. TH Dresden. In: Vermessungstechnik, 11(1963)12, 434-436.

Michalcak, B. (1966): Zum Einfluss der Atmosphäre bei geodätischen Messungen. Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), 91(1966)2, 34-32.

Romanjuk, S.M. (1969): Vlijanije elektroopticeskich javlenij v atmosfere na tocnost uglovych izmerenij (Einfluss von elektrooptischen Erscheinungen in der Atmosphäre auf die Winkelmessgenauigkeit). Geodezija, Kartografija i Aerofotosemka, Vyp.8, 1969, Lvov, 60-64.

Bryś, H. (1983): Model refrakcji elektrooptycznej oraz jej wpływ na wyniki pomiarów geodezyjnych. (Modell der elektrooptischen Refraktion und ihre Einwirkung auf geodätische Vermessungen). Monographie, Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy Nr 3, Kraków, 1983, 1-50.

Kmetko, I. N.; Pandul, I.S.; Litinskij, W.O. (1984): Vlijanije elektromagnitnogo polja LEP na resultaty izmerenija zenitnich rasstojanij *(Einfluss des elektromagnetischen Feldes LEP auf die Resultate der Zenitdistanzen.),* Geodezija, Kartografija i Aerofotosemka, Vyp.40, 1984, Lvov, 42-45.

Bryś, H. (1990): Modell der elektrooptischen Refraktion und ihr Einfluss auf präzise Winkelmessungen. Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), 115(1990)9, 365-372.

Heister, H. (1997): Experimentelle Untersuchungen zur Horizontalrefraktion im Tunnelbau. IX. Intern. Geodätische Woche, Obergurgl. In: Institutsmitteilungen, Heft 17, Fachvorträge, Universität Innsbruck, Institut für Geodäsie.

Hennes, M.; Böckem, B.; Flach, PH. (1998): Recent Devolopments for Refraction-free Optical Measurements. Paper FIG, XXI International Congress, Brighton, 19.-26. Juli 1998.

Kmetko, I.N.; Kravcov, N.I.; Litinskij, W.O. (1988): Issledovanije vlijania elektromagnigo polja (EMP) LEP na tocnost geodeziceskich izmerenij (Untersuchungen des Einflusses des elektomagnetisches Feldes (EMP) LEP auf die Genauigkeit der geodätischen Vermessungen). Geodezija, Kartografija i Aerofotosemka, Lvov, 1988, Seiten 20-23.

Beluch, J.; Bryś, H. (2010): Zur Problematik der Minimierung des Einflusses der Horizontalrefraktion in Tunnel-Vortriebs-Lagenetzen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 117(2010)2, 71-76.

Hennes, M. (2002): Zum Refraktionseinfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und der Instrumentenentwicklung. *I*n: Flächenmanagement und Bodenordnung (FuB), 64(2002)2, 1-18.

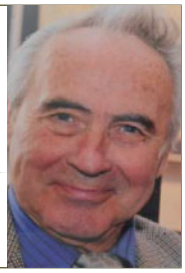
INTERNET: Wikipedia-Angaben

AUTOR

o. Prof. Dr.-Ing. habil. Henryk Bryś

POLITECHNIKA KRAKOWSKA
INSTYTUT GEOTECHNIKI

ul Warszawska 24 | 31-155 Kraków | Polen
hbrys@pk.edu.pl



Manuskript eingereicht: 12.09.2011 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet