

Zur Parametrisierung der meteorologischen Streckenreduktion in geodätischer Auswertesoftware



On the Parametrization of Atmospheric Correction of Electronic Distance Measurements in Geodetic Software Packages

Ekkehart Grillmayer, Garsten

Zusammenfassung

Die atmosphärischen Bedingungen während der Messung und ihre korrekte Berücksichtigung stellen immer noch eine Hürde bei der Erreichung der gemäß Gerätespezifikationen möglichen Distanzmessgenauigkeiten dar. Die dem eingesetzten Instrumentarium korrekt zugeordnete Parametrisierung der in den Auswerte-Software-Paketen benutzten Formeln für die meteorologische Streckenreduktion kommt dabei eine wesentliche Rolle zu. In der vorliegenden Arbeit wurden deshalb die heute am häufigsten in Geräte- und Auswertesoftware verwendeten Formeln zusammengestellt und die Auswirkungen einiger Fehler und Fehlannahmen, die in der Praxis öfter auftreten, werden diskutiert.

Schlüsselwörter: Meteorologische Korrektur, Entfernungsmessung

Abstract

The atmospheric conditions during the measurement and their correct consideration are still an obstacle in achieving the possible distance measurement accuracies according to the instrument's specifications. The correctly assigned to the instruments parameterization of the formulas used for the atmospheric correction in geodetic software packages, will therein be essential. In the presented work, the most frequently formulas used today in instrument and office software packages were put together, the transitions between different formulas worked out and the effects of some errors and misconceptions that occur often in practice are discussed.

Keywords: Atmospheric correction, electronic distance measurements

1. Aufgabenstellung/Motivation

In den letzten Jahren sind die Anforderungen an die zu gewährleistenden Genauigkeiten bei ingenieurgeodätischen Fragestellungen (insbesondere bei Deformationsmessungen) stetig gewachsen. Nicht selten werden von Auftraggebern, aber auch Gutachtern und Sachverständigen benachbarter Disziplinen, Genauigkeiten von besser als 3 ppm gefordert. Die praktische Erfahrung zeigt, dass die erzielbaren Genauigkeiten, besonders bei Monitoringaufgaben, heute weniger durch die Messtechnik, denn ursächlich durch die meteorologischen Bedingungen während der Messung limitiert sind. Da die epochenweisen Beobachtungen oftmals über den Jahreslauf verteilt ausgeführt werden müssen, ergibt sich auch eine entsprechende Vielfalt atmosphärischer Zustände, denen in der Auswertung Rechnung getragen werden muss. In den seltensten Fällen wird es, insbesondere im alpinen Raum, möglich sein, die Beobachtungen bei konstanten Umweltbedingungen auszuführen, so dass die Beeinflussung in der Differenzbildung eliminiert würde.

Ein, wenn vielleicht nur kleiner, Beitrag dieses Ziel zu erreichen, ist eine möglichst den realen Messbedingungen entsprechende meteorologische Reduktion der Strecken. Die Bestimmung der notwendigen Parameter ist aufwändig bis schwierig. Hier entsprechenden Aufwand zu betreiben ergibt nur Sinn, wenn in der Auswertesoftware die für das eingesetzte Instrumentarium und die benutzten Formeln korrekten Parameter verwendet werden. Die Erfahrung zeigt, dass dies sehr oft auf Grund von Missverständnissen zwischen den Hard- und Softwareherstellern und den Anwendern nicht der Fall ist.

Diese Publikation hat daher das Ziel, dem Anwender zu vermitteln, wie die meteorologische Streckenkorrektur heute in Softwareprodukten umgesetzt ist. Dazu werden die gebräuchlichsten Formeln zusammengestellt, die Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Lösungsansätzen aufgezeigt und die Größenordnung einiger möglicher systematischer Fehler infolge unzureichender Sorgfalt bei der Benutzung dieser Formeln abgeschätzt.

2. Refraktivität und Brechungsindizes

Die Ausbreitungsverzögerung einer elektromagnetischen Welle in einem Medium hängt im Wesentlichen von ihrer Wellenlänge λ und der Dichte des Mediums ab. Die Abhängigkeit von der Wellenlänge wird als Dispersion bezeichnet.

Die Dichte hängt neben der chemischen Zusammensetzung des Mediums vor allem von der Temperatur und dem vorherrschenden Druck ab, wie sich aus der Zustandsgleichung für ideale Gase ablesen lässt (siehe dazu z.B. [1] S. 11 ff):

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T \rightarrow \rho = \frac{p}{R_s \cdot T} \quad (1)$$

mit

T ... Temperatur [°K] V ... Volumen
 p ... Luftdruck [hPa] m ... Masse
 R_s ... spezifische Gaskonstante ρ ... Dichte.

Die in der Luft enthaltene Feuchtigkeit verändert die Zusammensetzung des Gases, was zu einer Veränderung der Dispersion führt. Da die Änderungen im Bereich der für Distanzmessgeräte benutzten Wellenlängen aber von vergleichsweise geringer Größenordnung sind, kann die Dispersion der feuchten Luft für die geodätische Anwendung als Konstante angesetzt werden.

Für die praktische Anwendung wird zuerst die Dispersion, also die Refraktivität für die benutzte Wellenlänge, in einer standardisierten Atmosphäre berechnet. Dieser Wert kann für ein konkretes Instrument als weitgehend konstant angesehen werden. Die tatsächlich vorliegende Dichte der Messumgebung (parametrisiert durch Temperatur und Luftdruck) wirkt wie eine Skalierung auf die Refraktivität. Die Luftfeuchtigkeit wird meist mit Hilfe eines wellenlängenunabhängigen Korrekturterms für die Berechnung der faktisch vorliegenden Refraktivität berücksichtigt, der in der geodätischen Literatur auch als Feuchtanteil bezeichnet wird. Diese Vorgehensweise wird ausführlich in [2] und [3] beschrieben.

2.1 Dispersion in einer standardisierten Atmosphäre

Unter einer standardisierten Atmosphäre versteht man trockene Luft (0 % relative Luftfeuchtigkeit RF) mit einem definierten (aktuell repräsentativen) CO₂-Gehalt bei standardisierten Werten für die Temperatur t und den Luftdruck p .

Unter den verfügbaren Lösungsansätze für die Dispersion findet der Ansatz nach Cauchy

$$(n_{ph} - 1) \cdot 10^6 = N = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots \quad (2)$$

für den Phasenbrechungsindex n_{ph} , und

$$(n_g - 1) \cdot 10^6 = N = A + 3 \cdot \frac{B}{\lambda^2} + 5 \cdot \frac{C}{\lambda^4} + \dots \quad (3)$$

für den Gruppenbrechungsindex n_g die häufigste Verwendung. Er liefert für den in der elektronischen Distanzmessung lange Zeit verwendeten Wellenlängenbereich zwischen 0,650 und 0,850 μm eine Übereinstimmung zu Messungen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ ppm. Neuere Distanzmessgeräte und im besonderen Laserscanner benutzen wesentlich größere Wellenlängen (bis zu 1,5 μm , weshalb für diese Instrumente der Ansatz nach Cauchy nur eingeschränkt nutzbar sein wird. Trotz einer Vielzahl von Arbeiten zu diesem Thema in den letzten Jahren findet es in der Praxis bisher weitgehend keinen Niederschlag.

Auf der General Assembly der IAG 1999 wurde in [4] festgehalten, dass für die Berechnung der Refraktivität bei Standardwerten der Atmosphäre ($T = 273,15$ K (0°C), $p = 1013,25$ hPa, $e = 0,0$ hPa und einem CO₂-Gehalt von 375 ppm) und für Wellenlängen zwischen 650 und 850 nm mit geringen Genauigkeitsverlusten die folgende Parametrisierung von (2) benutzt werden kann:

$$\begin{aligned} N_\lambda &= (n_\lambda - 1) \cdot 10^6 = \\ &= 287,6155 + 3 \cdot \frac{1,62887}{\lambda^2} + 5 \cdot \frac{0,0136}{\lambda^4} \end{aligned} \quad (4)$$

Die ist auch die derzeit am häufigsten in Software-Produkten anzutreffende Umsetzung, welche auch in vielen Lehrbüchern (wie z.B. [5]) wiedergegeben wird. In den meisten Softwarepaketen muss der Anwender die Refraktivität N_λ derzeit selbst berechnen und eingeben. λ ist dabei in μm einzuführen.

Es muss noch darauf hingewiesen werden, dass der den Parametern zu Grunde liegende CO₂-Gehalt ständig ansteigt. Im Sommer 2022 lag er in Österreich bei durchschnittlich 415 ppm (mit einer saisonal bedingten Schwankungsbreite von ± 2 ppm (siehe dazu [6])).

2.2 Konkrete atmosphärische Umgebungsbedingungen

Die aus der Dispersionsformel (4) folgende Refraktivität N_λ ist die Grundlage für die Berechnung des Brechungsindex für eine konkrete meteorologische Situation. In der geodätischen Literatur

und in den Empfehlungen der IAG wird dabei meist auf die Formel aus Kohlrausch [7] S. 387 (siehe auch z.B. [8] S. 54) verwiesen:

$$(n_M - 1) \cdot 10^6 = \frac{N_\lambda}{1 + t \cdot \alpha} \cdot \frac{p}{1013,25} - \frac{4,125 \cdot 10^{-2}}{1 + t \cdot \alpha} \cdot e \quad (5)$$

Darin sind

t ... Umgebungstemperatur [°C]

p ... Luftdruck [hPa]

e ... Partieller Wasserdampfdruck [hPa]

α ... $1/273,15$

Der partielle Wasserdampfdruck e kann nach der Psychrometer-Formel von A. Sprung ([9], siehe dazu auch [8], S. 55 und 62 ff) wie folgt berechnet werden:

$$e = E' - A \cdot p \cdot (t - t') \quad (6)$$

worin

E' ... Sättigungsdampfdruck

t' ... Feuchttemperatur

A ... Psychrometerkonstante

sind. Für Messungen der Feuchttemperatur über „Wasser“ ($t > 0^\circ\text{C}$) ist A mit $662 \cdot 10^{-6}$, über „Eis“ ($t \leq 0^\circ\text{C}$) mit $583 \cdot 10^{-6}$ anzusetzen. Der Sätti-

gungsdampfdruck wird nach Magnus-Tetens ([10], S. 299) mit

$$\log E' = \frac{a \cdot t'}{t' + b} + c \quad (7)^1$$

berechnet. Auch hier sind die Konstanten a und b wiederum für „Wasser“ und „Eis“ unterschiedlich:

„Wasser“ ... $a = 7,5$, $b = 237,3$

„Eis“ ... $a = 9,5$, $b = 265,5$

c ist in beiden Fällen konstant: 0,7858 (Angaben aus [8], früher wurde hier nach Magnus-Tetens 0,6609 verwendet).

2.3 Feuchtanteil

Der zweite Teil von Formel (5) stellt uns einerseits in der Praxis vor das Problem, dass wir nur sehr selten in der Lage sind, die Feuchttemperatur messen zu können. Häufig wird argumentiert, dass der Fehler durch Nichtberücksichtigung des Feuchtanteils bei der meteorologischen Reduktion (für die heute gebräuchlichen Distanzmessgeräte) nur eine kleine Fehlerquelle darstellt, da ein wesentlicher Teil durch die Benutzung herstellerspezifischer Referenzwerte (siehe dazu Abschnitt 3) ohnehin eliminiert wird und sich der

1) \log steht hier für den dekadischen Logarithmus.

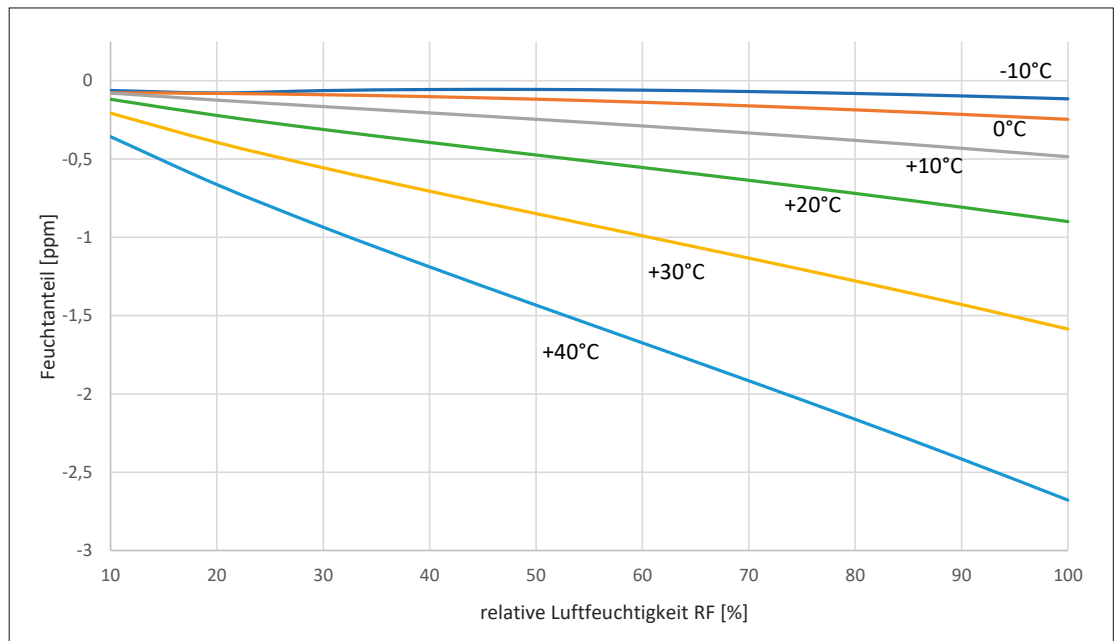


Abb. 1: Beitrag des Feuchtanteils zur Refraktivität in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit für verschiedene Umgebungstemperaturen

Anwender deshalb nicht mit dieser Problematik befassen muss.

In [11] wird gezeigt, dass der Beitrag des Feuchteanteils zur Refraktivität bis zu -3 ppm ausmachen kann. Aus Abbildung 1 lässt sich ablesen, unter welchen Bedingungen der Feuchteanteil welche Werte annehmen kann.

Die Variabilität dieses Werts hängt nur in geringem Maß mit der Höhenlage des Messgebiets (bzw. dem Luftdruck) zusammen. Er ist hauptsächlich von der Temperatur und natürlich der Luftfeuchtigkeit abhängig.

Mit den Werten aus Abbildung 1 und den Ausführungen in Abschnitt 3.2 ergibt sich, dass die oben getroffene Annahme zu Fehlern des meteorologischen Korrekturfaktors führen kann, welche wesentlich größer als die potenzielle Genauigkeit moderner Distanzmessteile werden können.

In den mir verfügbaren Geräte- und Bürosoftwarepaketen finden sich derzeit drei unterschiedliche Herangehensweisen mit dem Feuchteanteil umzugehen:

1. Es wird dem Anwender überlassen, die Feuchtemperatur zu bestimmen,
2. es wird eine Näherungsformel unter Einbeziehung der Luftfeuchtigkeit (welche sich erheblich leichter bestimmen lässt als die Feuchtemperatur) verwendet (z.B. bei Leica), siehe dazu 2.3.1,
3. der Feuchteanteil wird ganz vernachlässigt. Hierzu findet sich eine Abschätzung bzw. Anmerkung am Ende dieses Abschnitts unter 2.3.2.

2.3.1 Einbeziehung des Feuchteanteils über die relative Luftfeuchtigkeit

Leica verwendet in den Gerätehandbüchern eine abgewandelte Form von (5):

$$(n_M - 1) \cdot 10^6 = \frac{b \cdot p}{1 + t \cdot \alpha} - \frac{4,125 \cdot 10^{-4} \cdot RF}{1 + t \cdot \alpha} \cdot E \quad (8)$$

Darin steht RF wieder für die relative Luftfeuchtigkeit in % und

$$b = N_\lambda / 1013,25 \quad (9)$$

(8) ergibt sich aus (5) nach [8] S 65 in dem für den Feuchteanteil mit

$$e = RF \cdot E \cdot 10^{-2} \quad (10)$$

substituiert wird. Die Berechnung von E erfolgt nach (7), indem E' durch E und t' durch t ersetzt werden.

In [8] S. 65 findet sich eine Abschätzung, dass die Abweichung durch diese Vereinfachung bei 20 % und RF zwischen 50 und 100 % $\pm 0,03$ ppm beträgt, sofern die Temperatur t mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ\text{C}$ und RF auf $\pm 3\%$ bestimmt werden können.

In [11] wird gezeigt, dass die Unterschiede der Berechnung des Feuchteanteils nach (5) und (8) zwischen $+0,015$ und $-0,144$ ppm liegen, weshalb die Benutzung von (8) in den praktischen Anwendungen derzeit als ausreichend genau angesehen werden darf.

2.3.2 Vernachlässigung des Feuchteanteils

Formel (5) wird für diesen Fall zu

$$\begin{aligned} (n_M - 1) \cdot 10^6 &= \frac{(n_\lambda - 1) \cdot 10^6}{1 + t \cdot \alpha} \cdot \frac{p}{1013,25} = \\ &= \frac{N_\lambda}{1 + t \cdot \alpha} \cdot \frac{p}{1013,25} \end{aligned} \quad (11)$$

verkürzt.

Meistens wird zur weiteren Vereinfachung wie folgt substituiert:

$$N = N_\lambda \cdot \frac{273,15}{2013,25} \quad (12)$$

Dadurch vereinfacht sich (11) zu

$$(n_M - 1) \cdot 10^6 = N \cdot \frac{p}{273,15 + t} = N \cdot \frac{p}{T} \quad (13)$$

wobei T nun die Umgebungstemperatur in $^\circ\text{K}$ wäre.

Die in Österreich am weitesten verbreiteten Softwareprodukte der Firmen IDC-EDV und rm-Data verwenden, ebenso wie der Gerätehersteller Trimble, diesen Ansatz. Wie noch unter 3.2 gezeigt wird, kann diese Vernachlässigung zu erheblichen, die Streckenmessgenauigkeit des Distanzmessteils überschreitenden Abweichungen führen.

3. Berechnung der Streckenreduktion

Grundsätzlich werden Distanzmesseinheiten herstellerabhängig auf eine Bezugstemperatur (bei Leica sind dies 12°C , bei Trimble 20°C) und einen Bezugsdruck (1013,25 hPa) kalibriert, sodass die faktische Streckenreduktion als Maßstab relativ dazu bestimmt werden kann. Bei Leica kommt zusätzlich ein Bezugswert für die relative Luftfeuchtigkeit von 60% hinzu. Mit diesen Werten wird nach (5), (8) oder (11) der Referenz-Brechungsindex n_B berechnet. Auf die Auswirkung der Verwendung falscher Bezugswerte wird hier nicht eingegangen.

Für die konkrete Messsituation wird dann nach diesen Formeln und mit den aktuellen Werten der notwendigen (in den Formeln genutzten) meteorologischen Parameter der aktuelle Brechungsindex der Atmosphäre n_M berechnet.

Die eigentliche meteorologische Reduktion wird als Maßstab

$$\mu_{met} = n_B - n_M \quad (14)$$

berechnet. Korrekterweise wäre in (14) noch die Division mit n_M erforderlich. Dies wird jedoch aus numerischen Gründen in der Regel vernachlässigt, siehe zum Beispiel [12], S. 118.

Der meteorologische Korrekturfaktor ergibt sich somit als

$$k_{met} = (\mu_{met} - 1) \cdot 10^6 = N_B - N_M \quad (15)$$

Um Fehler zu vermeiden ist darauf zu achten, dass es zu keiner Vermengung der unterschiedlichen Formeln kommt, dass also n_B und n_M jeweils mit den selben Formeln berechnet werden. Bei Einsatz kommerzieller Auswertsoftware müssen die Parameter der benutzten Distanzmesseinheit in der Regel in der Konfiguration durch den Anwender selbst eingetragen werden. Dies betrifft meistens die beiden Werte n_B (bzw. eigentlich ein N_B) und N_λ aus (4), manchmal auch b aus (9) oder N aus (12).

3.1 Mischen der Reduktionsansätze

Sofern von der Auswertsoftware die verkürzte Formel (11) für die Berechnung von n_M benutzt

wird, sollte für Leica-Instrumente darauf geachtet werden, diese Parameter nicht aus dem Datenblatt oder Handbuch zu übernehmen, da sich die Angaben für n_B auf eine Berechnung mit Formel (8) beziehen. Dadurch kann in weiterer Folge ein systematischer Fehler in der Streckenreduktion von bis zu -3 ppm verursacht werden, siehe dazu [11] beziehungsweise 2.3.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Berechnung für ein Leica-Gerät (Wellenlänge 658 nm, Bezugstemperatur 12 °C, Bezugsdruck 1013,25 mbar und Bezugsfeuchte von 60 %) durchgeführt wurde. Die Unterschiede zu Geräten mit anderen Wellenlängen sind naturgemäß gering. Eine andere Bezugstemperatur, wie z.B. 20 °C für Trimble-Geräte, würde die Werte um maximal 0,5 ppm ändern.

Für die Berechnung der korrekten Parameter finden sich in Tabelle 1 entsprechende Verweise.

3.2 Vernachlässigung der Luftfeuchtigkeit

Der vernachlässigte Feuchteterm verursacht im Maßstab Abweichungen zwischen $+0.5$ und -2.7 ppm. Der Grund liegt darin, dass der Einfluss des Feuchtanteils für die Bezugswerte von Druck, relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur noch eher gering (-0.3 ppm für Leica- und -0.5 ppm für Trimble-Instrumente) ist, wohingegen der Feuchtanteil selbst unter realen Messbedingungen Werte von bis zu -3 ppm annehmen kann, wie in [11] gezeigt wird.

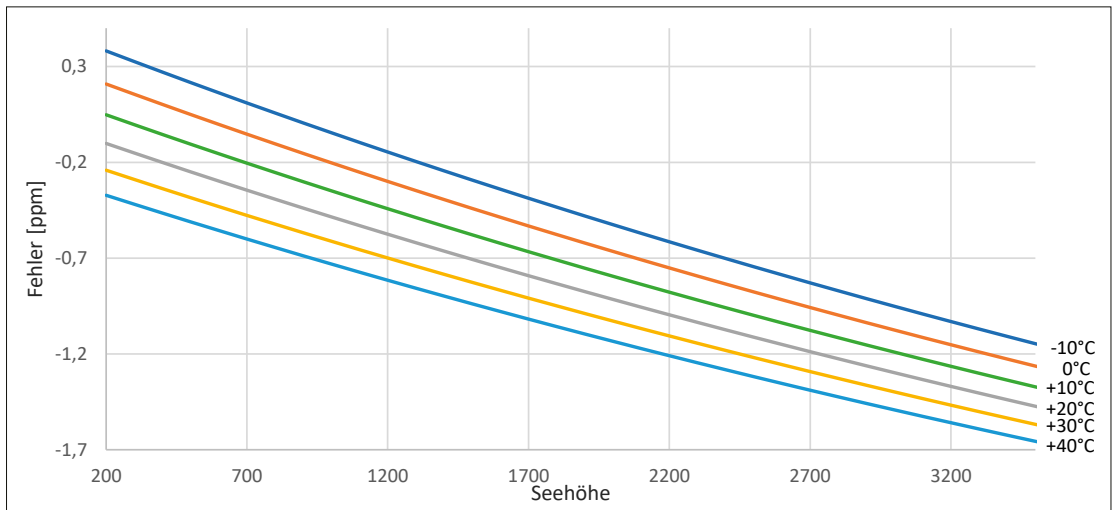


Abb. 2: Differenzen zwischen den Werten der meteorologischen Reduktion für die Wellenlängen 658 bzw. 905 nm in Abhängigkeit von der Seehöhe für verschiedene Umgebungstemperature

3.3 Falsche Wellenlänge

Über die letzten 25 Jahre wurden die benutzten Wellenlängen aus technischen Gründen mehrfach verändert. Heute befinden sich hauptsächlich Instrumente im Einsatz, die mit Wellenlängen zwischen 658 und 905 nm arbeiten. Um den maximalen Fehler, der durch Benutzung einer nicht dem verwendeten Instrument entsprechenden Wellenlänge entsteht, abzuschätzen, wurden mit diesen beiden Randwerten die meteorologischen Reduktionen für einen Temperaturbereich von -10 bis $+40^{\circ}\text{C}$ und den im Alpenraum auftretenden Höhenlagen berechnet. Abbildung 2 zeigt die Differenzen der für diese beiden Wellenlängen berechneten Reduktionen.

4. Parametrisierung in Software-Produkten

In den in Österreich gängigsten Office-Software-Paketen rmGEO und GeosIVERM finden sich die Parameter zu Berechnung der Streckenreduktion in Konfigurationsdateien, die der Anwender selbst anpassen kann, um die Auswertung für das von ihm eingesetzte Instrumentarium korrekt durchzuführen. In GeosIVERM gibt es darüber hinaus auch die Möglichkeit, diese Konfiguration über einen entsprechenden Dialog in der Software anzupassen. Leider ist in den derzeitigen Versionen nicht die Eingabe von Wellenlänge und Bezugswerten möglich, sondern es müssen bereits abgeleitete Parameter eingegeben werden. In Tabelle 1 finden sich Angaben, wie die jeweils verwendeten Parameter mit den Formeln in dieser Arbeit zusammenhängen:

rmGEO	GeosIVERM	Formel
P.A	a	(11) mit Bezugsparemtern
P.B		(12)
	P	(9)
P.C		273,15
	t	α in (5) bzw. (8)

Tab. 1: Korrekturparameter in Software-Produkten und Nummer der Formel, um sie zu berechnen

Für die am Weitesten verbreiteten Geräte der Hersteller Leica und Trimble sind in Tabelle 2 die korrekten Werte angeführt.

Es wurde jene Bezeichnung der Parameter gewählt, die den Handbüchern der Software-Pakete entspricht. Die jeweiligen Speicherorte der Konfigurationsdateien können den Software-Handbüchern entnommen werden beziehungsweise finden sich diese auch auf den Hilfe-Seiten.

In Vermessungsinstrumenten sind die korrekten Parameter für die meteorologische Streckenreduktion hinsichtlich Wellenlänge, Bezugsparemtern und benutzten Formeln im internen, nur dem Service zugänglichen Speicher der Instrumente hinterlegt und können vom Anwender auch nicht verändert werden. Da sich die Wellenlänge auf Grund der Alterung des Instruments auch individuell ändern kann, wird sie im Zuge eines Instrumentenservices kontrolliert und der verspeicherte Wert gegebenenfalls im Instrument angepasst.

In der Regel werden die aktuellen Parameter in der Messdatendatei mitgespeichert und sind im Zuge des Datenexports für den Anwender abrufbar. Die Anbieter von Office-Software-Produkten haben somit eine einfache Möglichkeit, die von ihnen verwendeten Parameter zu kontrollieren beziehungsweise gegebenenfalls vom Anwender korrigieren zu lassen. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die genannten Software-Pakete nicht immer die gleichen Formeln für die Berechnung des Reduktionsmaßstabs verwenden, wie die Gerätehersteller beziehungsweise die Parameter aus den Geräten unter Umständen noch umgerechnet werden müssen.

Viele Anwender umgehen die dargelegten Fragen, indem sie während der Messung bereits die meteorologischen Parameter am Instrument eingeben und die damit korrigierten Strecken direkt in ihre Auswertung übernehmen. Ob dieses Vorgehen bei komplexeren Aufgabestellungen wie einer Netzmessung zielführend ist, muss hinterfragt werden, da einerseits die meteorologischen

Hersteller	Instrumenten-Serie	Wellenlänge [nm]	P.A a	P.B	P	P.C	t	N_{λ}
Leica	TS/TM/MS ab Serie Viva	658	286,671	80,675	0,295351	273,15	0,003661	299,265
Trimble	S3/7/9 DR Plus	905	273,648	79,171	0,289843	273,15	0,003661	293,684
	S3/7/9 HP	660	278,780	80,656	0,295280	273,15	0,003661	299,192

Tab. 2: Parameter für die Umsetzung der meteorologischen Streckenreduktion in rmGEO und GeosIVERM

Bedingungen am Instrumentenstandort nicht immer repräsentativ für alle Messstrecken sein werden und während einer Satzmessung nicht stabil sein müssen.

5. Zusammenfassung

Auch wenn damit argumentiert werden kann, dass alle diese Anteile und Effekte tatsächlich klein sind, erscheint es unangebracht, diese nicht sorgfältig zu berücksichtigen. Wie gezeigt wurde, erscheint besonders die Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit in Präzisionsanwendungen als unerlässlich und ist mit einfachen Mitteln auch möglich. Nur wenn die formalen Möglichkeiten der Streckenreduktion vollständig ausgeschöpft werden, in dem eine korrekte Implementierung in der Software erfolgt und der Anwender diese auch entsprechend dem von ihm eingesetzten Instrumentarium richtig parametrisiert, können systematische Fehler, deren Größenordnung die Spezifikationen der Instrumente rasch überschreitet, vermieden werden.

Um den Schwierigkeiten bei der Berücksichtigung der meteorologischen Einflüsse zu begegnen, wird bei Netzmessungen oftmals ein sehr hoher Aufwand betrieben, um durch hohe Redundanz die vorhandenen systematischen Fehler auszumitteln und – mit anderen Worten – in den stochastischen Modellen verschwinden zu lassen. Dass Teile dieser systematischen Fehler durch Fehler in der Handhabung der benutzten Software verursacht werden, kann und sollte vermieden werden. Der Anwender wird dadurch auch in die Lage versetzt, Abweichungen im Datenmaterial exakter mit den Beobachtungsbedingungen in Zusammenhang zu bringen und ggf. darauf zu reagieren. Im Idealfall kann er sogar seinen Messaufwand reduzieren oder steigert die erreichbaren Genauigkeiten.

Danksagung

Für die Unterstützung bei dieser Publikation möchte ich folgenden Personen besonders danken:

Den Herren Dipl.-Ing. Robert Riser (IDC-EDV, Geosi) und Dipl.-Ing. Paul Plank (rmData, rmGEO/rmNETZ), mit denen ich intensiven Diskussionen darüber führen durfte, welche Möglichkeiten bestehen, die meteorologische Streckenreduktion in künftigen Software-Releases entsprechend den Vorschlägen in dieser Arbeit neu zu implementieren.

Herrn Dipl.-Ing. Franz Blauensteiner (BEV/G1) danke ich für das geduldige Korrekturlesen und die eingebrachten Verbesserungsvorschläge.

Referenzen

- [1] *Etling, D.*: Theoretische Meteorologie, eine Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer 2002
- [2] *Barrell, H. u. Sears, J.*: The refraction and dispersion of air for the visible spectrum. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 238 (1939) 786, S. 1–64
- [3] *Edlén, B.*: The Refractive Index of Air. Metrologia 2 (1966) 2, S. 71–80
- [4] *International Association of Geodesy: IAG Resolutions. General Assembly 1999. Resolution 3, Birmingham 1999.* <https://office.iag-aig.org/doc/5d7b8fda0c032.pdf>
- [5] *Joeckel, R., Stober, M. u. Huep, W.*: Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. Heidelberg: Wichmann 2008
- [6] *Deutsches Umweltbundesamt*: Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen
- [7] *Kohlrausch, F.*: Praktische Physik: Band 1. Zum Gebrauch für Unterricht, Forschung und Technik. Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1955
- [8] *Rüeger, J. M.*: Electronic distance measurement. An introduction; with 18 tables. Berlin, Heidelberg: Springer 1996
- [9] *Sprung, A.*: Über die Bestimmung der Luftfeuchtigkeit mit Hilfe des Assmannschen Aspirationspsychrometers. Zeitschrift für Angewandte Meteorologie – Das Wetter 5 (1888), S. 105–108
- [10] *Tetens, O.*: Über einige meteorologische Begriffe. Zeitschrift für Geophysik 6 (1930) 6, S. 297–309
- [11] *Grillmayer, E.*: Zur meteorologischen Streckenreduktion. avn (2023) 5, S. 157–162
- [12] *Kahmen, H.*: Vermessungskunde. Sammlung Göschen, Bd. 2161. Berlin: de Gruyter 1986

Anschrift des Autors

Dipl.-Ing. Dr. Ekkehart Grillmayer, Ingenieurkonsulent, geoAT. OG, Lektor an der Universität für Bodenkultur und der FH Oberösterreich, Reithofferstraße 63, A-4451 Garsten.
E-Mail: grillmayer@zivilgeometer.at 