

# Zur Orientierungskontrolle von Vortriebsnetzen mit Vermessungskreiseln

Otto Heunecke und Wolfgang Liebl

## Zusammenfassung

Vermessungskreisel erlauben die Richtungsübertragung von einer Bezugslinie auf eine andere Linie, ohne dass dazu ein verbindendes geodätisches Netz erforderlich ist. Routinemäßig werden Vermessungskreisel insbesondere zur Orientierungskontrolle von Vortriebsnetzen bei Tunnelbauvorhaben eingesetzt. Dies ist die derzeit einzige Möglichkeit, um zu einer Stabilisierung der Genauigkeit in schmalen Tunnelnetzen zu gelangen und unverzichtbar angesichts der heutigen Anforderungen an die Auffahrung und die Durchschlagsgenauigkeiten. Um zu einer gesicherten Aussage zur Richtigkeit zu gelangen, ist das Messverfahren so anzulegen, dass systematische Einflüsse bei der Bestimmung eines untertägigen Richtungswinkels minimiert werden. Dafür wird für eine Azimutbestimmung das Differenzenprinzip sowohl in zeitlicher als auch räumlicher Hinsicht genutzt, und es sind sämtliche erforderlichen Korrekturen und Reduktionen zu deklinieren, um zu einer Messunsicherheit  $\leq 1$  mgon des gesuchten Richtungswinkels zu gelangen.

## Summary

*Gyroscopes allow the orientation transfer from a reference line to another line without the need for a connecting geodetic network. They are used routinely for orientation control of networks in tunnel construction projects. This is currently the only way to stabilize the accuracy in slender tunneling networks and is indispensable in view of today's requirements for the excavation and breakthrough accuracy. In order to archive a reliable assessment of correctness, the measuring method has to be planned in such a way that systematic influences in the determination of an underground directional angle are minimized. For this purpose, the difference principle is used for an azimuth determination both in terms of time as well as in space, and all required corrections and reductions must be regarded correctly to obtain the directional angle of interest with measurement uncertainty  $\leq 1$  mgon.*

**Schlüsselwörter:** Azimutbestimmung, Horizontalrefraktion, Kreiselkampagne, Laplace-Reduktion, Messunsicherheit, Polreduktion

## 1 Einleitung

Vermessungskreisel bestehen aus einem richtungsgebenden System, dem schweregeffesselten Kreisel (Abb. 1), und einem adaptierten richtungsnehmenden System, einem Theodolit oder Tachymeter. Sie ermöglichen in der Horizontalen die Richtungsübertragung von einer Bezugs-

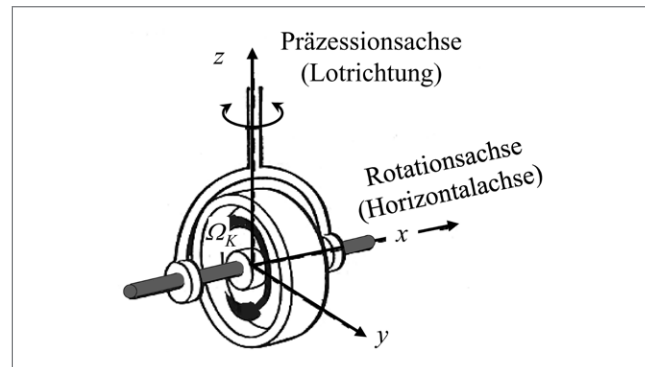


Abb. 1: Schweregeffellter Kreisel

linie auf eine andere Linie, ohne dass dazu ein verbindendes geodätisches Netz erforderlich ist. Mit anderen Worten: Vermessungskreisel erlauben die unmittelbare Bestimmung des Datumsparameters »Orientierung« eines Lagenetzes. Ihre Hauptanwendungen liegen bei der Orientierungsbestimmung unterirdischer Netze, speziell bei Tunnelbauvorhaben und im Bergbau. Spezielle Anwendungen sind außerdem die Nordausrichtung von Versuchseinrichtungen und Drehtischen, wie diese u. a. zur Prüfung von Inertialsensorik benötigt werden. Vermessungskreisel bieten die einzige Möglichkeit, um zu einer Stabilisierung der Orientierungsgenauigkeit in schmalen Tunnelnetzen und bei Schachtlotungen zu gelangen, wenn man von ersten Studien zur diesbezüglichen Nutzung von Inertialsensorik absieht (Neuhierl 2005), und sind unverzichtbar angesichts der heutigen Anforderungen an die Auffahrung und die Durchschlagsgenauigkeiten (u. a. Heunecke 2014, Schor 1992).

Ein schweregeffellter, rotierender Körper mit der symmetrischen Drehmasse  $\Theta_K$  und der Rotationsgeschwindigkeit  $\Omega_K$  ist bestrebt, seine Rotations- oder Läuferachse gleichsinnig zur Erdrotation  $\Omega_E$  in den Meridian einzustellen, zeigt also mit einer sich aus einer permanenten Schwingung abzuleitenden Richtungsanzeige nach astronomisch Nord. Anders als faseroptische Kreisel und Ringlaserkreisel sucht ein Vermessungskreisel wie ein Kompass die Nordrichtung. Das Richtmoment eines Kreisels ist

$$R = \Theta_K \cdot \Omega_K \cdot \Omega_E \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

wobei:

$\varphi$  : geografische Breite,

$\alpha$  : Amplitude der Schwingung.

Das Richtmoment wird mit wachsender geografischer Breite  $\varphi$  kleiner und die Periode einer Schwingung größer.

Da bei den Instrumenten von DMT über eine Schwingung integriert wird, um die Schwingungsmittellage (siehe Abb. 2) zu bestimmen, ist die geografische Breite im Instrument vorzugeben. Der Zeitbedarf für einen Messzyklus steigt mit wachsender geografischer Breite geringfügig an und eine Messung wird potenziell etwas ungenauer, da  $R$  proportional zu  $\cos \varphi$  ist (vgl. Heister et al. 1990).

Die Wiederholgenauigkeit (Präzision) einer Azimutbestimmung  $\sigma_a$  muss neben der Komponente der eigentlichen Kreismessung  $\sigma_k$  auch die Komponente der Richtungsmessung  $\sigma_r$  mit dem adaptierten Theodoliten bzw. Tachymeter berücksichtigen. So spezifizierte Aussagen zur Weisung  $W$ , auf die DIN 18723-7 (1990) fokussiert, geben die erreichbare Genauigkeit von Kreiselazimuten üblicherweise mit Standardabweichungen  $\sigma_a = 0,8 - 1,0$  mgon an (DMT 2004 und 2014). Wenngleich immer nur basierend auf kleinen Stichproben mit fünf bis sieben Messungen, zeigen umfangreiche Erfahrungen eigener Untersuchungen unter realen Bedingungen, dass solche Werte  $\sigma_a$  unter guten Beobachtungsbedingungen (stabiler Aufbau, sorgfältige Horizontierung, akklimatisierter Kreisel, keine äußeren Temperatureinwirkungen, keine gravierenden Windeinwirkungen etc.) zu erreichen sind.

Die meisten der ausgewerteten Stichproben liefern sowohl für den DMT Gyromat 2000, SN 225, in Kombination mit einem Leica T1800 als auch für den DMT Gyromat 5000, SN 5104, in Verbindung mit einem Leica TS15 des Instituts für Geodäsie der UniBw München für die Standardabweichung einer Einzelmessung  $s_a = 0,7 - 1,2$  mgon als Ergebnis. Für die 598 einzelnen, über den Zeitraum mehrerer Jahre erfassten Kreismessungen seitens des Instituts für Geodäsie zur Vortriebskontrolle bei der Auf-fahrung des Gotthard-Basistunnels mit dem DMT Gyromat 2000 in den Portalbereichen und im Tunnel ermitteln Heister und Liebl (2010) den Wert  $s_a = 1,03$  mgon. Bei fünffacher Repetition hat ein Mittelwert somit eine Größenordnung  $s_A = 0,3 - 0,6$  mgon und bei nochmaliger

Mittelung aus Hin- und Rückmessung wird für ein Rohazimut ein Wert  $s_A = 0,2 - 0,4$  mgon erhalten.

Diese Abschätzung der Genauigkeit einer Kreismessung berücksichtigt jedoch noch nicht die Unsicherheit, die sich aus der Berichtigung der Messgröße mit den anzubringenden Korrekturen, Reduktionen und weiteren eventuell systematisch wirkenden Einflussgrößen, z.B. der Horizontalrefraktion, ergibt, um letztlich zu einer Genauigkeitsaussage der Ergebnisgröße  $t$ , dem ebenen Richtungswinkel (siehe Abb. 2), zu kommen. Das Konzept zur Angabe einer Messunsicherheit verlangt auch diese Durchführungs- und Aufbereitungsschritte, deren Genauigkeit sich nicht allein bzw. allenfalls nur bedingt durch Messungshäufung und Mittelbildung steigern lässt, zu quantifizieren. Für die Messunsicherheit  $u_t$ , auch als kombinierte Standardunsicherheit bezeichnet, eines aus den Kreismessungen abzuleitenden Richtungswinkels  $t$  gilt

$$u_t = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{s_A^2 + \sum_{i=1}^b u_i^2}, \quad (2)$$

wenn  $u_A$  die Komponente bezeichnet, die mit statistischen Methoden berechnet werden kann, und  $u_B$  die Komponente darstellt, die ggf. auch auf andere Weise ermittelt werden muss (GUM 2008). Setzt man an dieser Stelle  $u_A = s_A$  für das Rohazimut, verbleibt es, die einzelnen  $i$  Bestandteile der Komponente  $u_B$  vollständig zu erfassen und ihre jeweiligen Beträge  $u_i$  seriös abzuschätzen – was fundierte Kenntnis über den Messprozess impliziert. Siehe hierzu auch Heister (2005). Für Größen mit geringer Auswirkung lässt es der GUM (2008) zu, dass deren Beiträge  $u_i$  vernachlässigt werden dürfen. Bei Kreismessungen ergibt sich, dass der Summand  $u_B^2$  in (2) deutlich größer ist als der Summand  $u_A^2 = s_A^2$ . Zwischen einer nach DIN 18723 (1990) spezifizierten Genauigkeit  $\sigma_a$  und der Messunsicherheit  $u_t$  für einen Richtungswinkel ist also wohl zu unterscheiden.

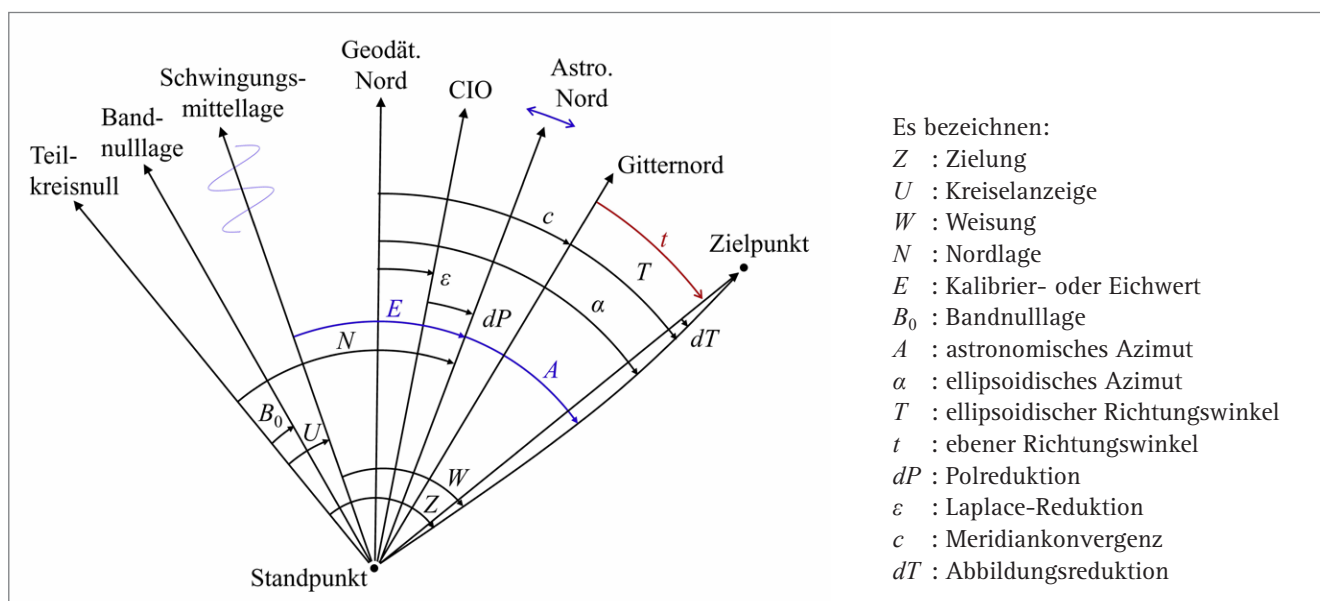


Abb. 2: Winkelbeziehungen bei Kreismessungen

## 2 Winkelbeziehungen bei Kreismessungen

Ohne an dieser Stelle auf die Funktionsweise von Vermessungskreiseln im Detail einzugehen, siehe hierzu z. B. Grillmayer (2003), Zanini (1992), besteht bei einer Orientierungsbestimmung die Aufgabe darin, von der mittleren Schwingungslage der Rotationsachse des Kreisels auf einen Richtungswinkel  $t$  entsprechend der in Abb. 2 dargestellten Winkelbeziehungen zu schließen.

In Verbindung mit einer Instrumentenkonstanten  $E$ , üblicherweise als Eichwert bezeichnet, sensiert ein Vermessungskreisel bei stabilem und lotrechtem Aufbau die instantane astronomische Nordrichtung. Aufgrund der Polbewegung, die sich aus einer zyklischen Polschwankung und einem säkularen Trend in Richtung Westen zusammensetzt, ist die Richtung nach astronomisch Nord nicht erdfest. Die mittlere Erdachse ist durch Vereinbarung mit dem Conventional International Origin (CIO; mittlere Pollage 1900–1905) festgelegt. Erfolgt die Bestimmung des Eichwertes  $E$  auf einer Referenzlinie mit bekanntem, auf den CIO referenziertem Azimut, ist die Polreduktion  $dP$ , wie sie sich zum Zeitpunkt der Überprüfung aus den aktuellen Polkoordinaten  $x_p, y_p$  ergibt, im Eichwert  $E$  enthalten (Caspary et al. 1982, Zanini 1992), womit dieser wegen  $dP(t)$  zeitvariant wird.

In Verbindung mit der Kreiselanzeige  $U$  liefert der Eichwert  $E$  die Nordlage

$$N = U + E = Z - A \quad (3)$$

und damit den Zusammenhang zwischen astronomisch Nord und Teilkreisnull des richtungsnehmenden Systems.

## 3 Korrekturen bedingt durch das Instrument

### 3.1 Temperaturkorrektur

Die Genauigkeit eines Kreiselazimuts wird oft durch herstellenseitig unzureichend kompensierte Temperatureffekte beeinträchtigt (u. a. Grillmayer 2003, Heister 1992). Wie die Abb. 3 für den DMT Gyromat 5000, SN 5104, zeigt, liegt eine solche zusätzliche Verbesserung  $v_T$  im Spektrum der bei Messeinsätzen typischerweise zu erwartenden Temperaturen in und außerhalb eines Tunnels im Bereich  $\pm 1,5$  mgon bezogen auf eine Referenztemperatur von  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ . Diesbezügliche Untersuchungen eines Vermessungskreisels erfolgen im Geodätischen Labor der UniBw München mit dem Prüfling in einer Klimakammer auf einem unabhängig gegründeten Messpfeiler und einem vor einem Sichtfenster aufgebauten Theodolit mittels Autokollimation. Eine Untersuchung mit einem wie in der Abb. 3 dargestellten Ergebnis erstreckt sich über einen Zeitraum von ca. drei Wochen, da nach jeder Temperaturveränderung in der Klimakammer abgewartet wird, bis sich der Vermessungskreisel akklimatisiert hat,

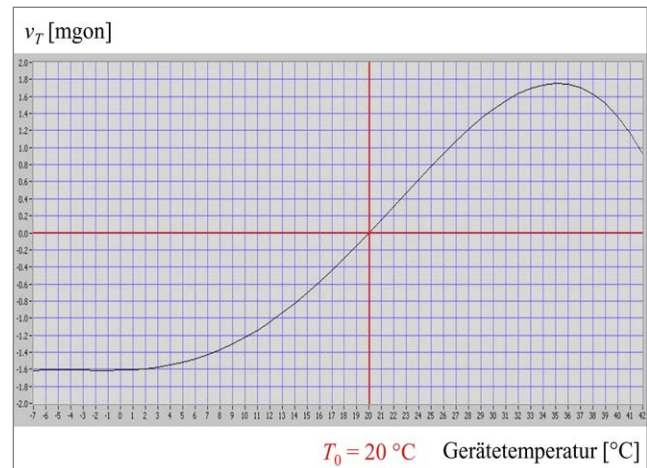


Abb. 3: Zusätzliche Temperaturverbesserung DMT Gyromat 5000, SN 5104, Stand März 2015

um Einlauf- und Hysteresse-Effekte zu vermeiden (siehe Carosio und Ebneter 1998), und mehrere Zyklen gemessen werden. Anders als z. B. bei Grillmayer (2003) und Lienhart und Brunner (2004) erfolgt die Ermittlung der Temperaturverbesserung durch ein höher als 2. Grades aufgelöstes Polynom. Ihre Unsicherheit im Sinne einer Standardabweichung ist mit  $u_{vT} = 0,2$  mgon abzuschätzen. Die Temperaturverbesserung  $v_T$  kommt insbesondere zum Tragen, wenn zwischen den Referenzmessungen an der Erdoberfläche und den Orientierungsbestimmungen im Tunnel größere Temperaturunterschiede gegeben sind.

### 3.2 Nullpunktkorrektur

Bei den Gyromaten von DMT gibt es einen herstellenseitig bestimmten und im Instrument eingegebenen Eichwert  $E_0$ , der den Zusammenhang zwischen der Ablesung der Kreiselanzeige und dem Teilkreisnull des richtungsnehmenden Systems herstellt. Vornehmlich durch alters- und temperaturbedingte Änderungen der Bandnulllage  $B_0$  des ruhenden Kreisels, aber auch durch den Transport eines Kreisels, unterliegt dieser Wert gewissen Veränderungen, die durch wiederkehrende Messungen auf einer Linie mit bekanntem astronomischem Azimut festgestellt werden können. Die Bandnulllage wird in jedem Messzyklus einer Azimutbestimmung zu Beginn erfasst, da das Torsionsmoment des Bandes Einfluss auf die Schwingungsmittellage hat. Der zeitnah zu einem Messeinsatz zu bestimmende Eichwert ist dann

$$E = E_0 + E_{ref}, \quad (4)$$

mit  $E_{ref}$  als Ablage zum Soll-Azimut der Referenzlinie.

Der DMT Gyromat 2000, SN 225, wurde seit seiner Beschaffung in den letzten 14 Jahren bereits ca. 90 Mal auf die Konstanz seines Eichwertes untersucht. Für den DMT Gyromat 5000, SN 5104, liegen zwischenzeitlich bereits 17 Überprüfungen vor. Wie die Abb. 4 zeigt, treten

gegenüber dem herstellereitigen Wert  $E_0$  unregelmäßige Veränderungen auf, die mehrere Milligon betragen können. Die Bestimmung  $E_{ref}$  erfolgt dabei im Hin- und Rückblick mit im Regelfall jeweils fünf Einzelmessungen auf zwangszentrierten Messfeilern mit einem Abstand von 438 m voneinander. Von einer Ausnahme in 2005 abgesehen, gibt es bei zeitnah aufeinanderfolgenden Überprüfungen kaum Sprünge, die betragsmäßig größer als ca. 1 mgon sind. Teilweise erfolgten die Bestimmungen von  $E_{ref}$  ohne dass ein Instrument zwischenzeitlich benutzt wurde. Der Vergleich von  $E_{ref,vorher}$  und  $E_{ref,nachher}$  erlaubt eine Aussage zur Konstanz der Nullpunktkorrektur für eine Kampagne sowie die gesamte Funktionsfähigkeit eines Instrumentes bei einem Messeinsatz einschließlich der An- und Abreise zur Tunnelbaustelle.

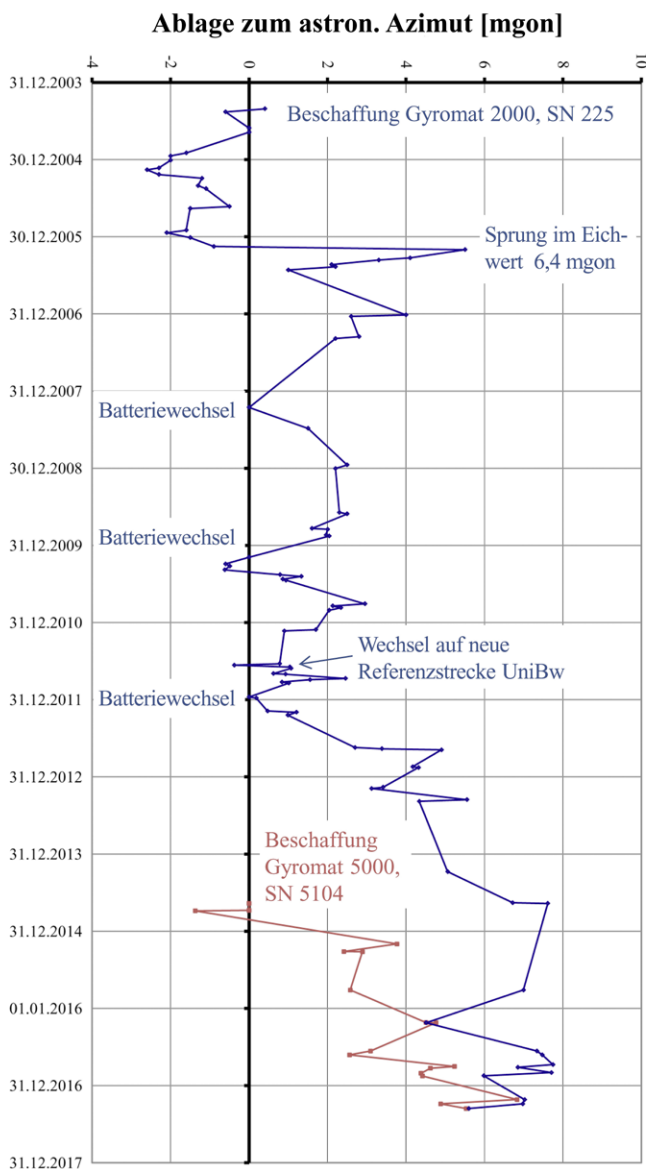


Abb. 4: UniBw M Eichwerthistorie  $E_{ref}$  DMT Gyromat 2000 und DMT Gyromat 5000

## 4 Reduktionen bedingt durch die Messsituation

Mit Messsituation ist im Folgenden umschrieben:

- Der Beobachtungsstandpunkt des Kreisels mit seinen geografischen Koordinaten  $\varphi, \lambda$
- das für die Auswertung vorgegebene Koordinatenreferenzsystem, bestehend aus dem zugrunde gelegten geodätischen Bezugssystem und dem Abbildungssystem in die Ebene,
- die atmosphärischen und sonstigen Bedingungen während der Messungen.

Die Messsituation führt zu einem auf erforderliche Reduktionen, um von der mit  $v_T$  (siehe Abschnitt 3.1) und  $E$  (siehe Abschnitt 3.2) korrigierten Messgröße  $A$  zu der Ergebnisgröße  $t$  zu gelangen, zum anderen auf ein Messkonzept, das die etwaigen sonstigen systematischen Messabweichungen, deren Modellierung sich verschleißt, zumindest reduziert und erkennen lässt, ob solche Einflüsse ergebnisverfälschend wirksam sind. Zu letzterem siehe die Abschnitte 5.1 und 5.2. Da bei Kreismessungen wie auch bei astronomischen Azimutbestimmungen, z.B. mit der Polaris-Methode, die Lotrichtung und die Erdachse die bestimmenden Größen sind, können und müssen sie nach denselben Reduktionen in die Ebene projiziert werden.

### 4.1 Polreduktion

Erfolgt die Bestimmung von  $E_{ref}$  auf einer Referenzlinie mit bekanntem CIO-Azimut, ist die Polreduktion im Eichwert  $E$  enthalten (siehe Abb. 2). Für die Polreduktion von astronomisch Nord auf den CIO gilt (Schödlbauer 1990, Grillmayer 2003)

$$dP["] = \frac{-(x_p \cdot \sin \lambda + y_p \cdot \cos \lambda)}{\cos \varphi} \quad (5)$$

Die vom International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS, [www.iers.org](http://www.iers.org)) herausgegebenen Polkoordinaten  $x_p, y_p$  beziehen auf den CIO als Ursprung. Hierbei zeigen die positive  $x$ -Richtung nach Greenwich und die positive  $y$ -Richtung nach Westen. Die Angaben sind mit einer Unsicherheit von  $0,01''$  spezifiziert, wobei  $1'' \cong 31 \text{ m}$ . In den letzten 25 Jahren schwanken die Polkoordinaten ungefähr in den Grenzen  $-0,30'' < x_p < -0,35''$  und  $-0,05'' < y_p < -0,55''$ . Die Polreduktion ist neben den aktuellen Polkoordinaten von den geografischen Koordinaten des Standpunktes abhängig. Die aufgeführten Variationen entlang des Meridians  $\lambda = 010^\circ \text{E}$  führen, um ein Beispiel zu geben, bei  $\varphi = 60^\circ \text{N}$  ( $\approx$  Oslo) zu  $-0,37 \text{ mgon} < dP < -0,01 \text{ mgon}$ , bei  $\varphi = 48^\circ \text{N}$  ( $\approx$  München) zu  $-0,27 \text{ mgon} < dP < -0,01 \text{ mgon}$  und am Äquator zu  $-0,18 \text{ mgon} < dP < -0,01 \text{ mgon}$ . Die sowohl örtliche als auch zeitliche Variation von  $dP$  ist gering, sodass die Polreduktion für einen wenige Tage



umfassenden Messeinsatz und ein begrenztes Messgebiet als konstant betrachtet werden kann.

Aus praktischen Erwägungen ist es daher möglich, diesen Effekt in dem lokalen, zeitnah bestimmten Eichwert  $E_{lok} = E + \Delta E$  zu subsumieren, wie er auf einer Referenzlinie im Portalnetz zur Bestimmung der Netzverdrehung erforderlich ist (vgl. Grillmayer 2003). Wird in einem Projekt die Referenzlinie in einer weiteren Kreiselkampagne nochmals gemessen und werden die jeweiligen  $E_{lok}$  miteinander verglichen, ist dann jedoch ein  $\Delta dP(t)$  ebenso wie in der Eichwerthistorie (siehe Abb. 4) als Effekt im Ergebnis enthalten.

## 4.2 Laplace-Reduktion

Die Reduktion von einem astronomischen Azimut  $A$  auf ein ellipsoidisches Azimut  $\alpha$  wegen der Lotabweichungen im Beobachtungsstandpunkt lautet (z. B. Zanini 1992, Grillmayer 2003)

$$\varepsilon["] = -\eta \tan \varphi - (\eta \cos A - \xi \sin A) \cot z, \quad (6)$$

mit den Lotabweichungskomponenten  $\eta$  in Ost-West- und  $\xi$  in Nord-Süd-Richtung und  $z$  als Zenitwinkel der Visur vom Stand- zum Zielpunkt. Der erste Summand bewirkt eine Verdrehung in der Horizontalen unabhän-

gig vom Azimut, während der zweite Summand als lotabweichungsbedingter Aufstellfehler zu sehen ist. Zwar sind Kreiselsvisuren zumindest im Tunnel näherungsweise immer als horizontal anzusehen, dennoch ist auch der zweite Summand von einer Größenordnung, die nicht pauschal vernachlässigt werden darf (siehe die exemplarischen Berechnungen in Abb. 5), insbesondere wenn eine Referenzlinie im Portalnetz eine geneigte Visur vorgibt.

Die Helmert'schen Lotabweichungen sind unmittelbar abhängig von der Kenntnis des geodätischen Bezugssystems, da der eine Schenkel der Winkel durch die Flächennormale auf das Bezugsellipsoid definiert ist und der andere Schenkel die physische Lotrichtung ist. Lotabweichungen sind zeitlich konstant, variieren jedoch räumlich derart, dass daraus resultierende Auswirkungen für ein Tunnelbauvorhaben grundsätzlich zu analysieren sind. Bei Unkenntnis der Lotabweichungen und daher Nichtberücksichtigung im Auswertegang, ist die Laplace-Reduktion bezüglich der Linie im Portalbereich Bestandteil der lokalen Netzverdrehung und daher in  $E_{lok}$  enthalten. Vorzugsweise legt man daher die Referenzlinie möglichst parallel zur Trasse, muss dabei jedoch auf eine einwandfreie Anbindung an das Portalnetz denken. Wirksam sind dann allein die Variationen  $\Delta\eta, \Delta\xi$  entlang der Trasse. Unter Umständen kommt es bei den Aufstellungen im Tunnel zu Abständen von mehreren Kilometern zum Portalbereich bzw. den Portalbereichen bei gegenseitigem

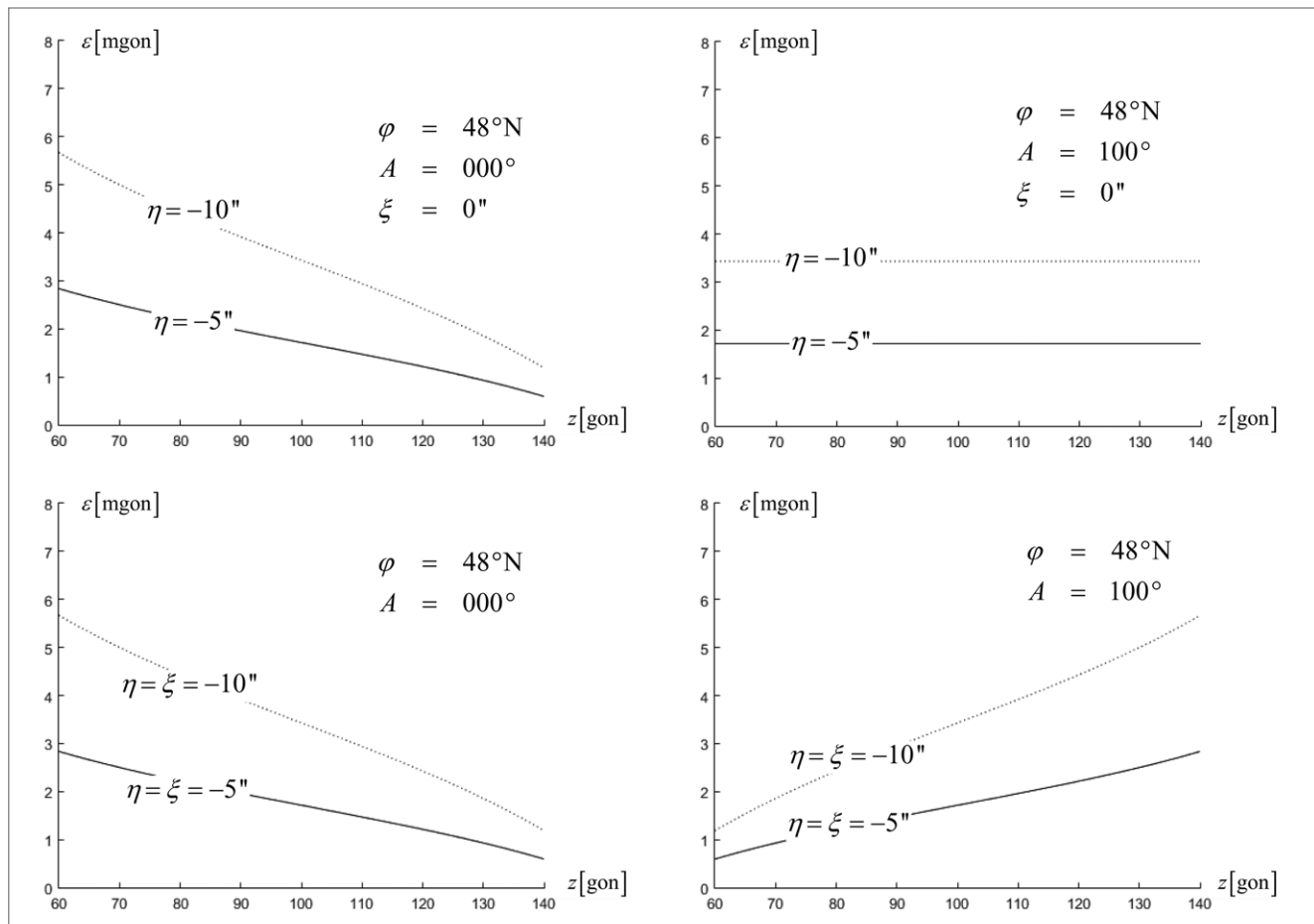


Abb. 5: Exemplarische Berechnungen zur Laplace-Reduktion

Vortrieb. Bei gegenseitigem Vortrieb ist daher auch wegen der Lotabweichungen das Anlegen je einer Referenzlinie in den Portalbereichen zu empfehlen.

Stehen keine Lotabweichungen  $\eta, \zeta$  in einem Projekt zur Verfügung, was häufig der Fall ist, und handelt es sich um ein Projekt in Deutschland, das im amtlichen Bezugssystem projiziert ist, können die Lotabweichungsvariationen  $\Delta\eta, \Delta\zeta$  behelfsweise mit Hilfe der Web-Seite <http://gibs.bkg.bund.de/geoid/gscmp.php?p=g> des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) zur Onlineberechnung von Quasigeoidhöhen mit dem GCG2016 ermittelt werden. Das German Combined QuasiGeoid 2016 (GCG2016) repräsentiert die Höhenbezugsfläche NHN der amtlichen Höhen mit einer Gitterweite von  $1 \times 1 \text{ km}^2$ . Mit bekannten ellipsoidischen Koordinaten  $B, L, h$  wird die Geoidhöhe  $\zeta$  für einen Punkt berechnet und aus dem Vergleich zweier Geoidhöhen  $\zeta_1$  und  $\zeta_2$  resultiert der horizontale Gradient des Quasigeoids, was als Winkel wiederum der azimuthalen Lotabweichungsänderung  $\Delta\theta$  entspricht. Es treten bei linearer Interpolation horizontale Gradienten der Quasigeoidhöhen bis zu maximal  $10 \text{ cm/1 km}$  auf (Liebsch 2016), was folglich eine azimuthalen Lotabweichungsänderung von  $\Delta\theta = 20'' = 6,7 \text{ mgon}$  auf dieser Distanz ausmacht. Die Genauigkeit des GCG2016 wird im Gebirge mit  $2 \text{ cm}$  angegeben. Es ist zu beachten, dass das global definierte GRS80, das den UTM-Koordinaten zugrunde liegt, das Quasigeoid in Deutschland schlechter approximiert, als es das regional definierte Bessel-Ellipsoid getan hat, und in der Folge Geoidhöhen und Neigungen des Quasigeoids auch bei Gebieten mit nur kleiner Ausdehnung zu nicht ohne weiteres zu vernachlässigenden Effekten gegenüber ellipsoidischen Höhenunterschieden führen. Dies überträgt sich entsprechend auf die Variationen der Lotabweichungen.

In der Abb. 5 sind für einen Ort  $\varphi = 48^\circ \text{N}$  die Beträge der Laplace-Reduktion für Zenitwinkel im Bereich zwischen  $60 \text{ gon}$  und  $140 \text{ gon}$  bei einem Nord-Süd-Azimut ( $A = 100^\circ$ ) und einem Ost-West-Azimut ( $A = 100^\circ$ ) aufgetragen für angenommene Werte für  $\eta$  und  $\zeta$ . Auch bei diesen moderaten Werten für die Lotabweichungskomponenten, die bei  $10''$  einem horizontalen Gradienten des Quasigeoids von  $4,8 \text{ cm/1 km}$  entsprechen, resultieren auch für horizontale Visuren Beträge für die Laplace-Reduktion, die in der Größenordnung einiger Milligon liegen.

An der Erdoberfläche werden Lotabweichungen z. B. mittels einer digitalen Zenitkamera bestimmt oder aus einem Geoidmodell prädiert. Für die Aufstellung eines Kreisels in Tunneln ist ggf. die Berücksichtigung der Lotkrümmung erforderlich, um auf die im Erdinneren gültigen Werte  $\eta, \zeta$  zu schließen (u. a. Carosio und Ebner 1998). Die Lotabweichungen eines Messgebietes sind durch das Erdschwerefeld korrelierte Größen. Ihre Nachbarschaftsgenauigkeit kann für gemessene Werte mit  $u_\eta = u_\zeta \approx 0,5''$  und für prädierte Werte mit  $u_\eta = u_\zeta \approx 1,0''$  abgeschätzt werden. Im Alpenraum ( $\tan \varphi \approx 1$ ) und bei horizontalen Visuren ( $z \approx 100 \text{ gon}$ ) überträgt sich dies in

gleicher Größenordnung auf die Standardunsicherheit  $u_e$ , für einen Ort mit  $\varphi \approx 63^\circ \text{N}$  kommt es zu einer Verdoppelung.

### 4.3 Meridiankonvergenz

Um das ellipsoidische Azimut  $\alpha$  in den ellipsoidischen Richtungswinkel  $T$  zu überführen (siehe Abb. 2), ist die Meridiankonvergenz anzubringen (Großmann 1976). Für die verebnete Reduktion gilt

$$c = \sin \varphi \cdot \Delta\lambda + \cos^2 \varphi \cdot \sin \varphi \cdot \frac{\Delta\lambda^3}{3 \cdot \rho^2} (1 + 3 \cdot e'^2 \cdot \cos^2 \varphi) + \dots \quad (7)$$

Zwar ist die Meridiankonvergenz betragsmäßig gewöhnlich die größte anzubringende Reduktion, jedoch kann die Berücksichtigung  $u_c$  im Unsicherheitsbudget im Allgemeinen unterbleiben, da die in (7) eingehenden Größen als sehr gut bekannt vorausgesetzt werden können.

### 4.4 Reduktion wegen der Zielpunkthöhe

Für eine Reduktion des Azimuts in der Richtung des Vertikalschnittbogens bei einer Zielpunkthöhe  $h_j$  gilt nach Schödlbauer (1984)

$$dA [\text{mgon}] = \frac{\rho^{\text{mgon}} e'^2}{2 \cdot N_B} \cdot h_j \cdot \cos^2 \varphi \cdot \sin(2 \cdot A) \approx 0,0335 \cdot h_j [\text{km}] \cdot \cos \varphi \cdot \sin(2 \cdot A). \quad (8)$$

Hierin sind wie in (7) die 2. numerische Exzentrizität und  $N_B$  der Querkrümmungsradius des Bezugsellipsoids in der geografischen Breite  $\varphi$ . Wie anhand der Näherungslösung zu überschlagen, erhält man für die Reduktion  $dA$  mit  $h_j < 5.000 \text{ m}$  in mittleren Breiten einen Wert  $< 0,1 \text{ mgon}$ . In der projizierten Wiedergabe der Winkelbeziehungen in Abb. 2 ist die Reduktion  $dA$  bezüglich des Zielpunktes nicht dargestellt. Wenngleich aus formalen Gründen mitzuführen, sind  $dA$  und  $u_{dA}$  von nachgeordneter Bedeutung und bei pragmatischer Sicht sowohl bezüglich  $t$  als  $u_t$  zu vernachlässigen.

### 4.5 Abbildungsreduktion

Der ebene Richtungswinkel  $t$  vom Stand- zum Zielpunkt wird aus dem ellipsoidischen Richtungswinkel  $T$  durch eine von der Art der Abbildung abhängige weitere Reduktion erhalten. Für eine konforme Abbildung, z. B. für UTM-Koordinaten, gilt

$$dT [\text{mgon}] = \frac{(2 \cdot y_z + y_s) \cdot (x_z - x_s)}{6 \cdot R_B^2} \approx \frac{y_m \cdot \Delta x}{2 \cdot R_B^2} \cdot \rho^{\text{mgon}}. \quad (9)$$

Darin sind  $y_m$  der mittlere Abstand von Stand- und Zielpunkt vom Hauptmeridian,  $\Delta x$  ihr Abszissenunterschied und  $R_B$  der Radius der Gauß'schen Schmiegungskugel (Großmann 1976). Am UTM-Zonenrand, wo die Richtungsreduktion am größten ist, ergibt sich mit  $\Delta x \leq 1$  km, was bei Orientierungskontrollen stets gegeben sein sollte, ein Wert von  $dT < 0,2$  mgon. Angesichts der Genauigkeit, mit der sowohl Stand- als auch Zielpunktkoordinaten im Regelfall gegeben sind, ist im Unsicherheitsbudget von  $u_{dT} < 0,1$  mgon auszugehen, was wegen Geringfügigkeit ebenfalls vernachlässigt werden darf.

## 5 Durchführung von Kreismessungen

### 5.1 Horizontalrefraktion

Die durch einen horizontalen Temperaturgradienten induzierte Ablenkung eines Zielstrahls kann in Tunneln zu systematischen Messabweichungen führen, die speziell bei wandnahen Visuren selbst bei nur geringen Gradienten eine Größenordnung mehrerer Milligon erreichen können (Heister 1997, Heunecke et al. 2008). Für eine Zielstrahlkrümmung  $\gamma$  aufgrund von Dichteunterschieden der Luft gilt in allgemeiner Schreibweise

$$\gamma = \int_{x=0}^{x=l} \frac{\partial n}{\partial y} \cdot dx = \frac{\partial n}{\partial y} \cdot l, \quad (10)$$

wobei ein konstanter Brechungsgradient von  $10^{-7}$  einem ungefähr gleichbleibenden Temperaturgradienten von 0,1 K/m über der gesamten Distanz entspricht. Bei einer Distanz  $l$  und kreisbogenförmiger Ablenkung (siehe Abb. 6) führt dies zu einer Ablage

$$z = \frac{\partial n}{\partial y} \cdot \frac{l^2}{2}. \quad (11)$$

Beispiel:  $\frac{\partial n}{\partial y} = 10^{-7} \approx 0,1$  K/m und  $l = 300$  m führen auf  $z = 4,5$  mm und somit zu  $\frac{1}{2}\gamma \approx 1$  mgon.

Ein Refraktionswinkel  $\delta$  ist eine Funktion von Parametern, die in der Praxis weder mit der erforderlichen Güte

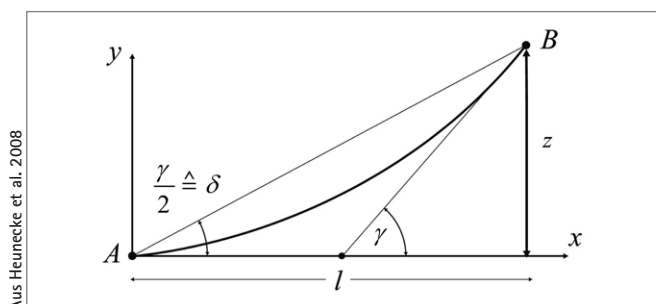


Abb. 6: Einfluss der Refraktion bei optischen Zielungen

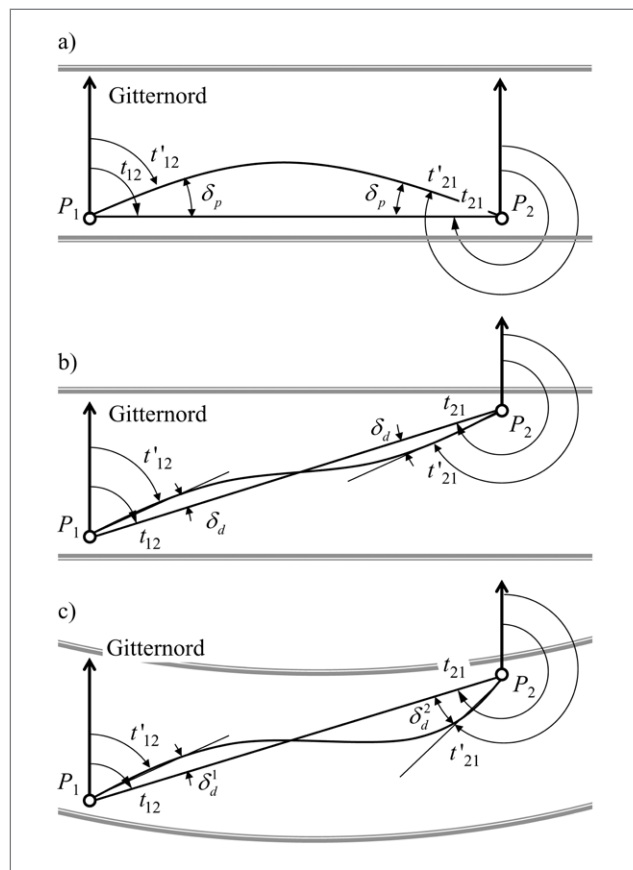


Abb. 7: Wirkung der Horizontalrefraktion

noch Dichte und zeitlicher Auflösung erfasst werden können, um die Horizontalrefraktion als Korrektur zuverlässig modellieren zu können. Maßgebliche Einflussgröße ist der Temperaturgradient (siehe Heister 1997). Optimal für eine Visur ist die Tunnelmitte, wo kein Brechungs- bzw. Temperaturgradient wirksam ist. Dies bedingt jedoch einen Stativaufbau über Bodenpunkten und führt unmittelbar zu einer Abwägung der Unsicherheiten aus den Zentrierungen durch den Stativaufbau gegenüber den Unsicherheiten, die aus der Horizontalrefraktion erwachsen, wenn auf zwangszentrierten Konsolen im Ulmenbereich zu beobachten ist. Unter der Annahme symmetrischer Verhältnisse, bei der sich der Temperaturgradient nicht längs der Trasse zwischen den Punkten  $P_1$  und  $P_2$  ändert, ergibt sich bei einer wandparallelen Visur die in Abb. 7a dargestellte Idealisierung. Es sind  $t_{12}$ : gesuchter Richtungswinkel von  $P_1$  nach  $P_2$ ,  $t'_{12}$ : Hinmessung, um  $\delta$  verfälscht,  $t_{21}$ : Rückmessung, um  $\delta$  verfälscht.

Für den gesuchten Richtungswinkel, für den ja allgemein die Bedingung

$$t_{12} = t_{21} - 200 \text{ gon} \quad (12)$$

bekannt ist, gilt in Abb. 7a wegen  $t_{12} = t'_{12} + \delta_p$  und  $t_{21} = t'_{21} - \delta_p$  (Heister 1992) für den bezüglich des unterstellten Refraktionsmodells fehlerfreien Richtungswinkel

$$t_{12} = \frac{t'_{12} + t'_{21} - 200 \text{ gon}}{2}, \quad (13)$$

und für den Refraktionswinkel

$$\delta_p = \frac{1}{2}(t'_{21} - t'_{12} - 200 \text{ gon}). \quad (14)$$

Diagonale Visuren sind deutlich geringer refraktionsbehaftet als wandparallele Visuren, d.h. es ist  $\delta_d < \delta_p$ . In einer refraktionsbehafteten Situation nach Abb. 7b wird wegen  $t_{12} = t_{12} + \delta_d$  und  $t_{21} = t_{21} + \delta_d$  (Heister 1992)

$$t_{12}^* = \frac{t'_{12} + t'_{21} - 200 \text{ gon}}{2} + \delta_d = t_{12} + \delta_d, \quad (15)$$

also ein um den unbekannten Refraktionswinkel  $\delta_d$  verfälschter Richtungswinkel erhalten.

Variiert man die Situation noch dahingehend, dass eine Trasse im Grund- und Aufriss Krümmungen hat und die Refraktionsverhältnisse auch schon dadurch bedingt nicht mehr symmetrisch für eine Visur sind wie in Abb. 7b, ergibt sich nach Abb. 7c mit  $\delta_d^1 \neq \delta_d^2$

$$t_{12}^* = \frac{t'_{12} + t'_{21} - 200 \text{ gon}}{2} + \frac{\delta_d^1 + \delta_d^2}{2} = t_{12} + \bar{\delta}_d. \quad (16)$$

Bei gegenseitigen und zudem möglichst gleichzeitigen Kreismessungen im Hin- und Rückblick einer Linie wird ein Refraktionseinfluss erkennbar und nur unter der Annahme kreisbogenförmiger Verhältnisse bei einer Messanordnung nach Abb. 7a durch Mittelbildung eliminiert. Geht man von dem Erwartungswert  $E\{\delta_d\} = 0$  aus, also  $E\{t_{12}^*\} = E\{t_{12}\}$ , erlaubt ein Vergleich der Differenz aus Hin- und Rückmessung mit der Bedingung (12) eine Bewertung, ob von einem signifikanten Refraktionseinfluss ausgegangen werden muss und ob ggf. die Messanordnung zu modifizieren ist, z.B. ein Wechseln zur Tunnelmitte. Eine Berechnung von  $\delta_d$  und  $\bar{\delta}_d$  ist nicht möglich, da der deterministische Anteil des Vergleichs nicht von den zufälligen Anteilen getrennt werden kann. Kreismessungen sind folglich auch geeignet, Refraktionseinflüsse aufzudecken, wie diese auch bei den tachymetrischen Visuren im Tunnel wirksam sind und dort möglicherweise unerkannt bleiben.

## 5.2 Messkonzept für eine Kreiselkampagne

Zur Gewährleistung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Kreismessungen – letzteres vor allem in Hinblick auf etwaige Entscheidungen bei Diskrepanzen eines Richtungswinkels  $t$  nach Abb. 2 im Vergleich zu den tachymetrischen Messungen – hat sich das folgende Vorgehen für die Durchführung einer Kreiselkampagne bewährt und bietet eine durchgreifende Kontrolle des Messprozesses (siehe auch Heister und Liebl 2010):

- Zeitnahe Überprüfung des Instruments durch Bestimmung von  $E_{ref,vorher}$
- Bestimmung einer lokalen Netzverdrehung durch Kreismessungen auf einer Referenzlinie im Portalbereich mit dem Ergebnis  $E_{lok,vorher} = E + \Delta E_{vorher}$
- Messung einer Linie und ggf. weiterer im Vortriebsnetz,
- erneute Messung der Referenzlinie im Portalbereich; Ergebnis  $E_{lok,nachher} = E + \Delta E_{nachher}$
- erneute zeitnahe Überprüfung auf einer astronomischen Referenzlinie; Ergebnis  $E_{ref,nachher}$

Die Linien sollten grundsätzlich im Hin- und Rückblick gemessen werden, und die Azimutbestimmung ist bei hohen Genauigkeitsanforderungen, wie diese bei Tunnelbauvorhaben regelmäßig gegeben sind, jeweils fünffach bei Neuinitialisierung des Instruments (DMT Messprogramm 1) zu wiederholen. Sind ausreißende Messwerte vorhanden, sollten weitere Repetitionen erfolgen. Die Richtungsmessungen mit dem Theodolit bzw. Tachymeter sollten stets in beiden Fernrohrlagen durchgeführt werden, um die Achsfehler zu kompensieren. Die zeitnahe Bestimmung und Berücksichtigung eines lokalen Eichwertes  $E_{lok}$  hat zur Folge, dass mit einem Vermessungskreis lediglich Richtungsdivergenzen aus dem Portalnetz in den Tunnel übertragen werden (vgl. Grillmayer 2003). Mit der Annahme, dass über die Zeitachse der Messungen  $dP = \text{const.}$  ist, wird die Polreduktion in den Differenzen nicht wirksam. Bezüglich der Laplace-Reduktion kommen jedoch die Lotabweichungsdifferenzen der Punkte im Portalnetz und im Tunnel zum Tragen, sodass diese Reduktion grundsätzlich anzubringen ist. Die Unsicherheit, mit der  $E_{lok}$  bestimmt wird, geht in jede Bestimmung eines untertägigen Richtungswinkels  $t$  ein.

Letztlich gilt für die Bestimmung eines Richtungswinkels zur Vortriebskontrolle

$$t = A + v_T + E_{lok} + \varepsilon - dA - c + dT. \quad (17)$$

Wie Heister und Liebl (2010) zeigen, kann mit einem solchen Messkonzept unter Beachtung der aufgeführten Korrekturen und Reduktionen und sorgfältiger Durchführung, insbesondere auch in Bezug auf Horizontierung, Zentrierung und Anzielung,  $u_t \leq 1,0 \text{ mgon}$  im Sinne einer kombinierten Standardunsicherheit für den gesuchten Richtungswinkel in einem Vortriebsnetz erreicht werden.

## 5.3 Registrierung und Auswertung der Messwerte

Die genannten Vermessungskreis des Instituts für Geodäsie verfügen über ein an die RS-232-Schnittstelle angeschlossenes Bluetooth-Modul, sodass mit einem Tablet oder PDA nach einer erfolgten Azimutbestimmung und Anzielung des Zielpunktes sämtliche Messwerte drahtlos ausgelesen werden können. Insbesondere sind dies das Rohazimut  $A$  des Kreisels und die Zielungen  $Z$  in erster



und zweiter Fernrohrlage des Theodoliten bzw. Tachymeters, aber auch z.B. die Nordlage  $N$ , die Bandnulllage  $B_0$ , die interne Temperatur und die Temperaturdrift. Dies erlaubt dem Operateur eine sofortige erste Bewertung, z.B. in Bezug auf die Qualität einer Messreihe sowie etwaige Ausreißer. Die drahtlose Kommunikation ermöglicht zudem die ständige Kontrolle des Messprozesses, speziell der Batteriekapazitäten des Kreisel- und des Theodoliten bzw. Tachymeters, ohne dass der Operateur ständig unmittelbar am Instrument stehen muss. Während der Leica T1800 eine manuelle Anzielung der Gegenstation verlangt, verfügt der Leica TS15 bei dem DMT Gyromat 5000 über die Möglichkeit zur automatisierten Zieleinstellung auf ein Prisma (Automatic Target Recognition, ATR).

Die ausgelesenen Daten können nach Abschluss der Messungen mit einem eigenen Programm (LabView Umgebung mit integrierten Matlab-Skripten) umgehend bis zum gesuchten Richtungswinkel weiterverarbeitet werden. Dabei werden die in den Abschnitten 3 und 4 genannten Korrekturen und Reduktionen wie beschrieben berücksichtigt. Gängige Koordinatenreferenzsysteme sind hinterlegt, sodass z.B. auch die Berechnung der Meridiankonvergenz, der Höhenreduktion und der Abbildungsreduktion bei der schiefachsigen Mercatorprojektion der Schweiz (LV95) oder den niederländischen Reichsdreieckskoordinaten (RD) möglich sind. Endgültige Ergebnisse und Bewertungen sind jedoch erst möglich, wenn das Ergebnis der abschließenden Messung auf der Referenzlinie der UniBw M vorliegt.

#### 5.4 Anordnung von Kreismessungen im Vortriebsnetz

Kreismessungen sind aufwändig. Das kombinierte Ergebnis von Tachymetrie und Kreismessungen muss die Anforderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Auffahrung und des Durchschlags erfüllen. Der Zeitaufwand für eine Messserie von fünf Wiederholungen beträgt ca. 1 Stunde, für eine Linie bei Wechsel des Instrumentes ist inklusive der Rüstseiten von einem Zeitbedarf von ca. 4 Stunden auszugehen, wenn zuvor dafür Sorge getragen wurde, dass sich der Vermessungskreisell akklimatisieren konnte. DMT (2004 und 2014) empfiehlt für einen Temperaturunterschied von 10 K eine Akklimatisierungszeit von 45 Minuten. Bei der simultanen Verwendung von zwei Instrumenten kann die Messung einer Linie auf ca. 2 Stunden verkürzt werden, was bei kurzen Wartungsintervallen des Baugeschehens ggf. einen Aspekt darstellt. In jedem Fall ist darauf zu achten, dass Erschütterungen durch das Baugeschehen die Nordsuche des Kreisels nicht beeinflussen.

Um zu einer Aussage zu kommen, in welchen Abständen eines Vortriebsnetzes es sinnvoll ist, einen kreiselgestützten Richtungswinkel zu bestimmen, ist die Fehlerfortpflanzung eines einseitig angeschlossenen Polygonzugs gleicher Seitenlänge (Gruber und Joeckel 2007)

$$q_T = L \cdot \frac{\sigma_w}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{n_T \cdot (2 \cdot n_T - 1)}{6 \cdot n_T - 1}} \approx L \cdot \frac{\sigma_w}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{n_T}{3}} \quad (18)$$

der entsprechenden Formulierung eines Kreisel- bzw. Bussolenzuges (Heunecke et al. 2008, Heister und Liebl 2010)

$$q_K = L \cdot \frac{\sigma_K}{\rho} \cdot \frac{1}{\sqrt{n_K}} \quad (19)$$

gegenüberzustellen. Es bedeuten

$q_T$  : Querabweichung des Polygonzugs [m],

$q_K$  : Querabweichung des Kreiselzuges [m],

$\sigma_w$  : Standardabweichung eines Brechungswinkel [mgon],

$\sigma_K$  : Standardabweichung eines Kreiselazimutes [mgon],

$L$  : Gesamtlänge des Zuges [m],

$n_T$  : Anzahl der Seiten des Polygonzugs,

$n_K$  : Anzahl der gekreiselten Seiten.

Die Relation der Querabweichungen  $q_T$  und  $q_K$  ist gegeben durch

$$\frac{q_T}{q_K} \approx \frac{\sigma_w}{\sigma_K} \cdot \sqrt{\frac{n_T}{3}} \cdot \sqrt{n_K} \quad (20)$$

Für die Äquivalenz  $\frac{q_T}{q_K} = 1$  bei  $n_K = 1$  ist die Relation der Standardabweichung eines Brechungswinkels  $\sigma_w$  zur Standardabweichung eines aus Kreismessungen abgeleiteten Richtungswinkels  $\sigma_K$  bestimmend dafür, jede wievielte Seite  $n_T$  eines Polygonzugs anhand dieser (einfachen) fehlertheoretischen Überschlagsrechnungen gestützt werden sollte. Mit  $\sigma_K = 1,0$  mgon ergeben sich die Werte der Tab. 1.

Tab. 1: Abstände für Kreiselstützungen

$\sigma_w$ [mgon]	0,4	0,5	0,6
$n_T$	19	12	8

Bei der Übertragung dieses Ergebnisses auf reale Situationen ist zu beachten:

- Die Standardabweichungen  $\sigma_w$  und  $\sigma_K$  sind durch ihre Messunsicherheiten zu ersetzen, wobei  $\sigma_K = u_t \approx 1,0$  mgon und bei entsprechender Abschätzung bezüglich der Brechungswinkel  $\sigma_w \approx 0,5 - 0,6$  mgon realistische Werte sind.
- Da zumeist auch übergreifende tachymetrische Messungen im Vortriebsnetz gegeben sind, ist anstelle von (18) für  $q_T$  das Ergebnis einer Simulationsausgleichung einzusetzen und (19) gegenüberzustellen.
- (18) bzw. eine Simulationsausgleichung liefern im Allgemeinen als Ergebnis, dass die heutigen Anforderungen an die Querabweichung beim Durchschlag bereits ab einer Tunnellänge von ca. 2 km allein mit tachymetrischen Messungen nicht sicher eingehalten werden können, wenn realistische Werte für die Unsicherheit der Brechungswinkel angesetzt werden.

- Der Wert von Kreismessungen liegt vor allem in einer von den tachymetrischen Messungen vollständig unabhängigen Kontrolle, die z. B. sonst nicht erkannte systematische Messabweichungen aufzudecken hilft.

Unabhängig von Überlegungen, wie diese für geeignete Abstände der Kreiselstützungen nach Tab. 1 anzuordnen sind, empfiehlt sich die Kontrolle einer Linie im Vortriebsnetz unmittelbar hinter den Tunnelmündern, was generell als eine thermisch unruhige Problemzone für optische Visuren zu betrachten ist, und so rechtzeitig vor einem Durchschlag, dass eine etwaige Korrekturfahrt noch eingeleitet werden kann. Schor (1992) empfiehlt darüber hinaus einen Kreiseleinsatz nach Kurven oder sonstigen Folgen von kurzen, die Genauigkeit der Richtungsübertragung beeinträchtigenden Polygonseiten. Die vorstehenden Überlegungen bestätigen zudem, dass es zweckmäßig ist, eher wenige, aber möglichst genaue Polygonseiten zu messen. Darauf ist das in Abschnitt 5.2 beschriebene Messkonzept ausgelegt.

## 6 Fazit

Der Funktion eines Vermessungskreisels liegt das natürliche Koordinatensystem des Erdkörpers zugrunde, die gesuchten Richtungswinkel beziehen sich auf das Koordinatenreferenzsystem, in dem ein Bauvorhaben projektiert und zu realisieren ist. Die Beträge anzubringender Korrekturen und Reduktionen bei Kreismessungen im Tunnelbau zu dieser Überführung der Bezugssysteme, aber auch der Einfluss der Horizontalrefraktion, können je nach Messsituation jeweils bereits für sich allein ein Mehrfaches der Standardabweichung  $\sigma_a$  nach DIN 18723-7 (1990) ausmachen. Dies macht es erforderlich, sich intensiv mit der Auswertung, der Messanordnung und dem Konzept einer Kreiselkampagne auseinanderzusetzen. Bei sorgfältiger Beachtung aller Umstände ist eine Messunsicherheit von  $u_t \leq 1,0$  mgon für die interessierenden Richtungswinkel erreichbar. Da für üblicherweise eingesetzte Vermessungskreisele betragsmäßig  $\sigma_a \approx u_t$  ist, führt dies auf Anwenderseite leicht zu Verwirrungen.

Der simultane Einsatz zweier Vermessungskreisele ermöglicht zwei weitgehend unabhängige Ergebnisse durch Einzelauswertung, eine Optimierung der Messanordnung »gegenseitig-gleichzeitig« durch Kombination und eine Genauigkeitssteigerung durch Mittelung. Vor allem aber wird die Zuverlässigkeit nochmals gesteigert, was angesichts der Tragweite beim Umgang mit dem Ergebnis einer Vortriebskontrolle von hoher Relevanz ist.

## Literatur

Carosio, A., Ebner, F.: Geodetic methods, mathematical models & quality management for underground surveying in the Swiss AlpTransit project. XXI Int. FIG Congress, Com. 6, Brighton 1998, pp. 407–426.

- Caspary, W., Heister, H., Schwintzer, P.: Zur Netzorientierung durch Kreiselazimute. In: zfv, Heft 10, 1982, S. 461–468.
- DIN 18723-7: Feldverfahren zur Genauigkeitsuntersuchung geodätischer Instrumente – Vermessungskreisele. Beuth-Verlag Berlin, 1990.
- DMT (Hrsg.): Operator's guide Gyromat 2000, March 2004.
- DMT (Hrsg.): User manual Gyromat 5000, August 2014.
- Grillmayer, E.: Untersuchungen systematischer Fehlereinflüsse bei Messungen mit dem Kreisel DMT Gyromat 2000. Shaker-Verlag Aachen (Ingenieurgeodäsie TU Graz), 2002, ISBN 3-8322-1588-3, 2003.
- GUM: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurements. BIPM (Ed.): JCGM 100, 2008.
- Großmann, W.: Geodätische Rechnungen und Abbildungen in der Landesvermessung. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Stuttgart, 1976, 3. Aufl.
- Gruber, F.J., Joeckel, R.: Formelsammlung für das Vermessungswesen. Teubner Stuttgart, 13. Aufl., 2007. ISBN 978-3-8351-0119-0.
- Heister, H.: Zur Anordnung von Kreismessungen unter besonderer Berücksichtigung von systematischen Fehlereinflüssen. In: Matthias/Grün (Hrsg.): Ingenieurvermessung 92, Ferd. Dümmler Verlag Bonn, ISBN 3-427-78151-8, Beitrag I7, 1992.
- Heister, H.: Experimentelle Untersuchungen zur Horizontalrefraktion im Tunnelbau. IX. Int. Geodätische Woche Obergurgl. Institutsmitteilungen Institut für Geodäsie der Universität Innsbruck, Heft 17, S. 79–91, 1997.
- Heister, H.: Zur Messunsicherheit im Vermessungswesen (I) und (II). Geomatik Schweiz, Heft 11, 2005, S. 604–607, Heft 12, 2005, S. 670–673.
- Heister, H., Lechner, W., Schödlbauer, A.: Zur Genauigkeit und Kalibrierwertstabilität automatisierter Vermessungskreisele. In: Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 38-2: Moderne Verfahren der Landesvermessung. Neubiberg 1990, S. 501–528.
- Heister, H., Liebl, W.: Zur Messunsicherheit von Kreismessungen im Gotthard-Basistunnel. Geomatik Schweiz, Heft 12, 2010, S. 586–593.
- Heunecke, O.: Aufgaben und Herausforderungen der Tunnelvermessung. In Schwarz (Hrsg.): Nachhaltigkeit und Innovation in Baubetrieb und Tunnelbau. Schriftenreihe Institut für Baubetrieb, Band Nr. 3, München 2014, S. 349–361. ISBN 978-3-8439-1418-5.
- Heunecke, O., Linkwitz, K., Schwarz, W.: Geodätische Überwachung von geotechnischen Bauwerken. Grundbautaschenbuch. 7. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, 2008. ISBN 978-3-433-01843-9, S. 559–652.
- Liebsch, G.: Perspektiven, Vorteile und Möglichkeiten des Raumbezugs 2016. Vortrag INTERGEO® Hamburg, 2016 (Zugriff 11/2016 Vortragsarchiv Kongress unter [www.intergeo.de](http://www.intergeo.de)).
- Lienhart, W., Brunner, F.K.: Temperaturabhängigkeit der Kreismessungen mit einem GYROMAT 2000. In: zfv, Heft 4, 2004, S. 235–241.
- Neuhierl, T.: Eine neue Methode zur Richtungsübertragung durch Kopplung von Inertialmesstechnik und Autokollimation. Dissertation Technische Universität München. <http://mediatum.ub.tum.de/doc/601086/601086.pdf>, 2005.
- Schödlbauer, A.: Funktionsprinzipien automatisierter Vermessungskreisele. In: Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 38-2: Moderne Verfahren der Landesvermessung. Neubiberg 1990, S. 443–469.
- Schödlbauer, A.: Rechenformeln und Rechenbeispiel zur Landesvermessung. Teil 3: Punkteigenschaften im System der Gaussischen und der geographischen Koordinaten. Wichmann-Verlag, Karlsruhe, ISBN 3-87907-12-5, 1984.
- Schor, U.: Absteckung langer Tunnel. ETH Zürich, Bericht Nr. 205, 1992.
- Zanini, M.: Hochpräzise Azimutbestimmung mit Vermessungskreisen. ETH Zürich, Bericht Nr. 209, 1992.

## Kontakt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke | Dipl.-Ing. Wolfgang Liebl  
Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie  
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg  
[otto.heunecke@unibw.de](mailto:otto.heunecke@unibw.de) | [wolfgang.liebl@unibw.de](mailto:wolfgang.liebl@unibw.de)

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter [www.geodaesie.info](http://www.geodaesie.info).