

Quo vadis Gotthard Basistunnel? – Wie die Richtungsübertragung für den längsten Tunnel der Welt sichergestellt wird

Theresa Neuhierl



Zusammenfassung

Die Vermessung von und in Tunneln ist von jeher eine große Herausforderung an die Vermessungsingenieure. Die Messungen können jeweils nur auf einer Seite an die übergeordneten Koordinatennetze der Außenwelt angebunden werden. Mit zunehmend vorangetriebenen Tunnel werden die Tunnelnetze immer länger und aufgrund der Fehlerfortpflanzung wächst die Unsicherheit in den Koordinaten. Die schwierigen meteorologischen Verhältnisse im Tunnel verschlechtern zudem die Messbedingungen.

Die Messungen unter Tage werden daher üblicherweise durch Präzisionsvermessungskreisel gestützt. Diese Vermessungskreisel unterliegen dem Einfluss der Lotabweichungen, insbesondere dann, wenn große Massen oberhalb der Tunnelröhre liegen. Im Hochgebirge können diese Abweichungen 20 mgon und mehr erreichen. Daraus resultieren große Restunsicherheiten bei Bauvorhaben im Alpenbereich, wie beispielsweise beim Gotthard-Basistunnel in der Schweiz.

Durch die große Länge der einzelnen Tunnelabschnitte können schon kleine Abweichungen in der Richtung eine große Abweichung in der Lage hervorrufen. Die Bauherrin AlpTransit Gotthard AG strebte daher eine unabhängige Kontrolle an. Diese wurde vom Lehrstuhl für Geodäsie der TU München in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Geodätische Messtechnik und Ingenieurgeodäsie der ETH Zürich (geomETH) in Form einer neuen Methode zur Richtungsübertragung entwickelt und erfolgreich getestet. Bei diesem neuartigen Verfahren wird die Autokollimation in Kombination mit der Inertialmesstechnik eingesetzt.

1 Richtungsübertragung im Gotthard Basistunnel

Die Trassierung des Gotthard-Basistunnels verläuft von Erstfeld nach Bodio durch das Gotthard-Basismassiv. Der Tunnel wird mit seinen 57 Kilometern weltweit der längste Eisenbahntunnel. Zur Verkürzung der Bauzeit wird der Tunnel nicht nur von den Portalen vorangetrieben, sondern auch von drei Zwischenangriffen in Amsteg, Sedrun und Faido. Die Streckenführung der neuen Bahnlinie am Gotthard ist aus *Bild 1* ersichtlich.

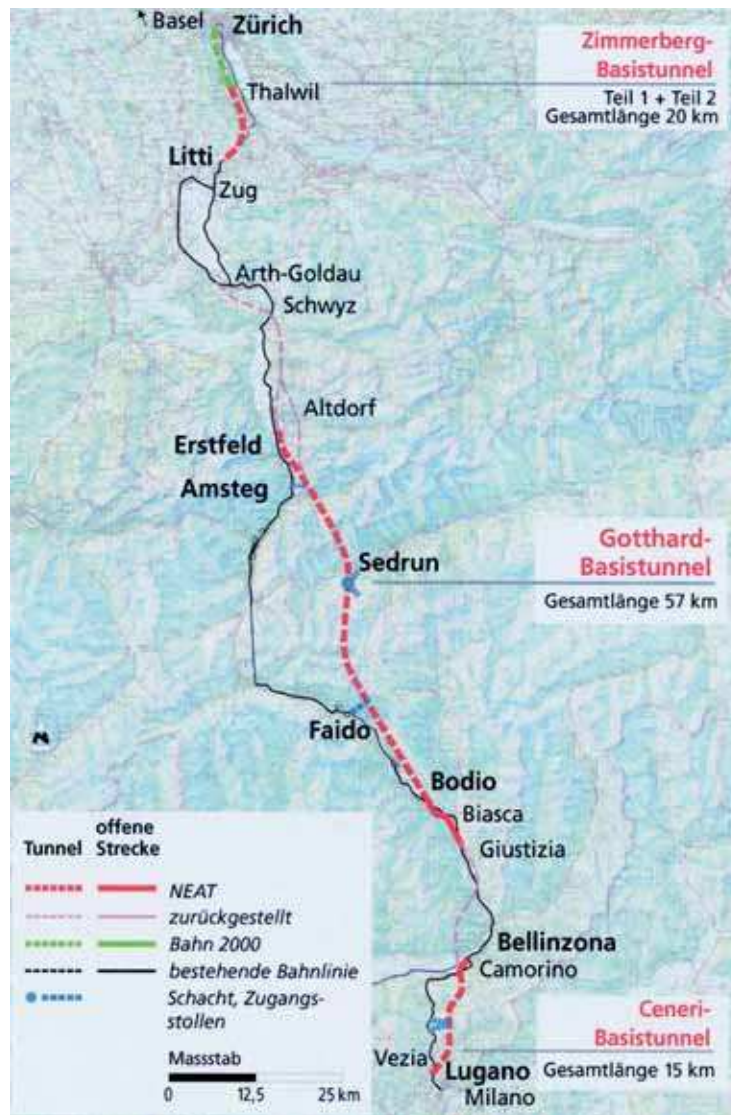


Bild 1: Trassierung des Gotthard-Basistunnels

Besonders komplex ist die zukünftige Multifunktionsstelle in Sedrun. Diese ist schematisch in *Bild 2* dargestellt. Dieser Zwischenangriff besteht aus einem etwa ein Kilometer langen Stollen in das Gotthardmassiv hinein. Ein knapp 800 Meter abgeteufter Schacht führt dann zur Vortriebsebene.

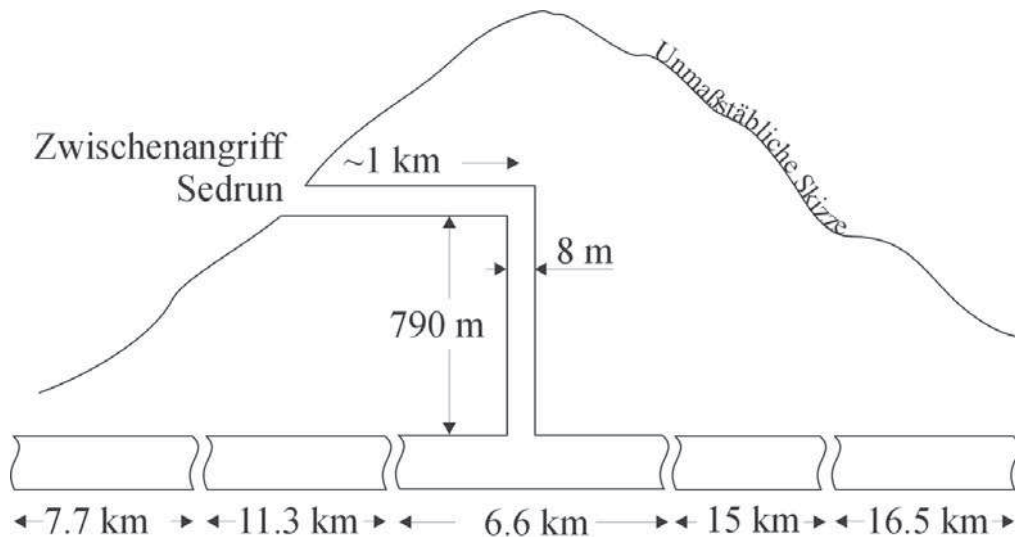


Bild 2: Zwischenangriff in Sedrun

2 Lage- und Richtungsübertragung durch Ablotung und Kreiselmessung

Ablotung

2.1 Ablotung

Für die Übertragung der dreidimensionalen Koordinaten, der Orientierung und des Netzmaßstabs standen nur der bereits erwähnte Stollen mit einer Länge von 990 Metern sowie ein Schacht mit einer Teufe von 800 Metern und einem Durchmesser von acht Metern zur Verfügung.

Um die geforderte Durchschlaggenauigkeit für den Tunnelvortrieb zu erreichen, muss die Positionsübertragung zwischen Schachtkopf und -fuß mit einer Genauigkeit von 24 mm erfolgen. Um das sicherzustellen, wurde die Lotung mit zwei unabhängigen Verfahren durchgeführt. Verantwortlich für Planung und Durchführung der Ablotungen war das Konsortium Vermessungsingenieure Gotthard-Basistunnel (VI-GBT), mit instrumenteller und personeller Unterstützung vom Lehrstuhl für Geodätische Messtechnik und Ingenieurgeodäsie der ETH Zürich. Die mechanische Ablotung wurde mit dem Personal und Material der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern (DBE) Erkundungsbergwerk Gorleben gemessen.

2.2 Optische Lotung

Die optische Lotung von oben nach unten wurde mit einem Nadirlot von Leica auf Stativen durchgeführt (Bild 3). Die Prismen, ebenfalls auf Stativen am Schachtfuß, wurden mit Kreuzschlitten in die richtige Position gebracht (Bild 4). Dazu wurde

mit dem Nadirlot aus den Abweichungen in vier Lagen die Solllage bestimmt. Diese wurde am Schachtfuß eingestellt. Bereits nach fünf Iterationen war die beste Position erreicht. Die Koordinaten der Stative wurden von einer Station aus in Bezug auf die Festpunkte im Tunnelnetz eingemessen. Dieser Vorgang wurde unabhängig wiederholt, damit die Messungen überprüft werden konnten. Um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messung zu steigern, wurden drei Lotkorridore gemessen. Der Abstand vom Schachtrand betrug zwischen 1,60 und 3,80 Meter; so wurden die Refraktionen minimiert.



Bild 3: Nadirlot am Schachtkopf

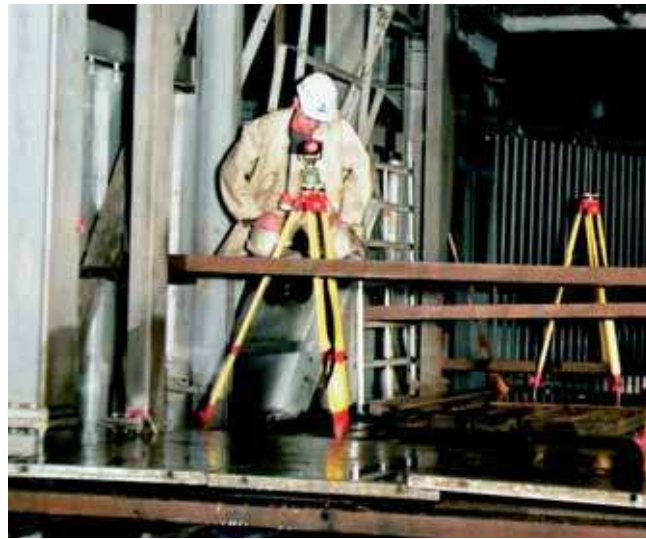


Bild 4: Prismen am Schachtfuß

Bereits mehrere Stunden vor der Messung wurde zur Belüftung am Schachtfuß Luft abgesaugt und durch Röhren zur Lenkung des Wetterstromes, den sogenannten Lutten, ins Freie geleitet. Dadurch entsteht im Schacht Fallluft. Die Frischluftzufuhr von oben vertreibt sämtlichen Nebel und liefert eine klare Sicht im Schacht von oben nach unten. Eine umgekehrte Messung von unten nach oben mit dem Zenitlot oder Tachymeter war wegen ständiger Wassertropfen nicht möglich.

2.3 Mechanische Lotung

Die mechanische Lotung wurde ebenfalls über drei Korridore durchgeführt. Am Vortag der Messung wurden die Winden, Umlenkrollen und Lotdrähte installiert und mit Gewichten beschwert, um eine Ruhephase von zwölf Stunden abzuwarten.

Am Schachtfuß wurden von zwei Stationen aus mit Theodoliten jeweils zehn Umkehrpunkte der drei pendelnden Lote in zwei Fernrohrlagen gemessen. Die Messungen wurden insgesamt 3mal mit verschiedenen Gewichten vorgenommen.

Bei jeder Lotung, ob optisch oder mechanisch, gehen die Lotabweichungen bei der Punktübertragung direkt in die Genauigkeit der Koordinaten ein und müssen daher berücksichtigt werden. Die Unsicherheit der modellierten Lotabweichungen liegt bei 0,3 mgon. Bei der mechanischen Lotung lenken systematische Einflüsse wie Wetterzug, Tropfwasser und Krümmung des Drahtes den Lotdraht vom Soll ab. Da diese Einflüsse umgekehrt proportional zum Gewicht sind, können sie mit Mehrgewichtslotungen bestimmt werden. Die erste Messung fand daher mit vollem Gewicht (390 kg), die zweite mit halbem (192 kg) und die letzte wieder mit vollem Gewicht statt.

Zur Höhenübertragung wurden die Distanzen verwendet, die bei der optischen Ablotung mit dem Tachymeter von unten nach oben gemessen wurden.

Zusätzlich zur Koordinatenübertragung wird auch die Orientierung benötigt, um die Richtung für den Vortrieb vorzugeben. Auf die klassische Art erfolgt dies mit speziellen Vermessungskreisel, die die geographische Nordrichtung bestimmen.

2.4 Klassische Richtungsübertragung mit Präzisionsvermessungskreisel

Ist der Präzisionsvermessungskreisel in Betrieb, so will er aufgrund seiner Trägheit seine Position im Raum beibehalten. Wird er nun horizontiert, man spricht auch von schweregefesselt, so erfährt die Kreiselachse eine Abweichung aus der Horizontalen. Aufgrund der Erddrehung entsteht ein Präzessionsmoment, das den Kreisel veranlasst, seine Rotationsrichtung parallel zu der Erddrehrichtung auszurichten. Dies ruft eine horizontale Drehung des Kreisels in die Meridianebene hervor. Damit gibt der Kreisel die Nordrichtung an. Lediglich an den Polen entsteht kein Präzessionsmoment. Eine Messung in mehr als 70 Grad nördlicher oder südlicher Breite liefert kein genügend genaues Ergebnis mehr.

Die Kreismessungen für die Richtungsübertragung im Gotthard-Basistunnel wurden mit dem Vermessungskreisel Gyromat 2000 von der Deutschen Montan Technologie (DMT) sowohl am Schachtkopf als auch am Schachtfuß durchgeführt. Kombiniert mit Präzisionstachymetern ist der Gyromat 2000 weltweit der schnellste und genaueste Präzisionsvermessungskreisel. Bei diesem Instrument handelt es sich um ein Messgerät, das innerhalb von etwa zehn Minuten vollautomatisch die Nordrichtung mit einer inneren Genauigkeit von 0,7 mgon vorgeben kann. Wichtig ist eine Klimatisierung des Instrumentes, eine Vororientierung ist jedoch nicht notwendig. *Bild 5* zeigt den Präzisionsvermessungskreisel Gyromat 2000.



Bild 5:
Gyromat 2000 mit Tachymeter

Die Ergebnisse der optischen und mechanischen Ablotung wurden durch das Konsortium VI-GBT in einer Netzausgleichung zusammen mit den Anschlussmessungen am Schachtkopf und -fuß sowie der Orientierungsmessung aus den Kreiselazimuten ausgewertet.

3 Richtungsübertragung durch Koppelung von Autokollimation und Inertialmesstechnik

3.1 Autokollimation

Für Richtungsübertragungen wird häufig die Autokollimation eingesetzt. Hier wird bei einem Tachymeter das Okular durch ein Autokollimationsokular ersetzt. In diesem beleuchtet eine spezielle Lampe das Fadenkreuz von hinten. Fokussiert man das Fernrohr eines Tachymeters auf Unendlich und zielt damit auf einen Spiegel, so können das Fadenkreuz und sein Spiegelbild zur Deckung gebracht werden. Der Zielstrahl steht dann senkrecht zum Spiegel. Ist der Spiegel um den Winkel δ aus der Zielachse verschwenkt, so zeigt der Tachymeter die doppelte Richtungsänderung von 2δ an, da der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist. Es ist also möglich, mit einer doppelten Genauigkeit zu messen. Daher eignet sich dieses Verfahren besonders gut zur Richtungsübertragung. In *Bild 6* ist das eingesetzte Autokollimationsokular der Firma Leica Geosystems zu sehen.



Bild 6: Autokollimationsokular



Bild 7: Autokollimationsprisma GAP1

Als Spiegel werden oberflächenverspiegelte Planspiegel eingesetzt, um den Gang des Zielstrahls im Glasblock zu vermeiden. Der Nachteil dieser Spiegel ist, dass die Zielung sowohl in der Horizontalen als auch in der Vertikalen senkrecht sein muss. Mit Autokollimationsprismen, wie z. B. dem GAP1 von Wild Heerbrugg in *Bild 7*, reicht es aus, die Fadenkreuze in horizontaler Richtung zu koinzidieren. Das GAP1 ist ein Dachkantprisma, das den Zielstrahl in einer vertikalen Ebene reflektiert. So muss am Tachymter lediglich die Horizontalrichtung eingestellt werden.

Um eine Redundanz für die Messung bei dieser Richtungsübertragung zu erhalten, wurden beide Arten von Reflektoren, der Spiegel und das Autokollimationsprisma eingesetzt.

3.2 Inertiale Messtechnik

Ein Trägheits- oder Inertialnavigationssystem enthält je drei senkrecht zueinander montierte Beschleunigungsmesser (a) und Kreisel (ω). Diese Sensoren sind jeweils koaxial angeordnet. Das Prinzip zeigt *Bild 8*. Mit diesem System ist man in der Lage, Translationen und Rotationen in und um diese drei Achsrichtungen zu messen.

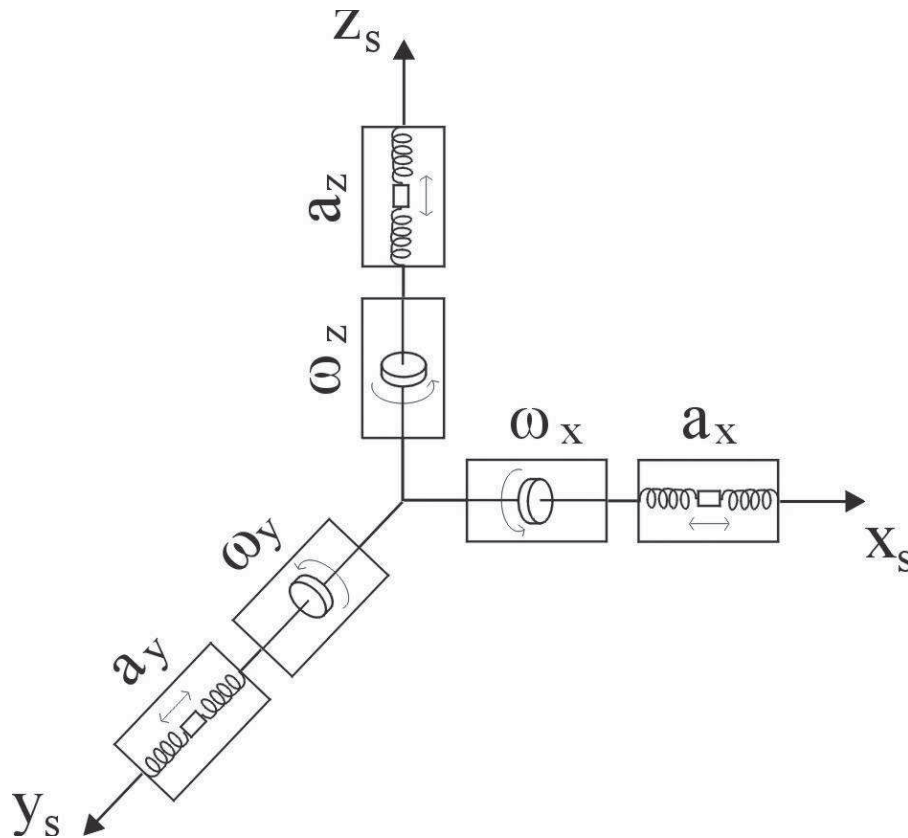


Bild 8: Prinzip eines inertialen Sensors

In einem Inertialnavigationssystem (INS) werden die Rohdaten zu Einstellwinkeln (Roll- und Nickwinkel sowie Azimut), Geschwindigkeiten, Positionen und Kurswinkeln prozessiert. Zu Beginn einer Messung sind zunächst eine Initialisierung und ein Alignment notwendig. Für die Initialisierung werden die Anfangsposition und die Anfangsgeschwindigkeit des INS einfach vorgegeben. Aufwändiger ist das Alignment, in dem die Orientierung, d. h. die Einstellwinkel des INS bestimmt werden müssen. Die Sensoren des INS messen die Daten im Sensorsystem auf ihren entsprechenden Achsen, jedoch sind die Messwerte bezogen auf das Inertialsystem, dem System, in dem sich unsere Erde dreht. Mehrere Transformationen verknüpfen die unterschiedlichen Koordinatensysteme. In *Bild 9* sind die verschiedenen Koordinatensysteme farblich veranschaulicht. Am schwierigsten ist die Transformation vom *Sensorsystem* in das *Navigationskoordinatensystem*. Letzteres ist in jedem Punkt der Erde nach Norden, Osten und entlang des Schwerevektors nach unten ausgerichtet. Es trägt daher den Namen North-East-Down-System (NED-System). Da sich das INS zu Beginn einer Messung meist an einem anderen Ort mit einer unterschiedlichen Ausrichtung befindet, muss diese Transformation und damit die Einstellwinkel jedes Mal neu bestimmt werden.

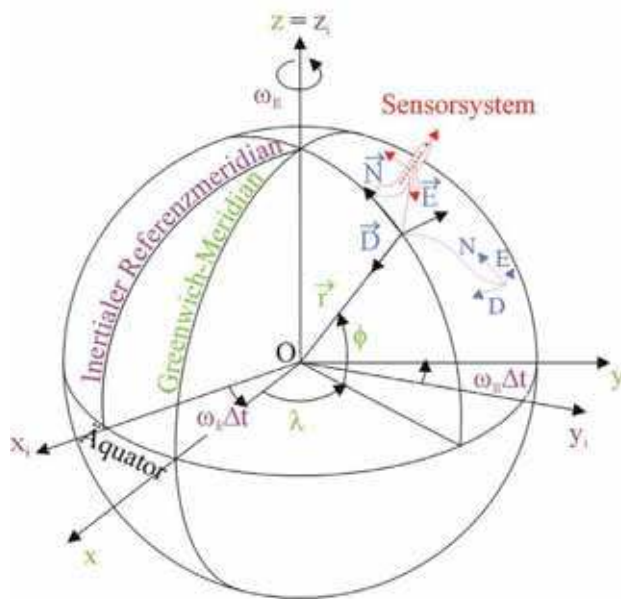


Bild 9:
Koordinatensysteme

Die weiteren Transformationen sind vergleichsweise einfach. Hierzu zählt die Transformation vom NED-System in das *geozentrische, erdfeste System*, das durch den Nullmeridian in Greenwich definiert ist, sowie eine weitere Koordinatenumformung in ein *geozentrisches, sternorientiertes System*, bezogen auf einen inertialen Referenzmeridian zum Zeitpunkt $t=0$.

Ist die Orientierung im Raum nach der Initialisierung und dem Alignment bekannt, so können die Daten prozessiert werden: Aus den gemessenen Beschleunigungen erschließt sich nach dem zweiten Newtonschen Axiom die Bewegung. Eine zweifache Integration liefert aus den Beschleunigungswerten den zurückgelegten Weg. Mit Hilfe der drei orthogonalen Kreisel werden die Drehraten gemessen. Durch Integration der Drehraten wird die Ausrichtung im Raum und damit der Betrag der Beschleunigungen bestimmt und korrigiert. Dies erfolgt in zeitlich kurzen Abschnitten. Ist die Abtastfrequenz entsprechend hoch, so handelt es sich um infinitesimal kleine Koordinatenunterschiede, die aufsummiert die zurückgelegte Trajektorie ergeben.

Durch die Summenbildung der Integration werden nicht nur die Koordinatenunterschiede aufaddiert, sondern auch sämtliche Fehler. Durch äußere und innere Störungen entstehen Sensordriften. Sie äußern sich durch ein unregelmäßiges Hin- und Herwandern des Ausgabesignals um seine Sollkennlinie. Sie sind temperaturabhängig und ändern sich mit jedem Einschaltvorgang. Sie unterliegen keiner Systematik und können daher nur schwer rechnerisch berücksichtigt werden.

Eine Stützung der Messwerte ist daher zwingend erforderlich. Grundsätzlich kann ein INS extern über ein Satellitennavigationssystem, wie z. B. GPS, gestützt werden. In bestimmten Zeitabständen wird dann die Position des GPS verwendet, um die gedrifteten Werte des INS wieder auf die tatsächliche Trajektorie rückzurechnen. Unter Tage stehen jedoch keine Satellitensignale zur Verfügung. Aus diesem Grund kam bei den Messungen eine interne Stützung des INS zum Einsatz. Eine Möglichkeit, die Sensordriften zu modellieren, besteht in einem »Zero Velocity Update« (ZUPT). In einer Ruheposition wird das Driftverhalten der Sensoren erfasst. Hierbei wird die Tatsache genutzt, dass dann die Geschwindigkeit und die Drehrate abgesehen von Erdbeschleunigung und Erdrotation, gleich Null sind. Die Drift wird dann herausgerechnet.

3.3 Messprinzip

Der Messablauf basiert auf dem Prinzip der Polygonierung. Bei diesem Verfahren zur Koordinatenübertragung werden entlang eines Polygons die Brechungswinkel und die Strecken gemessen. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich die Richtungsübertragung behandelt, daher werden nur die Brechungswinkel betrachtet.

Der Unterschied zum klassischen Polygonzug besteht in diesem Fall darin, dass einer der Polygonwinkel nicht mit dem Tachymeter, sondern mit dem INS gemessen wird. Anhand von *Bild 10* wird das Prinzip verdeutlicht. Am [Schachtkopf \(Index o\)](#) befand sich vor der Schachtförderanlage der Tachymeterstandpunkt. Über ein Fernziel im Stollen wurde mit dem Tachymeter die Richtung vom Koordinatennetz mithilfe der Autokollimation auf die Montageplatte übertragen. Hierzu dienten der Spiegel und das GAP1. Anschließend fuhr die Schachtförderanlage zusammen mit der Montageplatte nach unten zum [Schachtfuß \(Index u\)](#). Dort wurde die Richtung von der Montageplatte wieder abgenommen und auf ein Fernziel im Stollen übertragen. Die Richtung t_u am Schachtfuß ergibt sich nach der Formel

$$t_u = t_o + \beta_o + \alpha_o + \psi - (\beta_u + \alpha_u).$$

Die zentrale Messgröße ist der Winkel ψ . Das ist der Wert, der von dem INS während der Fahrt der Schachtförderanlage gemessen wird. Genau betrachtet, ist das ein kinematisch bestimmter Brechungswinkel.

Neben dieser zentralen Messgröße gab es noch weitere Messwerte, die nicht zu vernachlässigen sind. Je ein Anschluss-Spiegel oben und unten dienten zur Kontrolle der Autokollimationsmessungen, um sicher zu stellen, dass die Orientierung der Tachymeter über den ganzen Messtag hinweg stabil geblieben

ist. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung ist, dass zwischen den eigentlichen Messungen zur Richtungsübertragung (in *Bild 10* ist das der Winkel α) das Fernrohr nicht von den Fernzielen auf die Autokollimationsspiegel umfokussiert werden muss. Die Fernziele in den Stollen lagen in einer Entfernung von 110 bis 360 Metern. Die zur Autokollimation notwendige Fernrohrstellung auf Unendlich ist abhängig vom Fernrohr und tritt bei den verwendeten Tachymetern bei etwa 350 Metern ein.

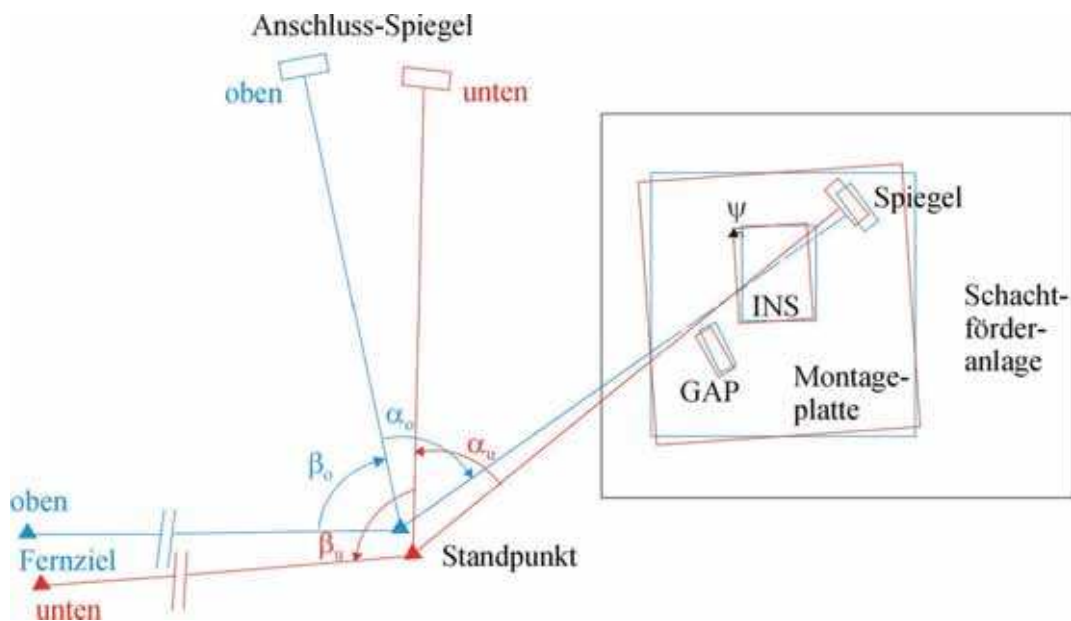
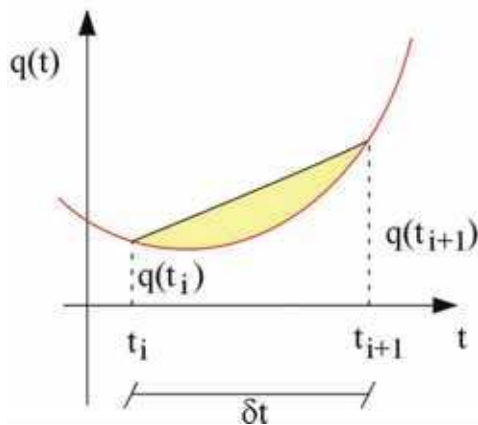


Bild 10: Schematische Abbildung des Messprinzips

Um einen symmetrischen Messablauf zu erreichen, wurde die gesamte Prozedur in umgekehrter Reihenfolge wiederholt, so dass sich die Montageplatte in der Schachtförderanlage am Ende einer Messung wieder in der Ausgangsposition am Schachtkopf befand. Durch die Ab- und Auffahrt entsteht eine Messung in »zwei Lagen«, die systematische und zeitproportionale Fehler minimiert. Fehlereinflüsse, die durch eine umgekehrte Bewegungsrichtung mit unterschiedlichem Vorzeichen eingehen, heben sich im Mittelwert aufgrund der Integration der Fehlereinflüsse über die Zeit auf.

Deutlich wird das anhand des Beispiels von *Bild 11*. In der Hinbewegung sei die Trajektorie durch die Funktion q über die Zeit abgebildet. Die Rückbewegung ist die identische Trajektorie. Sie wird lediglich von der anderen Richtung aus abgefahren und sei dargestellt durch die Funktion q' über die Zeit. Wie aus der Abbildung ersichtlich, geht der Fehler, der durch die Summenbildung der Integration entsteht, jeweils mit unterschiedlichem Vorzeichen ein. Durch die Mittelbildung von Hin- und Rückbewegung wird der Fehler im Beispiel gleich Null.

a) Hinbewegung



b) Rückbewegung

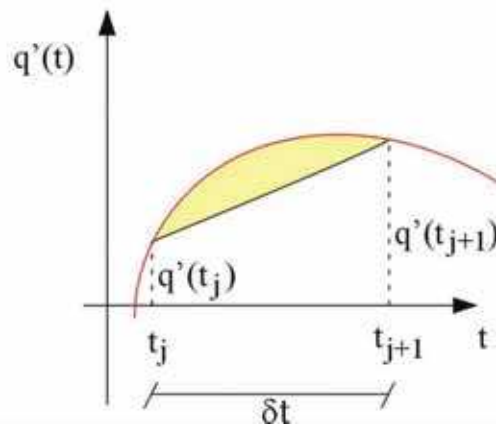


Bild 11: Schematische Darstellung von Hin- und Rückfahrt

3.4 Richtungsübertragung für den Gotthard-Basistunnel

Im Mittelpunkt steht die doppelstöckige Schachtförderanlage im Schacht I von Sedrun. Im unteren Stockwerk wurde an den Gleisen eine Montageplatte festgeschraubt (Bild 12). Auf dieser Montageplatte waren das INS, ein Planflächenspiegel zur Autokollimation, das Autokollimationsprisma GAP1 und zwei Reflektoren befestigt. Ein Notebook zur Steuerung und Datenspeicherung des INS sowie mehrere Akkus zur Stromversorgung waren ebenfalls in dem unteren Stockwerk der Förderanlage untergebracht. Wie bereits erwähnt, war im Schachtkopf wie im -fuß ein Tachymeter unmittelbar vor dem Tor der Schachtförderanlage zur Richtungsübertragung stationiert.

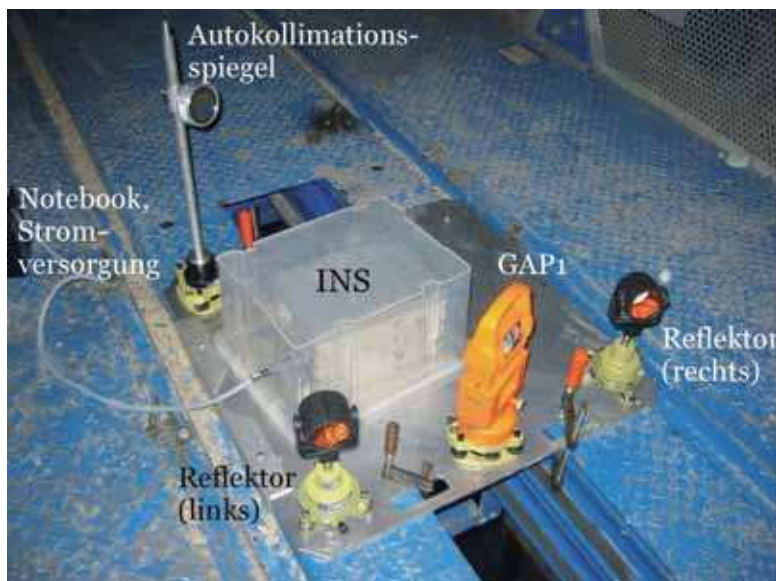


Bild 12: Montageplatte

Die Standpunkte der beiden Tachymeter wurden vor den Messungen bezüglich des Tunnelnetzes bestimmt und nach den Messungen überprüft. Darüber hinaus wurden die Koordinaten der Montageplatte durch die beiden Reflektoren bestimmt.

Die Einrichtung der beiden Standpunkte direkt vor der Schachtförderanlage gestaltete sich nicht einfach. Die Platzverhältnisse vor der Förderanlage sind beschränkt und der Boden ist nur teilweise betoniert und damit stabil genug für eine sichere Instrumentenaufstellung. Um oben und unten die rasche Autokollimation auf die Planflächenspiegel auf der Montageplatte sicherzustellen, müssen die Geometrien der Strahlengänge vom Tachymeter zum Spiegel oben und unten möglichst parallel, bzw. die Standpunkte und Höhendifferenzen relativ zur Montageplatte oben und unten praktisch identisch sein.

3.5 Eingesetzte Messinstrumente

Die Messungen wurden mit einem hochpräzisen INS der Firma iMAR durchgeführt, das dem Lehrstuhl für Geodäsie zusammen mit dem Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der TU München gehört. Das System besteht aus drei Beschleunigungsmessern und drei Ringlasern der Firma Honeywell. Bei den Ringlasern handelt es sich um optische Kreisel, die keine rotierenden Bauteile besitzen, sondern den so genannten Sagnac-Effekt nutzen. Dabei durchläuft ein Laserstrahl einen Glasblock in zwei gegenläufigen Richtungen und wird mit mehreren Spiegeln innerhalb des Glasblocks gehalten. Die Umlaufzeit ist im unbewegten Zustand für beide Richtungen gleich. Rotiert der Lichtleiter, muss der gegen die Rotationsrichtung laufende Laserstrahl einen weiteren Weg zurücklegen, wohingegen sich der Weg für den Laserstrahl in Rotationsrichtung verkürzt. Die beiden Laserstrahlen werden nach ihrem Umlauf überlagert. Aus dem Interferenzmuster kann auf die Drehrate geschlossen werden. Im INS sind Honeywell-Ringlaser; diese gehören derzeit zu den genauesten Laserkreisel.

Die Standpunkte für die Autokollimation gegenüber dem Tunnelnetz wurden mit Tachymetern des Typs Leica TCA1100 unter Verwendung der automatischen Zielerkennung ATR eingemessen. Für die Autokollimation selbst kamen Tachymeter des Typs Leica T3000, bzw. TC2002 zum Einsatz (*Bild 13*). Deren Feintriebe erlauben eine wesentlich präzisere manuelle Anzielung als moderne, für den vorwiegend automatischen Messmodus gebaute Instrumente mit Rutschkupplungen. Die Fernziele wurden mit Prismen ausgestattet, die durch Dioden beleuchtet waren, damit sie im dunklen Tunnel angezielt werden können.



Bild 13: Autokollimationsmessung

Für die Messung war eine sechsköpfige Mannschaft vor Ort, die die Messinstrumente bedienten. Drei Personen bestimmten jeweils die Anschlussrichtungen, sowie die Position des Tachymeters am Schachtkopf bzw. -fuß. Zusätzlich startete der Messtrupp am Schachtkopf das INS und führte das zu Beginn notwendige Alignment durch.

3.6 Messkampagnen

Am 5. April 2004 wurde eine erste Messkampagne in Sedrun durchgeführt. Wegen der Osterpause bei den Vortriebsarbeiten stand die Schachtförderanlage einen Tag lang fast ausschließlich den Messarbeiten zur Verfügung. Da gleichzeitig mit den Messfahrten auch »Seilfahrten« mit Personentransport vorgenommen wurden, war nur eine Höchstgeschwindigkeit von 12 m/s zulässig. Durch das Ein- und Aussteigen ergaben sich zusätzliche Verzögerungen, die sich negativ auf das Driftverhalten des INS auswirken. Steuerungsbedingt musste am Schachtfuß eine Korrekturfahrt durchgeführt werden, um die Schachtförderanlage in die Position für die Autokollimation einzurasten.

In dem von der Bauleitung eingeräumten Zeitfenster konnten insgesamt fünf Messfahrten (jeweils eine Ab- und Auffahrt) durchgeführt werden. Die guten Resultate und das erkannte Optimierungspotential führten zu einer

zweiten Messkampagne am 9. Januar 2005 während der Weihnachtspause des Vortriebs.

Für diese Kampagne stellte die örtliche Bauleitung die Schachtförderanlage ausschließlich für die Richtungsübertragung zur Verfügung. Die Instrumente konnten dank der Einmessskizzen aus der ersten Messung leichter positioniert werden. Die Förderanlage wurde im so genannten »Schutterbetrieb« gefahren. Das ist der Betriebsmodus, in dem das Ausbruchmaterial zu Tage befördert wird. Gesteinsmaterial und Montageplatten verkraften eine höhere Geschwindigkeit als Personen, die in diesem Betriebsmodus nicht zulässig sind. Dadurch entfielen die Wartezeiten für den Ausstieg der Bergleute. Abgesehen von den wegfallenden zeitlichen Verzögerungen kann die Schachtförderanlage mit einer Geschwindigkeit von 16 m/s betrieben werden. Das beeinflusst die Fahrzeiten und damit das Driftverhalten der Sensoren positiv.

Wegen anfänglicher technischer Schwierigkeiten und dem Ausfall der Schachtförderanlage, die sehr große Driften des INS zur Folge hatten, standen bei der zweiten Messkampagne lediglich drei einwandfreie Messungen zur Verfügung.

Die beiden Messkampagnen können etwa gleich gewichtet werden. Bei der ersten Kampagne im April 2004 konnten zwar mehr Messfahrten durchgeführt werden, jedoch wurden für die zweite Kampagne die Messbedingungen verbessert.

3.7 Ergebnisse

Ausgewertet wurden die Messkampagnen mit eigens an der TU München entwickelter Auswerteroutinen, in die Ergebnisse aus der Software KingsPad™, entwickelt am Department of Geomatics Engineering der Universität Calgary, einfließen.

Die Standpunkte der Tachymeter sowie die Fernziele wurden im vorhandenen Tunnelnetz koordiniert. Diese Koordinatennetze am Schachtkopf und -fuß basieren auf den Kreiselazimuten, die mit dem Präzisionsvermessungskreisel Gyromat 2000 bestimmt wurden. Daher sind die Ergebnisse aus den Inertialmessungen der hier beschriebenen Messkampagnen an das gleiche System angebunden, wie die vorher bereits vorhandene Richtungsübertragung, die unabhängig überprüft werden sollte. Die Resultate beider Methoden zur Richtungsübertragung können daher direkt miteinander verglichen werden.

Die erste Messkampagne im April 2004 lieferte eine Richtungsdivergenz von +0,7 mgon, die zweite Messung im Januar 2005 ergab einen Wert von +3,7 mgon.

Der gewichtete Mittelwert aus beiden Richtungsübertragungen ergibt eine Abweichung von +2,2 mgon vom Tunnelnetz.

Als Genauigkeit für die Richtungsübertragung wurde eine Standardabweichung von 1,5 mgon erreicht. In diesem Wert sind die Messgenauigkeit des INS, die Zentriergenauigkeiten sowie die Genauigkeit der Autokollimation und der Anschlussmessungen berücksichtigt. Die Genauigkeit des neuen Messverfahrens liegt somit in der gleichen Größenordnung wie die Messungen mit dem Präzisionsvermessungskreis Gyromat 2000. Eine stochastische Untersuchung hat ergeben, dass die Differenz von +2,2 mgon nicht signifikant ist. Ein Korrekturwert für das Tunnelnetz kann aus den Inertialmessungen nicht abgeleitet werden.

4 Fazit

Das neue Verfahren zur Richtungsübertragung durch Koppelung von Inertialmesstechnik und Autokollimation hat sich damit als unabhängiges Verfahren zur Steigerung der Zuverlässigkeit eindeutig bewährt. Diese Messungen haben einen unabhängigen Vergleichswert für die Präzisionskreismessungen mit vergleichbarem Genauigkeitsniveau geliefert. Die inertielle Messtechnik wurde in dieser Form im Projekt AlpTransit Gotthard weltweit erstmals für eine hochpräzise Richtungsübertragung eingesetzt und hat ihre Feuertaufe mit Bravour bestanden.

Informationen über den Gotthard-Basistunnel insbesondere zum Baufortschritt findet der interessierte Leser unter www.alptransit.ch.

Dank

Bedanken möchte ich mich an dieser Stelle bei den Professoren Herrn *Thomas A. Wunderlich* (TU München) und *Hilmar Ingensand* (geodETH), die mich während der Arbeit nach besten Kräften unterstützt haben. Großer Dank gebührt auch der AlpTransit Gotthard AG, namentlich den Herren *Franz Ebnetter* und *Fritz Bräker*. Nur durch die gute Zusammenarbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen wurden die Messungen im Schacht von Sedrun möglich.

Literatur

Neuhierl, Theresa (2005): Eine neue Methode zur Richtungsübertragung durch Kopplung von Inertialmesstechnik und Autokollimation; Dissertation an der Technischen Universität München.

Schätti, Ivo; Ryf, Adrian (2004): Hochpräzise Lotung im Schacht von Sedrun des Gotthard-Basistunnels; 14. Kurs für Ingenieurvermessung Zürich.

www.alptransit.ch

Diese Seite können wir gemeinsam fordern!

Werben Sie im Mitteilungsblatt des DVW Bayern e. V.
Sie erreichen vierteljährlich ein ausgewähltes Fachpublikum
in Behörden, Ingenieurbüros und Arbeitskreisen.

Fordern Sie unverbindlich unsere aktuelle Anzeigenpreisliste an!
Telefon: (0 89) 21 29-15 21