Zur Bestimmung der temperaturgradienteninduzierten Richtungsverschwenkung beim Tunnelvortrieb

Autor(en): **Hennes, M. / Dönicke, R. / Christ, H.-P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **97 (1999)**

Heft 8

PDF erstellt am: **24.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-235568

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Zur Bestimmung der temperaturgradienteninduzierten Richtungsverschwenkung beim Tunnelvortrieb

Hohe Genauigkeitsanforderungen und die steigende Präzision heutiger Vermessungsinstrumente verlangen hochentwickelte Verfahren zur Minimierung von Refraktionseffekten. Ein Lösungsansatz beinhaltet die direkte Messung des Temperaturfeldes und die Ermittlung von Korrektionswerten durch die Integration des Brechungsindexgradienten längs des optischen Weges. Dazu wurde am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) ein hochpräzises Temperaturmesssystem mit einer kurzen Ansprechzeit entwickelt, das sich leicht entlang der Visur verschieben lässt. Mit dieser Ausrüstung, die hier vorgestellt wird, wurden typische Situationen in Tunneln untersucht. Nach der Analyse des Fehlerbudgets, insbesondere des funktionalen Modells, zeigt sich die Leistungsfähigkeit dieses Konzepts in den berechneten Refraktionskorrektionswerten.

La précision élevée requise pour la construction des tunnels, de même que la précision croissante des instruments modernes impose dorénavant de diminuer les effets de la réfraction. Une approche envisageable consiste à mesurer le champ de température le long du chemin optique et d'en dériver les corrections en intégrant l'indice de réfraction. Dans ce sens, nous avons développé un système de mesure précis, flexible et très mobile, caractérisé par un court temps de réponse. Un premier bilan des erreurs est dressé, notamment au niveau du modèle fonctionnel. En outre, quelques situations-types ont été analysées dans le cadre de tunnels suisses, ce qui a permis de calculer la déviation d'un faisceau lumineux par rapport à sa trajectoire rectiligne. Finalement, ces démarches ont démontré la validité du concept développé.

Le elevate esigenze di precisione nella costruzione di gallerie e la sempre maggiore perfezione degli strumenti di misurazione richiedono dei processi molto avanzati per ridurre gli effetti della rifrazione. Un possibile approccio consiste nel misurare direttamente il campo di temperatura e di derivarne i valori di correzione, integrando l'indice di rifrazione lungo il cammino ottico. A questo scopo, l'Istituto di geodesia e fotogrammetria (IGP) ha sviluppato un sistema di misurazione con breve tempo di risposta. Con la dotazione qui di seguito presentata si sono testate delle situazioni tipiche in galleria. Dopo l'analisi del bilancio degli errori, in particolare del modello funzionale, si è evidenziata la validità del concetto nei valori calcolati per la correzione della rifrazione .

M. Hennes, R. Dönicke, H.-P. Christ

1. Einleitung

Die Einhaltung der veranschlagten Durchschlagsunsicherheit bzw. deren Reduzierung spielt eine entscheidende Rolle bei Tunnelbauten. Das Motto «auf eine Handbreit durch den Tunnel» für den Vortrieb des 56 km langen Alptransit-Tunnels verdeutlicht die Forderung nach einer Richtungsgenauigkeit von besser als 0.4 mgon insbesondere auf den langen Bauabschnitten (>10 km), wobei postuliert wird, dass keine zusätzlichen translatorischen Einflüsse auf die Querabweichung einwirken. Sie wird vor allem durch die Zuverlässigkeit der Richtungsübertragung bestimmt, die auf optischem Weg erfolgt.

Die Genauigkeit des Richtungsabgriffs heutiger Präzisionstheodolite liegt zwar deutlich unter 0.2 mgon, jedoch muss die ungünstige Varianzfortpflanzung eines offenen Polygonzuges berücksichtigt werden [vgl. Hennes, 1998]: Beispielsweise erhöht sich die resultierende Unsicherheit der Querabweichung bei einem offenen Polygonzug nach fünf Polygonseiten um das näherungsweise achtfache. Systematisch einseitig wirkende Effekte haben einen erheblich grösseren Einfluss (Faktor 30 für fünf Seiten). Im Hinblick auf die erreichbare Genauigkeit sind neben den instrumententechnischen Vorgaben und den zum Teil ungünstigen Sichtbedingungen auch die physikalischen Gesetzmässigkeiten bei der Ausbreitung einer elektrooptischen Welle im optisch inhomogenen Medium zu berücksichtigen, die der Visur einen gekrümmten Verlauf aufzwingen. Es liegt nahe, den einflussreichsten physikalischen Parameter, die Temperatur, messtechnisch zu bestimmen. Dies erfolgte in der Vergangenheit mit einem Instrumentarium recht niedriger Auflösung [Johnston; 1998, 1991] oder anhand jeweils eines einzelnen Querprofils [Heister; 1997], [Wilhelm; 1994], was sich aufgrund der teilweise komplizierten Verhältnisse als vollkommen unzureichend herausgestellt hat.
Wegen des vielversprechenden Lösungsansatzes der Temperaturgradientenbestimmung entlang der Visur wird am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETHZ dieser Weg weiter verfolgt, wobei sowohl das Instrumentarium, die Messanordnung als auch die Modellierung weiterentwickelt wurden. In diesem Beitrag wird ein Temperaturmesssystem vorgestellt, das am IGP entsprechend den Anforderungen aufgebaut wurde und das seine Leistungsfähigkeit hinsichtlich den Genauigkeits-, Messgeschwindigkeits- und Handhabungsanforderungen unter Beweis gestellt hat. Durch die in diesem Bericht vorgestellte polynominale Modellierung des Gradientenfeldes entlang der Visur aus lokal hochauflösend gemessenen Temperaturen kann nun die Querabweichung repräsentativ berechnet werden.

2. Brechungsindex-gradienten-induzierte Richtungsverschwenkungen

2.1 Modellierung der Richtungsverschwenkung

Refraktionsinduzierte Richtungsverschwenkungen treten auf, da ein Lichtstrahl zum optisch dichteren Medium hin gebrochen wird, wenn er ein optisch inhomogenes Medium durchläuft. In einem Koordinatensystem, dessen X-Achse so gelegt ist, dass sie Anfangs- und Endpunkt der gekrümmten Visur verbindet, lässt sich die Querabweichung q analog Moritz [1961] folgendermassen beschreiben, wobei die optische Inhomogenität des Mediums durch den Brechungsindexgradienten dn/dY quer zur Visur quantifiziert wird.

$$q = \int_0^s (X - s) \frac{\partial n}{\partial Y} dX \qquad (1)$$

mit q: Querabweichung
X: Koordinate längs der Visur
s: Länge der Visur

Der Brechungsindexgradient lässt sich als totales Differential

$$\frac{\partial n}{\partial Y} = \frac{\partial n}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial Y} + \frac{\partial n}{\partial p}\frac{\partial p}{\partial Y} + \frac{\partial n}{\partial e}\frac{\partial e}{\partial Y} \qquad (2)$$

über seine Einflussgrössen Temperatur T, Druck p und Dampfdruck e beschreiben. Er wird weitgehend durch den Temperaturgradienten bestimmt: Der Brechungsindex hängt vom Druck zu etwa 35% des Temperatureinflusses pro hPa bzw. K ab und vom Dampfdruck zu etwa 4%. Im vorliegenden Fall kann der räumliche Druckgradient als verschwindend gering angenommen werden. Deswegen lässt sich die Querabweichung genau genug allein aus Temperaturgradientenmessungen ableiten, wobei für Abschätzungen $dn/dT = 10^{-6}$/K angenommen werden kann.

Für die Standardabweichung der ermittelten Querabweichung gilt analog:

$$\sigma_q = \int_0^s (X - s)\, \sigma_{\frac{\partial n}{\partial Y}}\, dX \qquad (3)$$
$$= \tfrac{1}{2} s^2 \sigma_{\frac{\partial n}{\partial Y}} \quad \text{falls } dn/dY \text{ konstant}$$

mit σ_q: Standardabweichung der Querabweichung
$\sigma_{dn/dY}$: Standardabweichung des Brechungsindexgradienten

Um die Richtungskorrektion zuverlässig ableiten zu können, muss der Temperaturgradient in der Grössenordnung weniger hundertstel Grad bekannt sein, was sowohl an die Messgenauigkeit als auch an die Repräsentativität der Daten für die tatsächlichen Verhältnisse hohe Anforderungen stellt. Während erstere primär auf geeignete Sensoren abzielt, kann die Repräsentativität nur durch eine dichte Messanordnung und eine sorgfältige Modellierung erreicht werden.

2.2 Modellierung des Temperaturgradientenfeldes

Ausgangsbasis sind räumlich diskrete Temperaturmessungen an regelmässigen Rasterpunkten x_i, y_i im Tunnelkoordinatensystem (y identisch Tunnelachse). Daraus muss das zugehörige Temperaturgradientenfeld ermittelt werden, denn die Lösung des Intergrals (1) erfordert für den Gradienten eine Funktion in Abhängigkeit der Position längs der Visur (X) und damit eine Interpolation der Messdaten. Dazu können sie entweder durch Dreiecksvermaschung ähnlich einem digitalen Geländemodell interpoliert oder durch eine skalare zweiparametrige Funktion dargestellt werden (analytisches Verfahren). Bei beiden Verfahren müssen Kompromisse hinsichtlich der Approximationsgüte gemacht werden, denn im ersten Fall wird ein stetig differenzierbares Feld durch ein nicht stetig differenzierbares Polyeder dargestellt, während im zweiten Fall zwar die Funktion glatt bleibt, aber aufgrund der beschränkten Parameterisierbarkeit Abweichungen zum tatsächlichen Temperaturverlauf auftreten.

Vom numerischen Aufwand her gesehen mag die Interpolation über Dreiecksvermaschung zunächst günstiger erscheinen, weil letztere sich ja durch das regelmässige Messraster (vgl. Kap. 3.4) problemlos ergibt und weiterhin lediglich mit Vektorgeometrie und linearen Funktionen das Gradientenfeld bestimmbar ist. Entsprechend aufwendiger ist der folgende Schritt, in dem die Schnittkoordinaten der Visur mit dem jeweiligen Dreieck ermittelt werden müssen, um die Grenzwerte für die numerische Integration von (1) zu finden. Es ist davon auszugehen, dass auch die alternative Dreiecksvermaschung (durch Aufteilung des rechteckigen Messrasters in die gespiegelte Version) zu leicht anderen Ergebnissen führt. Bei diesem Verfahren können insbesondere an den Kanten Werte auftreten, die die tatsächlichen Verhältnisse nicht repräsentieren. Bei der Lösung des Integrals (1) treten erhebliche Modellfehler auf, wenn die ersten Maschen zu gross gewählt werden: Abweichungen des modellierten Differentialquotienten wirken wegen des langen Hebels besonders stark auf die berechnete Visur, die erheblich verschwenkt werden kann.

Für das analytische Verfahren muss eine geeignete Interpolationsfunktion gefunden werden. Diese wird zweckmässigerweise als ausgleichende Funktion ermittelt, um die Anzahl der Parameter gering zu halten. Prinzipiell bieten sich Polynome an, auch wenn sie einige Nachteile aufweisen: Ausreisser in den Messungen können den Verlauf erheblich verändern, weswegen sie sorgsam aufgedeckt und eliminiert werden müssen; hohe Polynomgrade führen zu schlecht konditionierten Matrizen; Extrapolationen liefern unplausible Resultate; usw. In extremen Fällen bietet sich die Aneinanderkettung verschiedener Funktionen auf beschränkten Intervallen unter der Bedingung der stetigen Differenzierbarkeit an [Hennes, Juretzko, Witte; 1994]. Im Hinblick auf den Datensatz «Vereina» (vgl. Kap. 5) würde ein Fourieransatz in Ortskoordinaten, der mit einer abklingenden e-Funktion überlagert ist, vom mathematischen Gesichtspunkt als vernünftig erscheinen; dieser ist jedoch physikalisch nicht be-

gründbar, weswegen er nicht weiter untersucht wurde. Um eine vielseitige Anwendung zu ermöglichen, wurde ein Polynomansatz des Grades 4 in x und y implementiert, der es erlaubt, die Temperatur für jeden Punkt x, y zu berechnen, wobei dem stark strukturierten Verlauf im Anfangsbereich des Datensatzes (kleine y-Koordinaten) durch eine y-Koordinaten-reziproke Gewichtung Rechnung getragen wurde (X entspricht in etwa y). Dies scheint gerade deswegen gerechtfertigt, da auch die Querabweichung stark durch die Verhältnisse im Anfangsbereich gemäss (1) bestimmt wird und diese umso genauer berechnet werden sollten. Die Gradienten in beliebiger Richtung lassen sich am einfachsten über den Weg der Koordinatentransformation oder durch numerische Differentiation berechnen.

3. Systemaufbau

Um die Temperaturgradienten mit der erforderlichen Genauigkeit messen zu können, ist ein spezielles Messsystem erforderlich, das aus mindestens vier Sensoren besteht, deren primäres Ausgangssignal durch ein Interface derart aufbereitet wird, dass es sich möglichst verlustfrei und rauscharm zum Datenerfassungsgerät (sinnvollerweise ein PC) übertragen lässt. Handelsübliche «Thermometer» erfüllen die gestellten Anforderungen nicht (vgl. auch Abb. 1), jedoch lassen sich unter den in der Messtechnik angebotenen elektronischen Sensoren Systemkomponenten finden, die zu einem geeigneten Messsystem – mit variierbarer Sensoranordnung – zusammengestellt werden können.

3.1 Sensoren

Für die gestellte Messaufgabe sollten die Sensoren folgenden Spezifikationen genügen:

- hohe Auflösung (besser 0.02 °C)
- relativ kurze Ansprechzeiten (τ_{63} kleiner 10 s in ventilierter Luft)
- gute Reproduzierbarkeit (um häufiges Nachkalibrieren zu vermeiden)
- kleine Bauform (um eine hohe räumliche Auflösung zu erreichen)

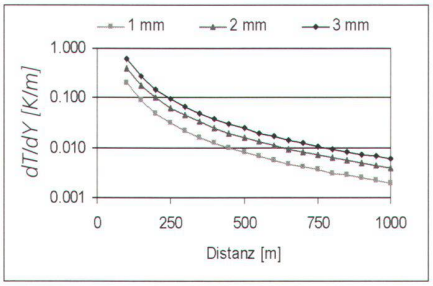

Abb. 1: Erforderliche Temperaturgradientenmessgenauigkeit für eine Unsicherheit in der Querabweichung von 1–3 mm.

- robust, unempfindlich gegen Staub und Feuchtigkeit.

Somit scheiden übliche Temperaturmessgeräte, wie sie in der klassischen Meteorologie und Vermessung eingesetzt werden, aus. Aus der Vielfalt der verfügbaren Sensortypen (Thermistoren, resistive Sensoren mit negativer (NTCs) und positiver (PTCs) Kennlinie, Quarze, Ultraschallthermometer (Sonics), ...) sind einige ungeeignet: die hohe Genauigkeit von Quarzsensoren kann wegen ihrer langen Ansprechzeit (grosse thermische Masse) nicht ausgenutzt werden; Sonics (mit dem Vorteil der verzögerungsfreien Messwerterfassung) scheiden wegen der grossen Bauform und des Preises aus und Thermistoren, weil sie eine aufwendigere Anpassschaltung erfordern. Einige Halbleiter (NTCs) weisen zwar eine ausgesprochen hohe Empfindlichkeit auf: die Widerstandsänderung beträgt bei Siliziumsensoren etwa –15 Ω/K bis –30 Ω/K; wegen ihres nicht-linearen Verhaltens sind sie aber in Messsystemen wenig verbreitet, weswegen auch insbesondere rauscharme, aber schnell reagierende Interfaces, die zur Transformation des variablen Widerstandes in eine messbare Spannung eingeschaltet werden, nicht marktgängig sind. Die Verwendung von NTCs hätte somit Eigenentwicklungen erfordert. Ausserdem legen Untersuchungen mit NTCs die Vermutung nahe, dass ihre Kennlinie mit der Luftfeuchte variieren kann, was sich als sehr störend im Feldeinsatz erweisen würde.

Deswegen wurden Platin-Sensoren ausgewählt, die ebenfalls in die Klasse temperaturveränderlicher Widerstände fallen, obwohl sie eine verhältnismässig geringe Empfindlichkeit (0.39 Ω/K bei Pt100 und 3.9 Ω/K bei Pt1000) besitzen. Vor allem wegen ihrer sehr linearen Kennlinie (4),

$$R = R_o(1 + AT + BT^2) \qquad (4)$$

mit $A = 3.90802\ 10^{-3}$ /K
$B = -0.580195\ 10^{-6}$ /K^2
R_0: Nennwiderstand bei $T_0 = 0$ °C

die sich im Bereich 0 °C bis 100 °C mit einem Fehler von maximal 0.38 K durch $A = 3.85 \cdot 10^{-3}$ /K und $B = 0$ linearisieren lässt, haben sie weite Verbreitung in vielfältigen Applikationen gefunden. Platin-Sensoren verhalten sich sehr stabil. Ausführungen mit einem Nennwiderstand von 100 Ω (Pt100) bzw. 1000 Ω (Pt1000) sind handelsüblich, wobei der Pt100 durch die DIN IEC 751 den Status als Referenzsensor erlangt hat.

Im Hinblick auf die Messsignalverarbeitung ist zu beachten, dass zusätzliche (und variable) Widerstände (z.B. Kabel unterschiedlicher Länge, Steckerverbindungen usw.) das Messsignal verfälschen können, weswegen bei dieser Aufgabenstellung ein Pt1000-Typ bevorzugt wurde. Bei der Auswahl einer geeigneten Bauform ist die erwünschte Robustheit gegen Umwelteinflüsse (Kapselung in Stahl oder Glas) und die schnelle Ansprechzeit (be-

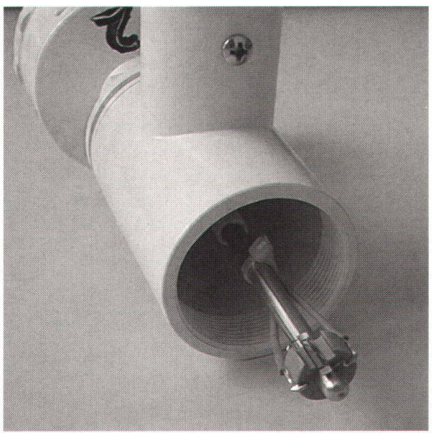

Abb. 2: Montierung des Pt1000-Chip-Sensors und Pt1000-Standard-Sensors.

Hersteller (Lieferant)	Sensor (Peis sFr.)	Genauigkeit nach Herstellerangaben	Anspechzeit Sensorgrösse	Spezifikation Messwertumformer	Strahlungsschutz Abmessung Ventilation Effizienz	Preis für 4 Messstellen
Young (Scintec, Tübingen, D)	Pt1000 (200)	0.1°C	42 s bei 3.5 m/s	10 mV / 0.1°C	Weisser Zylinder 34mm*100mm 3.5 m/s 0.05 °C bei 1kW/m²	5.5 kFr
Friedrichs (Abissa, Renens)	Pt100 ()[1]	1/3 DIN B, andere auf Anfrage	20 s bei 3.5 m/s ca. 5 mm Ø in Glasmantel	< 0.1 °C zwischen 10°C und 30°C	Frankenberger 173mm*490 mm 3.5 m/s k.A.	14 kFr
Vaisala (Kelag, Schwerzenbach)	Pt100 DTS12A (540)	¼ DIN 0.08°C	k. A. ca. 5 mm Ø, 27 mm vorstehend (Inox)	10 mV / 0.1°C	Weisse Lamellen (DTR13F) 220mm*300 mm k.A. k.A.	10 kFr
Suprag, Zürich	Pt100 (250)	1 DIN	5s ...30s [2] 20x30x1.5 mm³	5 mV / 0.1°C	Nicht angeboten	8 kFr [3]
Degussa Schweiz, Baar	Pt1000 Glaschip (40)	1% des Nennwiderstands, 0.66% des Linearitätsfaktors	4.1 s (τ_{90} 0.7 m/s) 12x2x0.15 mm³	10 mV / 0.1 °C (Eigenentwicklung)		5.3 kFr [3]

()[1]: nicht einzeln offeriert [2]: mündliche Mitteilung [3]: Strahlungsschutz Young kalkuliert

Tab. 1: Beispiele für Temperaturmesssysteme verschiedener Anbieter (Preise Stand 1997).

vorzugt in Dünnschichttechnik, auf einem Keramik-Chip ausgeführt) gegeneinander abzuwägen, wobei auch die Montierbarkeit des Sensors in einem ventilierbaren Strahlungsschutzgehäuse zu berücksichtigen ist. Die am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie durchgeführten Messungen wurden zu Vergleichszwecken mit beiden Bauformen ausgeführt, wobei bei vier der acht verfügbaren Fühlereinheiten zusätzlich ein Chip-Sensor (Träger 12 x 2 x 0.15 mm³) in die Nähe eines stiftförmigen, gemantelten Pt1000-Fühlers montiert wurde (vgl. Abb. 2).

3.2 Temperaturmesssystem

Im Hinblick auf die Reduzierung von Fremdeinflüssen auf den Sensor selbst wird ein ventilierter Strahlungsschutz verwendet, dessen Antrieb sensorfern angeordnet ist (vgl. Abb. 2: geöffneter Strahlungsschutz, Abb. 4: Ventialtionseinrichtungen sind jeweils oberhalb der Sensoreinheiten 1–4 angeordnet, um die Erwärmung durch die Ventilationsmotoren zu reduzieren). Zu einem vollständigen Messsystem gehört ausserdem ein Interface, das den originären Fühlerausgangswert (hier Widerstand) in eine übertragbare Messgrösse (Spannung) wandelt, ggf. weiterverstärkt, filtert, digitalisiert und speichert. Meistens bieten die Hersteller eine mehr oder weniger umfangreiche Ausrüstung an, die bis zur Datenspeicherung auf einer PCMCIA-Karte gehen kann. Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft einige Angebote, wobei zu bemerken ist, dass in der Regel mit steigender Sensorgenauigkeit weniger komplexe Komplettsysteme angeboten werden, wodurch zusätzliche Entwicklungen für Auswerteelektronik und Strahlungs-

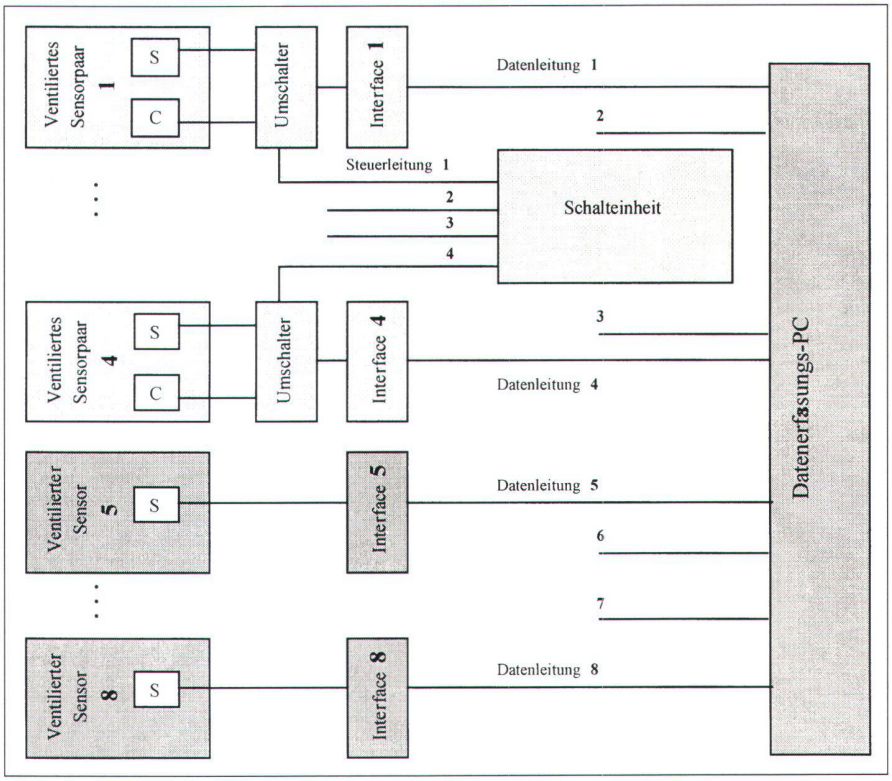

Abb. 3: Aufbau des Messsystems (S = Standardsensor; C = Chipausführung).

schutz notwendig werden. Zu bemerken ist weiterhin, dass trotz der toleranzgrenzenbezogenen Klassifizierung nach DIN die letztendlich erreichbare Temperaturgradientenmessgenauigkeit aus den Herstellerangaben nur schwierig bis gar nicht abzuleiten ist und Ansprechzeiten nur ungenügend angegeben werden. Hinsichtlich der Entwicklung eines Temperaturgradientenmesssystems vereinfacht sich die Problemstellung, da ja lediglich Temperaturdifferenzen bestimmt werden müssen, weswegen die Absolutgenauigkeit von untergeordneter Bedeutung ist. Wichtig ist, dass das Verhalten der Sensoren untereinander stabil bleibt. Am IGP werden Young-Fühler mit Strahlungsschutz verwendet, die sich durch eine kleine Bauweise auszeichnen und sowohl in elektrischer als auch in mechanischer Hinsicht leicht durch die schnell ansprechenden Pt1000-Chip-Sensoren erweitert werden konnten: Wegen identischer Sensor-Spezifikationen kann für die zusätzlich applizierten Chip-Sensoren (vgl. Abb. 2 mit geöffnetem Strahlungsschutz) dasselbe Interface verwendet werden wie für die Standardsensoren.

3.3 Datenerfassung

Die Ausgangssignale des Temperaturmesssystems liegen zunächst als Spannungen vor, wobei der Temperaturbereich von –50 °C bis +50 °C durch eine Spannung zwischen 0 V und 10 V repräsentiert wird. Sie werden einer A/D-Wandlerkarte in einem PC zugeführt, wo sie digitalisiert und nach Anbringen einer a-priori festgelegten Kalibrierfunktion als Temperaturdaten abgespeichert werden. Dabei lassen sich Datenraten (maximal 0.5 Hz) und Mittelungszeiten (minimal 6 s) festlegen. Um die Qualität der Daten beurteilen zu können, werden neben dem Mittelwert auch die Standardabweichung einer Einzelmessung und Maximal- und Minimalwert eines Mittelungszeitraumes abgelegt. Datenerfassungseinheit und Sensoreinheit mit Verstärker lassen sich bis zu 75 m voneinander entfernt platzieren, um Störeinflüsse durch zusätzliche Wärmequellen (PC, Beobachter) zu vermeiden. Diese Anordnung besitzt den Vorteil, die Messelektronik und damit zusätzliche Wärmeentwicklung am Fühler auf ein Minimum zu beschränken, jedoch ist aus Sicht der Datenübertragung eine Digitalisierung an der Messstelle vorzuziehen, wodurch auf der Signalübertragungsstrecke das Messrauschen und zusätzliche Fehlereinflüsse weitestgehend eliminiert werden. Die bisherigen Erfahrungen bei Messungen in Tunneln haben allerdings gezeigt, dass auch die analoge Signalübertragung ausreichend störsicher ist, wenn das Fühlerausgangssignal nicht weit vom Messort verstärkt wird. Um das Interface auch für die zusätzlich applizierten Chip-Sensoren zu nutzen, kann das gewünschte Sensorsignal manuell auf den Eingang des Verstärkers geschaltet werden, wobei auch dies aus Gründen der Elimination von zusätzlichen Wärmequellen vom Ort der Datenerfassungseinheit aus erfolgt.

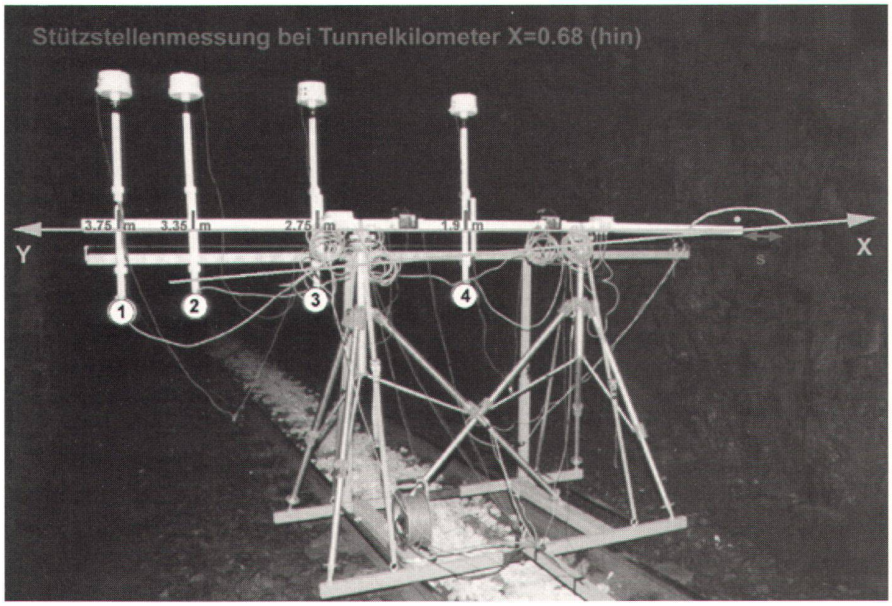

Abb. 4: Messwagen im Albula-Tunnel.

3.4 Messwagen

Bei den bisherigen Untersuchungen von Temperaturprofilen in Tunneln wurde eine Messanordnung eingesetzt, die bis zu acht ventilierte und strahlungsgeschützte Sensorelemente enthält, wovon vier als Sensorpaare, bestehend aus einem Standard-Sensor mit einem applizierten Chip-Sensor in einer gemeinsamen Strahlungsschutzhaube, ausgeführt sind. Diese Sensorpaare werden jeweils gemeinsam ventiliert. Die Sensoreinheiten sind in beliebigen Positionen an einem Träger zu befestigen, so dass Temperaturquerprofile über einen Bereich der Trägerlänge (etwa 4 m) bestimmbar sind. Um die Variabilität des Temperaturfeldes längs der Tunnelachse über einen weiten Bereich möglichst bei unveränderten Temperaturverhältnissen erfassen zu können, ist eine schnelle Verschiebung der Messeinrichtung erforderlich, weswegen sie auf einem eigens zu diesem Zweck konstruierten Wagen montiert wurde, der auf verschiedene Spurweiten der meist in Tunneln verlegten Geleisen adaptierbar ist. Mit einem solchen Wagen können von einem erfahrenen Team etwa zehn Profile (d.h. mit insgesamt 80 Stützstellen) in 1.5 h gemessen werden, wenn die Beobachtungszeit auf einer Position etwa 5 Minuten beträgt und die Profilabstände nicht weit auseinander liegen (wie in Kap. 5 beschrieben).

3.5 Kalibrierung

Wie bereits einleitend erwähnt, werden Temperatursensor- bzw. Messsystemgenauigkeiten nach DIN IEC 751 angegeben und beziehen sich auf die Absolutgenauigkeit. Im Falle der Temperaturgradientenmessung ist die Absolutgenauigkeit von untergeordneter Bedeutung; da es

sich um kleine Differenzen handelt (<1 K), braucht auch die Linearität nicht sehr genau bekannt zu sein. Die Exemplarstreuung darf also recht hoch sein, solange sie in geeigneten Kalibrierungsverfahren ermittelt werden kann. Von wesentlich grösserer Bedeutung ist die Robustheit gegen Störeinflüsse und die Kalibrierhaltigkeit. Deswegen wird für das Messsystem ein einfaches Kalibrierverfahren angewendet, das auf die Vergleichsmessung zu einem – zum Messsystem selbst gehörenden – Referenzsensor (hier Sensor Nr. 4) beruht, wobei während der Messung die Umgebungstemperatur möglichst keinen räumlichen oder zeitlichen Schwankungen unterworfen sein sollte. Um allfällige Effekte zu minimieren, werden hierzu die Sensoren in mehreren geometrisch möglichen Kombinationen dicht nebeneinander angeordnet und die Temperaturdifferenz zum Referenzsensor bestimmt. Dabei hat sich herausgestellt, dass die atmosphärischen Bedingungen in einem Tunnel durchaus ausgewogener und stabiler sein können als in einer Klimakammer, wodurch bei einer Kalibrierung vor Ort vor und nach der eigentlichen Profilaufnahme eine höhere Genauigkeit erzielt werden kann und gleichzeitig das System auf seine zuverlässige Funktionsweise nach dem Transport überprüft wird. Allfällige Abhängigkeiten der Eigenschaften des Interfaces von der Umgebungstemperatur werden so mitberücksichtigt. Geübte Anwender können innerhalb von 40 Minuten einen vollständigen Kalibrierdatensatz erzeugen, in dem sowohl der Standard- als auch der Chip-Sensor in jeder Geometrie ausreichend lange (jeweils 5 Minuten entsprechend 50 Datensätzen) beobachtet worden ist.

Aus den Kalibrierungen lassen sich Aussagen über die erreichbare Genauigkeit ableiten. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass mit zunehmender Beobachtungsdauer der Einfluss des Messrauschens sinkt, aber in Abhängigkeit vom turbulenten Verhalten der Luft der Einfluss der zeitlichen Temperaturvariationen steigen kann: Auf freiem Feld lassen sich Temperaturschwankungen von einigen Hundertstel bis einem Zehntel Grad während weniger Sekunden aus Messungen mit unmittelbar ansprechenden Sonics feststellen [Hennes, 1995]. Die in diesem Bericht ermittelten Temperaturgradienten sind aus Beobachtungen über fünf Minuten bestimmt worden. (Die zeitliche Optimierung des Messvorgangs wird in weiteren Experimenten untersucht werden.) Da ein Ausreisser in einem abgespeicherten Datensatz sowohl den Mittelwert über das Beobachtungsintervall (Speicherwert) als auch die Standardabweichung bei entsprechend kleinen Samples signifikant verfälscht, kann letztere herangezogen werden, um eine einfache Filterung der Daten vorzunehmen. Es hat sich gezeigt, dass eine Gewichtung mit der reziproken Varianz eine ausreichende Reduzierung des Einflusses dieses fehlerbehafteten Wertes auf das Gesamtmittel bewirkt. Alle Beobachtungen sind somit als Temperaturdifferenz bezogen auf den Referenzsensor zu verstehen. Mit dieser Methode lässt sich die Temperaturdifferenz mit einer inneren Genauigkeit von 0.02 K...0.04 K angeben. Der Kalibrierwert, der aus dem Mittel dreier geometrischer Anordnungen (z. B. bei Verwendung von vier Sensoren: 4 1 2 3, 4 1 3 2, 4 2 1 3) berechnet wird, ergibt sich mit einer Standardabweichung von 0.01 K ... 0.02 K, so dass die innere Genauigkeit einer kalibrierten Temperaturdifferenz 0.03 K ... 0.04 K beträgt. Dies gilt für beide Sensortypen und für Mittelungszeiten über etwa fünf Minuten. Innerhalb einer solchen fünfminütigen Beobachtungsreihe schwanken die Messwerte einer einzelnen Temperatur etwas mehr (0.03 K für die Standardsensoren und 0.04 K ... 0.05 K für die Chip-Sensoren), woraus zu folgern ist, dass während der Messzeit Temperaturfluktuationen auftreten, die mit dem schnelleren Chipsensoren in grösserem Umfang erfasst werden. Weil diese Fluktuationen jedoch für alle Sensoren zu einem grossen Teil gleichartig sind, werden sie durch die Differenzbildung von Mittelwerten eliminiert.

Um eine Aussage über die äussere Genauigkeit zu treffen, müssen die Umgebungsbedingungen geändert werden. Hierzu sollen die Ergebnisse der bisher durchgeführten sieben Kalibrierungsmessungen herangezogen werden, die gleichzeitig eine Aussage über die Kalibrierhaltigkeit erlauben. Die vor und nach einer Session durchgeführte Kalibrierung (zeitlicher Abstand etwa 6 h) zeigte bei den Standard-Sensoren eine mittlere Abweichung von –0.01 K mit einer Standardabweichung von 0.04 K, was den Schluss nahelegt, dass die zwischenzeitlich durchgeführten Temperaturdifferenzmessungen ebenfalls mit einer Genauigkeit von 0.04 K durchgeführt werden konnten. Im Gegensatz dazu änderte sich die Kalibrierung der Chip-Sensoren um 0.17 K mit einer Standardabweichung von 0.05 K. Die Chip-Sensoren scheinen also selbst in der kurzen Zeit von 6 h ihre Kalibrierung nicht gehalten zu haben. Da die Standardabweichung nicht erheblich angestiegen ist, liegt die Ursache vermutlich beim Chip-Referenzsensor; möglicherweise ist durch die Erschütterungen beim Verschieben des Messwagens an einem der haarfeinen Verbindungsdrähte zum Chip oder an den Kontakten eine Störung aufgetreten. Die Zuverlässigkeit der Messung wird also durch die Doppelbestückung erhöht. Weiterhin ist natürlich zu berücksichtigen, dass die Chip-Sensoren turbulenzbedingte Luftunruhen und damit einhergehende Temperaturschwankungen in weit grösserem Umfang erfassen als die Standard-Sensoren. Detailanalysen haben gezeigt, dass die zeitlichen Temperaturschwankungen zu gross sind, um Messergebnisse, die in ein und demselben Ansaugrohr erhalten wurden, miteinander im Hinblick auf das Sensor-Leistungsverhalten vergleichen zu können. Vergleicht man die in einem Zeitraum von 17 Monaten durchgeführten Relativkalibrierungen der Standard-Sensoren, zeigt sich eine Stabilität im Sinne einer Standardabweichung von 0.01 K ...0.03 K relativ zum Referenzsensor, wobei sich keine Drifterscheinungen ergaben. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde das Messsystem von ursprünglich vier auf acht Sensoren des Standardtyps erweitert.

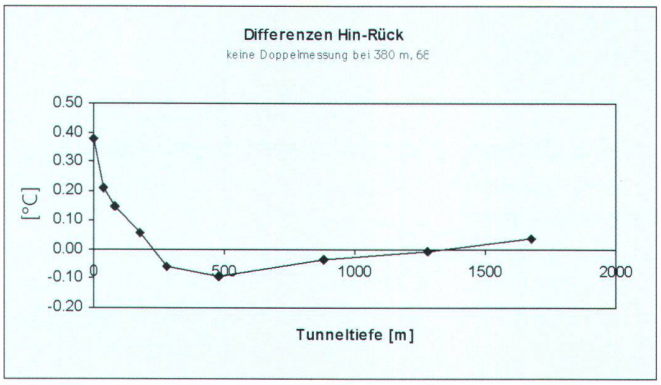

Abb. 5: Temperaturdifferenz in der Tunnelachse während der Messsession.

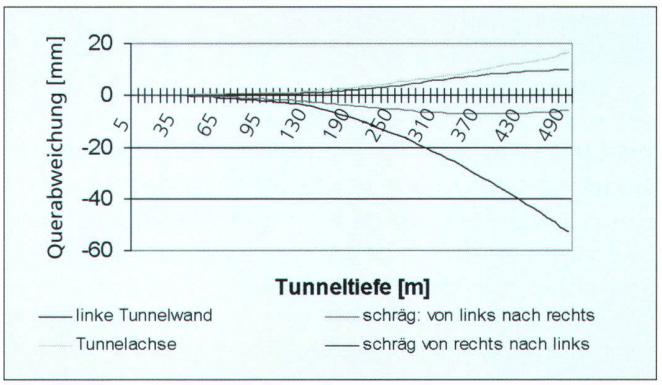

Abb. 7: Visuren im Temperaturprofil Albula-Tunnel (200–700 m).

4. Systemerprobung im Albula-Tunnel

4.1 Situation

Eine der ersten Systemerprobungen fand im Albula-Tunnel statt. Der etwa 4 m breite und beinahe 6 km lange Tunnel verbindet Preda im Albula-Tal mit Bevers im Oberengadin. Die Messsession mit 11 Stützstellen in der Nacht vom 2.6.98 auf den 3.6.98 sollte Aufschluss über das Temperaturfeld der ersten 1.7 km im Portalbereich Preda geben. Zum Zeitpunkt der Messung standen lediglich vier Sensoren zur Verfügung. Um ein dichteres Stützstellennetz zu erzielen, wurde im Hin- und Rückgang gemessen, wobei zuerst die Sensoren auf der jeweils vom Portal aus gesehenen linken Tunnelseite verteilt waren und während der Rückmessung auf der rechten. Durch eine dichtere Anordnung der Sensoren in Wandnähe wurde dort eine höhere Auflösung gewährleistet. Der Referenzsensor (Sensor Nr. 4) befand sich jeweils in der Tunnelachse, so dass Rückschlüsse über die Temperaturfeldänderung während der Messung gezogen werden konnten.

4.2 Temperaturprofile

Die Analyse der beiden von Sensor 4 zeitlich seriell gemessenen Achstemperaturen zeigt, dass sich die Temperatur während der Messzeit von 6 h um maximal 0.4 °C am Tunnelportal ändert (vgl. Abb. 5). Der gleichmässige Verlauf lässt darauf schliessen, dass Messfehler ausgeschlossen werden können und es sich um die zunehmende Abkühlung im Portalbereich während der Nachtstunden handelt. Dieses Ergebnis zeigt, dass sich die Temperaturgradienten zeitlich schnell ändern können, weswegen Richtungskorrekturwerte nur aus simultan zur geodätischen Beobachtung durchgeführten Temperaturmessungen relevant abgeleitet werden können. Für die Abschätzung der resultierenden Querabweichungen eines Polygonzuges, der dieses Temperaturfeld kreuzt, werden die beiden Teilprofile entsprechend dem Mittelwert der Achstemperatur aneinander angepasst und dann das Temperaturfeld durch eine analytische Funktion (vgl. 2.2) beschrieben, wobei die Genauigkeit einer interpolierten Temperatur zwischen 0.02 K (bei 200 m) und 0.04 K (bei 700 m) liegt. Damit ist im Vergleich zur inneren Genauigkeit einer gemessenen Temperatur sichergestellt, dass die Parametrisierung nicht zu hoch getrieben wurde. Aus der zweidimensionalen Interpolationsfunktion lassen sich Temperaturgradienten auf etwa 0.02 K/m im vorderen Bereich und 0.06 K/m im hinteren Bereich ableiten, die in etwa der äusseren Genauigkeit einer Temperaturdifferenzmessung entsprechen.

4.3 Resultierende Querabweichungen

Die resultierende Richtungsverschwenkungen auf den ersten beiden Polygonseiten wird beispielhaft für eine Visur von 500 m Länge berechnet, die 200 m hinter dem Portal beginnt, um lokal schnell ändernde Effekte auszuschliessen. Basierend auf (3) lässt sich so eine Querabweichung mit einer Genauigkeit von 3 mm

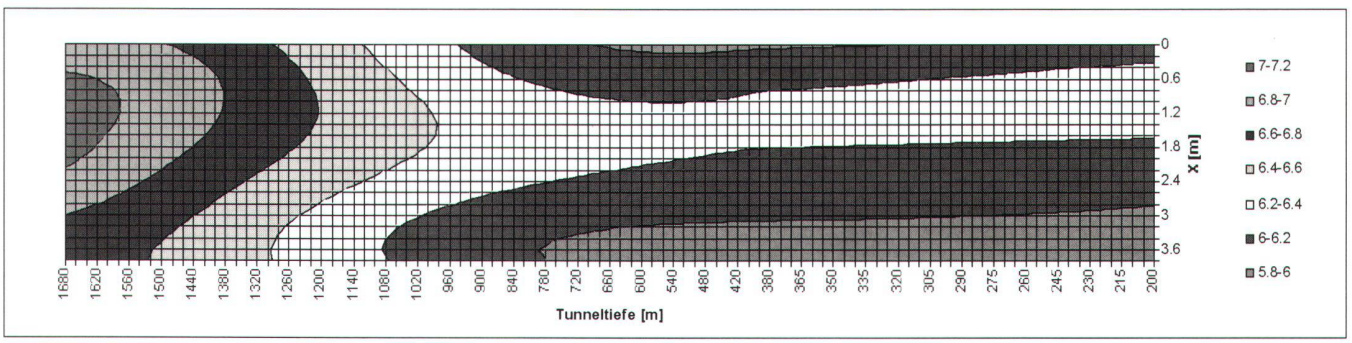

Abb. 6: Temperaturfeld im Albula-Tunnel (variabler Massstab auf der y-Achse).

bis 4 mm bestimmen. Wird die Visur längs der Tunnelwand geführt, ergibt sich eine Querabweichung von mehr als 50 mm, im Bereich der Tunnelachse von etwa 16 mm. Verläuft die Visur annähernd in der Temperaturfeldachse, reduziert sich die Querabweichung auf weniger als 3 mm. Betrachtet man das – wegen des antisymmetrischen Durchgangs durch das Temperaturfeld – vielfach als ausmittelnd beschriebene Zick-Zack-Verfahren, wobei die Visuren immer zu gegenüberliegenden Wänden verlaufen, ergibt sich eine Querabweichung von –6 mm auf der ersten Seite (200 m bis 700 m, Rückblick: –13 mm) und 13 mm auf der zweiten Seite (700 m bis 1200 m, Rückblick: 1 mm), die in der Summe über diese beiden Polygonseiten mit 20 mm keine nennenswerte Reduktion der systematischen Abweichungen darstellt. Beim Doppel-Zick-Zack-Verfahren mit sich kreuzenden Visuren zeigt sich als Mittelwert der Verschwenkung nach zwei Seiten 11 mm. Das Beispiel zeigt, dass sich beide Verschwenkungen nicht vollständig aufheben. Im Hinblick auf das nicht zur Tunnelachse symmetrische Temperaturfeld (vgl. Abb. 6) ist das Ergebnis plausibel. Auch aus rein statistischer Sicht kann es als signifikant nachgewiesen bezeichnet werden. Asymmetrisch gleichmässig auftretende Effekte können also insbesondere auf langen Polygonzügen zu erheblichen Fehlerquellen führen.

5. Anwendung bei lokaler Wärmequelle

5.1 Situation

Asymmetrische und inhomogene Verhältnisse bei besonders grossen Temperaturgradienten entstehen auch in der Nähe lokaler Wärmequellen wie Klimaanlagen, Baumaschinen oder Transportsystemen. Untersuchungen wurden an dem Fallbeispiel einer Diesellokomotive, die im Vereina-Tunnel bei Stollenkilometer 10.4 positioniert war, durchgeführt. Um die Signifikanz der Resultate zu erhöhen, ist eine verdichtete Messung notwendig, weswegen das Messsystem auf acht Sensoren erweitert wurde und die Profilabstände im Bereich des Triebwagens deutlich dichter gewählt wurden.

5.2 Temperaturfeld

Bei Beginn der Messung lief der Triebwagen bereits seit einigen Stunden im Standbetrieb, so dass sich ein lokales Temperaturgradientenfeld ausbilden konnte. In Abb. 9 sind lediglich die Verhältnisse neben und 250 m hinter der etwa 12 m langen Lokomotive dargestellt, da im weiteren Verlauf keine wesentlichen Gradienten mehr auftraten. Deutlich ist die Erhöhung der Temperatur um etwa 1.5 °C im Bereich der Lokomotive (0–50 m) erkennbar. Der ungleichmässige Abfall in y-Richtung ist durch wirbelartige Ausströmeffekte erklärbar.

5.3 Resultierende Querabweichung

Die Richtungsverschwenkung wird für den Extremfall betrachtet, wobei der Theodolit in der Nähe der Lokomotive positioniert ist und das Ziel sich im Fernfeld (250 m) befindet. Obwohl erheblich grössere Gradienten (bis zu 0.5 K) im Bereich der Lokomotive auftreten als im Fallbeispiel Albula-Tunnel, und obwohl sie gerade im Anfangsbereich den grössten Einfluss auf die Visur haben, bewirken sie nur geringe Querverschiebungen, weil sie nur etwa auf 2% der Gesamtdistanz wirken. Für Visuren im Abstand 1 m, 1.5 m, 2 m, und 2.5 m zum Triebwagen jeweils parallel zur Tunnelachse ergeben sich folgende Abweichungen: 1.9 mm, 1.6 mm, 0.6 mm und –0.2 mm. Lokale Wärmequellen können also weitaus unkritischer sein als gleichmässig senkrecht zur Visur bzw. Tunnelachse verlaufende Gradienten.

6. Fazit

Immer noch zählt die Realisierung von refraktionsfreien Richtungsmessungen zu einer der bislang ungelösten Aufgaben der Geodäsie. Mit dem physikalisch basierten Ansatz der Temperaturgradientenmessung lassen sich zumindest kritische Bereiche aufdecken, an denen besondere Vorkehrungen zur Refraktionsreduktion getroffen werden müssen. Untersuchungen in verschiedenen Tunneln haben gezeigt, dass das Temperaturfeld raschen Änderungen unterworfen sein kann, weswegen die geodätische Richtungsbeobachtung und die Bestimmung der Korrektion gleichzeitig erfolgen muss. Obwohl die hohen Genauigkeitsansprüche eine aufwendige Messeinrichtung erfordern, hat sich das benutzte Messsystem aufgrund seiner leichten Beweglichkeit auf Geleisen und der einfachen Handhabung als hierzu geeignet erwiesen. Die Zuverlässigkeit der Daten wird durch eine einfaches Vor-Ort-Kalibrierungs-Verfahren sichergestellt. Es ist gewährleistet, dass sowohl die Stützstellenanzahl den örtlichen Gegebenheiten als auch die Parametrisierung des funk-

Abb. 8: Messsituation im Vereina-Tunnel.

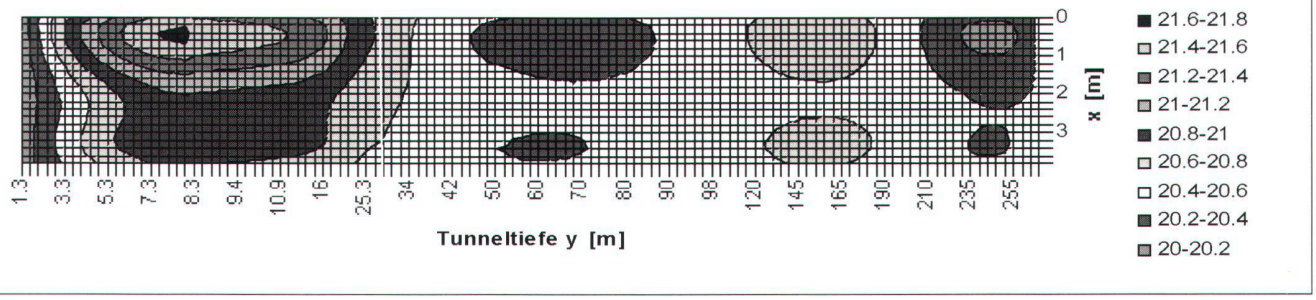

Abb. 9: Temperaturprofil im Nah- und Fernfeld der Diesellok (variabler Massstab auf der y-Achse).

tionalen Modells für die Beschreibung des Temperaturfeldes den Daten angepasst werden kann. Insbesondere durch die hier gezeigte Erweiterung des funktionalen Modells hinsichtlich einer stetig differenzierbaren räumlichen Funktion wird die Genauigkeit der Korrekturwerte erhöht. Die Anwendung dieses Verfahrens ist aus wirtschaftlicher Sicht immer dann empfehlenswert, wenn grosse Gradienten über längere Distanzen vermutet werden. Die Ableitung von Richtungskorrekturen ist für kleine Bauabschnitte sinnvoll; allerdings bleibt ihre Unsicherheit zu gross, um Extrapolationen über grössere Streckenabschnitte zuverlässig zu erlauben. Hier bietet die Dispersometrie, ein Verfahren zur refraktionsfreien Richtungsmessung mittels aufwendigem und hochempfindlichem Instrumentarium [Böckem, 1998], die einzige Chance, den in grossen Tunnelbauprojekten gestellten Anforderung zu genügen.

Dank

Wir danken an dieser Stelle allen, die uns die Messungen unter Tunnelbedingungen ermöglicht haben. Insbesondere sind hier zu nennen: von der Bauleitung Alptransit: Herr Walker (Fa. Amberg) und Herr Stüssi (Elektrowatt Engeneering); von der Bauleitung Vereina-Tunnel Herr Röthlisberger, als Vertreter der Rhätischen Bahn Herr Altermatt und Herr Schmied. Ausserdem danken wir für die Betreuung im Albula-Tunnel. Weiterhin möchten wir den Mitarbeitern der mechanischen Werkstätten der ETH und Herrn Sorber (Elektroniklabor IGP), die durch ihre spontane Unterstützung unmittelbare Modifikationen an der Messeinrichtung erlaubten, unseren Dank aussprechen.

Literatur:

Böckem, B. [1998]: Optische Richtungsübertragung höchster Genauigkeit durch Ausnutzung der atmosphärischen Dispersion. Beitrag zu Geodätische Woche 98, Kaiserslautern, 12.–17.10.1998. In: Progress in Geodetic Science at GW 98, Shaker Verlag, Aachen.

Christ, H.; Dönicke, R. [1998]: Untersuchungen zur Erfassung von inhomogenen Temperaturfeldern. Diplomarbeit WS 1997/98, IGP, ETH Zürich.

Heister, H. [1997]: Experimentelle Untersuchungen zur Horizontalrefraktion im Tunnelbau. Universität Innsbruck, Inst. für Geodäsie. IX. Intern. Geodätische Woche, Obergurgl 1997. Institutsmitteilungen Heft 17, Fachvorträge.

Hennes, M. [1998]: Zum Einfluss inhomogener Brechungsindexfelder auf die Verschwenkung offener Polygonzüge am Beispiel des Tunnelvortriebs. IGP, Mitteilung Nr. 65, 88 Seiten.

Hennes, M.; Böckem, B.; Flach, PH. [1998]: Recent Developments for Refraction-free Optical Measurements. XXI. FIG-Kongress, 19.–25. Juli, 1998, Brighton (GB).

Hennes, M. [1995]: Entwicklung eines Messsystems zur Ermittlung von Turbulenzparametern der Atmosphäre für Anwendungen in der Geodäsie. Diss, GIUB, DGK, Reihe C, Heft 438.

Hennes, M.; Juretzko, M.; Witte, B. [1994]: Die prüfstreckenunabhängige Modellierung von Additionskorrektionen elektrooptischer Distanzmesser. AVN 101, S. 121–132.

Ingensand, H., Hennes, M., Böckem, B. [1997]: Recent Concepts for Refraction-free Optical Measurements in Tunnels and Vertical Shafts. Proc. «Surveying of Large Bridge and Tunnel Projects», FIG-Symposium Comm. 4, 5 and 6, Copenhagen, June 2.–6. 1997, pp 181–193.

Johnston, A. [1998]: Tunnel alignment and lateral refraction. Tunnels & Tunnelling International, March 1998, S. 58–60.

Johnston, A. [1991]: Lateral Refraction in Tunnels. Survey Review, S. 201–220.

Moritz, H. [1961]: Zur Reduktion elektronisch gemessener Strecken und beobachteter Winkel wegen Refraktion. ZfV, S. 246–252.

Wilhelm, W. [1994]: Die Seitenrefraktion – Ein unbeliebtes Thema? Oder ein Thema nur für Insider? VPK, S. 75–82.

Dr. Maria Hennes
Geodätische Messtechnik
Institut für Geodäsie und
Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zürich
e-mail: hennes@geod.ethz.ch

R. Dönicke
Zürichstrasse 50
CH-8600 Dübendorf

H.-P. Christ
Dammweg 230A
CH-7208 Malans