Die datenbasierte Korrektur refraktionsbedingter Messabweichungen in vierdimensionalen Punktwolken

FREDERIK SCHULTE[1,2], LUKAS WINIWARTER[2] & DANIEL CZERWONKA-SCHRÖDER[1]

Zusammenfassung: Durch den Klimawandel kommt es vermehrt zu gravitativen Massenbewegungen, welche Menschen und Infrastruktur gefährden. Damit diese besser aufgedeckt werden, hat sich das Verfahren des permanenten Laserscannings bewährt, um kritische Bereiche vierdimensional (3D + Zeit) zu überwachen. Besonders im alpinen Raum erzeugen Temperaturgradienten, die insbesondere im Sommer durch Sonneneinstrahlung entstehen, einen signifikanten Refraktionseffekt, der die erhobenen Daten beeinflusst. Um die Auswirkung dieses Effektes systematisch zu untersuchen, wurde ein Laboraufbau entwickelt. Dabei wurden aus Laserscans „Quasi-Tiefenbilder" generiert, die anschließend mithilfe von drei verschiedenen photogrammetrischen Auswertemethoden analysiert wurden. Abschließend konnte der Refraktionseinfluss erfolgreich durch Methoden der Zeitreihenanalyse extrahiert werden.

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren hat sich die Häufigkeit von gravitativen Massenbewegungen, wie Hangrutschungen, Böschungs- und Murenabgängen und Felsstürzen im alpinen Bereich gesteigert. Dies ist nicht zuletzt dem Klimawandel und dem komplexen Zusammenspiel verschiedener Faktoren, welche durch diesen unterschiedlich beeinflusst werden, zuzuordnen (BRASSEUR et al. 2023). Vermehrte Starkniederschlagsereignisse, das Abtauen des Permafrostes, Gletscherschmelze, erhöhte Temperaturen, stärkere Temperaturschwankungen und viele weitere durch den Klimawandel hervorgerufene Effekte sorgen für eine erhöhte, signifikante Gefahr für den Menschen. Die klimatischen Veränderungen erhöhen das Risiko solcher Ereignisse sowohl hinsichtlich ihres Umfangs als auch ihrer Häufigkeit (HUGGEL et al. 2012). Bei der Erfassung und Überwachung dieser Phänomene können Methoden der Geodäsie einen entscheidenden Beitrag in der Prozesskette zum Schutz der Bevölkerung beitragen, indem z.B. photogrammetrische Verfahren oder Laserscanning hochauflösende und verlässliche vierdimensionale (3D + Zeit) Erdoberflächendaten hervorbringen.
Da es bei den klassischen, punktbasierten Verfahren zwangsläufig zu Diskretisierungsfehlern kommt (MÖSER 2012), werden in der jüngeren Vergangenheit vermehrt kontinuierliche, quasi-flächenbasierte Erfassungsmethoden wie das terrestrische Laserscanning (TLS) eingesetzt. Dies ermöglicht die Entwicklung neuer Modellierungsstrategien, die im Gegensatz zu traditionellen, punktbasierten Ansätzen der Deformationsanalyse keine a priori Kenntnisse über das Bewegungsverhalten des zu überwachenden Objekts voraussetzen. Wenn zusätzlich zur geometrischen die zeitliche Auflösung immer höher wird, kann der Übergang zu permanenten Laserscanning (PLS) mit 4D-Datenprozessierung erfolgen, welche eine zusätzliche Informationsextraktion aus den Daten bieten kann (WINIWARTER et al. 2023).

[1] Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie, Am Hochschulcampus 1, D-44801 Bochum, E-Mail: daniel.czerwonka-schroeder@hs-bochum.de
[2] Universität Innsbruck, AB Geometrie und Vermessung, Technikerstrasse 13, AT-6020 Innsbruck, E-Mail: [frederik.schulte, lukas.winiwarter]@uibk.ac.at

 DOI: 10.24407/KXP:1928481663

Konventionelles TLS wird meist mit wenigen Messepochen durchgeführt, wohingegen sich PLS, durch kontinuierliche, zeitlich diskrete Datenerfassungen auszeichnet. Beim PLS, welches auch als automatisches oder autonomes Laserscanning bekannt ist, wird der Scanner an einer definierten Position installiert, wodurch das Messgebiet in diskreten Intervallen von Minuten bis wenigen Stunden kontinuierlich erfasst wird (LINDENBERGH et al. 2025). CZERWONKA-SCHRÖDER (2023) unterteilt das PLS-Verfahren in die Erfassung einzelner Epochen, das Datenmanagement, die multitemporale Datenanalyse und die abschließende Präsentation der Daten.
Durch den inhomogenen Brechungsindex der Atmosphäre entstehen jedoch bei terrestrischen Messungen mit optischen Methoden in der unteren Erdatmosphäre systematische Messabweichungen, welche vor allem Einfluss auf die erfassten Zenitwinkel haben. Gerade im alpinen Raum, wo aufgrund der Topographie ein großes Anwendungsgebiet von PLS liegt, sind die Messdistanzen oft mehrere Kilometer lang, sodass es zu Abweichungen von mehreren Dezimetern kommen kann, welche sich nicht durch die klassischen, punktbasierten Korrekturmodelle beseitigen lassen (FRIEDLI et al. 2019). Die unberücksichtigten, systematischen Abweichungen sind insofern kritisch, da es zu Fehlalarmen in Frühwarnsystemen kommen kann, welche neben dem Verursachen von teils erheblichen Kosten auch das Vertrauen der Menschen in die Technik verringern. Im schlimmsten Fall können Anzeichen von gravitativen Massenbewegungen gar nicht erfasst werden, sodass keine Warnung bei drohender Gefahr ausgelöst wird.
Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen Laboraufbau zu entwickeln, der die Auswirkungen des Refraktionseinflusses in 4D-Laserscanpunktwolken mithilfe von photogrammetrischen Methoden ohne zusätzliche Sensoren aus den Beobachtungsdaten abschätzen kann. Dafür wird zunächst im Labor die Refraktion eines einzelnen Messstrahls mithilfe einer Totalstation bestimmt, bevor drei verschiedene bildbasierte Verfahren für die Refraktionskorrektur eines terrestrischen Laserscanners getestet werden.

2 Refraktionsbestimmung mithilfe bildbasierter Verfahren

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle hängt vom Brechungsindex im Medium ab, welcher bei Messungen in der Erdatmosphäre immer bei größer 1,0 liegt. Um den physikalischen Grund für die Geschwindigkeitsabnahme im optisch dichteren Medium zu erörtern, kann die anschauliche Herleitung nach FEYNMAN (1964) herangezogen werden. In diesem Modell wird die Wechselwirkung des Lichts mit den Elektronen des Mediums beschrieben, die als harmonische Oszillatoren moduliert werden und einen Phasensprung der Eingangswelle hervorrufen, was diese abbremst. Da der Brechungsindex innerhalb der Atmosphäre vor allem in vertikaler Richtung variiert, kann mit dem Snelliusschen Brechungsgesetz die Strahlkrümmung bzw. die Refraktion beschrieben werden. Es sei jedoch angemerkt, dass diese physikalischen Modelle nicht auf vermessungstechnisch relevante Skalen anwendbar sind und daher empirisch geleitete Modelle verwendet werden müssen.
Eine in der geodätischen Praxis anwendbare Methode ist die integrale Bestimmung des Refraktionskoeffizienten, welche auf der Ähnlichkeitstheorie von MONIN & OBUKHOV (1954) aufbaut. Dabei werden kleinteilige, bodennahe Luftpakete mit unterschiedlicher Dichte als Linsen modelliert. Wenn sich der Messstrahl nun durch diese fortbewegt, wird er beeinflusst, was sich als optisches Flimmern widerspiegelt. Um dieses Phänomen physikalisch zu erfassen,

werden Intensitätsschwankungen erfasst und mit dem Impuls- und Wärmefluss in der Luft verrechnet. So können die Berechnung der Höhenkorrektur und des Refraktionskoeffizienten bei Totalstationsmessungen mit dem in ESCHELBACH (2009) dargestellten Berechnungsalgorithmus durchgeführt werden. Da für dieses Verfahren zusätzliche Sensoren und eine lange Integrationszeit benötigt werden, wurden weitere Methoden entwickelt, welche die Turbulenzen mithilfe von bildbasierten Totalstationen erfassen können. Die Turbulenzparameter werden dort aus hochfrequenten Bewegungen oder Intensitätsschwankungen von künstlichen Mustern (Targets) ermittelt, welche von den Kameras moderner Videotachymeter aufgenommen werden können. Diese Informationen werden genutzt, um turbulent refraktive Effekte zu quantifizieren (REITERER & WAGNER 2012). Bei den in REITERER (2012) durchgeführten Vergleichsmessungen zwischen dem Szintillometer SLS20 und einer Leica Geosystems TPS 1200 konnten hohe Korrelationen der Turbulenzparameter ermittelt werden, was die Machbarkeit der Refraktionsbestimmung mit einer Image Assisted Total Station (IATS) bestätigt.
Um die für die Videotachymetrie gezeigten Methoden auf Laserscanning-Punktwolken anzuwenden, wird die 3D-Punktwolke in ein Panoramabild umgerechnet, bei dem die Pixelwerte den Tiefeninformationen aus Sicht des Laserscanner-Zentrums entsprechen. Dieser Ansatz wird verwendet, um die Übertragung des bildbasierten Ansatzes auf das Laserscanning zu überprüfen.

3 Erstellung eines Laboraufbaues mit einer Totalstation

Da es bisher noch einen Laboraufbau für Messungen des Refraktionseinflusses an der Hochschule Bochum gab, musste dieser und das dazu gehörige Messkonzept zunächst erarbeitet werden. Wie in Abb. 1 dargestellt, wurde das Laborexperiment an der Komparatorbahn des Längenmesslabors aufgebaut. Auf der einen Seite ist eine Totalstation (TS) an einer fest installierten Halterung aufgebaut. Auf der gegenüberliegenden Seite, bei einem Abstand von etwa 19 m, ist ein klassisches Rundprisma in der Wand verankert. Wie vorherige Messungen belegen, kann von einer zeitlich stabilen Messkonfiguration zwischen Standpunkt und Zielzeichen ausgegangen werden. Die Steuerung der Totalstation wurde mithilfe eines Raspberry Pi Mikrocomputers realisiert, wobei in regelmäßigen Abständen unter Verwendung der automatischen Zielerfassung (ATR) Messreihen erhoben wurden. Diese ist zwingend notwendig, da das System den Messstrahl für die zentrische Messung eines Prismas verwendet. Wenn nun der Messstrahl durch eine künstliche Wärmequelle abgelenkt wird, reagiert die ATR auf diesen Einfluss und misst fälschlicherweise einen systematisch falschen Zenitwinkel zum angezielten Zentrum des Prismas. Um die Totalstation automatisch steuern und Daten abspeichern zu können, wurde ein Python-Skript entwickelt, welches über die Leica-GeoCOM-Schnittstelle mit dem Messinstrument kommunizieren und so den automatischen Ablauf jeder Messepoche steuern kann. Zeitgleich wurde eine Temperaturgradienten-Messung, welche durch zwei vertikal angeordnete Temperatursensoren realisiert wird, durchgeführt, und mit der TS-Messung synchronisiert. Nach einer Messzeit von einer Minute wird ein Heizlüfter in verschiedenen Abständen zur Totalstation für jeweils sieben Minuten unter dem Messstrahl eingebracht. Dieser erwärmt die Luft an der jeweiligen Position und sorgt für starke statische und turbulente refraktive Effekte in diesem Bereich. Danach wird der Heizlüfter wieder ausgeschaltet und die Messung so lange fortgeführt, bis der Temperaturgradient wieder nahe Null liegt. Aus den Messwerten und dem zuvor mit einem Lasertracker ermittelten Soll-

Höhenunterschied zwischen Standpunkt und Prisma kann der Refraktionskoeffizient jeder Einzelmessung bestimmt werden. Dabei wurde auf der einen Seite mit dem Taster des Lasertrackers die Höhe Kippachse der Totalstation bestimmt. Auf der anderen Seite wurde das

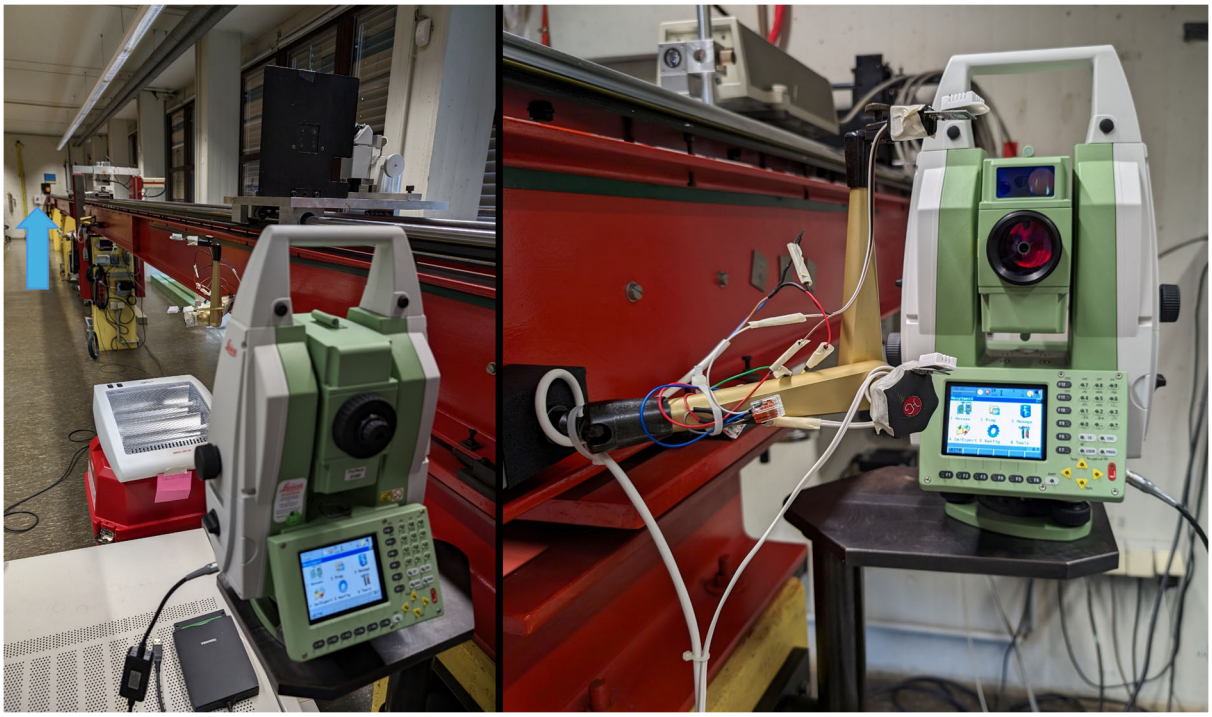

Abb. 1: Darstellung des Totalstations-Messaufbaus im Labor. Auf der linken Seite ist im Hintergrund das Prisma zu erkennen, welches mit einem blauen Pfeil markiert ist. Im Vordergrund ist die automatisch gesteuerte Totalstation zu sehen. Der benötigten Temperaturgradient wurde durch den weißen Heizlüfter, welcher unterhalb des Messstrahls aufgebaut wurde, erzeugt. Auf der rechten Seite ist im Detail die Totalstation und das Temperaturgradient-Messsystem zu erkennen, welches magnetisch an der Komparatorbahn oberhalb des Heizlüfters befestigt werden konnte

Prisma an 21 Stellen abgetastet und das Zentrum mit Methoden der Parameterschätzung ermittelt. Um das System am Schwerefeld der Erde zu auszurichten, wurde der eingebaute Kompensator im Lasertracker verwendet. Die Unsicherheit des Höhenunterschiedes wurde mit allen Einflussgrößen in einer gemeinsamen Varianzfortpflanzung berechnet und lag bei etwa 50 µm.

Die eigentliche Datenerhebung wurde mit einer Nullmessung über Nacht gestartet, welche die Eignung des Labors bestätigte, da keine linearen oder zyklischen Effekte zu erkennen waren. Im Anschluss konnte die Größenordnung des Refraktionseinflusses trotz der relativ kurzen Zielweite nachgewiesen werden. Dies ist in Abb. 2 dargestellt, wo die gemessenen Höhenversätze als schwarze Punkte und die Turbulenzeffekte als Fehlerbalken eingetragen sind. Mit den Höhenversätzen wurde im Anschluss eine Trendschätzung durchgeführt, welche als gestrichelte, rote Linie dargestellt ist. Auf diesen Trend wurden die Turbulenzeffekte in hellroter Schraffur modelliert. Mit der Trendlinie konnte zudem der Höhenversatz für vier Strahlabschnitte von je 4,81 m Länge interpoliert werden. Die interpolierten Werte sind als Magenta-farbige Kreuze im Plot dargestellt. Zuletzt wurden als blaue Kreuze die Literaturwerte aus BROCKS (1939) ergänzt. Diese sind bereits vor 85 Jahren durch Untersuchungen des Refraktionseinfluss, abhängig vom jeweiligen Strahlabschnitt entstanden. Die Studie zeigt, dass atmosphärische Einflüsse, welche mit dem Messstrahl im ersten

Strahlabschnitt interagieren, einen deutlich größeren Effekt auf die Höhenmessung haben als Einflüsse, die in späteren Abschnitten auftreten.
Durch diese Analyse konnte die Differenz des Rauschens und des Höhenunterschiedes, bezogen auf die Zeit, während der Heizlüfter lief, und während er ausgeschaltet war, analysiert werden. Wenn durch den größeren Temperaturgradienten der Refraktionskoeffizient an der jeweiligen Stelle im Messstrahl erhöht wird, wird der Strahl stärker gebrochen, und es wird eine größere Höhendifferenz zwischen Totalstation und Prisma beobachtet. Da der Temperaturgradient konstant ansteigt, konnte der mittlere Temperaturgradient als Referenz für die gesamte Einschaltzeit angenommen werden. Aus der Trendlinie lässt sich erkennen, dass der Einfluss des Wärmefeldes mit der Distanz nachlässt. Dies stimmt mit der geometrischen Interpretation einer konstanten, durch Refraktion hervorgerufenen, Winkeländerung des Messstrahls überein. Zusätzlich sind die ebenfalls in ihrer Amplitude mit der Distanz fallenden turbulenten Rauschanteile abzulesen. Bemerkenswert ist die hohe Übereinstimmung der Ergebnisse mit den Werten von BROCKS (1939), welche im Bereich von 2 % liegen.

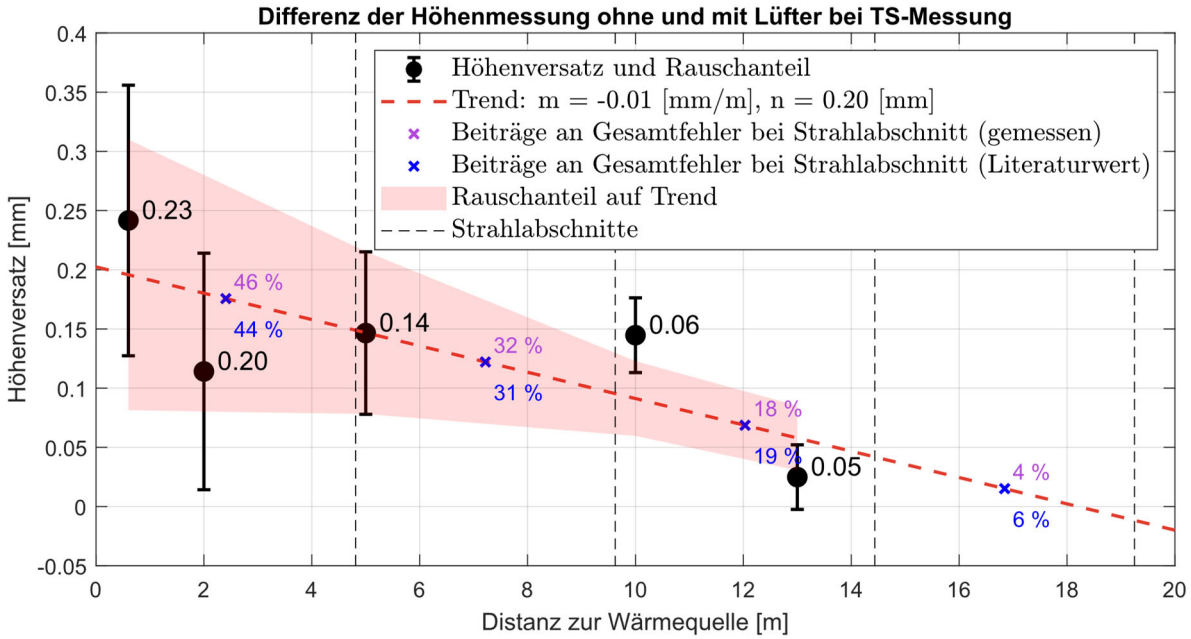

Abb. 2: Darstellung des Höhenversatzes und des Rauschens bei der Totalstations-Messung zwischen der Zeit, während der Heizlüfter lief und während er ausgeschaltet war. Zudem wurde die Messdistanz in vier Abschnitte unterteilt und mithilfe einer Trendschätzung der mittlere Einfluss jedes Abschnittes mit dem Litertaturwert nach BROCKS (1939) verglichen

Mit der Nullmessung wurde gezeigt, dass die Laboratmosphäre für derartige Messungen geeignet ist. Zusätzlich wurde das Messkonzept erfolgreich erprobt und erreichbare Genauigkeitsanforderungen für die Hauptuntersuchung mit dem Laserscanner abgeschätzt.

4 Messung und Auswertung der Punktwolken mit photogrammetrischen Methoden

Die Auswertung von Punktwolken ist deutlich komplexer und fehleranfälliger gegenüber unerwünschten, systematischen Messabweichungen, welche das Ergebnis verfälschen, als die Auswertung von Einzelpunkten. Daher wurden in dieser Arbeit bildbasierte Auswerteansätze genutzt, welche vor allem die geringere Genauigkeit und die fehlende Diskretisierung eines

TLS gegenüber einer TS durch die deutlich höherfrequente, flächenhafte Abtastung ausgleichen können. Um die im vorherigen Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse auf die mit einem Laserscanner erhobenen Punktwolken zu übertragen, wurde der dort vorgestellte Messaufbau weitestgehend beibehalten und lediglich die Instrumentierung ausgetauscht. Mit

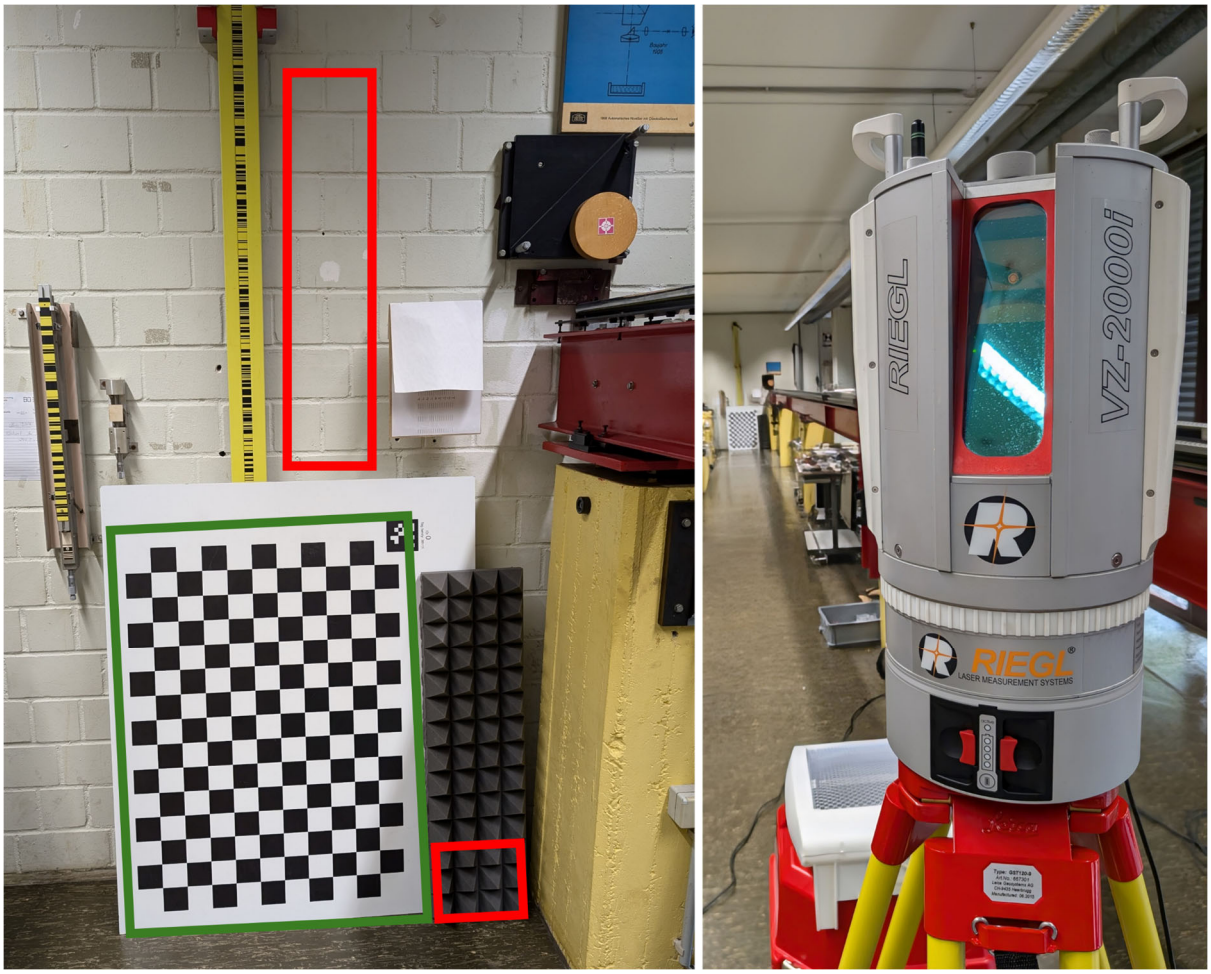

Abb. 3: Darstellung des Messaufbaus mittels TLS. Auf der linken Seite ist das Untersuchungsgebiet der verschiedene Auswertemethoden dargestellt. Dies sind zum einen die Fugen und der Schallschutz-Schaum (rot), welche für die 2D-Kreuzkovarianz-Methode verwendet wurden und zum anderen das Kamera-Kalibrierungs-Schachbrett (grün) für die „Schachbrett-Methode“. Die Feature-Methode wurde auf den gesamten Bereich angewendet. Auf der rechten Seite ist der Laserscanner mit dem Heizlüfter im Detail dargestellt

dem Scanner wurden alle 30 Sekunden insgesamt 64 Epochen gemessen, wobei der Heizlüfter, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, zwischenzeitlich angestellt wurde. Während dieser Zeit sollten auch hier durch Refraktion die Messstrahlen gebrochen werden, sodass eine scheinbare vertikale Verschiebung der zeitlich stabilen Bereiche im Vergleich zur Referenzepoche beobachtet werden müsste. Um dies nachzuweisen, wurden die Daten mit drei, in Abb. 4 dargestellten, adaptierten, photogrammetrischen Verfahren ausgewertet. Die ersten Auswerteschritte wurden für jede Scanepoche und jedes der drei Verfahren durchgeführt: Zunächst wurde die Punktwolke mit einer festgelegten Bounding Box auf die Untersuchungsbereiche zugeschnitten. Im nächsten Schritt wurden die Ebenenparameter der Wand mithilfe eines Gauß-Helmert-Modells geschätzt. Um die Auswertung mit voller Kovarianzmatrix durchführen zu können, wurde das stochastische Modell (a priori) des Scans mithilfe des Varianzfortpflanzungsgesetzes auf die gemessenen Punkte übertragen. Dadurch

war es möglich, Ausreißer zu detektieren und diese aus der Parameterschätzung zu entfernen. Im letzten gemeinsamen Vorverarbeitungsschritt wurden alle Koordinaten auf die Ebene projiziert und ein rasterisiertes Bild mit einer Auflösung von 0,5 mm interpoliert. Als Pixel-Werte wurden die Residuen der Ebenenschätzung, welche die Distanzen zu der Ebene darstellen, übernommen, sodass ein „Quasi-Tiefenbild" relativ zur geschätzten Ebene entsteht. Im Anschluss an diesen Vorverarbeitungsschritt konnte schließlich der Höhenversatz mit drei verschiedenen photogrammetrischen Bildverarbeitungsverfahren bestimmt werden. Dabei wurde die erste Messung als Referenzepoche und die danach aufgenommenen Messdaten jeweils als Folgeepoche festgelegt, sodass immer der Unterschied zur ersten Epoche ausgewertet wurde.

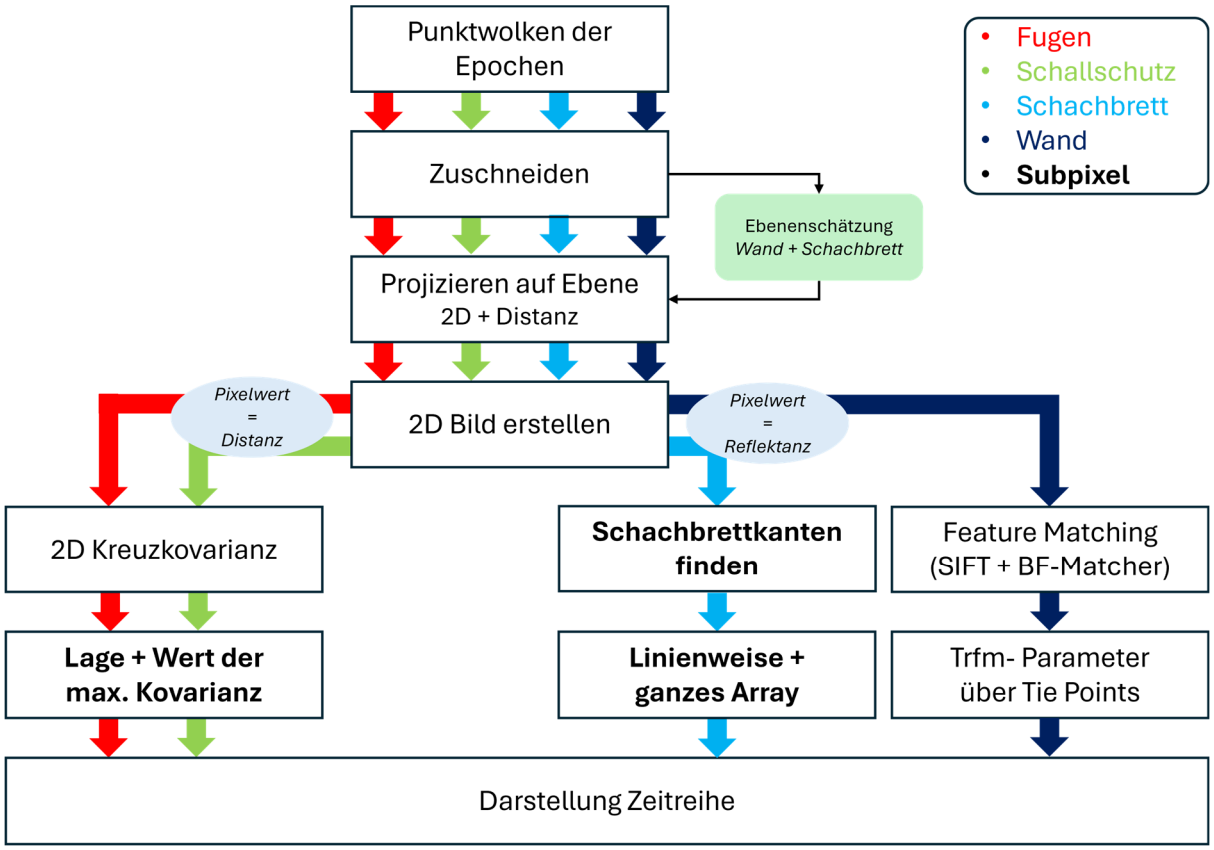

Abb. 4: Übersicht, welche den Auswerteansatz der TLS-Messungen zeigt. Dabei wurden alle Scans zunächst in Quasi-Tiefenbilder umgerechnet und dann mit photogrammetrischen Verfahren weiterverarbeitet, sodass am Ende eine Zeitreihenanalyse durchgeführt werden konnte, um den Refraktionseinfluss zu quantifizieren

Die erste Auswertungsmethode verwendete 2D-Kreuzkovarianz, welche die Ähnlichkeit in zwei Bildern über verschiedene Verschiebungen und somit die relative Verschiebung zwischen den gescannten Strukturen bestimmt. Um einen vergleichbaren, skalaren Wert für den Höhenversatz jeder Epoche zu ermitteln, wurde das Maximum des 2D-Kreuzkovarianz-Arrays mit Subpixelgenauigkeit berechnet und als Zeitreihe dargestellt. Mathematisch wurde hier der Hochpunkt der 2D-Kreuzkorrelation durch eine kubische Interpolation und anschließender Minimierungsaufgabe in Subpixelgenauigkeit mit der Python-Bibliothek SciPy (VIRTANEN et al. 2020) berechnet. Da diese Bestimmung sehr rechenintensiv und die Verschiebung sehr gering ist, wurde der Hochpunkt nur in den mittleren 20 × 20 Pixeln gesucht, sodass Verschiebungen von mehr als 1 cm nicht erfasst werden können. Diese Schranke wurde

aus den TS-Messungen abgeleitet, wo die maximale Verschiebung unterhalb von 0,3 mm lag. Als zweites Modell wurde eine Auswertung mit einem 14 × 10 Schachbrett-Muster durchgeführt, welches normalerweise für die Kamerakalibrierung verwendet wird. Dabei wurden für jede Epoche die 140 Ecken des gescannten Schachbrettes aus den Intensitätswerten extrahiert und der Verlauf des Schwerpunktes der Eckpunkte analysiert. Dieser sollte sich, während der Heizlüfter eingeschaltet ist, scheinbar vertikal nach unten bewegen. Zudem kann die Streuung des mittleren Abstands der Gitterpunkte zueinander betrachtet werden. Durch turbulente Effekte sollte diese Streuung, bei eingeschaltetem Heizlüfter, verstärkt auftreten. Eine weitere Möglichkeit zur Untersuchung der turbulenten Effekte stellt die Schätzung von Splines in den zehn horizontalen Linien dar. Wenn der Scanner das vertikal platzierte Schachbrett zeilenweise von links nach rechts abtastet, sollten bei idealen Bedingungen die Punkte einer Schachbrettreihe auf einer horizontalen, trendbereinigten Gerade liegen. Wenn nun turbulente Verhältnisse auftreten, sollte die Verbindunglinie stärkere Abweichungen enthalten.

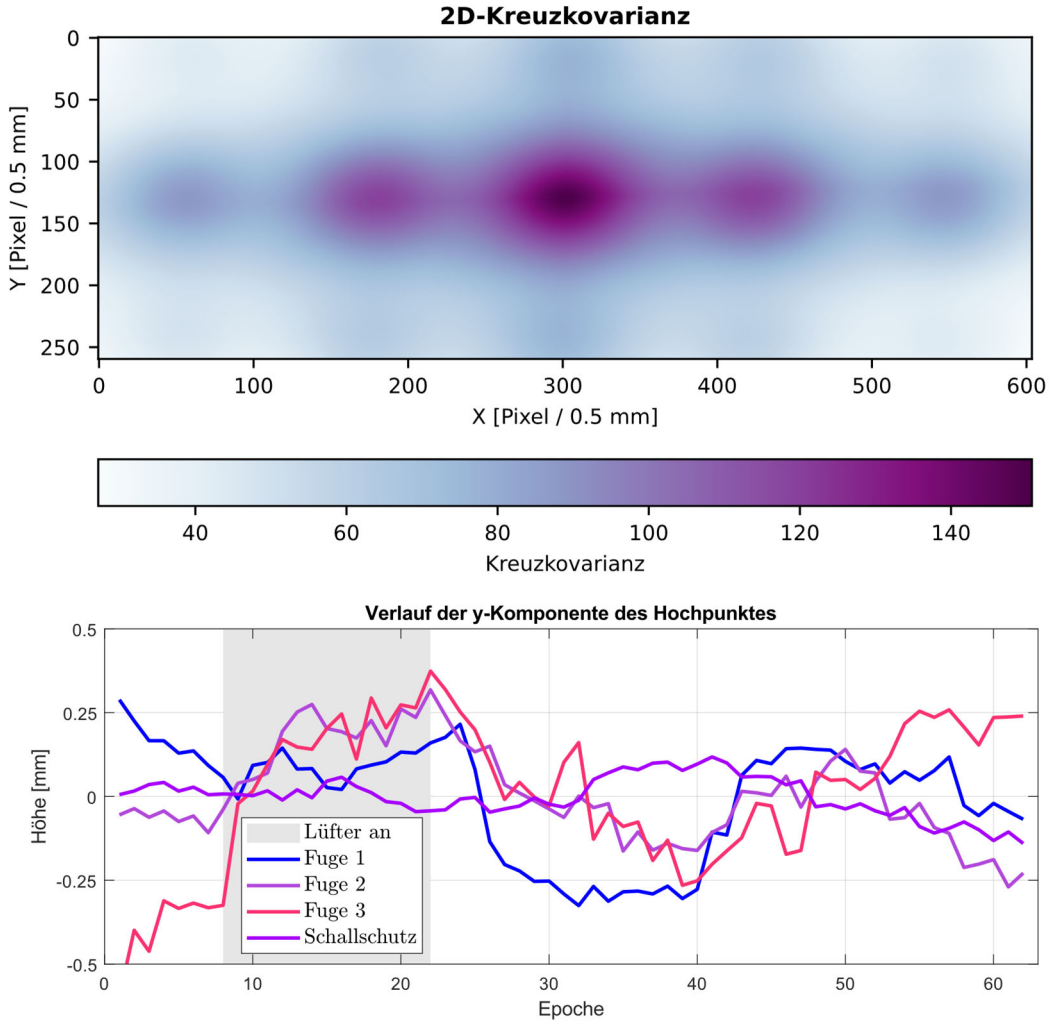

Abb. 5: Auswerteergebnisse mit der 2D-Kreuzkovarianz-Methode. Oben ist die 2D-Kreuzkovarian zwischen den ersten beiden Epochen abgebildet. Aus dieser wird im Anschluss der Hochpunkt für jede Epoche berechnet. Unten ist die vertikale Komponente der vier verschiedenen Untersuchungsgebiete dargestellt

Die letzte Auswertemethode bildet das Feature-Matching von markanten Merkmalen zwischen den Epochen. Als Pixelwerte dienten Reflektanzwerte. Im Anschluss konnten Key-Points über den SIFT-Algorithmus (LOWE 2004) gefunden, beschrieben und später mittels Brute-Force-Matching zu homogenen Punkten zugeordnet werden. Die Berechnungen wurden mit der Python-Bibliothek OpenCV (BRADSKI 2000) durchgeführt. Um eine Zeitreihe aus allen Epochen ableiten zu können, wurden iterativ drei Transformationsparameter (X_0, Y_0, α) zwischen den Tie-Points der Referenz- und Folgeepoche in einem Gauß-Helmert-Modell mit dem mathematischen Ansatz nach NEIZEL & PETROVIC (2008) berechnet. Die Parameterschätzung wird so lange durchgeführt, bis alle Beobachtungen den Global- und Einzeltest bestehen, und die Verschiebungsparameter aller Epochen als Zeitreihe dargestellt werden können. Die Einzeltests werden mithilfe der normierten Verbesserung und der Abstimmung des Testniveaus nach NIEMEIER (2008) durchgeführt.

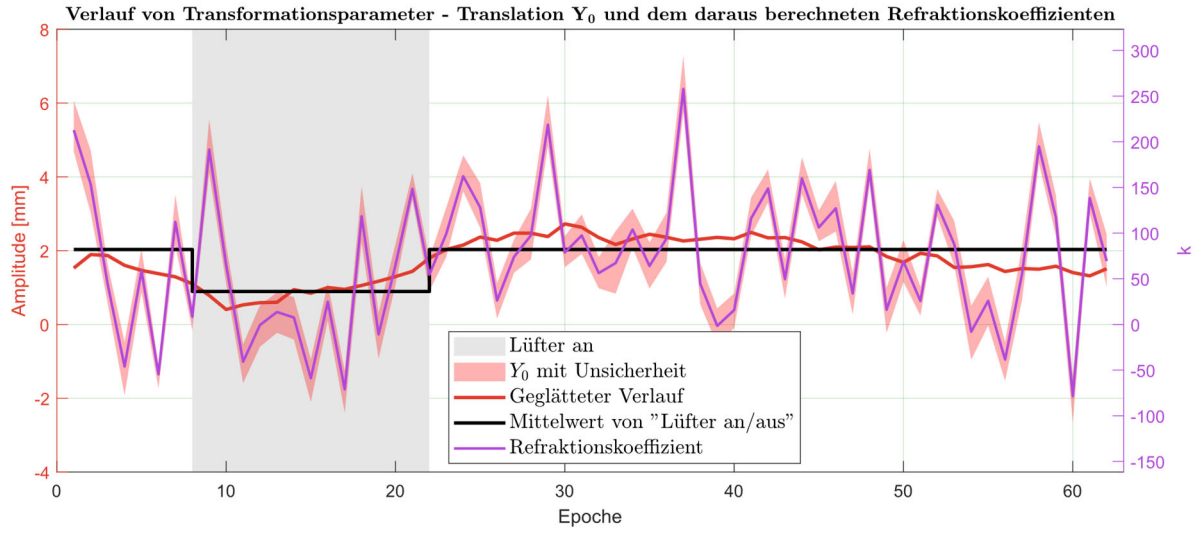

Abb. 6: Ergebnisse der Auswertung mittels Feature-Matching und anschließender iterativer Berechnung der Transformationsparameter der Tie-Points

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Feature-Matching-Methode vorgestellt, da diese die vielversprechendsten Ergebnisse lieferte. Abb. 6 zeigt den Verlauf des Transformationsparameters Y_0, welcher den vertikalen Versatz beschreibt. Dieser schwankt zwischen –2 und +7 mm. Es lässt sich zudem, bei getrennter Mittelbildung zwischen den beiden Heizlüfter-Zuständen, ein Unterschied von 1,14 mm beobachten. Dies entspricht bei einem reduzierten Soll-Höhenunterschied von 0 mm, einem Refraktionskoeffizienten von k = 40,4. Die jeweiligen Mittelwerte sind in schwarz eingezeichnet, wohingegen der rote Bereich die Messreihe mit ihren Unsicherheiten darstellt. Die rote Linie zeigt einen über 15 Epochen geglätteten Verlauf. Die Magenta gefärbte Zeitreihe zeigt die Umrechnung in einen Refraktionskoeffizienten. Allerdings lässt sich die Hypothese einer erhöhten Varianz, hervorgerufen durch turbulente Refraktionseinflüsse, nicht bestätigen. Die Messreihe weist zudem allgemein ein hohes Rauschen auf, wodurch verbleibende systematische Abweichungen nicht ausgeschlossen werden können.

Insbesondere die Erzeugung des Temperaturgradienten, welcher die Strahlbeugung hervorruft, könnte weiter verbessert werden, da der verwendete Heizlüfter eine geringe Leistung besitzt und hohe Turbulenzen verursacht. Wenn eine höhere, gleichmäßige Leistung abgegeben werden könnte, erwärmt sich Luft stärker, sodass sich der Strahl noch weiter beugen würde.

So könnten größere Abweichungen erzielt werden, welche das Signal-Rausch-Verhältnis bei der Datenauswertung verbessen würden. Außerdem müssen die Verfahren in zukünftigen Untersuchungen verfeinert und ins Feld übertragen werden. Gerade bei der Feature-Detektion sollte zukünftig ein Operator verwendet wird, der auch im Subpixelbereich operiert, sodass die sehr kleinen Verschiebungen zuverlässiger detektiert werden können.

5 Fazit und Ausblick

Einer der wesentlichen Fehlerquellen beim permanenten Laserscanning sind Refraktionseffekte. Es handelt sich hierbei um einseitig wirkende, systematische Messabweichungen, welche mit den in den letzten Jahrzehnten entwickelten, statistischen Auswertemethoden im geodätischen Monitoring nur schwierig zu detektieren und minimieren sind. Die Einflüsse können zu Fehlalarmen führen und dafür sorgen, dass die Ergebnisse bei schwierigen Bedingungen nicht zuverlässig sind. Obwohl bestehende Auswerteansätze wie M3C2-EP (WINIWARTER et al. 2021) diese Effekte berücksichtigen können, ist die Anwendung von PLS, aufgrund der starken Beeinflussung der Zeitreihen durch refraktive Effekte, aktuell auf langperiodische Phänomene beschränkt. Gerade im Monitoring sind jedoch auch kurzperiodische Ereignisse von hoher Relevanz. Um das volle Potential der 4D-Datenauswertung nutzen zu können, müssen die Refraktionseinflüsse besser verstanden und korrigiert werden können. In dieser Arbeit wurden Auswerteansätze entwickelt und getestet, welche auf photogrammetrischen Methoden basieren. Aus diesen kann der Einfluss der Refraktion abgeschätzt werden. Dafür wurde zunächst ein automatisierter Laboraufbau neu konzipiert. Mit diesem konnten künstliche Refraktionen reproduzierbar hervorgerufen und die erforderlichen Größenordnungen und Genauigkeiten in guter Übereinstimmung mit Literaturwerten abgeschätzt werden. Der Laboraufbau wurde so erweitert, dass auch bildbasierte Auswertungen mit Laserscannern durchgeführt werden konnten. Die Ergebnisse weisen vermutlich noch systematische Abweichungen auf, bilden jedoch eine vielversprechende Grundlage für weitere Untersuchungen, welche auf den vorgestellten Verfahren aufbauen können.

6 Literaturverzeichnis

BRADSKI, G., 2000: The OpenCV Library. Dr. Dobb's Journal of Software Tools.

BRASSEUR, G. P., JACOB, D. & SCHUCK-ZÖLLER, S., 2023: Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-66696-8.

BROCKS, K., 1939: Vertikaler Temperaturgradient und terrestrische Refraktion, insbesondere im Hochgebirge. Veröffentlichungen des Meteorologischen Instituts der Universität Berlin, **3**(4).

CZERWONKA-SCHRÖDER, D., 2023: Konzeption einer qualitätsgesicherten Implementierung eines Echtzeitassistenzsystems basierend auf einem terrestrischen Long Range Laserscanner. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg

ESCHELBACH, C., 2009: Refraktionskorrekturbestimmung durch Modellierung des Impuls-und Wärmeflusses in der Rauhigkeitsschicht. Dissertation, KIT – Karlsruhe.

FEYNMAN, R., 1964: The Feynman Lectures on Physics – 31: The Origin of the Refractive Index. https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_31.html, letzter Zugriff 03.04.25.

FRIEDLI, E., PRESL, R. & WIESER, A., 2019: Influence of atmospheric refraction on terrestrial laser scanning at long range. Proceedings of the 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Athens, Greece.

HUGGEL, C., CLAGUE, J. J. & KORUP, O., 2012: Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? Earth Surface Processes and Landforms, **37**(1), 77-91. https://doi.org/10.1002/esp.2223.

LINDENBERGH, R.K., ANDERS, K., CAMPOS, M., CZERWONKA-SCHRÖDER, D., HÖFLE, B., KUSCHNERUS, M., EETU, P., PRINZ, R., RUTZINGER, M., VOORDENDAG, A. & VOS, S., 2025: Permanent terrestrial laser scanning for near-continuous environmental observations: systems, methods, challenges and applications. ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (eingereicht).

LOWE, D.G., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision, **60**(2), 91-110. https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.

MONIN, A. S. & OBUKHOV, A. M., 1954: Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground. Academiia Nauk, SSSR, Geofizicheskogo Instituta, **24**(151).

MÖSER, M. (Hrsg.), 2012: Handbuch Ingenieurgeodäsie: Grundlagen (4. Aufl.). Wichmann.

NEITZEL, F. & PETROVIC, S., 2008: Total Least Squares (TLS) im Kontext der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten am Bespiel der ausgleichenden Geraden. zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, **133**(3), 141-148.

NIEMEIER, W., 2008: Ausgleichungsrechnung. Walter de Gruyter Verlag, 302-303.

REITERER, A., 2012: Modeling Atmospheric Refraction Influences by Optical Turbulences Using an Image-Assisted Total Station. zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 137(3), 156–165.

REITERER, A. & WAGNER, A., 2012: System Considerations of an Image Assisted TotalStation – Evaluation and Assessment. avn - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, **3**, 83-93.

VIRTANEN, P., GOMMERS, R., OLIPHANT, T.E. & et al., 2020: SciPy 1.0: fundamental algorithmsfor scientific computing in Python. Nat Methods, **17**, 261-272. https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2.

WINIWARTER, L., ANDERS, K. & HÖFLE, B., 2021: M3C2-EP: Pushing the limits of 3Dtopographic point cloud change detection by error propagation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **178**, 240-258. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.06.011.

WINIWARTER, L., ANDERS, K., CZERWONKA-SCHRÖDER, D. & HÖFLE, B., 2023: Full four-dimensional change analysis of topographic point cloud time series using Kalman filtering. Earth Surface Dynamics, **11**(4), 593-613. https://doi.org/10.5194/esurf-11-593-2023.