

# Ein Adapter zum automatisierten Horizontieren von Tachymetern

## An Adapter for Automated Leveling of Total Stations

Andreas Wehner | Julian Pimpi | Otto Heunecke | Axel Wagner

### Zusammenfassung

Geodätische Messgeräte, insbesondere Tachymeter, werden üblicherweise lotorientiert aufgebaut, wobei zumeist ein Kompensator die Restneigung beseitigt, sofern die Horizontierung so weit vorgenommen wurde, dass sich dieser in seinem Arbeitsbereich befindet. Es wird ein Adapter vorgestellt, welcher sich reversibel an handelsüblichen Dreifußen anbringen lässt und eine automatisierte Horizontierung ermöglicht. Dazu greift die Steuerung des Adapters den Stehachskompensator des Tachymeters ab, der selbst keine eigene Sensorik benötigt. Eine Aktorik bewirkt die Drehung der Dreifußschrauben, bis die Horizontierung unterhalb eines einzustellenden Schwellwertes erreicht ist. Die erreichbare Genauigkeit und auch die dafür benötigte Zeit der automatisierten Horizontierung entsprechen dem eines manuell durchgeführten Horizontiervorgangs. Als Anwendung wird vor allem das Monitoring mit motorisierten Tachymetern gesehen.

**Schlüsselwörter:** Regelung, Dreifuß, Kompensator, Stehachsfehler, Monitoring, Microcontroller

### Summary

*Geodetic measuring devices, in particular total stations, are usually set up with respect to the plumb line, whereby a compensator usually eliminates the residual inclinations, provided that the levelling has been carried out to such an extent that the compensator is within its working range. An adapter is presented which can be reversibly attached to commercially available tribrachs and enables automated levelling. For this purpose, the adapter's control system read outs the tachymeter's vertical axis compensator, which itself does not require its own sensor system. An actuator causes the tribrach screws to rotate until levelling below a definable threshold value is achieved. The achievable accuracy as well as the time of automated levelling corresponds to that of a manually performed levelling process. As the main application monitoring with motorised total stations is seen.*

**Keywords:** controlling, tribrach, compensator, standing axis error, monitoring, microcontroller

## 1 Einleitung

Die Neigung eines Vermessungsinstruments gegenüber der Lotrichtung stellt ein Problem dar, da sich der dadurch er-

gebende Stehachsfehler unmittelbar auf die Messergebnisse auswirkt, sofern dies nicht durch einen Kompensator unschädlich gemacht wird. Im Gegensatz zu anderen Instrumentenfehlern kann ein Stehachsfehler durch Messungen in zwei Lagen nicht eliminiert werden. Kleinere, oftmals unvermeidliche Veränderungen können durch Kompensatoren abgefangen werden. Wird deren Arbeitsbereich verlassen, sind keine lotbezogenen Messungen mehr möglich. Beim Monitoring oder der Baumaschinensteuerung mit Tachymetern führt dies zu einem Ausfall der Station. Mit Folgen verbunden sind solche Ausfälle dann, wenn die Instrumentenneigung nicht zeitnah korrigiert wird. Dies erfordert einen manuellen Eingriff in Form einer Neuorientierung des Messinstruments – mit anderen Worten: Personal muss zum Instrument und die Messbereitschaft vor Ort wiederherstellen.

Deutlich komfortabler ist ein System, welches in der Lage ist, automatisiert eine Horizontierung durchzuführen. Zum einen muss kein Personal eingesetzt werden, zum anderen wird die Messbereitschaft permanent aufrechterhalten und eine höhere Verfügbarkeit der Messungen ist gegeben. Ein solches System zum automatisierten Horizontieren ist zum Beispiel der Automatik-Dreifuß AD-12 der Firma GEO-Laser (GEO-Laser Messtechnik 2015). Innerhalb eines staub- und wasserdichten Gehäuses sind Neigungsgeber sowie Mess- und Steuerelektronik verbaut, welche es ermöglichen, eine Horizontierung in zwei Achsen automatisiert durchzuführen. Der Arbeitsbereich des GEO-Lasers beträgt  $\pm 12$  gon. Dabei werden Horizontiergenauigkeiten von  $\pm 10$  mgon erreicht. Der Dreifuß besitzt eine eigene Stromversorgung (über Akku oder Netzgerät) und sorgt für eine kontinuierliche Horizontierung des sich darüber befindlichen Messsystems. Der Automatik-Dreifuß AD-12 stellt ein komplett eigenständig arbeitendes System dar.

In diesem Beitrag wird ein andersartiger Ansatz zur automatisierten Horizontierung vorgestellt. Die zugrunde liegende Idee ist es, bereits gegebene Sensorik und vorhandene Hardware zu nutzen. Bei der vorhandenen Hardware handelt es sich zum einen um das zu horizontierende Messinstrument selbst, zum anderen um einen gewöhnlichen Dreifuß, auf welchem es aufgebaut ist. Der entwickelte Adapter verfügt über keine eigene Sensorik, ist aber über Aktorik in der Lage, den Dreifuß motorisch zu steuern. Die dafür nötigen Informationen werden direkt vom Messinstrument über dessen elektronische Libelle geliefert.

## 2 Betrachtung des Stehachsfehlers

Der Stehachsfehler, der die Schiefstellung eines Vermessungsinstruments gegenüber der Lotrichtung beschreibt, ist ein Aufstellfehler. Für polare Messsysteme und somit auch Tachymeter müssen im Idealfall die folgenden Achsbedingungen erfüllt werden (Möser et al. 2012):

- Das Instrument mit seiner Stehachse steht lotrecht und zentrisch zum Horizontalkreis,
- die Kippachse steht senkrecht zur Stehachse und zentrisch zum Vertikalkreis,
- die Zielachse steht senkrecht zur Kippachse und
- die Vertikalkreisablesung muss an der Lotrichtung ausgerichtet sein.

Bei einer Nichterfüllung dieser Bedingungen spricht man von einem

- Stehachsfehler,
- Kippachsfehler,
- Zielachs- oder Kollimationsfehler und einem
- Höhenindexfehler.

Bei dem Kippachs-, dem Zielachs- und dem Höhenindexfehler handelt es sich um Effekte, die sich mit der Zeit bei einem Instrument verändern. Ihre Werte können wiederkehrend mittels geeigneter Verfahren bestimmt und somit im weiteren Auswertegang berücksichtigt werden. Ferner lassen sich diese Fehler über Messungen in zwei Lagen eliminieren.

Ein Stehachsfehler  $\nu$  kann durch Messungen in zwei Lagen nicht beseitigt werden und wirkt sich auf die Bestimmung von Horizontal- und Zenitwinkeln aus. Der Einfluss des Stehachsfehlers auf die Messung eines Horizontalwinkels  $\nu_H$  und eines Zenitwinkels  $\nu_Z$  ergibt sich zu (Möser et al. 2012):

$$\nu_H = \nu * \sin(\alpha) * \cot(\zeta), \quad (1)$$

$$\nu_Z = \nu * \cos(\alpha). \quad (2)$$

Dabei stehen  $\alpha$  für das Azimut in Relation zur Richtung der Stehachse und  $\zeta$  für den Zenitwinkel.

In Abb. 1 ist der Einfluss des Stehachsfehlers auf Messungen in Abhängigkeit einer Visur dargestellt. Aus Abb. 1 (a) wird ersichtlich, dass der Einfluss auf die Horizontalrichtung bei horizontalen Visuren gegen Null geht. Für steile Visuren steigt der Fehlereinfluss, insbesondere dann, wenn die Zielrichtung rechtwinklig zur Richtung des Stehachsfehlers steht. Für steile Visuren mit einem Zenitwinkel von 50 gon bzw. 150 gon kann der Einfluss auf die Horizontalrichtung  $\nu_H$  den Betrag der Schiefstellung erreichen. Für noch steilere Visuren wächst er sogar darüber hinaus. Abb. 1 (b) stellt den Einfluss auf einen Zenitwinkel  $\nu_Z$  dar. Gemäß (1) hängt dieser von der Horizontalrichtung  $\alpha$  ab. Der Stehachsfehler wirkt sich bei der Ablesung eines Zenitwinkels maximal aus, wenn die Horizontalrichtung gleich der Richtung des Stehachsfehlers ist.

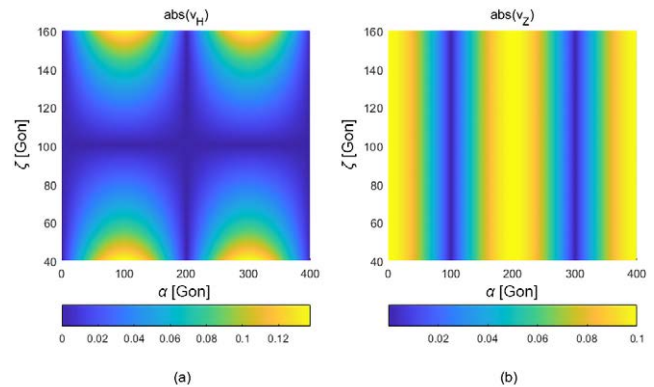


Abb. 1: Einfluss des Stehachsfehlers von 0,1 gon: (a) Einfluss auf den gemessenen Horizontalwinkel, (b) Einfluss auf den gemessenen Zenitwinkel

Moderne Tachymeter besitzen eine Winkelmessgenauigkeit  $\sigma_{Hz/V}$  von 0,3 mgon (1'') und besser (Leica Geosystems 2013, Trimble 2015). Da der Einfluss des Stehachsfehlers schnell den Betrag der Achsschiefe selbst annehmen kann, werden Zweiachs-Neigungskompensatoren verbaut. Diese messen die verbleibende Restneigung zur Lotrichtung, welche intern in Form einer Reduktion der Horizontal- und Zenitwinkel angebracht wird. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Neigungssensoren entsprechen folglich mindestens der Winkelmessgenauigkeit des Instruments. Eine solche Auflösung kann bei Neigungssensoren jedoch nur innerhalb eines kleinen Messbereichs erreicht werden. Dementsprechend verfügen die zur Kompensation verbauten Neigungssensoren nur über einen beschränkten Arbeitsbereich. Dieser beträgt bisher in etwa  $\pm 3'$ , modernere Instrumente erreichen bis zu  $\pm 5,4'$  (Trimble 2015). Zwar lässt sich die elektronische Libelle auch außerhalb dieses Arbeitsbereichs noch auslesen, kompensierte Messungen sind dann jedoch nicht mehr möglich.

## 3 Entwurf eines Adapters zur automatisierten Horizontierung

### 3.1 Ausgangsidee

Die dem Horizontieradapter (Tripod-Leveling-Adapter, TLA) zugrunde liegende Idee ist es, dass verwendete Messinstrument unmittelbar zu benutzen. Für eine automatisierte Horizontierung werden zwei Komponenten benötigt:

- Eine Sensorik zur Bestimmung der aktuellen Instrumentenneigung und
- eine Aktorik, um diese zu verändern, bis die Horizontierung erreicht ist.

Das Messinstrument mit elektronischer Libelle liefert die Sensorik. Der Adapter am Dreifuß wiederum enthält die Aktorik, mit welcher die Neigung in zwei Achsen verändert werden kann. Aus Gründen der Flexibilität ist der Adapter in Form einer Klammer konstruiert, welche sich

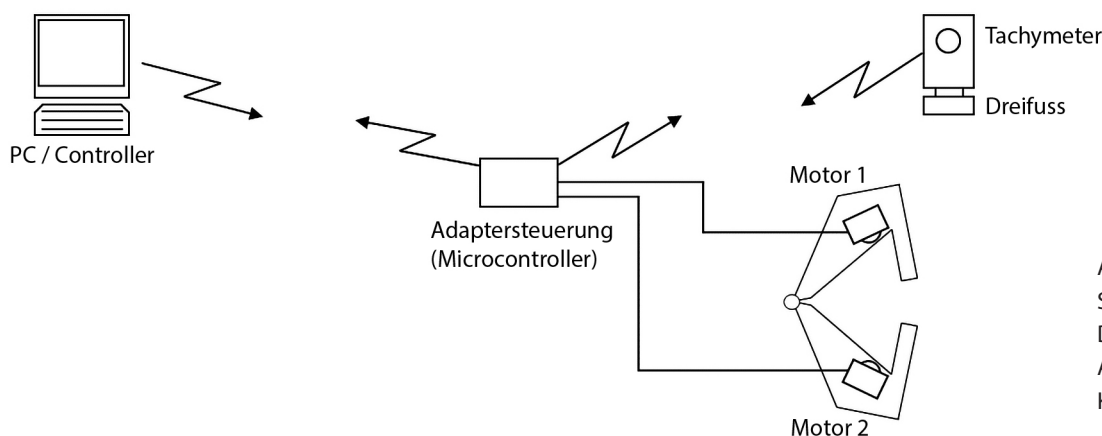


Abb. 2:  
Schematische  
Darstellung des  
Adapters und der  
Kommunikation

reversibel an den Dreifuß anbringen lässt. Auf den beiden Klammerarmen sind angetriebene Reibräder installiert, die im geschlossenen Zustand des Adapters auf zwei der drei Fußschrauben des Dreifußes wirken. Die Steuerung der beiden Schrittmotoren sowie die Kommunikation mit dem Messinstrument, hier im Speziellen ein Tachymeter, geschieht über einen auf dem Adapter installierten Mikrocontroller. So ist der Adapter in der Lage, die elektronische Libelle auszulesen und auf der Basis der Neigungswerte die Schrittmotoren und damit die Fußschrauben des Dreifußes zu verstellen.

Die Abb. 2 stellt den Adapter mitsamt der Adaptersteuerung schematisch dar. Auf den beiden Klammerarmen des Adapters sind jeweils ein Motor und Reibrad installiert. Die Adaptersteuerung ist mit dem Controller verbunden und kann Befehle eines dort laufenden Programmes empfangen. Bei diesen Befehlen kann es sich um zwei verschiedene Typen handeln:

- Befehle für den Adapter, insbesondere für einen durchzuführenden Horizontiervorgang
- Befehle für das Tachymeter für die sonstigen Messungen

Befehle für den Tachymeter werden erkannt und direkt weitergeleitet. Genauso werden in Gegenrichtung Messwerte oder Statusmeldungen direkt an den Controller weitergeleitet. Adapterbefehle unterbrechen diese Relaisfunktion und dienen dem Einstellen von Parametern des Adapters oder der Durchführung einer automatisierten Horizontierung.

### 3.2 Prototyping mittels 3D-Druck und Low-Cost-Komponenten

Der Prototyp des Adapters ist für die Horizontierung von Leica Tachymetern ausgelegt. Für die Kommunikation wird die GeoCOM-Schnittstelle genutzt. Der Adapter ist so konzipiert, dass er mittels eines gängigen Y-Kabels an den Controller angeschlossen werden kann. Die Verbindung zwischen der Adaptersteuerung und dem Tachymeter erfolgt über die RS232-Schnittstelle. Der Adapter und auch das Tachymeter werden gemeinsam über die Stromversorgung des Adapters versorgt.

Die Entwicklung des Prototyps erfolgte in drei Schritten. Im ersten Schritt wurde die Adaptersteuerung konzipiert und getestet. Im zweiten Schritt wurde der Adapter selbst konstruiert und mittels 3D-Druck hergestellt. Im letzten Schritt erfolgte die Fusion des Adapters mit den elektronischen Komponenten.

#### 3.2.1 Konzeption der Steuerung

Das zentrale Bauteil der Adaptersteuerung stellt ein Mikrocontroller dar. Der Adapter wird über ein für Leica Tachymeter gängiges Y-Kabel angeschlossen. Dementsprechend findet die Kommunikation mit dem Controller über eine RS232-Schnittstelle statt. Die Stromversorgung erfolgt ebenfalls über das Y-Kabel mit einer Spannung von 12 V. Aufgrund der Transistor-Transistor-Logik (TTL) des Microcontrollers benötigt dieser eine Betriebsspannung von 5 V. Dies erfordert für die Stromversorgung einen Spannungswandler. Auch das RS232-Signal muss mittels eines RS232-TTL-Wandlers gewandelt werden. Für die Stromversorgung des Tachymeters wird die 12 V-Spannungsquelle durch die Adaptersteuerung geschleust. Das Kommunikationssignal muss wieder von TTL auf RS232 gewandelt werden.

Die Abb. 3 zeigt schematisch den Aufbau der Adaptersteuerung. Auf der linken Seite sind der Controller und die Stromversorgung dargestellt. Am Adapter befindet sich der Microcontroller, der die Steuerung der beiden Motoren übernimmt. Der Spannungswandler sorgt für die korrekte Stromversorgung des Microcontrollers und der Motoren. Die beiden RS232-TTL-Wandler sorgen für das Funktionieren der Kommunikationslogik.

Mit der Software »Fritzing« – eine einsteigerfreundliche freie Software (<https://fritzing.org>) für den Entwurf elektronischer Schaltungen – wurde eine Platine der Adaptersteuerung entworfen. Als Microcontroller wird ein Arduino Nano verwendet. Für die Wandlung der RS232-Signale zu TTL und zurück werden die Microchips »MAX232« verbaut. Der Spannungswandler ist ein »LM2596«. Für die Steuerung der beiden Motoren dient schlussendlich ein Darlington-Array. Die Programmierung erfolgt so, dass GeoCOM Befehle und Antworten aufgrund ihrer Struktur erkannt und weitergeleitet werden. Zusätzlich wurden die

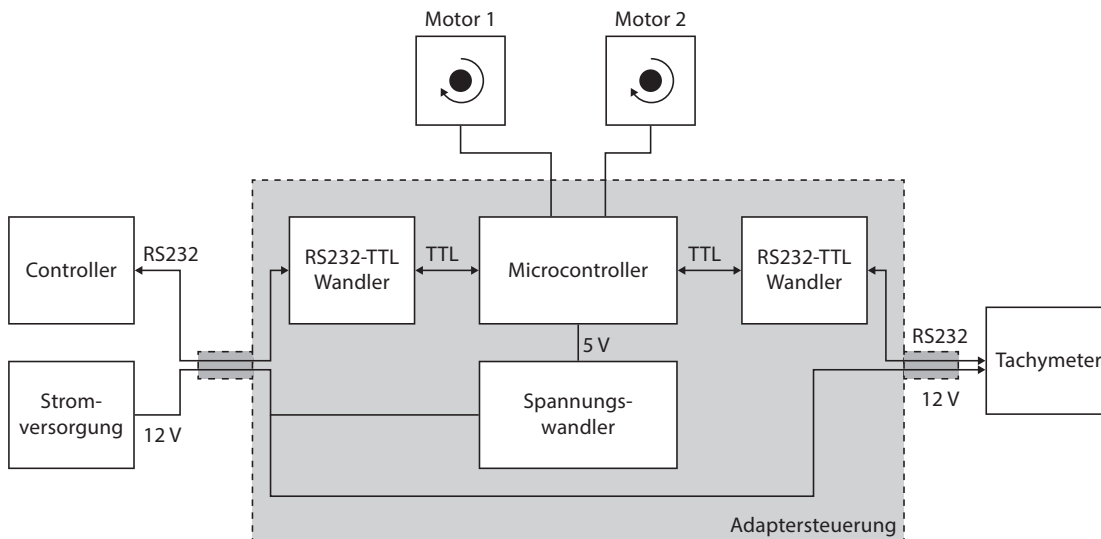


Abb. 3:  
Schematischer Aufbau  
der Adapter-  
steuerung

Motoren mit der bestehenden Arduino-Bibliothek »Accel Stepper.h« überprüft.

### 3.2.2 Konstruktion und Herstellung des Prototyps

Die Entwicklung des Adapters erfolgte mit Hilfe der Software »Fusion 360« von AutoDesk. Fusion 360 ist ein Programm zur 3D-Konstruktion und Modellierung, welches einen Export in \*.stl Dateien erlaubt und sich somit für das Erstellen von Modellen für den 3D-Druck eignet. In der Designphase einer neuen Entwicklung ist ein 3D-Druck, hier mittels FDM (Fused Deposition Modeling) umgesetzt, ein probates Vorgehen, um schnell und flexibel zu Lösungen zu kommen. Beim FDM, auch als Schmelzschichtungsverfahren bezeichnet, wird Kunststoff verflüssigt und aus einer beweglichen Düse schichtweise zu einem Objekt extrudiert (Fastermann 2014).

Die zwei über ein Gelenk miteinander verbundenen Klammerarme sind so konstruiert, dass sie sich exakt um die Grundplatte eines üblichen Dreifuß anbringen lassen. Somit ist es möglich, eine stabile und zugleich reversible Verbindung zwischen dem Adapter und einem Dreifuß

herzustellen. Am Dreifuß selbst sind keine Eingriffe erforderlich. Auf den zwei Klammerarmen wird je ein Reibradmodul installiert. Diese Module bestehen aus einem Reibrad, welches auf die Fußschraube drückt, sowie einem Schrittmotor für dessen Antrieb. Die Übersetzung ist in Form eines Schneckenrades integriert. Sie ist nötig, um die benötigten feinen Drehbewegungen durchführen zu können. Die beiden Module lassen sich auf den Adapterarmen verschiebbar montieren, wodurch sie so ausgerichtet werden können, dass die Reibräder bei geschlossenem Zustand des Adapters ohne Schlupf auf die Fußschrauben drücken.

In der Abb. 4 ist der konstruierte Adapter dargestellt. Auf den zwei Klammerarmen (1) ist je ein Reibradmodul (2) installiert. Die Klammerarme sind um einen Dreifuß bzw. dessen Grundplatte geschlossen, die Reibräder drücken auf zwei Fußschrauben des Dreifußes. Die dritte Fußschraube bleibt gegenüber der Ausgangsstellung unverändert. Für die Installation der Platine mit den elektrischen Komponenten wird eine Box (3) verwendet, welche seitlich befestigt ist.

Neben den gedruckten Bauteilen, den elektronischen Komponenten der Platine und den Motoren werden ledig-

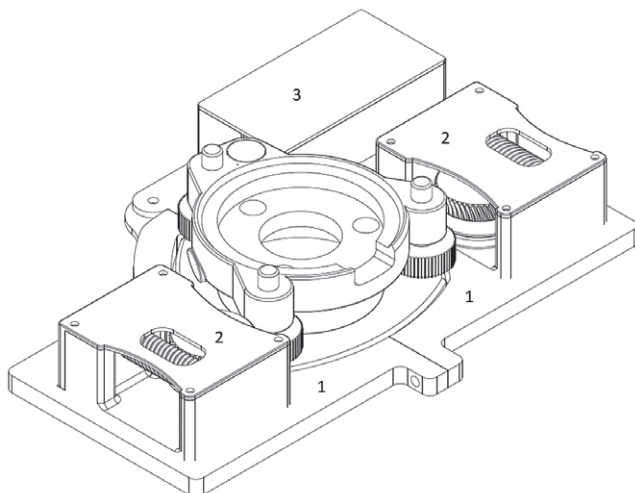


Abb. 4: Perspektivdarstellung des Adapters mit einem Standarddreifuß



Abb. 5: Adapter-Prototyp mittels 3D-Druck zur Horizontierung eines Leica Tachymeters



lich Schrauben, Senkmutter, Achsstifte und Gummiringe benötigt. Die Bestückung der Platine erfolgt von Hand. Der Adapter-Prototyp ist in der Abb. 5 dargestellt. Rot sind die beiden Klammerarme mit den darauf installierten Reibrad-Modulen. Das Gehäuse, welches die Platine zur Steuerung enthält, ist das rechte weiße Element. Die Kabelverbindungen zum Tachymeter sowie zum Controller, d.h. dem Host-Rechner, sind ebenfalls zu sehen.

### 3.3 Funktionsweise

Der Adapter dient zum einen als Relais, das Befehle und Antworten zwischen dem Host-PC und dem Instrument weiterleitet, sodass die Kommunikation zwischen Host und Tachymeter nicht unterbrochen wird. Zum anderen kann der Adapter eine automatisierte Horizontierung durchführen. Die Abb. 6 zeigt ein Ablaufdiagramm dieser generellen Funktionsweise.

Nach dem Start des Adapters werden Default-Werte für verschiedene Parameter, wie z. B. die zu erreichende Horizontierungsgenauigkeit oder die zulässige maximale Dauer für den Horizontiervorgang gesetzt. Anschließend läuft das eigentliche Programm auf dem Host-Rechner, bei dem der Adapter ständig auf Signale wartet. Diese Signale können

- Tachymeterbefehle (GeoCOM),
- Antworten des Tachymeters (GeoCOM) oder
- oder Adapterbefehle

sein. Die einzelnen Signale werden aufgrund ihrer Struktur identifiziert. Empfängt der Adapter Tachymeterbefehle, so werden diese an das Instrument weitergeleitet. Werden Tachymeterdaten empfangen, so werden diese an den Host-PC weitergeleitet. Adapterbefehle werden als solche erkannt und führen zu einer Unterbrechung der Relaisfunktion, bis der entsprechende Adapterbefehl abgearbeitet ist. Über Adapterbefehle können auch die Default-Parameter des Adapters verändert werden, z. B. ob die Horizontierung in nur einer oder in zwei Lagen erfolgen soll oder welcher Betrag der Neigung als Abbruchkriterium verwendet wird. Zusätzlich kann die automatisierte Horizontierung gestartet werden. Die Abb. 7 zeigt

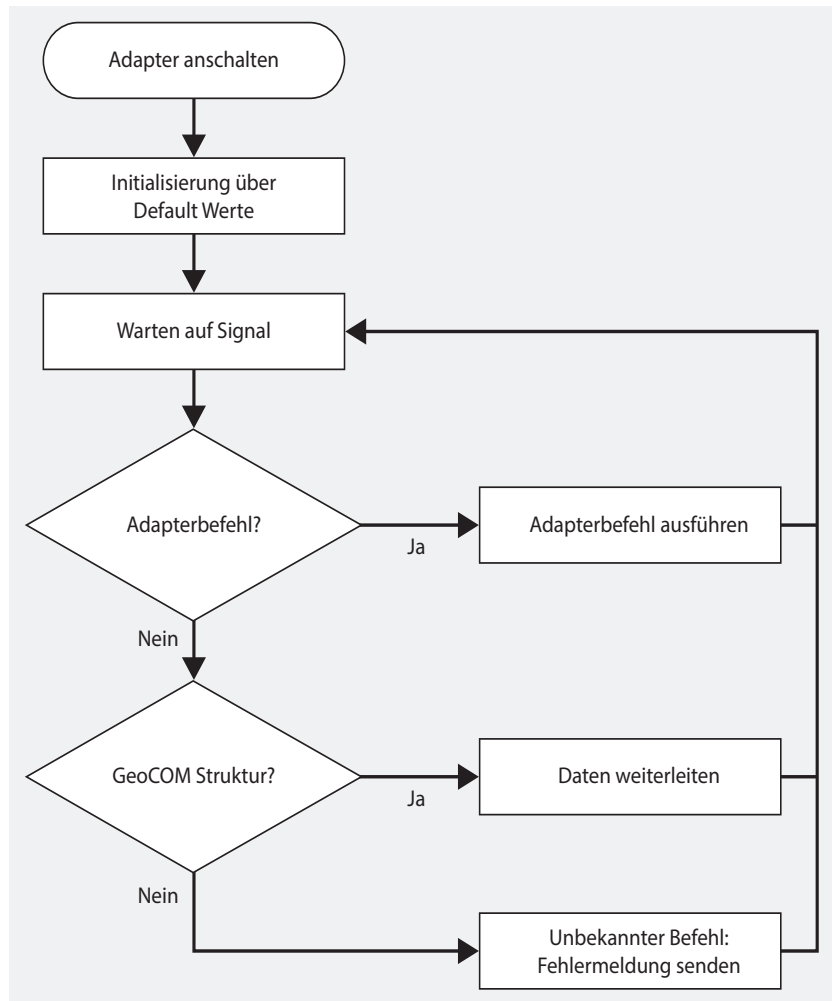


Abb. 6: Funktionsweise des Adapters

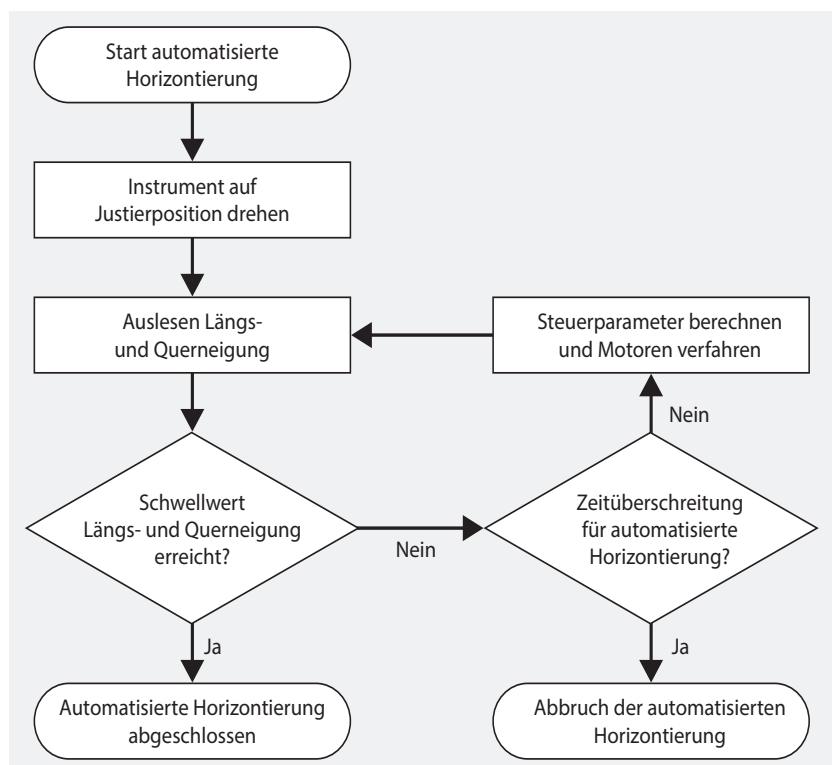


Abb. 7: Ablaufdiagramm der automatisierten Horizontierung

schematisch das Ablaufdiagramm einer automatisierten Horizontierung.

Nach dem Start einer durchzuführenden Horizontierung wird das Instrument auf eine Ausgangsposition gedreht. Anschließend beginnt ein iteratives Verfahren entsprechend einem Regelkreis. Zunächst wird die aktuelle Längs- und Querneigung der elektronischen Libelle ausgelesen. Aus diesen Werten wird der Betrag der Neigung  $|N|$  gegenüber der Lotrichtung entsprechend

$$|N| = \sqrt{LN^2 + QN^2} \quad (3)$$

berechnet.

Anschließend wird dieser Wert, die kombinierte Gesamtneigung, mit der Führungsgröße, dem zu erreichenden Schwellwert verglichen. Befindet sich  $|N|$  oberhalb des Schwellwertes, so werden Steuerparameter für die Motoren bestimmt und die Motoren dementsprechend bewegt. Bei der Bestimmung der Motorsteuerparameter erfolgt neben der Festlegung der Drehrichtungen eine dynamische Anpassung der Drehgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Betrags der Neigung. Ist der Schwellwert erreicht, so ist die Horizontierung abgeschlossen und der Adapter nimmt erneut seine Relaisfunktion auf. Ein weiteres Abbruchkriterium innerhalb dieses Regelkreises ist durch eine Zeitüberschreitung des Horizontiervorgangs gegeben, woraufhin eine Meldung an den Controller ausgegeben wird.

#### 4 Untersuchung unter Laborbedingungen

Für die Untersuchung des Adapters wurde ein Leica TCRP1203 verwendet. Entsprechend den Spezifikationen beträgt der Arbeitsbereich des Kompensators  $\pm 4'$  ( $0,07$  gon). Die elektronische Libelle liefert Ergebnisse in einem deutlich größeren Bereich von bis zu  $\pm 5$  gon. Für die Tests wird das Instrument in Schiefelage gebracht und die Längs- und Querneigung während des Horizontiervorgangs aufgezeichnet. Der zu erreichende Schwellwert für die Horizontierung beträgt  $1$  mgon bzw.  $\sim 0,05'$ . Insgesamt wurden 23 automatisierte Horizontierungen in einer Lage durchgeführt. Der Adapter wurde während dieser Zeit nicht abgenommen.

In der Abb. 8 sind die Längs- und Querneigungen sowie die Beträge der Neigung  $|N|$  gegenüber der Lotrichtung für vier ausgewählte automatisierte Horizontierungen dargestellt. Es wurden unterschiedliche Ausgangssituationen bezüglich der Längs- und Querneigung erprobt, wobei verhältnismäßig große Schiefstellungen als Ausgangssituationen gewählt wurden, um den möglichen Arbeitsbereich des Adapters zu untersuchen. Bei einem Einsatz in der Praxis ist dagegen eher mit kleineren Abweichungen zu rechnen. Aus den vier Grafiken wird ersichtlich, dass für den Betrag der Neigung auch bei größeren Schiefstellungen innerhalb von 40 Sekunden eine Horizontierung von etwa  $10$  mgon erreicht wird. Dieser Wert entspricht der

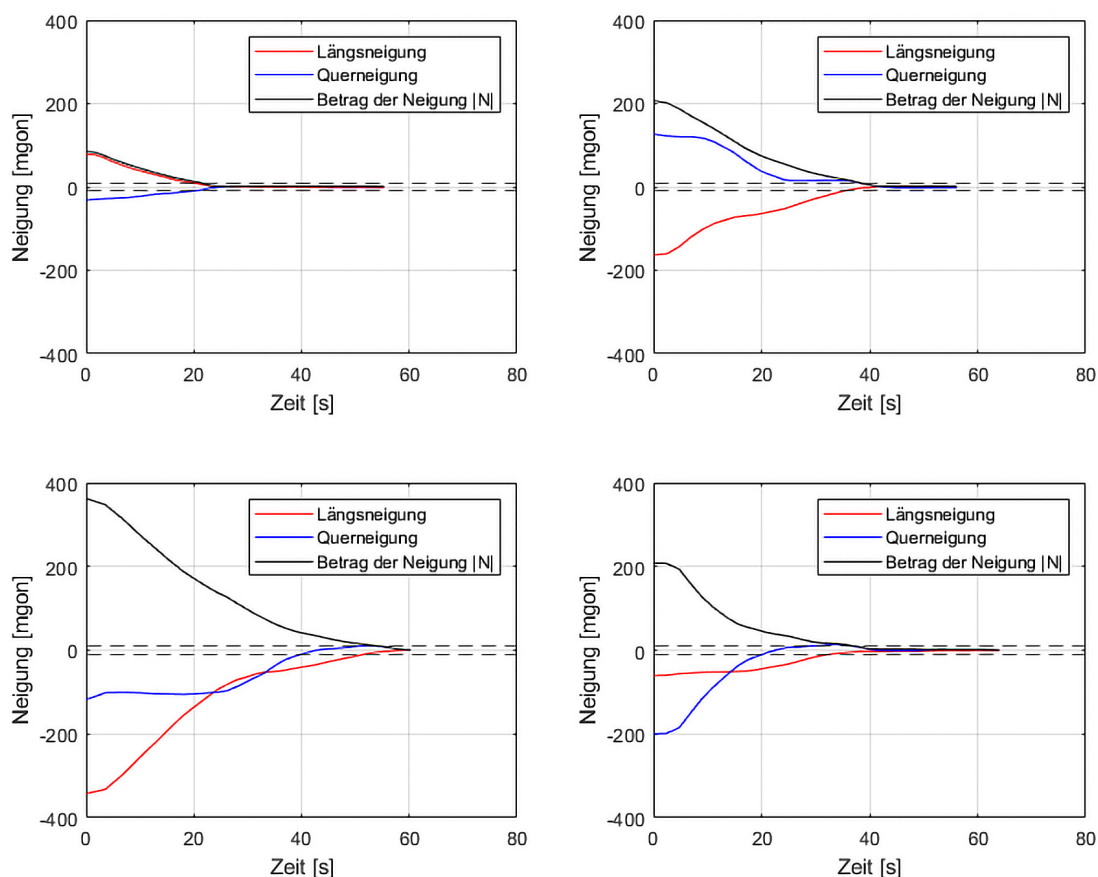


Abb. 8:  
Längs-, Quer-  
neigung und Be-  
trag der Neigung  
während der  
automatisierten  
Horizontierung

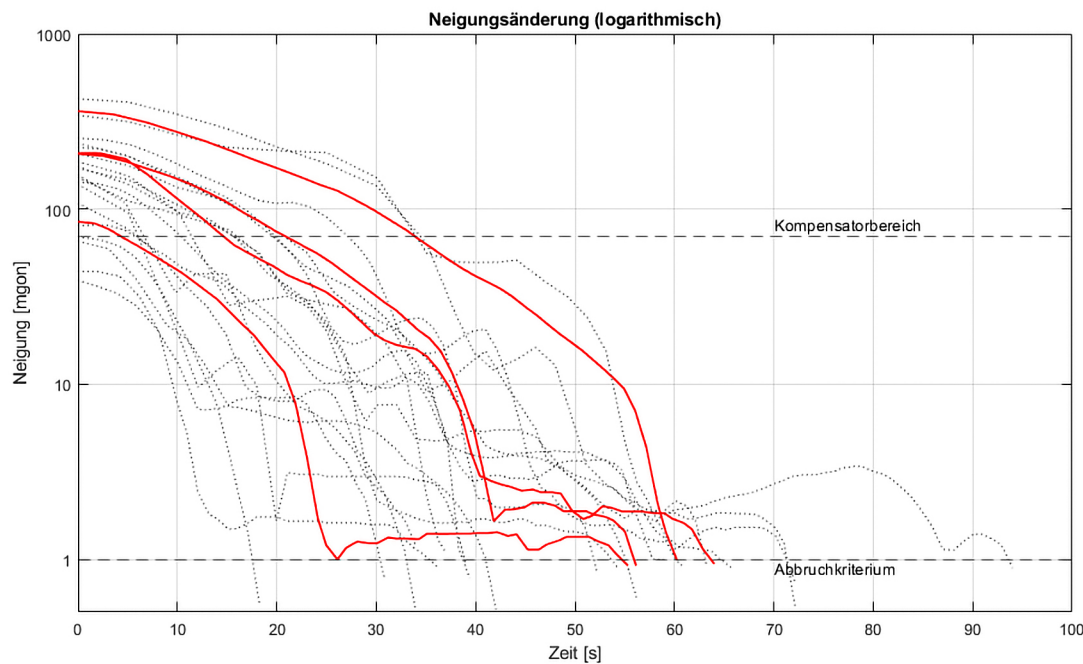


Abb. 9:  
Vergleich aller  
Durchläufe der  
automatisierten  
Horizontierung

angegebenen Horizontiergenauigkeit des Geo-Lasers (GEO-Laser Messtechnik 2015). Lediglich bei einer äußerst großen Schiefstellung als Ausgangssituation wird dieser Zeitwert überschritten. Eine Horizontierung der Qualität von etwa 5 mgon wird nach ca. 50 Sekunden erreicht. Die Dauer der Feinjustierung bis zum Erreichen des voreingestellten Schwellwerts von 1 mgon benötigt weitere Zeit, insgesamt dauert eine automatisierte Horizontierung mit dem Adapter ca. 60 bis 70 Sekunden. Das entspricht in etwa auch der Zeit, die für einen sorgsam ausgeführten manuellen Horizontiervorgang benötigt wird.

Die Abb. 9 zeigt den Betrag der Neigung  $|N|$  für die 23 durchgeführten automatisierten Horizontierungen in einer logarithmischen Darstellung. In Rot sind die vier bereits oben behandelten Durchläufe dargestellt. Die Dauer der einzelnen Horizontierungen beträgt ca. 30 bis 65 Sekunden. Insbesondere die Feinhorizontierung unterhalb der 10 mgon-Grenze nimmt einen guten Teil dieser Zeit in Anspruch. Die Abb. 9 zeigt auch, dass der Neigungsbereich, in welchem der Stehachskompensator im Arbeitsbereich liegt und damit Messbereitschaft gegeben ist, in höchstens 40 Sekunden erreicht wird. Betrachtet man die Neigungsänderungen bis zur Wiederherstellung der Messbereitschaft, so ist die Korrelation zwischen der benötigten Zeit und der anfänglichen Schiefstellung zu erkennen.

Auch wenn die Versuche demonstrieren, dass der Adapter in der Lage ist, die automatisierte Horizontierung deutlich schneller durchzuführen, wurden für die maximale Dauer der Horizontierung im Steuerprogramm 120 Sekunden festgelegt. Zu einer Zeitüberschreitung mit einem damit verbundenen Abbruch kam es in keinem der 23 Durchläufe. Für die automatisierte Horizontierung in zwei Lagen kann, sofern entsprechend voreingestellt, nach Erreichen des Abbruchkriteriums das Tachymeter in die zweite Lage gedreht werden und es erfolgt eine erneute

automatische Horizontierung. Aus den Werten der ersten und zweiten Lage lässt sich damit der Spielpunkt bestimmen und sein Verlauf über der Zeit bei einer Monitoringanwendung dokumentieren.

## 5 Vor- und Nachteile des Systems

Die automatisierte Horizontierung mit einem TLA hat Vor- und Nachteile. Das System kann nicht eigenständig ohne die Trägerelemente – den Dreifuß und das Messinstrument mit seiner elektronischen Libelle und einer offenen Schnittstelle – verwendet werden. Somit kann der Adapter nicht zur Horizontierung andersartiger Instrumente oder Plattformen benutzt werden. Der Arbeitsbereich des Adapters ist begrenzt. Ein limitierendes Element stellt die elektronische Libelle des Messinstruments dar. Übersteigt die Schiefstellung deren Arbeitsbereich, so existiert keine Eingangsgröße des Regelkreises, auf deren Basis eine automatisierte Horizontierung durchgeführt werden kann. Der zweite limitierende Faktor ist der Dreifuß. Dieser besitzt für jede Fußschraube einen Gangbereich, also eine maximale Verstellung  $d$ . Nimmt man die Mittelstellung als Ausgang, kann somit jede der beiden Fußschrauben um maximal  $d/2$  nach oben oder unten verstellt werden.

Ein großer Vorteil liegt darin, dass der Adapter eine Low-Cost-Entwicklung darstellt. Dadurch, dass keine Sensorik verbaut ist, kann der Adapter günstig hergestellt werden. Daneben bringt der Adapter technische Vorteile. Horizontierungen können äußerst präzise auf besser als 1 mgon in Längs- und Querneigung durchgeführt werden. Außerdem bezieht sich die Horizontierung direkt auf die im Messgerät verbaute Libelle – es muss kein Offset zwischen einer zusätzlichen Libelle und den Instrumentenachsen beachtet werden.

Eine automatisierte Horizontierung, welche unabhängig vom Betriebsmodus des Instruments geschieht, birgt die Gefahr, dass Messungen des Instruments während des Horizontiervorgangs durchgeführt werden. Daraus können fehlerhafte Messwerte resultieren. Durch die Relaisfunktion des Adapters wird dessen Steuerung direkt in ein Monitoring- bzw. Überwachungsprogramm eingebunden, sodass solche parallelen Vorgänge vermieden werden. Die Einbindung kann beispielsweise so geschehen, dass die Befehle zur Steuerung des Adapters innerhalb des Monitoring Programms implementiert werden. Befehle zur automatisierten Horizontierung können in festen Intervallen ausgeführt werden. Alternativ dazu können innerhalb des Monitoring Programms auch die Neigungswerte des Tachymeters aufgezeichnet und mit vordefinierten Toleranzen verglichen werden. Kommt es zu einer Überschreitung, kann das Monitoring Programm die Tachymetermessungen definiert unterbrechen, eine automatisierte Horizontierung starten und im Anschluss den Regelbetrieb wieder aufnehmen. Dies hat den Vorteil, dass alle Aktionen aus dem Monitoring Programm heraus gestartet, überwacht und dokumentiert werden. Ein Anwender, der nicht vor Ort sein muss, kann vorgeben und nachvollziehen, was zu welchem Zeitpunkt geschieht.

## 6 Ausblick

Die Entwicklung des Prototyps ist abgeschlossen und die generelle Funktionsweise wurde nachgewiesen. Es wurde gezeigt, dass der Adapter in der Lage ist, verlässlich eine automatisierte Horizontierung herzustellen. Verschiedene Arbeitsfelder bieten Möglichkeiten, den Adapter weiterzuentwickeln. Diese Aspekte umfassen die Konstruktion, die Programmierung und die Funktionalität.

Die Konstruktion des Prototyps erfolgte als 3D-Druck. Zwar bietet der 3D-Druck die Möglichkeit, alle Bestandteile schnell und preisgünstig zu fertigen und ist somit die perfekte Grundlage für ein Prototyping, allerdings können Bauteile nicht beliebig klein hergestellt werden. Insbesondere bei den Reibradmodulen sollen zukünftig auch vorgefertigte Bauteile für die Übersetzung eingesetzt werden. Dadurch können diese Module deutlich kleiner gehalten werden. Zusätzlich soll das Gehäuse des Adapters angepasst werden, um einen besseren Schutz gegen Regen und Spritzwasser herstellen zu können. Schließlich soll die gesamte Haptik noch weiter verbessert werden.

Die Programmierung bestimmt die Funktionalität bezüglich der Horizontierung. Ziel ist es, die Programmierung so zu optimieren, dass eine Horizontierung von jeder beliebigen Ausgangsrichtung des Horizontalkreises des Tachymeters ermöglicht wird. Außerdem soll die Bestimmung der Steuerparameter verbessert werden, sodass ein Übersteuern vermieden wird. Beide Zielsetzungen stellen Regelungsprobleme dar, sodass ein PID-Regler integriert werden soll. Außerdem soll der Adapter dahingehend angepasst werden, dass auch Tachymeter anderer Hersteller oder auch andere Vermessungsinstrumente, die über elektronische Libellen verfügen, verwendet werden können.

## Literatur

- Fastermann, P. (2014): 3D-Drucken. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 9783662498651.
- GEO-Laser Messtechnik (Hrsg.) (2015): Automatik-Dreifuß AD-12. <https://geo-laser.de/de/product/automatik-dreifuss-ad-12>.
- Leica Geosystems (Hrsg.) (2013): Leica Nova MS50 White Paper. [https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/nova\\_ms50/white-tech-paper/Leica\\_Nova\\_MS50\\_TPA\\_de.pdf](https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/nova_ms50/white-tech-paper/Leica_Nova_MS50_TPA_de.pdf).
- Möser, M., et al. (2012): Handbuch Ingenieurgeodäsie – Grundlagen. 4. Auflage, Wichmann-Verlag. ISBN 9783879075041.
- Trimble (Hrsg.) (2015): Trimble S9/S9 HP Datenblatt. [https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2019-04/022516-155F-DEU\\_TrimbleS9\\_DS\\_A4\\_0419\\_LR.pdf](https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2019-04/022516-155F-DEU_TrimbleS9_DS_A4_0419_LR.pdf).

## Kontakt

M. Sc. Andreas Wehner | M. Sc. Julian Pimpi |  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke  
Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie  
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg  
[andreas.wehner@unibw.de](mailto:andreas.wehner@unibw.de)  
[julian.pimpi@unibw.de](mailto:julian.pimpi@unibw.de)  
[otto.heunecke@unibw.de](mailto:otto.heunecke@unibw.de)

Dipl.-Ing. Axel Wagner  
b<sup>2</sup>v<sup>2</sup> Ingenieurbüro  
Würzstraße 1, 81371 München  
[a.wagner@b2v2.de](mailto:a.wagner@b2v2.de)

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