

Einsatz mobiler Lasermesstechnik bei der Erfassung von Strahlführungselementen eines Elektronenlinearbeschleunigers

Mobile Laser Metrology for Surveying a Linear Electron Accelerator

Cornelia Eschelbach, Michael Lösler, Philipp Winkemann, Michaela Arnold, Norbert Pietralla

Der Supraleitende Darmstädter Elektronenlinearbeschleuniger (S-DALINAC) des Instituts für Kernphysik der Technischen Universität Darmstadt besteht seit 1991 und wurde seit dieser Zeit mehrfach umgebaut und erweitert. Im ersten Quartal 2015 erfolgte die hochpräzise Erfassung der räumlichen Position und Ausrichtung von Dipol- und Quadrupolmagneten und der Strahlführung zwischen den Kryostatmodulen, die als Planungsgrundlage für eine zusätzliche dritte Rezirkulationsstrahlführung und den Umbau eines nachfolgenden Strahlführungsabschnitts dient. Um die hohen Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen, wurde die Aufnahme mit dem mobilen Lasertracker Leica AT401 des Labors für Industrielle Messtechnik der Frankfurt University of Applied Sciences (FRA-UAS) durchgeführt. Zur Auswertung der Lasertrackerdaten gehörte neben einer Bündelausgleichung mit einem umfangreichen stochastischen Modell auch die Ableitung geometrischer Primitiven zur Bestimmung der räumlichen Ausrichtung der Magneten und zur Ableitung des Strahlverlaufs. Zusätzlich erfolgte eine räumliche Aufnahme des kompletten Beschleunigers mit dem Laserscanner FARO Focus3D S 120 des Labors für Geoinformation der FRA-UAS. Die registrierte Punktwolke lieferte Kenngrößen, um logistische Fragestellungen oder räumliche Restriktionen bereits im Vorfeld der Umbauplanung ohne erneuten Hallenzutritt zu beantworten. Dieser Beitrag stellt die Herausforderungen des Mess- und Auswerteprozesses in den Mittelpunkt und gibt einen kurzen Einblick in die gegenwärtigen Entwicklungen.

Schlüsselwörter: Teilchenbeschleuniger, S-DALINAC, Lasertracker, Laserscanner, Messtechnik, Bündelausgleichung, geometrische Primitive

Since 1991, the Institute for Nuclear Physics of Darmstadt University of Technology hosts, operates and enhances the Superconducting Darmstadt Linear Electron Accelerator (S-DALINAC). In the first quarter of 2015, the components of the S-DALINAC, i. e. the spatial position and alignment of the dipole and quadrupole magnets as well as the beam-line between the cryostat modules, were surveyed. The results of this surveying campaign are used for planning a further recirculation of the accelerator. Due to the high accuracy requirements, the Laboratory of Industrial Metrology of Frankfurt University of Applied Sciences (FRA-UAS) deploys a mobile laser tracker AT401 (Leica). The laser tracker data is analyzed by a self-developed bundle adjustment using a comprehensive uncertainty budgeting. The orientation of the accelerator components are determined by fitting geometric primitives. Moreover, a 3D-model of the S-DALINAC is derived by the Laboratory of Geoinformation (FRA-UAS). The spatial point-cloud was registered by a laser scanner FARO Focus3D S 120. The 3D-model can be used for logistic support e. g. detecting spatial restrictions during the planning phase or virtual tours without entering the halls of the accelerator. This paper focused on the surveying process and data analysis of the complex measurement campaign and gives a short impression of the current work.

Keywords: Particle accelerator, S-DALINAC, laser tracker, laser scanner, metrology, bundle adjustment, geometric primitives

¹ Überarbeiteter und erweiterter Beitrag der Oldenburger 3D-Tage 2016

1 EINFÜHRUNG

Seit 1991 wird am Institut für Kernphysik der Technischen Universität Darmstadt ein supraleitender, zweifach rezirkulierender Linearbeschleuniger für Elektronenstrahlen betrieben (S-DALINAC: Superconducting DArmsstadt LINear electron ACcellerator; /Richter 1996/). *Abb. 1* zeigt den für diesen Beitrag relevanten Teil des Grundrisses des Großgeräts.

Als Quellen des Elektronenstrahls können entweder eine Heizkathode für thermischen Austritt von Elektronen oder eine Photokathode zur Erzeugung von spinpolarisierten Elektronenstrahlen durch laserinduzierten Photoeffekt genutzt werden. In der Chopper-Prebuncher-Sektion wird der Strahl danach auf die Hochfrequenzbeschleunigung mit 3 GHz im Dauerstrichbetrieb (continuous wave, cw) vorbereitet. Die Elektronenpakete werden anschließend im supraleitenden Injektorbeschleuniger um bis zu 10 MeV beschleunigt. Die supraleitenden Beschleunigungsstrukturen sind in mehreren aneinandergereihten Kryostaten durch ein Bad aus flüssigem Helium auf 2 K heruntergekühlt. In den Kryostatmodulen wird das Heliumbad von einem Schild aus flüssigem Stickstoff bei 77 K, einem Isoliervakuum und weiteren Isolationsmaterialien thermisch gegen die Raumtemperatur isoliert.

Nach dem Injektorbeschleuniger kann der Strahl am DHIPS (Darmstadt High-Intensity Photon Setup; /Sonnabend et al. 2011/) für Experimente verwendet oder über den 180°-Injektorbogen in den Hauptbeschleuniger eingeschossen werden. Im Hauptbeschleuniger kann der Strahl pro Durchgang um bis zu weitere 40 MeV beschleunigt werden, sodass die Extraktion in die Experimentierhalle je nach Nutzung der Rezirkulationen für weitere Beschleunigerdurchgänge mit maximal 50 MeV, 90 MeV bzw. 130 MeV erfolgt. In der Experimentierhalle stehen die beiden Magnetspektrometer LINTOTT /Schüll et al. 1978/, Q-CLAM /Knirsch 1991/, /Lüttge et al. 1995/ sowie der Niederenergie-Photonentagger NEPTUN /Lindenberg 2007/, /Savran et al. 2010/ für wissenschaftliche Experimente zur Grundlagenforschung bereit.

Gegenwärtig wird der Beschleuniger um einen Rezirkulationsring erweitert /Arnold et al. 2016/. Darüber hinaus stehen größere Umbaumaßnahmen im vorderen Teil der Experimentierhalle an, die einen nicht unerheblichen Eingriff in den Verlauf der Strahlführung bedeuten /Hug et al. 2013/. Zur Planungsgrundlage erfolgte im Frühjahr 2015 eine vollständige messtechnische Erfassung des betroffenen Bereichs, um die Umbaumaßnahmen zu koordinieren.

2 MESSTECHNISCHE ERFASSUNG

Der Strahlverlauf des S-DALINAC wird bestimmt durch die räumliche Position und Orientierung der Dipole und Quadrupole sowie die Positionen der Achsen der Strahlführungselemente zwischen den Kryostatmodulen. Die messtechnisch erfassten Daten geben Auskunft über den gegenwärtigen Elektronenstrahlverlauf und werden als Grundlage für die Planung zum Umbau und zur Erweiterung des Beschleunigers verwendet. *Abb. 1* zeigt einen Ausschnitt des S-DALINAC mit den messtechnisch zu erfassenden Elementen und der Strahlführung im Bereich der Beschleuniger- und Experimentierhalle. Ein schmaler begehbare Durchgang und eine Wandöffnung für den Strahlverlauf selbst verbinden beide miteinander.

Im Frühjahr 2015 waren insgesamt 26 Dipol- und 40 Quadrupolmagnete entlang der Strahlführung aufzunehmen, die sich in drei Bautypen aufteilen. Während die größeren blauen Dipolmagnete den Strahl ablenken, dienen die 15 gelben und 25 grauen kleineren Quadrupolmagneten der Strahlfokussierung. Ebenfalls zum Strahlverlauf gehören die Strahlführungselemente zwischen den supraleitenden Kryostatmodulen, die der Beschleunigung des Elektronenstrahls dienen. Sie befinden sich im Abschnitt A1 bzw. I1 und sind in *Abb. 1* rot dargestellt. An sechs Verbindungsstellen zwischen den Kryostatmodulen können hierzu ein wenige Zentimeter langes Segment der zylindrischen Strahlführung taktill aufgenommen und die geometrische Achse bestimmt werden.

Eine Worst-Case-Analyse des Instituts für Kernphysik zur Abschätzung von Positions- und Orientierungsfehlern bei der Erfassung lieferte eine maximal tolerierbare Positionsabweichung von 0,5 mm und eine räumliche Ausrichtung der Dipolmagneten entlang der Strahlführung mit einer Genauigkeit von 0,5 mm/m. Bei einer Magnetkantenlänge von 20 cm entspricht dies einer relativen Punktlagegenauigkeit von 0,1 mm. Um diese hohen Genauigkeitsanforderungen zu erreichen, kam für die Aufnahme der mobiler Lasertracker Leica AT401 des Labors für Industrielle Messtechnik zum Einsatz, der mit einer 3D-Punktunsicherheit von $15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ spezifiziert ist /Hexagon Metrology 2012/. Um Temperatureinflüsse auf die Streckenmessgenauigkeit abzuschätzen /Eschelbach 2007/, wurden in mehreren Bereichen der Beschleunigerhalle und des Experimentierbereichs meteorologische Langzeitmessungen durchgeführt. Sowohl räumliche als auch zeitliche Temperaturschwankungen liegen in diesen Bereichen unter $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$, sodass eine Messstelle zur Erfassung der repräsentativen meteorologischen Parameter ausreicht.

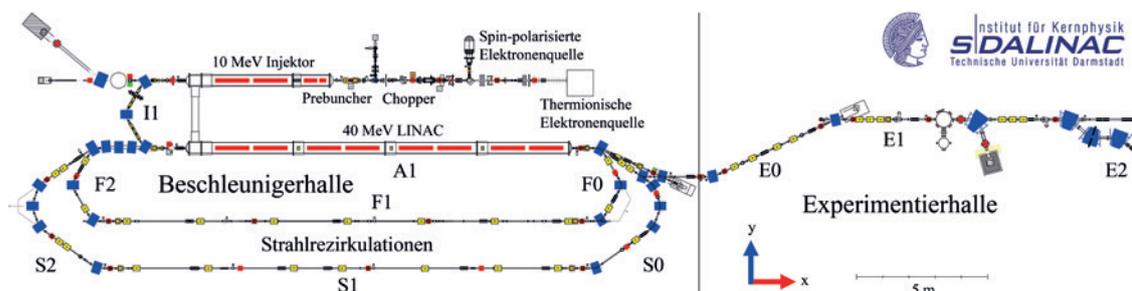


Abb. 1 | Übersichtsplan mit Bereichskennzeichnung des S-DALINAC. Links: Beschleunigerhalle mit Elektronenquellen, Injektor, Hauptbeschleuniger und zwei Strahlrezirkulationen; rechts: Beginn der Experimentierhalle. Farbliche Markierung der Strahlführungselemente: Dipolmagnete (blau), Quadrupolmagnete (gelb) und Kryostatmodule mit je zwei Beschleunigungskavitäten (rot)

2.1 Realisierung des Bezugsrahmens

Der lokale Bezugsrahmen wurde als mathematisches Koordinatensystem mit der x -Achse in Richtung der Beschleunigerhaupttrichtung gelegt. Die z -Achse orientiert sich näherungsweise am Hauptschwerefeld, um die Grobabsteckung zu erleichtern. Der Ursprung liegt für alle drei Raumkomponenten außerhalb des Messbereichs, um negative Koordinatenwerte zu vermeiden. Zur dauerhaften Realisierung des lokalen Bezugsrahmens wurden im Vorfeld 18 Drift-Nester zur magnetischen Aufnahme von 1,5-Zoll-Corner-Cube-Reflektoren (CCR) an den Laborwänden fest verschraubt. Die Netzmessung erfolgte gleichzeitig mit der Aufnahme der Strahlführungselemente. Nur vereinzelt wurden zusätzliche Standpunkte zur besseren Verknüpfung der Netzteile eingefügt. Von Vorteil war oftmals die Möglichkeit der flexiblen Standpunktwahl des Leica AT401. So konnten sowohl Instrumentenhöhen von über 2,5 m mithilfe eines Industriestativs als auch Standpunkte in beengtem Raum gewählt werden, um optimale Sichten auf die Objekt- und Netzpunkte zu gewährleisten.

2.2 Aufnahme der Strahlführungselemente

Die blauen Dipole besitzen je nach Funktion drei oder sieben konische Referenzpunkte (Bohrungen), die zur späteren Überführung der magnetischen Achsen in das geometrische System des Lasertrackers benötigt werden. Hierzu wird durch taktiles Messen mittels Hallsonde ein Koordinatensystem mit Bezug zu den Referenzpunkten am Magneten definiert und die magnetische Achse abgeleitet. Die Erfassung aller Referenzpunkte erfolgte wiederum taktill mit einem CCR (Abb. 2). Um die Zuverlässigkeit zu steigern, wurden alle Referenzpunkte von zwei Instrumentenstandpunkten redundant aufgenommen. Durch die hohe Reproduzierbarkeit der Reflektorposition an den Referenzpunkten der Dipole konnten diese als zusätzliche Verknüpfungspunkte in der späteren Auswertung verwendet werden.

Die gelben Quadrupole besitzen lediglich zwei die Strahlrichtung definierende Referenzpunkte, sodass hierfür eine Adapterplatte mit vier konischen Bohrungen an den Ecken gefertigt wurde, die in die Bohrungen am Magneten eingesetzt wird. Auch die Position der grauen Quadrupole musste mithilfe eines speziell gefertigten Adapters ähnlich einem Kantenadapter erfasst werden. Somit konnten für beide Magnettypen jeweils vier bis sechs definierte Referenzpunkte aufgenommen werden, über die Position und Orientierung abgeleitet werden konnten.

Die Ausrichtung der Magneten in Strahlrichtung (Gierwinkel) lässt sich eindeutig über die jeweiligen Referenzpunkte ableiten. Um auch den Nick- und Rollwinkel mit entsprechender Genauigkeit bestimmen zu können, wurden auf den blauen Dipolen jeweils ca. 30 gleichmäßig verteilte Punkte auf der Magnetoberfläche gemessen und daraus der Normalenvektor berechnet (Abb. 2, links). Der Gierwinkel der Quadrupole leitet sich direkt aus den vier bzw. sechs gemessenen Referenzpunkten ab, wobei sich auch hier über den Normalenvektor zusätzlich Nick- und Rollwinkel ergeben.

Zur Beschleunigung wird der Elektronenstrahl durch die supraleitenden Kryostatmodule geleitet (Abb. 1, rote Elemente). Da die Module auf bis zu 2 K heruntergekühlt werden, sind sie mehrfach isoliert und die Strahlführungselemente nur an sechs Übergängen auf einer Länge von jeweils nur wenigen Zentimetern zugänglich. Die Aufnahme der Strahlführungselemente gelang mithilfe eines L-förmigen Adapters, der an einem Ende zwei CCR magnetisch aufnehmen kann und am anderen Ende auf der Mantelfläche der zylindrischen Strahlführung formschlüssig aufsetzt (Abb. 3). Wird der Adapter um seinen Auflagepunkt gedreht, beschreiben beide Reflektoren zwei Kreise unterschiedlicher Radien im Raum. Zusätzliche Verschiebungen entlang der Strahlführungsachse erweitern die Geometrie vom dreidimensionalen Kreis auf die Mantelfläche eines Zylinders. Versorgungsleitungen und Steuerkabel begrenzen den Zugang, sodass nur Segmente der Zylinder realisiert werden können. Insgesamt wurden die sechs Doppelzylinder mit jeweils 20 bis 40 Punkten erfasst.

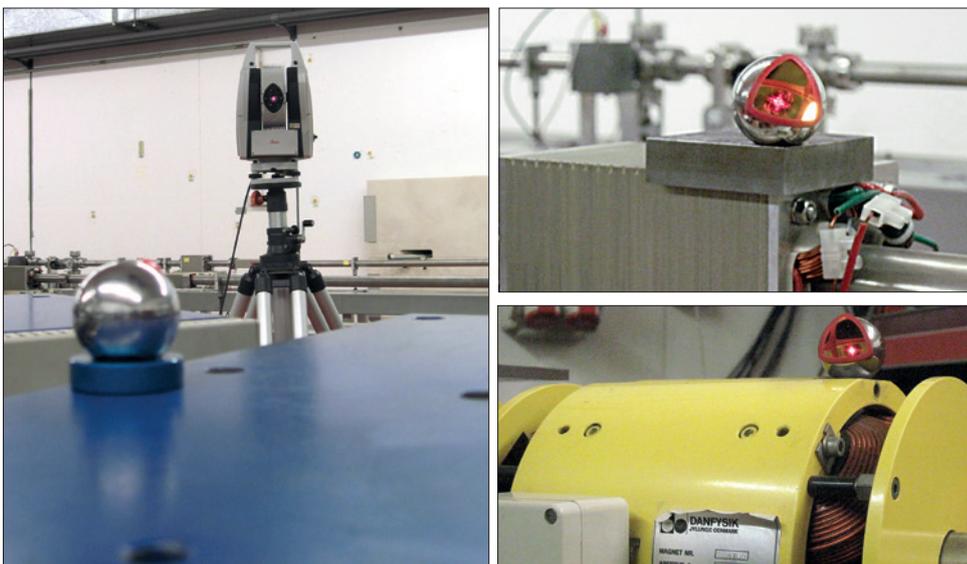


Abb. 2 | Links: Dipol (blau) mit CCR in Oberflächenadapter; rechts oben: grauer Quadrupol mit CCR in Kantenadapter; rechts unten: gelber Quadrupol mit CCR in Referenzpunkt

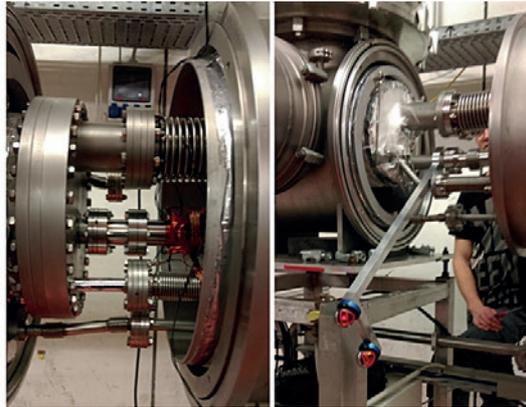
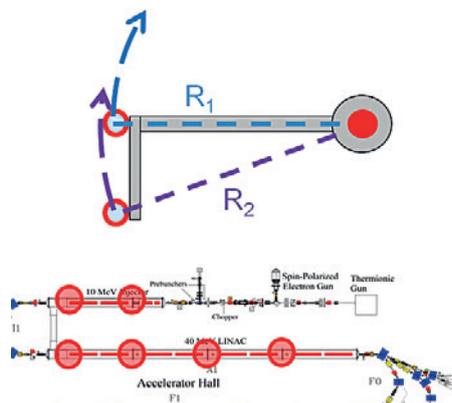


Abb. 3 | Links oben: L-Adapter in schematischer Darstellung; rechts: L-Adapter in Montage an Strahlführungselement; links unten und Mitte: Kryostatmodule mit sechs Aufnahmepositionen für L-Adapter

2.3 Laserscannermessungen

Parallel zu den Messungen mit dem Lasertracker wurden die Beschleunigerhalle sowie der vordere Bereich der Experimentierhalle mithilfe eines Laserscanners aufgenommen. Zum Einsatz kam der FARO Focus3D S 120 des Labors für Geoinformation.

Ziel war es, Daten zur Bestandsdokumentation und Planung zu erfassen, da die Hallen des S-DALINAC während des zum Teil mehrere Wochen ununterbrochen andauernden Strahlbetriebs aus Strahlenschutzgründen nicht betreten werden dürfen (Strahlenschutzverordnung). In diesen Zeiträumen bietet die Punktwolke eine gute Informationsgrundlage zur Planung des Umbaus. Ebenso lassen sich aus den Daten Medien zur Außendarstellung wie beispielsweise Animationen ableiten.

Zur gegenseitigen Registrierung der Scans und zur späteren Verknüpfung mit den Lasertrackerdaten wurden an die Wände Schachbrettmarken geklebt. An den langen Wänden der Beschleunigerhalle sowie im vorderen Teil der Experimentierhalle waren Marken des Formats DIN A4 ausreichend. Mit Blick auf die zunehmend geringere Auflösung bei steigender Messentfernung haben die Marken an der kurzen Seite der Wände in der Experimentierhalle das Format DIN A3. Um die geometrische Stabilität der Orientierung zu gewährleisten, wurden an verdeckten Stellen zusätzlich temporäre Zielkugeln mit Magnetfuß und Schachbrettmarken verwendet. Insgesamt sind 19 Schachbrettmarken und neun Zielkugeln in den beiden Hallen verteilt worden. Zur Orientierung der Scans im lokalen Netz wurden die Zentren der Marken mit dem Lasertracker und einem Surface Reflector taktile eingemessen (Abb. 4, links oben).

Die Beschleunigerhalle wurde mit 27 Standpunkten erfasst (Abb. 4). Ein Scan mit einer Auflösung von 10 240 Punkten pro 360° (Punktabstand ca. 6 mm/10 m) dauerte ca. vier Minuten. Weitere fünf Standpunkte waren zur Erfassung des Experimentbereichs nötig. Bei diesen Scans wurde aufgrund des kleineren Messvolumens eine geringere Auflösung von 8 192 Punkten pro 360° (Punktabstand ca. 7,5 mm/10 m) mit einer Scandauer von knapp zwei Minuten gewählt. Der herstellereinspezifische Qualitätsfaktor, über den sich die Messrate und die mögliche Verwendung

einer Rauschkompensation definieren, betrug in beiden Fällen 3×. Das entspricht einer Erfassung von 244 000 Punkten pro Sekunde ohne die Verwendung der Rauschkompensation /FARO Technologies 2013/. Die Aufnahmezeiten aller Standpunkte verlängern sich noch um die Dauer der Erfassung von Farbbildern, mit denen die Punktwolken in der Nachprozessierung eingefärbt werden können.

Das Anbringen und Einmessen der Schachbrettmarken sowie die vollständige Erfassung der beiden Hallen am S-DALINAC erfolgte an einem Arbeitstag. Die kompakte Bauweise des Scanners erleichterte das Arbeiten in den mit komplexen Aufbauten ausgefüllten und daher teilweise schwer zugänglichen Hallen und ihrer verwinkelten Verbindung.

3 AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE

3.1 Bündelausgleichung der Lasertrackerstandpunkte

Die einzelnen Standpunkte des Lasertrackers werden über eine Bündelausgleichung zusammengeführt. Hierbei kann in der industriellen Messtechnik der Schwerebezug oft aufgrund des sehr kleinen Objektraums vernachlässigt werden. Die Verknüpfung erfolgte über homologe Punkte mittels verketteter Koordinatentransformationen /Lösler & Eschelbach 2012/, wobei die originären polaren Messwerte – Schrägstrecke, Nick- und Gierwinkel – jedes Punkts $p_{i,j}$ vorab in



Abb. 4 | 3D-Scan mit FARO Focus3D S 120 zwischen Hauptbeschleuniger und erster Rezirkulation; links oben: Surface Reflector zur Erfassung der Schachbrettmarken mit dem Lasertracker Leica AT401

Fokus auf Produktivität ...

kartesische Koordinaten der Punkte überführt werden müssen. Als homologe Punkte fungierten nicht nur die Datumpunkte im Außenbereich des Beschleunigers, sondern auch die Referenzpunkte der Dipole, die redundant von mehreren Standpunkten aufgenommen wurden.

Die Wahl der möglichen Transformationsparameter, die pro Standpunkt im Rahmen der Bündelausgleichung mitgeschätzt werden können, ist problembezogen abzuwägen /Lösler & Eschelbach 2014/, um geometrische Objekteigenschaften, wie beispielsweise die Rechtwinkligkeit, zu wahren. Im Allgemeinen beschränkt man sich auf maximal sechs Transformationsparameter pro Standpunkt, drei Drehungen $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ und ε_z , die zu einer Rotationssequenz \mathbf{R} zusammengefasst werden, und drei Translationen $\mathbf{t} = [t_x \ t_y \ t_z]^T$. Werden alle sechs Parameter pro Standpunkt geschätzt, spricht man von einer 6-DOF-Lösung (DOF: engl. Degree of Freedom). Im Fall sehr kleinräumiger Netze wird statt dieser 6-DOF-Lösung häufig auch eine 4-DOF-Lösung angewandt, bei der die Drehungen $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ gesetzt werden. Um die optimale Anzahl an Parametern im Ausgleichungsmodell zu eruieren und um einer Überparametrierung entgegenzuwirken, bieten sich Verfahren zur Modellbewertung aus der Informationstheorie an /Lehmann 2014/, /Lehmann & Lösler 2016/. Eines der ältesten und bekanntesten Verfahren zur Modellbewertung ist das Akaike-Informationskriterium /Akaike 1974/. Für kleinräumige Netze untersuchen /Lösler et al. 2016b/ die optimale Anzahl an Transformationsparametern mittels Akaike-Informationskriterium und zeigen, dass eine 6-DOF-Lösung gegenüber der 4-DOF-Lösung bei der Bündelausgleichung zu empfehlen ist. Aufgrund der vergleichbaren Netzausdehnung am Teilchenbeschleuniger wurde eine Bündelausgleichung gewählt, bei der sechs Parameter pro Standpunkt (6-DOF) geschätzt werden.

Über die Transformationsgleichung

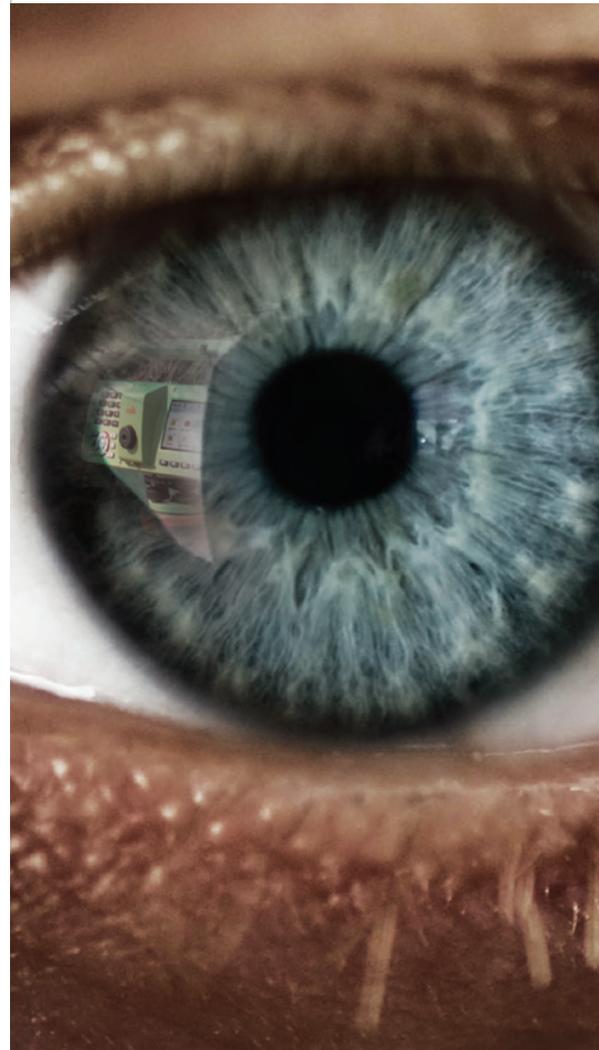
$$\mathbf{p}_{i,j} = \mathbf{t}_j + \mathbf{R}_j \tilde{\mathbf{p}}_i \quad (1)$$

werden alle Punkte $\mathbf{p}_{i,j}$ des j -ten Standpunkts des Lasertrackers in den übergeordneten Bezugsrahmen $\tilde{\mathbf{p}}_i$ überführt. Die Bestimmung der Transformationsparameter erfolgt in einer gemeinsamen Ausgleichung für alle Standpunkte im Gauß-Markov-Modell nach der Methode der kleinsten Quadrate /Lösler & Eschelbach 2012/, /Lösler et al. 2016b/.

Im Zuge der Umformung der polaren Beobachtungen in lokale kartesische Koordinaten lässt sich auch das Unsicherheitsbudget ableiten, das dem Ausgleichungsprozess als stochastisches Modell zugrunde liegt. Diese Budgetierung berücksichtigt die Genauigkeit der Messelemente selbst, zusätzliche Einflussparameter im Messprozess (Temperaturschwankungen, Zentrierunsicherheiten etc.) und fertigungsbedingte Abweichungen des Instruments von seiner idealisierten Geometrie bzw. die Unsicherheiten der entsprechenden Korrekturparameter (Kippachsabweichung, Exzentrizität des Teilkreises etc. /Lösler et al. 2016b/). Basierend auf dem geometrischen Kompensationsmodell von /Hughes et al. 2011/ erweiterten /Lösler & Eschelbach 2012/ das Modell auf den gesamten Messprozess, sodass sich bis zu 25 Einflussgrößen modellieren lassen, die die Unsicherheiten der aus polaren Messelementen abgeleiteten Koordinaten bestimmen. Das a priori gewählte stochastische Modell wurde in Anlehnung an die Herstellerspezifikation /Hexagon Metrology 2012/, Erfahrungen aus vergleichbaren Projekten /Juretzko 2009/, /Eschelbach & Overath 2014/ und Instrumentenuntersuchungen /Hughes et al. 2011/, /Eschelbach et al. 2015/ mittels Unscented Transformation festgelegt /Lösler et al. 2015/, /Lösler et al. 2016a/. Tab. 1 fasst die gewählten a priori Unsicherheiten zusammen. Während die instrumentenbezogenen Unsicherheiten alle von einem Standpunkt aus gemessenen Punkte gleichermaßen beeinflussen, sind die individuellen zielpunktabhängigen Unsicherheiten als zufälliges Messrauschen zu interpretieren /Lösler & Eschelbach 2012/.

Im Rahmen der Bündelausgleichung wurden mehr als 2100 einzelne Punktbeobachtungen von insgesamt 31 Standpunkten zu ca. 1500 Objektpunkten zusammengeführt. Die erreichte 3D-Punktunsicherheit nach der Ausgleichung lag bei $u_{xyz} = 0,2 \text{ mm}$ (95 % Konfidenzbereich) für die Datums- und Objektpunkte und erfüllt die oben genannten Anforderungen.

Gegenwärtig erfolgt die Feinabsteckung der Positionen aller Magnete der drei Rezirkulationsstrahlführungen in der Beschleunigerhalle. Da bei den Umbaumaßnahmen nicht garantiert werden kann, dass die Positionen der übrigen Magneten unverändert bleiben, liegt das



... die neuen Leica Digitalnivelliere!

Dem Innovationsführer und Erfinder der Digitalnivelliere - Leica Geosystems - ist es gelungen, neue Digitalnivelliere zu entwickeln, die Ihren Arbeitsablauf deutlich beschleunigen.

Möglich wird dies durch das Zusammenspiel der neuen Autofokus Funktionalität, der neuen großen Farb-Touch Anzeige, der hochwertigen Weitwinkel-Kamera und dem neuen Digitalkompass.

Instrumentenbezogene Unsicherheiten		
Standpunkt	x-Koordinate	50 µm
	y-Koordinate	50 µm
	z-Koordinate	50 µm
Distanzmesser	Instrumentenmaßstab	0,5 ppm
	Additionskonstante	5 µm
	y-Offset	0,5 µm
	z-Offset	0,5 µm
Achsenoffset		0,5 µm
Gierwinkel-Encoder	Fourier-Koeffizienten ² $n = 2$	75 µgon
	Höhenindexabweichung	75 µgon
Nickwinkel-Encoder	Fourier-Koeffizienten $n = 2$	75 µgon
Kippachsabweichung		75 µgon
Zielachsabweichung		75 µgon
Individuelle zielpunktabhängige Unsicherheiten		
Umgebungsmaßstab		2,5 ppm
Gierwinkel		0,15 mgon
Nickwinkel		0,15 mgon
Zentrierung	x-Komponente	12 µm
	y-Komponente	12 µm
	z-Komponente	12 µm

Tab. 1 | Gewählte a priori Unsicherheiten zur Ableitung des stochastischen Modells der Bündelausgleichung. Die Unsicherheiten unterteilen sich in punktübergreifende instrumentenbezogene Unsicherheiten und individuelle Unsicherheiten im Messprozess eines Punktes.

Datum einzig in den 18 Drift-Nestern an den Laborwänden. Im Zuge der Stationierungen zur Feinabsteckung in der Beschleunigerhalle ergibt sich eine mittlere räumliche Abweichung in den Datumspunkten von 0,1 mm und bestätigt die Annahme, dass sich die Drift-Nester an den Laborwänden zur langfristigen Definition des Datums eignen und die abgeschätzten Unsicherheiten nach /DIN-1319^{3/} zutreffend sind.

3.2 Ableitung der räumlichen Ausrichtung der Strahlführungselemente

Die Ausgleichsprozesse zur Ableitung der räumlichen Ausrichtung der Strahlführungselemente erfolgten mit den aus der Bündelausgleichung stammenden ausgeglichenen Punkten unter Berücksichtigung der zugehörigen, vollbesetzten Unsicherheitsmatrix. Insgesamt wurden die Formparameter von 66 Ebenen und sechs Doppelzylindern berechnet.

Neben den Referenzpunkten an den Dipolen und Quadrupolen definiert der Normalenvektor der Magnetoberfläche die räumliche Orientierung des Strahlführungselements. Dieser wird über die

Regressionsebene durch die hierfür erfassten Ebenenpunkte auf dem Magneten abgeleitet. Es gilt

$$\mathbf{e}^T \tilde{\mathbf{p}}_i = d, \quad (2)$$

wobei $\mathbf{e} = [e_x \ e_y \ e_z]^T$ der normierte Normalenvektor mit $\|\mathbf{e}\| = 1$ ist, d der kürzeste Abstand der Ebene vom Koordinatenursprung und $\tilde{\mathbf{p}}_i$ ein Punkt der Ebene ist. Da im Gleichungssystem keine Trennung der Veränderlichen vorgenommen werden kann, sind die Parameter in einem Gauß-Helmert-Modell (GHM) mit Restriktionen /Caspary & Wichmann 2007/ zu schätzen.

Als Maßzahl für die Ausrichtungsgenauigkeit wird die 3D-Punktunsicherheit für einen Punkt außerhalb der Ebene im Verhältnis zu seinem Ebenenabstand herangezogen, die sich durch Anwendung des Unsicherheitsfortpflanzungsgesetzes ergibt. Erwartungsgemäß ist die Unsicherheit bei den Dipolen bedingt durch die große Punktzahl und die Größe des erfassten Ebenenausschnittes am kleinsten. Die Normalenvektoren der Quadrupole wurden jeweils nur aus vier Referenzpunkten bestimmt. Insbesondere bei den grauen Quadrupolen, die lediglich eine Grundfläche von ca. $15 \times 10 \text{ cm}^2$ aufweisen, kommt es zu höheren Extrapolationsabweichungen und somit zu größeren Unsicherheiten. Insgesamt wird eine 3D-Punktunsicherheit von $u_e = 0,3 \text{ mm/m}$ (95 % Konfidenzbereich) nicht überschritten, wodurch die o. g. Anforderungen erfüllt sind.

In der Beschleunigerhalle wurden zur Bestimmung der Strahlachse an den Verbindungsstellen zwischen den Kryostatmodulen Teile der Strahlführungselemente erfasst. Bauartbedingt ist nur eine partielle Erfassung des Zylindermantels möglich. Die Aufnahme mit einem speziellen L-Adapter, der zwei CCR aufnehmen kann, liefert bei Drehung und Verschiebung des Adapters Punkte der Mantelflächen von zwei Zylindern, die um dieselbe Achse $\mathbf{z} = [z_x \ z_y \ z_z]^T$ rotieren, jedoch unterschiedliche Radien r_1 bzw. r_2 besitzen (Abb. 5). Über den funktionalen Zusammenhang

$$\|(\tilde{\mathbf{p}}_i - \mathbf{p}_0) \times \mathbf{z}\| = r_{1,2} \quad (3)$$

liefern die Punkte $\tilde{\mathbf{p}}_i$ der Mantelfläche des Zylinders den Aufpunkt \mathbf{p}_0 mit dem kürzesten Abstand zum Ursprung sowie die Achse \mathbf{z} mit $\|\mathbf{z}\| = 1$, und $\mathbf{p}_0^T \mathbf{z} = 0$. Während die Ebenen der Magnete getrennt für sich berechnet werden, erfolgt die Bestimmung der insgesamt sechs Doppelzylinder in einem Modell, da es sich um Elemente desselben Strahlführungsabschnitts handelt. Hierbei werden die beiden Radien für alle Doppelzylinder als identisch betrachtet.

Die ursprüngliche Annahme einer einheitlichen Zylinderachse für den Bereich I1 bzw. A1 muss nach der Analyse der Residuen verworfen werden. Die in Abb. 5, rechts, blau dargestellten Residuen dieses Modells weisen eine asymmetrische Verteilung auf und übersteigen die Messunsicherheit des Lasertrackers um ein Vielfaches. Dies lässt auf ein nicht zutreffend parametrisiertes funktionales Modell schließen. In einer weiteren Analyse wurden die sechs Achsen der Doppelzylinder unabhängig voneinander geschätzt. Die in Abb. 5, rechts, orange dargestellten Residuen dieses Modells sind annähernd normalverteilt und streuen in der Größenordnung der erzielbaren Messunsicherheit. Der

² Der Entwicklungsgrad der Fourier-Reihe wird auf $n = 2$ beschränkt, siehe /Lewis et al. 2013/.

³ Die Ermittlung der Messunsicherheit nach /DIN-1319/ ist konform zum Leitfadens zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (engl.: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; GUM) insbesondere zur 2. Ergänzung für multivariable Modelle /GUM 2011/.

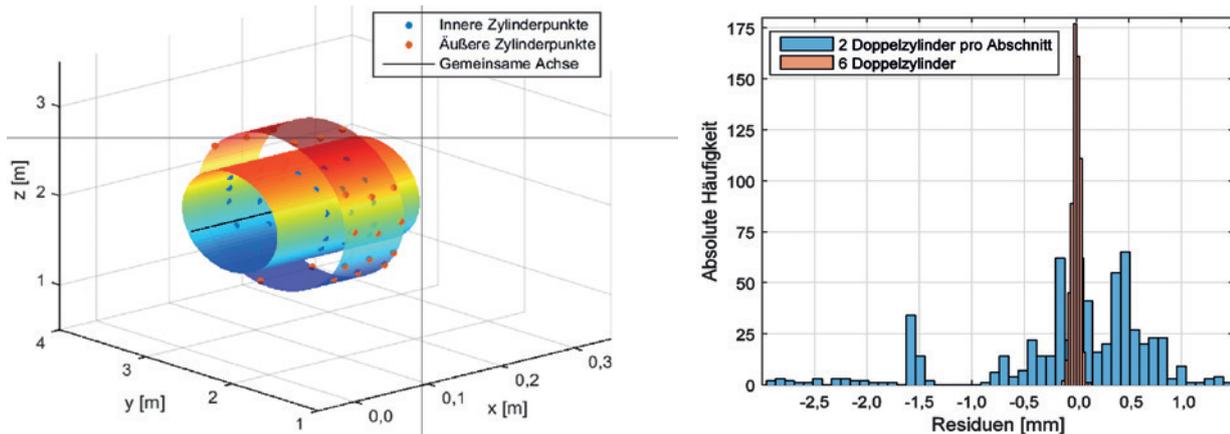


Abb. 5 | Links: Schätzung eines Doppelzylinders aus diskreten 3D-Punkten (ungleiche Achsskalierung); rechts: Residuenanalyse unterschiedlicher Modellierungen der Doppelzylinderachsen; blau dargestellt sind die Residuen bei abschnittsweiser Achsbestimmung (zwei Achsen), orange dargestellt sind die Residuen bei individueller Achsbestimmung (sechs Achsen)

durch Gleichung (3) angenommene funktionale Zusammenhang ohne Kopplung der Zylinderachsen wird bestätigt, sodass dieses Modell zu favorisieren ist. Die Residuenanalyse der Doppelzylinderauswertung ergibt somit, dass eine einheitliche Strahlachse sowohl im Bereich I1 als auch im Bereich A1 nicht vorliegt, und eine Neuausrichtung der Kryostatmodule empfehlenswert ist.

3.3 3D-Modell aus Laserscannerdaten

Die Auswertung der Laserscannerdaten erfolgte in mehreren Schritten. In FARO SCENE wurden die Scanpunkte zunächst automatisch eingefärbt und die Verknüpfungspunkte ermittelt. Im Anschluss wurden die Passpunkte manuell auf Fehlerfassungen überprüft und die Punktnummern korrigiert.

FARO SCENE ermöglicht eine gegenseitige Orientierung der Scans in Clustern. Dabei kann ein Projekt in mehrere Bereiche (Cluster) unterteilt werden, in denen die Einzelscans zueinander orientiert werden. Die Orientierung dieser Cluster erfolgt abschließend projektweit. Die Scans der Beschleunigerhalle wurden in mehreren Clustern zusammengefasst, die jeweils in den Bereichen parallel zu den geraden Abschnitten der Strahlführung in x -Richtung lagen (Abb. 1). Ein weiterer Cluster enthielt die Scans der Experimentierhalle. Zusammen mit den lokalen Koordinaten der Schachbrettmarken aus der Messung mit dem Lasertracker konnten so alle Scans mit einer mittleren Positionierungsunsicherheit von 7 mm in das lokale Bezugssystem transformiert werden. Aufgrund der untergeordneten Genauigkeitsanforderungen an die Laserscannerdaten wurde auf eine zusätzliche Verknüpfung der einzelnen Scans über geometrische Primitive (z.B. /Lichtenstein & Benning 2010/) verzichtet. Im Anschluss wurde eine Projektpunktwolke mit einer homogenisierten Punktdichte berechnet. Aus dieser Punktwolke lassen sich digitale Orthophotos, eine zweidimensionale Abbildung ausgewählter Punkte orthogonal projiziert auf eine der drei Raumebenen mit gegebenem Maßstab, berechnen. Diese Bilddaten können dann beispielsweise georeferenziert als Hintergrundinformation im CAD genutzt werden. In diesem Projekt wurden zwei Orthophotos in der Draufsicht im Verhältnis $1\text{ px} = 5 \times 5\text{ mm}^2$ erstellt: Als Schnitt auf Höhe des Beschleunigerstrahls und als komplette Ansicht ohne Decke. Ebenso

wird die Projektpunktwolke einmal gesamt und einmal ohne Decke zur Weiterverarbeitung in mehrere Formate exportiert.

Das Projekt wurde zur Ansicht in FARO SCENE WebShare2Go aufbereitet. Dort lassen sich die Scans als Panoramabilder in einem Webbrowser betrachten. SCENE WebShare ermöglicht auch eine punktwolkenbasierte Messung innerhalb der Panoramen. Während SCENE WebShare auf einem Server betrieben werden muss, bietet WebShare2Go eine portable Komplettlösung mit Webserver und Browser, die sich von einem Wechseldatenträger aus starten lässt.

Als weiteres Produkt wurden Flüge durch die Beschleunigerhalle und den Experimentierbereich animiert (Abb. 6). Diese Filme können bei Präsentationen eingesetzt werden.

Eine andere Möglichkeit der Visualisierung der Punktwolke in einem Webbrowser bietet Potree. Nachdem der Datensatz ohne Decke in eine Octree-Struktur überführt wurde /Foley et al. 2013/, kann Potree die Punktwolken mittels WebGL anzeigen und durch Javascript dynamisch Datenpakete nachladen. So können im Browser die Punktwolken interaktiv betrachtet, zwischen den Punkten gemessen und Clippingboxen zur besseren Visualisierung gesetzt werden.

Die Vorbereitung der Scans bis zur Berechnung der Projektpunktwolke konnte in einem Arbeitstag realisiert werden. Die Ableitung der weiteren Produkte bedurfte nochmals dreier Arbeitstage, die sich durch die teilweise langen Prozessierungszeiten auf mehrere Wochen verteilen.

4 Zusammenfassung

Am Supraleitenden Darmstädter Elektronenlinearbeschleuniger des Instituts für Kernphysik der Technischen Universität Darmstadt wurden 66 Dipol- und Quadrupolmagnete, die den Strahlverlauf des Teilchenbeschleunigers definieren, messtechnisch erfasst. Bedingt durch die hohen Genauigkeitsanforderungen wurde die Aufnahme mit dem mobilen Lasertracker Leica AT401 des Labors für Industrielle Messtechnik der FRA-UAS durchgeführt. Die sachgerechte Verknüpfung der erhobenen Daten erfolgte mit einem koordinatenbasierten Auswertansatz in einer Bündelausgleichung unter Berücksichtigung eines umfassenden Unsicherheitshaushalts. Für die ermittelten Punkte konnte eine räumliche Unsicherheit von $u_{xyz} = 0,2\text{ mm}$ (95 % Konfidenzbereich) nachgewiesen werden, womit die geforderte Toleranz von 0,5 mm eingehalten

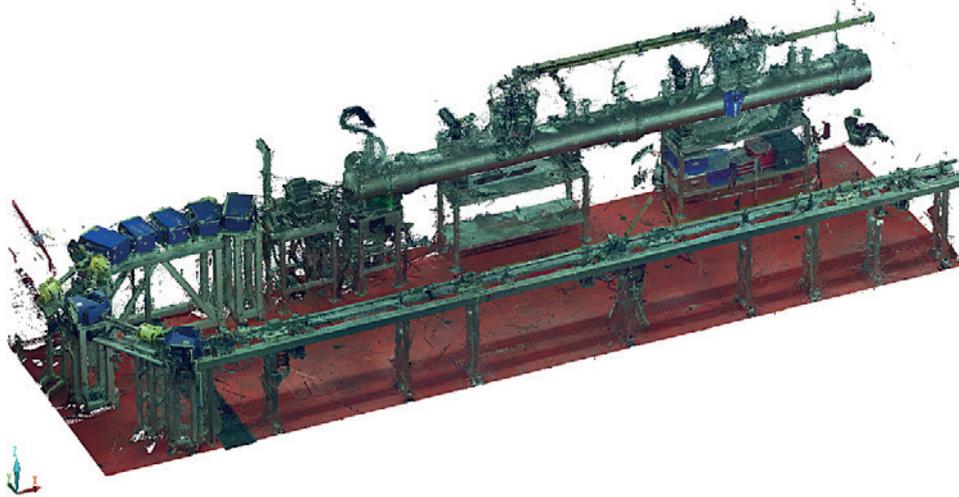


Abb. 6 | Detailsicht aus 3D-Punktwolke: hinterer Abschnitt des Hauptbeschleunigers mit Kryostatmodulen und erster Rezirkulation

wird. Mithilfe der Formanalyse konnten weiterhin der Strahlenverlauf zwischen den Kryostatmodulen und die räumliche Ausrichtung der Dipole und Quadrupole geometrisch abgeleitet werden.

Ergänzend zu den diskret gemessenen Punkten des Lasertrackers erfolgte die Aufnahme des gesamten Laborbereichs mithilfe des Laserscanners FARO Focus3D S 120 des Labors für Geoinformation der FRA-UAS. Die hierbei entstandene Punktwolke bildet die geometrische Grundlage für räumliche Fahrtrags- und Kollisionsanalysen bei infrastrukturellen Änderungen des Teilchenbeschleunigers im Planungsstadium. Sie lässt sich im Kontext der Gebäudedatenmodellierung (engl. Building Information Modeling – BIM) weiter analysieren. Ferner können die Daten zur Erstellung von webbasierten virtuellen Rundgängen verarbeitet werden, um Besuchern und Fachkollegen auch während der Betriebsphase einen gefahrlosen visuellen Eindruck des S-DALINAC zu vermitteln.

Literatur

- Akaike, H. (1974): A new look at the statistical model identification. In: IEEE Trans. Autom. Control, 19(1974), 716–723.
- Arnold, M.; Kürzeder, T.; Pietralla, N.; Hug, F. (2016): Final Design and Status of the Third Recirculation for the S-DALINAC. In: Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, 1717–1719.
- Caspary, W.; Wichmann, K. (2007): Auswertung von Messdaten – Statistische Methoden für Geo- und Ingenieurwissenschaften. Oldenbourg, München.
- DIN-1319 (1995): Grundlagen der Meßtechnik. Beuth, Berlin.
- Eschelbach, C. (2007): Störanfälligkeit geodätischer Präzisionsmessungen durch lokale Temperaturschwankungen. In: Brunner, F. K. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 07. Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, 2007. Wichmann, Heidelberg, 169–180.
- Eschelbach, C.; Heckmann, B.; Lösler, M. (2015): Hochgenaue Sollstreckenbestimmung mit einem mobilen Lasertracker an der Kalibrierbasis Neu-Isenburg. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 122(2015)3, 95–101.
- Eschelbach, C.; Overath, T. O. (2014): Einsatz eines mobilen Lasertrackers zur hochpräzisen Justierung von Fächerlotsystemen bei Hochseevermessungsschiffen. In: Wieser, A. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 14. Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich, 2014. Wichmann, Berlin/Offenbach, 347–360.
- FARO Technologies, Inc. (2013): FARO Laser Scanner Focus 3D Handbuch.
- Foley, J. D.; van Dam, A.; Feiner, S. K. (2013): Computer Graphics: Principles and Practice. 3. Auflage. Addison-Wesley, New York.
- GUM (2011): Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Extension to any number of output quantities. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html> (12.08.2016).
- Hexagon Metrology (2012): Leica Absolute Tracker AT401. Specification.
- Hug, F.; Bahlo, T.; Burandt, C.; Conrad, J.; Jürgensen, L. E.; Kleinmann, M.; Konrad, M.; Kürzeder, T.; Pietralla, N.; Eichhorn, R. (2013): Increasing the Stability of the Electron Beam of the S-DALINAC. In: Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, 3303–3305.
- Hughes, B.; Forbes, A.; Lewis, A.; Sun, W.; Veal, D.; Nasr, K. (2011): Laser Tracker Error Determination Using a Network Measurement. In: Meas. Sci. Technol., 22(2011), 1–12.
- Juretzko, M. (2009): Positionsbestimmung der Elektrodenmodule des KATRIN-Experiments mithilfe eines Lasertrackers. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 116(2009)6, 220–230.
- Knirsch, M. (1991): Konzeption, Aufbau und Erprobung eines hochauflösenden QCLAM-Spektrometers mit großem Raumwinkel und hoher Impulsakzeptanz am Elektronenbeschleuniger S-DALINAC. D17. TU Darmstadt.
- Lehmann, R. (2014): Transformation model selection by multiple hypotheses testing. In: Journal of Geodesy, 88(2014)12, 1117–1130.
- Lehmann, R.; Lösler, M. (2016): Multiple Outlier Detection: Hypothesis Tests versus Model Selection by Information Criteria. Journal of Surveying Engineering.
- Lewis, A.; Hughes, B.; Forbes, A.; Sun, W.; Veal, D.; Nasr, K. (2013): Determination of misalignment and angular scale errors of a laser tracker using a new geometric model and a multi-target network approach. In: MacroScale 2011 – Recent developments in traceable dimensional measurements. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bern-Wabern (Schweiz), 1–16.
- Lichtenstein, M.; Benning, W. (2010): Registrierung von Punktwolken auf der Grundlage von Objektprimitiven. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 117(2010)6, 202–207.
- Lindenberg, K. (2007): Development and Construction of the Low-Energy Photon Tagger NEPTUN. D17. TU Darmstadt.
- Lösler, M.; Arnold, M.; Bähr, H.; Eschelbach, C.; Bahlo, T.; Grewe, R.; Hug, F.; Jürgensen, L.; Winkemann, P.; Pietralla, N. (2015): Hochpräzise Erfassung von Strahlführungselementen des Elektronenlinearbeschleunigers S-DALINAC. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformatik und Landmanagement (zfv), 140(2015)6, 346–356.
- Lösler, M.; Bähr, H.; Ulrich, T. (2016a): Verfahren zur Zusammenfassung von Parametern und Unsicherheiten bei nicht-linearen Zusammenhängen. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016. Wichmann, Berlin/Offenbach, 274–285.

Fokus auf Präzision ...

Lösler, M.; Eschelbach, C. (2012): Konzept zur Realisierung eines Prototypen zur sachgerechten Auswertung von polaren Beobachtungen. In: allgemeine vermessungs-nachrichten, 119(2012)7, 249 – 258.

Lösler, M.; Eschelbach, C. (2014): Zur Bestimmung der Parameter einer räumlichen Affintransformation. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 121(2014)7, 273 – 277.

Lösler, M.; Haas, R.; Eschelbach, C. (2016b): Terrestrial monitoring of a radio telescope reference point using comprehensive uncertainty budgeting. In: Journal of Geodesy, 90(2016)5, 467 – 486.

Lüttge, C. et al. (1995): Large aperture system for high-resolution 180° electron scattering. In: Nucl. Instr. and Meth., A 366(1995)325.

Richter, A. (1996): Operational Experience at the S-DALINAC. Bd. 110. In: Meyers, S.; Pacheco, A.; Pascual, R.; Petit-Jean-Genaz, C.; Poole, J. (Hrsg.): Proc. of the 5th EPAC. IOP Publishing, Bristol:

Savran, D. et al. (2010): The low-energy photon tagger NEPTUN. In: Nucl. Instr. and Meth., A 613(2010)232.

Schüll, D. et al. (1978): High Resolution Electron Scattering Facility at the Darmstadt Linear Accelerator (DALINAC). In: Nucl. Instr. Meth., 153(1978)9.

Sonnabend, K. et al. (2011): The Darmstadt High-Intensity Photon Setup (DHIPS) at the S-DALINAC. In: Nucl. Instr. and Meth., A 640(2011)6.

Prof. Dr.-Ing. Cornelia Eschelbach

FRANKFURT UNIVERSITY OF APPLIED
SCIENCES –
LABOR FÜR INDUSTRIELLE MESSTECHNIK

Nibelungenplatz 1 | 60318 Frankfurt am Main
cornelia.eschelbach@fb1.fra-uas.de



Dipl.-Ing. (FH) Michael Lösler

FRANKFURT UNIVERSITY OF APPLIED
SCIENCES –
LABOR FÜR INDUSTRIELLE MESSTECHNIK

Nibelungenplatz 1 | 60318 Frankfurt am Main
michael.loesler@fb1.fra-uas.de



Philipp Winkemann MSc. (GIS)

FRANKFURT UNIVERSITY OF APPLIED
SCIENCES – LABOR FÜR GEOINFORMATION

Nibelungenplatz 1 | 60318 Frankfurt am Main
philipp.winkemann@fb1.fra-uas.de



MSc. Michaela Arnold

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT
INSTITUT FÜR KERNPHYSIK

Schlossgartenstraße 9 | 64289 Darmstadt
marnold@ikp.tu-darmstadt.de



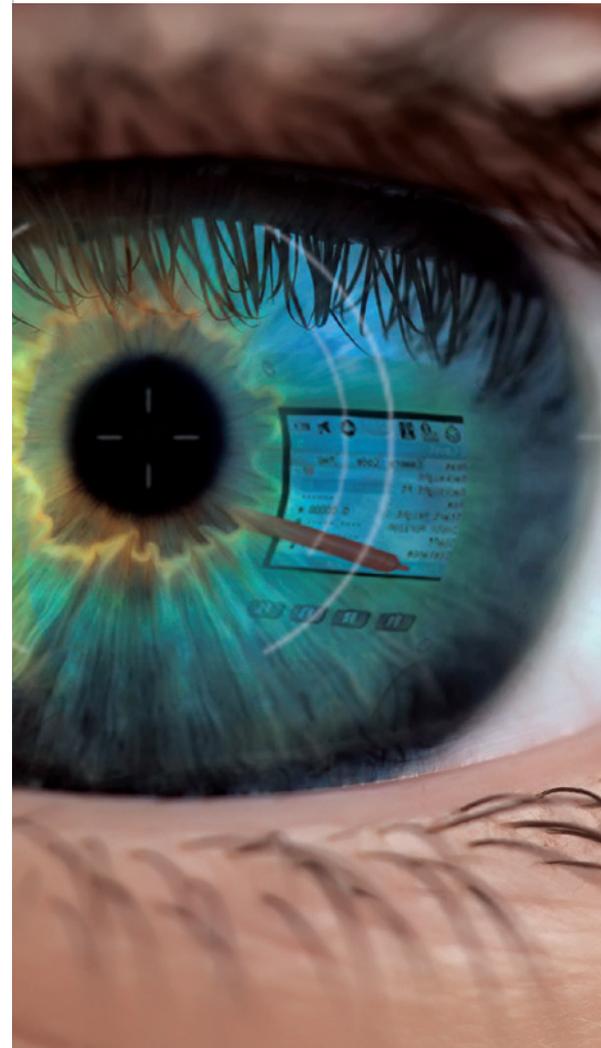
Prof. Dr. Dr. h. c. Norbert Pietralla

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT
INSTITUT FÜR KERNPHYSIK

Schlossgartenstraße 9 | 64289 Darmstadt
pietralla@ikp.tu-darmstadt.de



C. Eschelbach, M. Lösler, P. Winkemann, M. Arnold, N. Pietralla –
Einsatz mobiler Lasermesstechnik bei der Erfassung von
Strahlführungselementen eines Elektronenlinearbeschleunigers



... die neuen Leica Digitalnivelliere!

Automatisierte Funktionen und eine branchenführende Genauigkeit von 0,2 mm mit Standard Invar-Nivellierlatten liefern höchste Präzision.

Mit nur einem Tastendruck werden vor jeder Messung automatisierte Neigungsprüfungen durchgeführt. Dank dem integrierten Autofokus wird nicht nur Ihr Ziel schneller erfasst, sondern auch die Messgenauigkeit erhöht, indem der Kontrast der Latte maximiert wird.

Leica Geosystems
Tel. 089/14 98 10 0
<http://facts.leica-geosystems.com/LS>

Leica
Geosystems