

rotating fiducial is called the precision rotating datum (PRD). There are also three stationary fiducials on the AIP that primarily define the angle between the KCS and ACS.

As noted, the measurements of the wire position from the KOMs form a circle whose center coincides with the rotational stage's center. The center of rotation is determined by taking repeated measurements of the PRD while the AIP rotates. For each magnet, a best-fit circle is determined from the PRD measurements, and its center is taken as the center of rotation. The process then follows the calculations outlined in the "Principle of Magnet Referencing" section. Additionally, the circle's radius can be determined during calibration to improve precision. The roll of the magnet is conveyed as an angle in the KCS. The linear stages are also referenced to a common coordinate system.

The SMRs will be made from ceramic (since magnetic materials are unsuitable), and the stationary fiducials are designed to be three-point contact nests with retaining rings over the SMRs. An extensive design process – including several 3D printing prototypes – has led to the final version, which is now being manufactured from aluminum by our workshop (MEA4).

A spatial scan of the rotating AIP using a laser tracker is currently not feasible due to uncertain synchronization between the laser tracker and the KOMs.

3.1 Calibration

The calibration of the alignment interface uses a coordinate measurement machine (CMM). The KOM stand is placed on the CMM's measurement surface in the same orientation as it will be on the magnet measurement bench. This setup allows corrections for imperfections such as sag, tilt, and non-orthogonalities. The fiducials are measured using tactile CMM measurements of the SMR's reflective surfaces. For the PRD, this method eliminates the centering error of the corner cube placement within the sphere. If a gentle locking mechanism for the SMR can be found, even the PRD's imperfections could be corrected – an option that needs further assessment.

During calibration, the KCS is tied to the external fiducial markers on the AIP by determining the assembly-specific translation and rotation. Mathematical corrections for imperfections are then calculated and applied. The orthogonalization of the non-perpendicular KOM measurements is based on an affine transformation solved via an iterative least squared method. We determine the elements (a, b, c, d) of the affine transformation matrix by minimizing the difference between the reduced CMM coordinates and the transformed reduced KOM coordinates:

$$\begin{pmatrix} \bar{X}'_{ki} \\ \bar{Y}'_{ki} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{X}_{ki} \\ \bar{Y}_{ki} \end{pmatrix} \quad (2)$$

where:

$\begin{pmatrix} \bar{X}'_{ki} \\ \bar{Y}'_{ki} \end{pmatrix}$ are the rotated and orthogonalized (centroid-reduced) KOM coordinates,

$\begin{pmatrix} \bar{X}_{ki} \\ \bar{Y}_{ki} \end{pmatrix}$ are the centroid-reduced measured KOM coordinates, and

$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ define the affine transformation (combining orthogonalization and rotation).

This minimizes the squared difference between the CMM-measured coordinates and the transformed KOM coordinates.

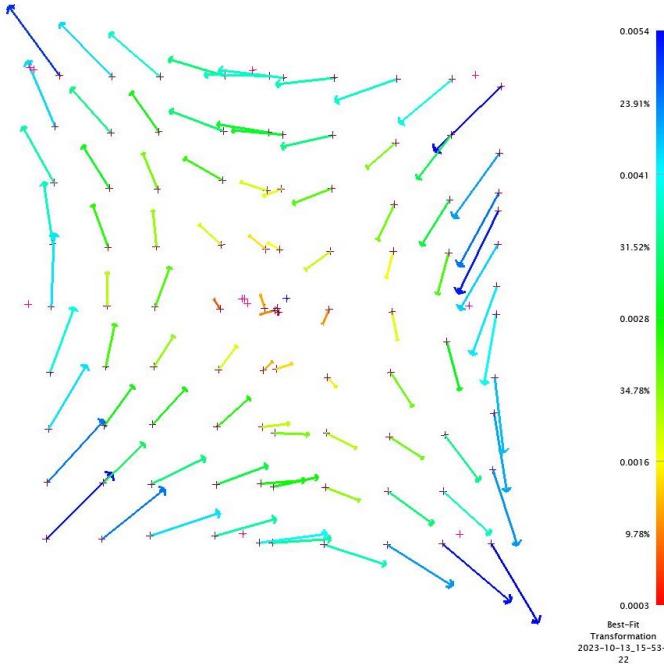


Fig. 3: This shows the transformation between the KOM and CMM measurements. The saddle shape indicates the non-perpendicularity of the KOMs. The color scale indicates the size of the deformation in mm, along with percentiles of measurements the listed range.

During the referencing measurements of the KOMs and AIP, a grid of points was obtained where the KOMs observed the CMM probe simultaneously with CMM measurements. A best-fit transformation of these measurements, shown in Figure 3, clearly reveals the non-perpendicularity of the KOMs. It was also observed that Keyence sensors perform better when measuring the shaft of the CMM's tactile probe rather than the ruby ball at its end. Changing the shaft color from reflective to black did not affect the readings.

Manual calibration (driving the CMM probe and recording KOM and CMM coordinates) is too labor-intensive for production. Therefore, the AIP design was modified to include a special circular plate inserted during calibration. This “calibration insert” provides a surface for the CMM probe, enabling automated data collection from both the KOMs and CMM. The plan is to use 4 (+1 back-up) measurement benches in production, corresponding to 10 stands.

3.2 Simulations

A simulation was performed in Spatial Analyzer to determine the uncertainty in the calculated center of rotation (CoR) from laser tracker measurements. The laser tracker’s uncertainty is based on experience with precise deformation measurements in BARKER & SCHLÖSSER 2022.

Table 1: Uncertainty of Leica AT960 as per BARKER & SCHLÖSSER (2022)

Quantity	Uncertainty
Horizontal angle	0.11 mgon
Zenith angle	0.42 mgon
Slope distance	4 μm + 1 ppm

The simulation shows that 72 points around the circle must be measured to achieve a center point accuracy of 1 μm (i. e., one measurement every 5°). The following table summarizes the relationship.

Table 2: Simulation results of CoR uncertainty

Number of points measured on the circle	Uncertainty
9	4 μm
18	3 μm
36	2 μm
72	1 μm

4 Photogrammetry Approach

Photogrammetry is being explored as an alternative for measuring the location of the alignment interface plates. The photogrammetry approach concept centers on automating the process by imaging the AIP only from a circular path above the measurement bench from a motorized rotor on a frame. We built a large frame spanning over the magnet and roughly 1.5 m above it. The rotor installed on the frame turns the camera with a 1.5 m radius. Tests and proofs of concepts are being done with a GSI Inc.'s photogrammetry system using the Nikon D700 camera, the 50 μm accuracy version, and V-STARS software. The setup can be seen on Figure 5. Further tests were performed with Nikon D810 Platinum version.

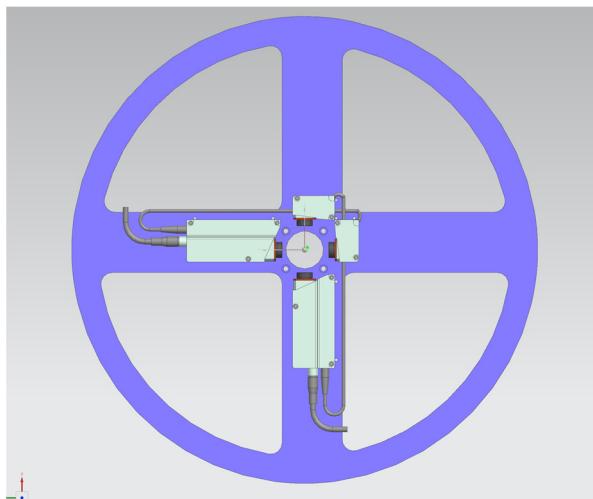
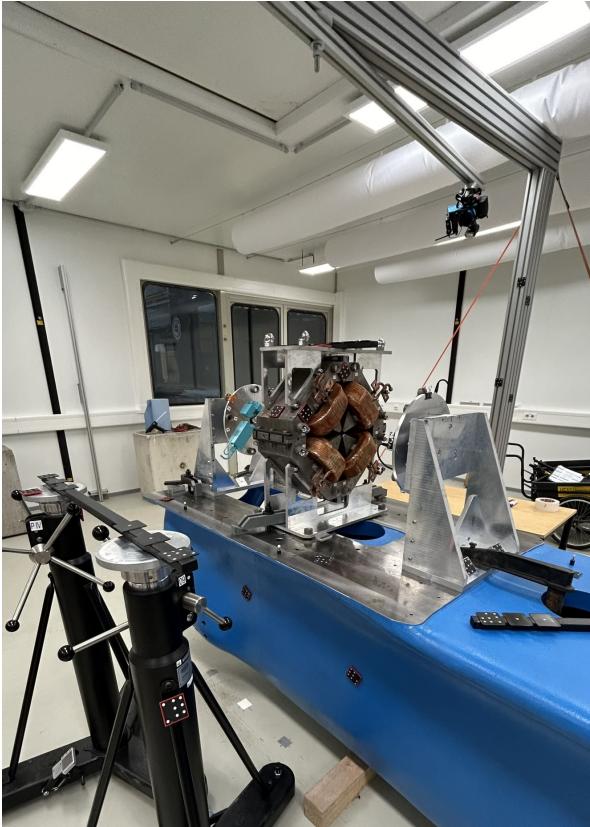


Fig. 4:
Large AIP for photogrammetry
[Daniel Thoden]

**Fig. 5:**

Photogrammetry setup with small KOM plates. The aluminum frame with the camera on the rotor can be seen arching overhead.

Relatively good initial results were achieved in feasibility tests, but optimization was needed to make the method applicable. Initially we used the same size of alignment interface plate as was used for the laser tracker approach, but larger the AIP plates were found to be more practical for this approach. The AIPs were enlarged by 150 mm to the design shown in Figure 4. This enhanced the visibility of the fiducials. The measurement area was then targeted with coded targets, scale bars, reflective ball targets, and spherical fiducial targets.

We took three sets of measurements with the photogrammetry setup. First, we used the small AIPs and experimented with the position of the fiducials, the setup, and the camera position. The fiducials were on the sides of the AIPs facing the magnet, which lead to decreased visibility. We measured a cluster of points with small differences in the radius. Here, the camera was mounted on the frame and rotating above the setup. We also marked the angle of the rotation, because the V-STARS software has a problem with naming points if the position of points is too similar to the previously measured fiducial due to rotation of the AIP.

Then for the next two sets, we used larger plates and measured four fiducials in a diamond shape cluster, with each fiducial at a slightly different radius. We used fiducials on the side of the AIP facing away from the magnet. One set had the camera hand-held, while the other had the camera on the frame's rotor. The hand-held camera setup got slightly better results.

The movements of the hand-held camera would be very difficult to mimic with an automated process.

Table 3 shows the maximum uncertainties of the measured points during the rotation of the AIP and the stationary magnets fiducials. The magnets fiducial uncertainties are significantly better, as expected, since they have a better geometry and more measurements than the points on the AIP. More images were taken with the small AIP, resulting in lower uncertainties.

Table 4 details the median differences between determinations of the centers of rotation (CoRs). In each phase, a rotating AIP was measured four times with the laser tracker, and four times by photogrammetry. These are independent measurements of the same rotating AIP, with each circle using a different fiducial. "LT and Photogrammetry" shows the median of the differences between the two sets of four measurements, and reveals the systematic differences between the measurement methods.

Table 3: Photogrammetry results

Description	Max σ_{XYZ} AIP	Max σ_{XYZ} Magnet Fiducial
Small AIP, frame cam	23 μm	10 μm
Large AIP, hand cam	41 μm	20 μm
Large AIP, frame cam	58 μm	16 μm

Table 4: Median differences in 2D magnitude of measured CoRs during large AIP measurements

Pass 1 – camera in hand	
CoR Data Source	Median of differences
Laser tracker	4 μm
Photogrammetry	6 μm
LT and Photogrammetry	21 μm

Pass 2 – camera on frame	
CoR Data Source	Median of differences
Laser tracker	3 μm
Photogrammetry	47 μm
LT and Photogrammetry	26 μm

All the results are at the level of the camera's accuracy or better. The next course of action is to borrow a camera with higher accuracy rating. The accuracy might be further improved by: using the whole reflective 1.5" targets in fiducial nests, and coded targets that can be referenced with tactile measurements. Another possibility is to try a setup with two cameras at different heights.

5 Conclusion

The alignment of PETRA IV presents numerous challenges. The tunnel alignment accuracies range from 30 to 100 μm (at $p = 68\%$), depending on the element. Beyond final alignment, two critical aspects are the referencing of the resistive magnets and the stability of instrumentation during both referencing and final alignment. This paper discusses key advancements in developing an ideal magnet referencing technique and in designing stable instrument pillars.

The referencing uncertainty is targeted to be as low as 15 μm , which includes errors from magnetic axis determination (using the stretched wire), the wire's position measurements, and the referencing itself. New methods are under development, demonstrated through various experimental setups and proofs of concept.

The laser tracker approach is in the early prototyping phase. Stationary AIP fiducials are awaiting manufacturing and testing, and the precision rotating datum is being prepared for prototype manufacturing.

In the photogrammetry approach, different geometries of the camera, AIP, and fiducials have been explored. Although the accuracy limits of the camera were quickly reached, the photogrammetry method is a viable option. Future tests will verify whether it can meet or exceed the required referencing accuracy.

Advancing both approaches in parallel mitigates risk; the photogrammetry method provides a backup to the experimental laser tracker approach.

References

- Barker, J. & Schlösser, M. (2022): *PETRA IV Girder Transport Tests*. In: 16th International Workshops on Accelerator Alignment, Ferney-Voltaire (France), 31 October – 4 November 2022, p. 6. Retrieved from indico.cern.ch/event/1136611/contributions/5027108/.
- Schlösser, M. (2016): *Coordinate Database at DESY*. In: 14th International Workshops on Accelerator Alignment, Grenoble (France), 3-7 October 2016, p. 3.
doi: 10.3204/PUBDB-2016-06681.
- Schroer, C. G. & DESY (2019): *PETRA IV: Upgrade of PETRA III to the Ultimate 3D X-ray Microscope*. Conceptual Design Report. Edited by Roehlsberger, R., Weckert, E., Wanzenberg, R., Agapov, I., Brinkmann, R. & Leemans, W. – Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, 259 p. doi: 10.3204/PUBDB-2019-03613.

Konzeption AR-gestützter Messverfahren in der Industrievermessung

Emanuel SCHÜTZ und Robin ULLRICH

Zusammenfassung

Mit dem Aufkommen der Industrie 4.0 hat Augmented Reality längst Einzug in die industrielle Produktion gehalten. Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig: von der Ausbildung und dem Training über Schritt-für-Schritt Anweisungen in der Produktion bis hin zur Qualitätskontrolle. Dieser Beitrag orientiert sich an einem konkreten Anwendungsszenario aus dem Schienenfahrzeugbau um aufzuzeigen, wie AR auch in der Industrievermessung erfolgreich eingesetzt werden kann. Hauptziel ist es, die Effizienz und Flexibilität bestehender Messprozesse zu erhöhen. Hierbei soll die Microsoft HoloLens in Verbindung mit einem Lasertracker genutzt werden. Der Lasertracker bietet hochpräzise Messungen, während die HoloLens als visuelle Schnittstelle dient und Messdaten in Echtzeit visualisiert. Die Kombination beider Technologien ermöglicht es, komplexe Messaufgaben schneller und intuitiver zu bewältigen. Die Fehlerquote wird reduziert, da Benutzer sofortige Rückmeldungen erhalten und notwendige Anpassungen direkt vornehmen können.

Die Implementierung dieser Technologie birgt jedoch einige Herausforderungen. Dieser Beitrag betrachtet die technischen Hürden einer solchen Umsetzung, stellt verschiedene Lösungsansätze dar und gibt einen Ausblick auf das Potenzial hinsichtlich Effizienz und Nutzerinteraktion.

1 Einleitung

Augmented Reality (AR) ermöglicht eine intuitive Kommunikation zwischen Menschen und Maschinen. So wird beispielsweise bei BMW GROUP (2019) die Vollständigkeitsprüfung eines Presswerkzeugs mittels Tablets und einer zugehörigen AR-Applikation durchgeführt, um unter anderem Bohrpositionen mit dem zugehörigen Computer-aided-Design-(CAD-)Modell abzulegen. Weitere Anwendungen führen FRIGO et al. (2016) mit besonderem Augenmerk auf den Bereich Aerospace bei Airbus auf. Auch in der Medizin sind verschiedene Ansätze vorhanden, die das Potenzial von AR und explizit auch von AR-Brillen nutzen. LIU et al. (2020) untersuchen die Einsatzfähigkeit von AR in Ausbildung und Training, oder für die aus der Ferne angeleitete Durchführung von Operationen (engl. telementored surgery). KUNZ et al. (2020) beschreiben gar den Einsatz im Rahmen von neurochirurgischen Eingriffen.

Als mobiles Messsystem kann ein Lasertracker (LT) problemlos zum Produkt befördert werden und kommt daher besonders häufig bei der Qualitätssicherung großvolumiger Bauteile (Large Volume Metrology – LVM) zum Einsatz. Mittels eines kooperierenden Ziels- einem meist handgeführten Reflektor, müssen oft mehrere hundert Punkte gemessen oder abgesteckt werden. Letzteres bezeichnet die Kennzeichnung von bekannten bzw. definierten Koordinaten am Messobjekt. Ein typischer Anwendungsfall ist beispielsweise das Anreißen von Bohrpositionen. Im Bereich der LVM sind auf der einen Seite automatisierte Inline-Messun-

gen aufgrund der Bauteilgröße und der vergleichsweise geringen Stückzahlen schwer realisierbar bzw. nicht wirtschaftlich. Auf der anderen Seite sind manuelle Messungen mit dem LT durch den geringen Automatisierungsgrad häufig ein Nadelöhr in der Produktionskette. Gerade bei Absteckungen muss die Reflektorposition kontinuierlich und feinfühlig korrigiert werden. Dies führt zu stetig wiederholten Blickrichtungswechseln zwischen dem Bildschirm und dem Reflektor, die ergonomisch ungünstig sind und den Fokus auf die Positionierung unterbinden. Gleichzeitig fordern im industriellen Umfeld Hindernisse und Gefahrenbereiche wie Montagegruben oder spannungsführende Installationen ständige Aufmerksamkeit.

2 Grundlagen

AR bezeichnet die Überlagerung des realen Umfelds mit virtuellen Informationen in Echtzeit. Verschiedene Technologien stehen zur Darstellung zur Verfügung; in erster Linie sogenannte Head Mounted Displays (HMDs). Dazu zählt auch die HoloLens2 (HL) von Microsoft. Alternativ können aber auch Smartphones oder Tablets verwendet werden. Spatial Augmented Reality (SAR) bezeichnet eine Projektion direkt auf ein reales Objekt (DEPPE et al. 2022). HMDs unterteilen sich einerseits in reine AR-Hardware (hier sieht der Benutzer die reale Welt) sowie andererseits in Virtual-Reality-(VR-)Brillen mit der Möglichkeit die Umgebung mittels Kameras zu erfassen und im Display darzustellen. Auf Letzterem basiert beispielsweise die Apple Vision Pro, welche darüber hinaus die Augen des Nutzers mittels Display auf der Außenseite dargestellt, um die Kommunikation mit der Umwelt zu erleichtern (APPLE INC. 2023). Die HL gehört dagegen mit zwei transparenten Displays und einer Auflösung von jeweils 2K zu den Marktführern ersterer Kategorie, den AR-Brillen. Ihre Produktion wurde inzwischen zwar eingestellt, dennoch bleibt das Konzept der HL insbesondere für Industrieanwendungen interessant, erfüllt sie doch unter anderem auch die Reinraumkriterien ISO-Klasse 6 bis ISO-Klasse 8 (MICROSOFT CORPORATION 2023). Für viele Produktionsumgebungen ist besonders auch die Kombination mit einem Helm essenziell, wie sie von Trimble in Form des XR10 (TRIMBLE INC. 2022) realisiert wurde. Auch das in diesem Beitrag beschriebene Konzept bezieht sich auf die Nutzung einer HL2. Der verwendete, offene Softwarestandard OpenXR kann jedoch auf einer Vielzahl weiterer Hardwareplattformen übertragen werden (KHRONOS GROUP 2024). Im Folgendem wird die HL2 näher vorgestellt und auf Spezifikationen und Hardware eingegangen.

Die HL kann völlig autark genutzt werden, d. h., es sind weder eine Verbindung zu einem Rechner notwendig noch im Raum vorhandene Marker (Beacons). Alle Anwendungen werden auf einem System-on-a-Chip (SoC) ausgeführt, dieser vereint CPU und GPU. Für eine flüssige AR-Erfahrung müssen neben der räumlichen Position auch die Gestenerkennung und das Eye-Tracking (Blickerfassung) in Echtzeit berechnet werden. Alle Auswertungen finden auf einer eigens entwickelten Holographic Processing Unit (HPU) 2.0 statt. Speziell auf Computer-Vision-Algorithmen optimiert, ermöglicht die HPU, nahezu unabhängig von der benutzten App, die Auswertung sämtlicher Sensorik bei einem geringen Stromverbrauch (UNGUREANU et al. 2020). Die kontinuierliche, präzise Bestimmung der eigenen Position im Raum erfordert das Zusammenspiel verschiedener Sensoren. Anders als bei vielen VR-Brillen, wie z. B. der Vive Pro2, werden keine externen Basisstationen und Controller genutzt. Stattdessen erfassst die HL kontinuierlich die Umgebung, bestimmt die eigene Position und erzeugt nach und nach eine Karte (Simultaneous Localization and Mapping – SLAM). Dies

erlaubt den Verzicht auf Marker und Kalibrierungen von Beacons und sorgt so für die nötige Flexibilität für den Einsatz in wechselnden Umgebungen.

Die Karte wird gespeichert und kann beim erneuten Betreten des Raumes wiedererkannt werden, sodass die bei der letzten Verwendung holographisch positionierten Objekte erneut an der gleichen Raumposition erscheinen. Doch nicht nur die Position und Orientierung im Raum wird erfasst, auch die Gesten des Nutzers müssen präzise erkannt werden, um eine Interaktion mit den Apps zu ermöglichen. All diese Funktionen basieren auf folgenden Sensoren (Abb. 1):

- Vier Umgebungskameras (Visible-Light Tracking Cameras – VLCs) erfassen Graustufenbilder und ermöglichen durch ihren Überlappungsbereich eine photogrammetrische Auswertung für SLAM.
- Eine Tiefenkamera wird in zwei verschiedenen Modi betrieben. Ersterer erfasst bei einer Frequenz von 45 Hz die Hände (Articulated Hand Tracking – AHAT) bis zu einer Distanz von einem Meter und wird für die Gestenerkennung genutzt. Zweiterer dient der Erfassung der Umgebung. Er erlaubt daher eine größere Messdistanz, jedoch mit reduzierter Frequenz von 1-5 Hz. Als Stream ist neben der Tiefeninformation auch ein Intensitätsbild (Active Brightness – AB) verfügbar. Durch die Verwendung von Infrarot (IR) sind die Daten nahezu unabhängig vom Tageslicht.
- Weiterhin eine Inertial Measurement Unit (IMU), eine Kombination aus Beschleunigungsmessung in x, y und z-Achse, Drehratenmessung durch ein Gyroskop und Magnetometer zur absoluten Bestimmung der Orientierung.
- Zuletzt eine RGB-Webcam, welche anders als die vorherigen Sensoren jedoch nicht der Positionsbestimmung dient, sondern in erster Linie die Aufnahme von Fotos und Videos ermöglicht. Sie ist auch der einzige Sensor, auf den direkt durch Apps zugegriffen werden kann.



Abb. 1:
Die vier Visible-Light Tracking Cameras (VLCs) der HL (gelb) und die Tiefenkamera (rot)
(MICROSOFT CORPORATION 2023)

Die Webcam wird standardmäßig auf einer Auflösung 1504×846 Pixeln betrieben; ein Wechsel des Profils ist nur im Programmcode möglich. Die vier VLCs liefern jeweils hochformatige Bilder im Format 480×640 . Daten der Tiefenkamera liegen im AHAT-Modus mit 512×512 Pixeln vor, bei Long-trow in 320×288 . Weiterhin besitzt die HL zwei weitere IR-Kameras für das Eyetracking. Für den Zugriff auf die Sensorrohdaten ist der Developer-Mode notwendig.

3 Konzept

Neben der Nutzung eines HMDs wäre zur Signalisierung von Absteckpunkten oder Messstellen auch der Einsatz von SAR denkbar, etwa durch einen Laserprojektor (z. B. FARO 2021). Eine solche Projektion kann jedoch nur einen eingeschränkten Bereich abdecken; es müssten daher mehrere Aufstellungen oder Projektoren genutzt werden. Während der Messdurchführung wären, neben einem unterbrechungsfreien Messstrahl des Lasertrackers, zusätzlich Verschattungen der Projektion durch den Anwender zu beachten. Vor diesem Hintergrund wird im folgenden Konzept der Ansatz über ein HMD (HL) verfolgt. Dieses sieht eine Transformation der HL in das Koordinatensystem des LT über ein paralleles Tracking des Reflektors durch die HL vor. Über diesen Zusammenhang ist dann die Bestimmung der Transformationsparameter möglich. Auf ein Einmessen von Tags oder Passpunkten in der aktuellen Messumgebung kann dadurch verzichtet werden. Die Transformation soll während der Anwendung kontinuierlich verbessert bzw. auf den aktuellen Arbeitsbereich optimiert werden. Ein solches Tracking stellt technisch zwar eine deutlich größere Herausforderung dar als das Einmessen von explizit in der Umgebung platzierten Markern, Letzteres würde jedoch die gewünschte Arbeitserleichterung durch AR nahezu ausschließen. Ziel der hier beschriebenen Vorgehensweisen ist daher die Einsatzfähigkeit der HL bei wechselnden Messumgebungen und -objekten ohne besondere Vorbereitungen.

3.1 Voraussetzungen

Für eine eindeutige Transformation müssen alle sechs Freiheitsgrade (6 Degrees of Freedom – DOF) bekannt sein. Daher ist das Messverfahren besonders in Verbindung mit einer T-Probe geeignet, da bei einem solchen Messtaster auch dessen Orientierung vom LT bestimmt wird. Das Einbeziehen einer kinematischen Messreihe (Trajektorie) in die Ausgleichung erlaubt jedoch auch den Einsatz anderer Reflektoren (z. B. Spherical Mounted Retroreflectors – SMRs), sofern eine ausreichend präzise Möglichkeit zum Tracking durch die HL besteht (vgl. Abschnitt 3.1.1). Auch über Zwangsbedingungen (Horizontierung) kann die Zahl der zu bestimmenden Freiheitsgrade reduziert werden. Die Realisierung eines solchen Messverfahrens ist von verschiedenen Voraussetzungen bzw. Bausteinen abhängig. In den folgenden Abschnitten werden die Problemstellungen nebst möglichen Lösungsansätzen vorgestellt.

3.1.1 Visuelles Tracking durch die HoloLens

Für das Tracking des Reflektors durch die HL kommen verschiedene Ansätze infrage. Am naheliegendsten und häufig realisiert ist das Tracking mittels QR-Codes. Ein solcher könnte beispielsweise auf geeigneten Flächen einer T-Probe angebracht werden. Abbildung 2a zeigt dies exemplarisch mit zwei sogenannten AprilTags (OLSON 2011). Als zweidimensionaler Barcode dienen QR-Codes in erster Linie zur visuellen Datenübertragung und sind daher auf eine hohe „Speicherkapazität“ ausgelegt. Bis zu 4296 Zeichen können in einem QR-Code codiert werden. CHU et al. (2007) beschreiben ein Verfahren zur Stabilisierung der Detektion der Tags, hinsichtlich spezifischer Verkippungen und verrauschem Bildmaterial. Dabei wird unter anderem die Orientierung des Tags relativ zur Kamera geschätzt, um den Tag entsprechend zu entzerren.

Grundsätzlich sind QR-Codes jedoch nicht für eine 6-DOF-Positionsbestimmung ausgelegt und aufgrund ihrer Komplexität anfällig für ungünstige Mess- und Umgebungsbedingungen