



Diplomarbeit

Einsatz von 3D-Laserscannern in der Fertigung von Schienenfahrzeugen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur (Dipl.-Ing. oder DI)
unter der Leitung von

A.o.Univ.Prof. Dr.techn. Manfred Grafinger

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung
FB Maschinenbauinformatik und Virtuelle Produktentwicklung

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von **Daniel Lindner, BSc**

Matr.Nr. 01126357

Donnersmarkstraße 27/6, 3542 Gföhl

Wien, im Juli 2020

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und, dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Juli 2020

Daniel Lindner

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich zuerst bei Herrn A.o.Univ.Prof. Dr. Manfred Grafinger bedanken, der mir die Anfertigung einer Diplomarbeit am Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung ermöglicht hat. Er hat meine Arbeit während der gesamten Entstehungszeit betreut und ist mir zu jeder Zeit beratend zur Seite gestanden, wenn fachliche Fragen oder Probleme bei der Umsetzung aufgetreten sind.

Besonderer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Helmut Poiss, der meine Diplomarbeit in der Firma betreut hat und mich mit seiner langjährigen Erfahrung tatkräftig unterstützen konnte.

Herr Dipl.-Ing. Dr. Joachim Pargfrieder hat mir die Anfertigung dieser Diplomarbeit in Kooperation mit der Siemens Mobility GmbH ermöglicht, wofür ich mich recht herzlich bedanke.

Bei Gerhard Gumprecht bedanke ich mich für seine großartige Unterstützung im Bereich der Messtechnik.

Auch möchte ich mich bei vielen meiner Kollegen und Freunde bedanken, die mich immer wieder motiviert oder mir wertvolle Tipps für die Umsetzung gegeben haben.

Besonderen Dank möchte ich auch meiner Freundin Anna aussprechen, die meine Diplomarbeit korrektur gelesen und mich auf Fehler hingewiesen hat. Außerdem konnte sie mir als Fachfremde aufzeigen, wo noch Erklärungsbedarf bestand.

Nicht zuletzt gebührt meinen Eltern großer Dank, ohne deren moralische sowie finanzielle Unterstützung ich diesen Bildungsweg gar nicht erst hätte einschlagen können.

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit Methoden der 3D-Oberflächenerfassung im Schienenfahrzeugbau sowie einer Möglichkeit, bei Messungen aufgenommenes Bildmaterial in weiterer Folge für virtuelle Schulungsunterlagen aufzubereiten. Hierbei steht die Frage im Vordergrund, ob es ein Messsystem gibt, das sowohl den hohen Genauigkeitsanforderungen der Wagenkastenvermessung genügt und gleichzeitig auch qualitativ hochwertige Bildaufnahmen wie beispielsweise hochauflösende 360°-Aufnahmen generiert. Solche Aufnahmen können in weiterer Folge die Basis für Schulungsunterlagen bilden, wie etwa ein *Virtual Maintenance Training*, das ein Kunde von Siemens Mobility zur Schulung seiner Mitarbeiter haben möchte.

Zu Beginn wird auf die Grundlagen der Lasertechnologie eingegangen und anschließend die gängigsten Verfahren der 3D-Oberflächenerfassung in der industriellen Messtechnik beschrieben. Weiters wird ein kurzer Überblick über die Grundlagen von Virtual- und Augmented Reality gegeben.

Im praktischen Teil werden die im Siemens Mobility Werk Wien angewandten Methoden der Wagenkastenvermessung betrachtet und untersucht, ob die dabei gewonnenen Aufnahmen eine Grundlage für Schulungsunterlagen bilden können. Anschließend wird ein Konzept vorgestellt, um mit einem 3D-Laserscanner montagebegleitende Aufnahmen aus dem Inneren von Wagenkästen zu machen, die in weiterer Folge zur Implementierung eines *Virtual Maintenance Trainings* für Schulungszwecke genutzt werden können.

Abstract

This Thesis deals with methods of 3D surface measurement in rail vehicle manufacturing as well as an option to subsequently use the photographic material which is taken at surface measurements for virtual training materials. The key question here is if there is a measuring system which fulfills the high accuracy requirements of vehicle body measuring and also records high quality images like high-resolution 360°-images. These recordings could form the base of training materials like a *Virtual Maintenance Training* which a customer of Siemens Mobility wants to have for instruction of his employees.

At the beginning the basics of laser technology and common methods of 3D surface measurement are explained. Further on a short summary of the basics of Virtual- and Augmented Reality is given.

In the practical part of the thesis the methods of measuring vehicle bodies used in the Vienna plant of Siemens Mobility are analysed if the recordings that are taken at the measurements could build the base of virtual training materials. Thereafter a concept to take recordings of the interior of vehicle bodies during the assembly process is introduced. These recordings can subsequently be used to implement a *Virtual Maintenance Training* for training purposes.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Vorstellung Siemens Mobility	10
1.2	Problemdefinition	12
2	Grundlagen zum 3D-Scanning	13
2.1	Grundlagen der Lasertechnologie	13
2.1.1.1	Funktionsprinzip von Lasersystemen.....	13
2.2	Verfahren zur optischen 3D-Oberflächenerfassung	15
2.2.1	Lichtschnittverfahren.....	15
2.2.1.1	Grundlagen.....	15
2.2.1.2	Beschreibung des Lichtschnittverfahrens.....	16
2.2.1.3	Messeinflüsse beim Lichtschnittverfahren.....	19
2.2.1.4	Nachbearbeitung der Messdaten.....	20
2.2.2	Streifenprojektion	21
2.2.2.1	Grundlagen.....	21
2.2.2.2	Beschreibung des Streifenprojektionsverfahrens	23
2.2.2.3	Vergleich der beschriebenen Codierungsverfahren	26
2.2.3	Photogrammetrie	26
2.2.3.1	Grundlagen.....	26
2.2.3.2	Beschreibung des Photogrammetrieverfahrens	27
2.2.3.3	Anwendungen der Photogrammetrie	30
2.2.4	Lasertracker.....	30
2.2.4.1	Grundlagen.....	30
2.2.4.2	Beschreibung des Messverfahrens.....	31
2.2.4.3	Zusatzkomponenten für Lasertracker	32
2.2.5	Terrestrisches Laserscanning.....	35
2.2.5.1	Grundlagen.....	35
2.2.5.2	Beschreibung des Messverfahrens.....	37
2.2.5.3	Einflussfaktoren auf die Messung	41
3	Grundlagen Virtual- und Augmented Reality	43
3.1	Historische Entwicklung und Begriffsabgrenzung	43
3.2	Virtual Reality	45

3.2.1	Technologieorientierte Betrachtung	45
3.3	Augmented Reality	48
4	Wagenkastenvermessung	51
4.1	Aktuell angewandte Messmethoden.....	51
4.1.1	Lasertracker.....	51
4.1.1.1	Verwendetes Messgerät	51
4.1.1.2	Messaufbau und Messablauf	55
4.1.1.3	Eignung der Messdaten zur Erstellung von Schulungsunterlagen	57
4.1.2	Photogrammetrie	57
4.1.2.1	Verwendetes Messgerät	57
4.1.2.2	Messaufbau und Messablauf	58
4.1.2.3	Eignung der Messdaten zur Erstellung von Schulungsunterlagen	59
5	Virtual Maintenance Training.....	61
5.1	Problemstellung und Ausgangssituation	61
5.2	Auswahl geeigneter Technologien	62
5.2.1	3D-Laserscanner	62
5.2.1.1	Leica RTC360.....	62
5.2.1.2	Leica BLK360	63
5.2.1.3	Leica BLK2GO.....	64
5.2.2	Testaufnahmen und visuelle Umsetzung.....	66
6	Zusammenfassung und Ausblick	70
7	Abbildungsverzeichnis.....	71
8	Tabellenverzeichnis	74
9	Abkürzungsverzeichnis	75
10	Literaturverzeichnis	76

1 Einleitung

Immer höhere Anforderungen an Qualitätsstandards im Schienenfahrzeugbau, einerseits durch Normen, andererseits aber auch von Kundenseite, stellen produzierende Betriebe vor sehr große Herausforderungen. Es gilt, konstant hohe Qualität zu liefern und dabei auch die Kosten nicht außer Acht zu lassen. Zur Erreichung der Qualitätsziele und Sicherstellung der Kundenzufriedenheit leistet die Messtechnik einen sehr wesentlichen Beitrag. Der Bereich der industriellen Messtechnik hat sich in den vergangenen Jahren enorm entwickelt, hauptsächlich aufgrund der rasanten Weiterentwicklung von Verfahren zur optischen 3D-Oberflächenerfassung. Auch im Schienenfahrzeugbau haben sich zur Überprüfung der Maßgenauigkeit des Rohbaus von Wagenkästen berührungslose optische Messverfahren etabliert, darunter etwa die Vermessung mittels Lasertracker oder die photogrammetrische Vermessung.

Auch an die Wartung von Schienenfahrzeugen, die aufgrund des komplexen Aufbaus sehr zeit- und kostenintensiv ist, sind sehr hohe Anforderungen gestellt. Bei der Fertigung und Montage von Schienenfahrzeugen steht ein enormes Know-how bereit, welches bildlich dokumentiert und aufbereitet werden kann und dadurch für Service- und Wartungszwecke genutzt werden kann.

1.1 Vorstellung Siemens Mobility

Die Siemens Mobility GmbH steht im Eigentum der Siemens AG und ist seit über 160 Jahren führender Anbieter von Transportlösungen. Das Portfolio von Siemens Mobility umfasst alle Geschäftsbereiche von Siemens, die auf den Transport von Menschen und Gütern spezialisiert sind. Das Leistungsportfolio von Siemens Mobility deckt dabei folgende Bereiche ab: [34], [35]

- Das gesamte Spektrum an Schienenfahrzeugen: Lokomotiven, Regional-, Intercity- und Hochgeschwindigkeitstriebzüge, U-Bahnen, Straßen- und Stadtbahnen, Reisezugwagen sowie Fahrzeuge, die für den fahrerlosen Betrieb ausgelegt sind
- Leit- und Signaltechnik für den schienengebundenen Bahn- und Straßenverkehr
- Service- und Instandhaltungsleistungen sowohl für Fahrzeuge als auch für Infrastruktur
- Verkehrssteuerungs- und Informationssysteme, Parkraummanagement, elektronische Bezahl- und Mautsysteme für Stadt- und Fernverkehr
- Beratung, Planung, Finanzierung, Errichtung und Betrieb schlüsselfertiger Mobilitätssysteme
- Integrierte Mobilitätslösungen zur Vernetzung unterschiedlicher Verkehrssysteme

Die gesamte Entwicklung, Herstellung und der Vertrieb von Schienenfahrzeugen geschieht durch die Business Unit Rolling Stock (RS). Das Werk Wien deckt dabei die Entwicklung und Produktion von U-Bahnen, Straßenbahnen, Reisezugwagen sowie fahrerlosen Transportsystemen, sogenannten Automated People Mover, ab.

In Abbildung 1 ist das neue U-Bahn Modell für Wien (X-Wagen) zu sehen. Die Auslieferung der bestellten 34 sechsteiligen Züge beginnt im ersten Halbjahr 2020 mit einem Vorserienzug, bis 2030 sollen alle Fahrzeuge ausgeliefert sein.



Abbildung 1: U-Bahn Wien "X-Wagen" [36]

Die Hauptkunden von Siemens Mobility sind, wie das Produktportfolio schon vermuten lässt, öffentliche und staatliche Transport- und Logistikunternehmen. Demzufolge sind die von Mobility bedienten Märkte überwiegend von öffentlichen Ausgaben abhängig.

Die weltweite Bevölkerung, vor allem in urbanen Gebieten, steigt weiterhin stark an, was Städte und Länder vor große Herausforderungen stellt. Gefragt sind Lösungen, die die Mobilität im Alltag schneller, flexibler, zuverlässiger und nicht zuletzt auch kostengünstiger machen. Zudem ist es notwendig, den Flächenbedarf und die vom Verkehr verursachten Lärm- und CO_2 -Emissionen zu verringern.

Die Strategie der Forschung und Entwicklung von Siemens Mobility konzentriert sich darauf, die Verfügbarkeit von Zügen und zugehöriger Infrastruktur zu maximieren bei gleichzeitiger Beachtung der Kapitalrentabilität der Kunden und Verbesserung des Fahrkomforts. Schwerpunkte der Entwicklung sind einerseits effiziente Fahrzeugplattformen, die es ermöglichen, die Lebenszykluskosten zu optimieren sowie gleichzeitig den Kunden größtmögliche Flexibilität bieten. Auch an alternativen, umweltfreundlichen Energieversorgungen für Züge und LKWs forscht Mobility erfolgreich. Hier wären etwa Batterie- und Brennstoffzellensysteme für Züge sowie e-Highways für Lastwagen zu nennen. Ein weiterer Fokus liegt beispielsweise auf der Entwicklung von digitalen Technologien und Lösungen zur weiteren Automatisierung des Fahrbetriebs von Schienenfahrzeugen. [35]

1.2 Problemdefinition

Es besteht der Wunsch eines Kunden der Siemens Mobility GmbH nach einem Konzept für ein *Virtual Maintenance Training*, also einer virtuellen Schulungsunterlage für Schienenfahrzeuge, die eine Hilfestellung zur Schulung des Wartungspersonals darstellen soll. Es sollen die unterschiedlichen Abschnitte in der Montage der Fahrzeuge dokumentiert und auf einer digitalen Plattform bereitgestellt werden. Konkrete Anforderungen oder Einschränkungen im Hinblick auf die verwendete Technologie wurden dabei nicht gestellt. Hieraus entstand seitens Siemens Mobility die Idee, die im Werk Wien bereits eingesetzten optischen Messtechnologien zur Wagenkastenvermessung auf ihre Tauglichkeit zur Erstellung solcher virtueller Wartungsunterlagen zu untersuchen. Dabei liegt der Fokus auf einer ganzheitlichen Lösung zur Erstellung virtueller Schulungsunterlagen, nicht speziell auf einen Kunden zugeschnitten, sondern auf alle aktuellen und künftigen Projekte anwendbar. Ein geeignetes System sollte die Erstellung einer Punktwolke sowie von 360°-Aufnahmen ermöglichen, um die Montageabschnitte vom Rohbau bis zum fertigen Innenausbau eines Fahrzeuges sauber dokumentieren und aufbereiten zu können. Falls die bereits im Werk befindlichen Messtechnologien dies nicht ermöglichen, sollen andere Möglichkeiten gefunden werden, beispielsweise ein 3D-Laserscanner, der wiederum im Idealfall auch zur Vermessung der Rohbau-Wagenkästen eingesetzt werden kann.

2 Grundlagen zum 3D-Scanning

2.1 Grundlagen der Lasertechnologie

Laser ist eine aus dem Englischen übernommene Kurzform für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, was auf Deutsch übersetzt heißt: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Im Vergleich zu herkömmlichem Licht ist Laserlicht sehr stark gebündelt, hat also kaum Streuung. Außerdem ist es monochromatisch, also einfarbig im Gegensatz zu herkömmlichem Licht beispielsweise einer Glühlampe, das aus mehreren Farbspektren besteht, siehe Abbildung 2. Die hohe Intensität der Strahlung, also eine hohe Anzahl an Lichtteilchen pro Fläche, ist beim Laserlicht ebenfalls eine Besonderheit. [1]

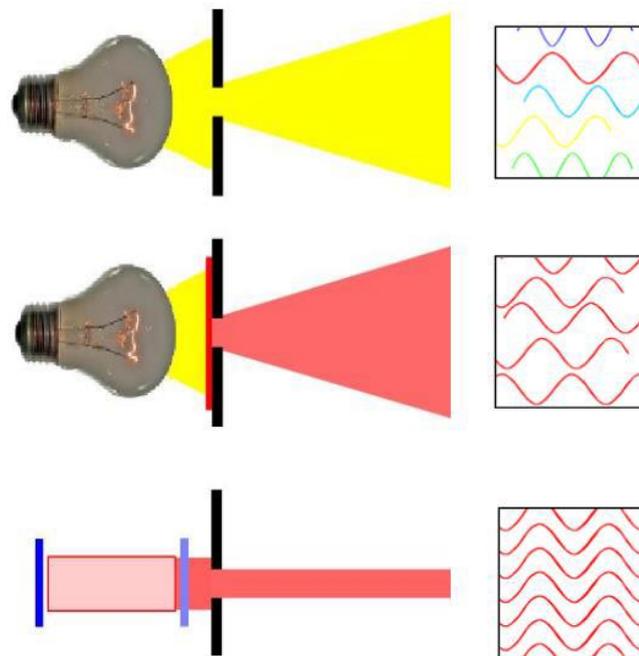


Abbildung 2: Gegenüberstellung weißes (oben) / gefiltertes (mitte) Glühlampenlicht und Laserlicht (unten) [2]

2.1.1.1 Funktionsprinzip von Lasersystemen

Für die praktische Anwendung der Lasertechnologie, wie zum Beispiel in Laserscannern, unterscheidet man drei Subsysteme: [1]

- Laserverstärker
- Laserresonator (Mehrspiegelsystem)
- Pumpquelle

Um die Strahlung in einem Laser zu erzeugen, benötigt man ein aktives Medium (den Laserverstärker), einen Resonator, der meist als Spiegelsystem ausgeführt ist sowie eine Energiezufuhr. Der Laserverstärker hat die Aufgabe, schwache externe Signale durch induzierte Emission und optische Rückkopplung durch das Spiegelsystem zu verstärken. Das Spiegelsystem, also der Resonator, erzeugt durch interne Verstärkung der spontanen Emission eigene Signale. Als Pumpquelle wird der Energielieferant bezeichnet. Das aktive Medium (auch als Lasermaterial oder Laserverstärker bezeichnet) kann in unterschiedlichsten Materialien ausgeführt sein. Je nach Arbeitsmedium wird zwischen Halbleiter-, Flüssigkeits-, Gas-, oder Festkörperlaser unterschieden. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Betriebsart des Lasers, nämlich Dauerbetrieb oder Pulsbetrieb. Beim Pulsbetrieb wird das Material pulsierend angeregt, wodurch auch der Laserstrahl pulsiert. Ein Beispiel hierfür ist die Anregung des aktiven Materials mittels Blitzlichtlampe. Beim Dauerbetrieb hingegen wird, wie der Name schon vermuten lässt, der Laserverstärker dauerhaft angeregt, z.B. durch eine Leuchtstoffröhre. [1]

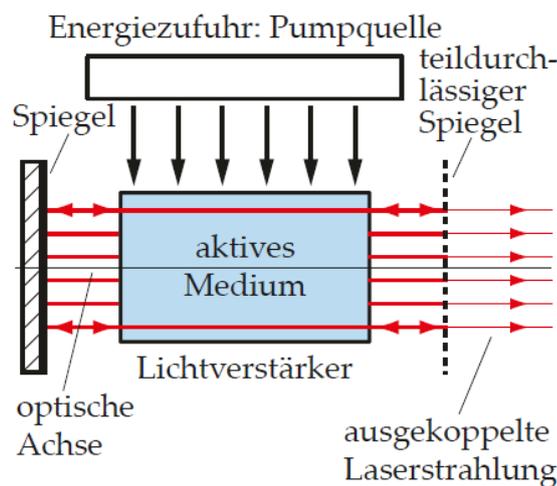


Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Lasers [3]

Der Prozess der stimulierten Emission, welcher dem Laser zugrunde liegt, läuft folgendermaßen ab: Ein Photon einer bestimmten Frequenz triggert ein Atom, das sich auf einem bestimmten Energieniveau befindet dazu, ein Photon gleicher Frequenz, gleicher Richtung und gleicher Phasenlage zu emittieren. Das emittierte Photon ist also gleich dem auslösenden Photon. Wird Licht einer bestimmten Frequenz durch ein Material geschickt, in dem sich ausreichend viele Atome auf einem Energieniveau E_2 oberhalb des Niveaus E_1 befinden, so ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass stimulierte Emissionen stattfinden. Dadurch kann das einfallende Licht kohärent verstärkt werden, was einem optischen Verstärker für Licht entspricht. Wenn man das Ausgangssignal wieder dem Verstärker zuführt, also den Verstärker zurückkoppelt, und die Verstärkung die auftretenden Verluste überwiegt, beginnt das System zu oszillieren. Zur Rückkopplung dienen spezielle Spiegel,

die das verstärkte Licht in das Lasermaterial zurück reflektieren. Ein Teil des verstärkten Lichts wird durch den auf einer Seite teildurchlässigen Spiegel in die Umgebung ausgekoppelt. [3]

2.2 Verfahren zur optischen 3D-Oberflächenerfassung

Optische 3D-Messsysteme erlauben eine schnelle und berührungslose Erfassung von Geometrie und Kontur des zu messenden Objektes. Es ist mit geeigneten Verfahren möglich, die Kontur dreidimensionaler Messobjekte zu digitalisieren und diese als CAD-Modell bereitzustellen. Daraus ergibt sich eine Reihe von Möglichkeiten wie beispielsweise Qualitätskontrolle in Form eines Toleranzabgleichs des gescannten Modells mit dem CAD-Modell aus der Konstruktion. Auch das sogenannte reverse Engineering, bei dem aus einem gescannten Objekt ein Plan erzeugt wird, wird durch optische 3D-Oberflächenerfassung ermöglicht. [1]

Es gibt mittlerweile eine Vielzahl an Methoden, um dreidimensionale Oberflächen zu erfassen. Im Folgenden werden einige davon näher erläutert.

2.2.1 Lichtschnittverfahren

2.2.1.1 Grundlagen

Eine sehr verbreitete Möglichkeit zur 3D-Oberflächenerfassung stellt das Lichtschnittverfahren dar, welches bereits seit Jahren eingesetzt wird. Das Lichtschnittverfahren ist eine einfache sowie robuste Möglichkeit, räumliche Objekteigenschaften zu erfassen. Dabei handelt es sich um ein sogenanntes aktives Verfahren, d.h. dass entweder die Laserlinie oder das zu messende Objekt relativ zueinander bewegt werden müssen. [1], [4]

Das Prinzip des Lichtschnittverfahrens beruht darauf, eine möglichst dünne Linie auf das zu messende Objekt zu projizieren, wodurch diese an der Oberfläche verformt wird. Die Reflexion wird dabei von einer Kamera erfasst. Bei diesem Verfahren werden hauptsächlich Linienlaser verwendet, die über eine fokussierende Optik verfügen. [1]

Beim Lichtschnittverfahren werden Messgenauigkeiten von etwa 0,03 mm sowie maximale Höhenauflösungen bezogen auf die Abtastlänge von 1:5000 erreicht, wobei das Auflösungsvermögen stark von der Oberflächenbeschaffenheit des Messobjekts und den verwendeten Komponenten abhängt.



Abbildung 4: 3D-Oberflächenmessung mittels Lichtschnittverfahren [5]

Angewandt wird das Lichtschnittverfahren typischerweise zur 3D-Oberflächenerfassung sowohl kleiner als auch größerer Messobjekte. Meistens sind Lichtschnittsensoren als handgeführte Messsysteme ausgeführt und erlauben eine effiziente Geometrierfassung unterschiedlichster Geometrien. Es gibt jedoch für größere zu messende Objekte, wie z.B. Autokarosserien, auch stationäre Systeme die individuell auf die jeweilige Messaufgabe zugeschnitten sind. [1]

Abbildung 4 zeigt eine 3D-Oberflächenmessung in der Praxis mit dem HandySCAN 3D der Firma Creafom.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile des Lichtschnittverfahrens [1]

Vorteile	Nachteile
Absolute Geometrievermessung	Begrenzte Genauigkeit
Für große Messobjekte geeignet	Nicht für alle Oberflächen geeignet
Vermessung automatisierbar	Abschattungen vorhanden
Einfacher Messaufbau	Eventuell gefährliche Laserstrahlung
Für bewegte Objekte geeignet	
Kompakt und leicht transportabel	

2.2.1.2 Beschreibung des Lichtschnittverfahrens

Beim Lichtschnittverfahren wird ein Laserstrahl unter einem bekannten Winkel auf das zu messende Objekt projiziert, wobei diese Linie je nach Oberflächenbeschaffenheit mehr oder weniger gekrümmt wird. Die Profillinie wird dabei von einer oder mehreren Kameras unter

einem bekannten Triangulationswinkel beobachtet. Somit kann das genaue Höhenprofil eines Messobjekts nach dem Triangulationsprinzip erfasst werden. [1]

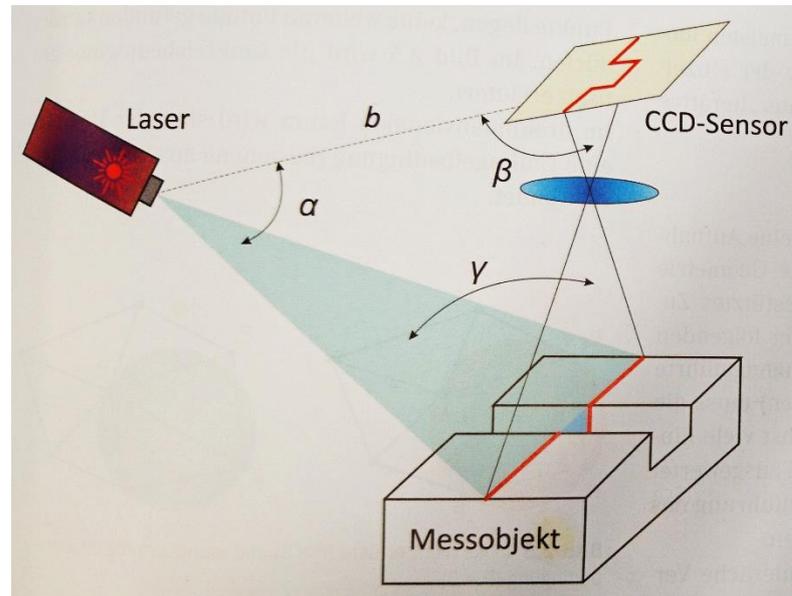


Abbildung 5: Prinzip des Lichtschnittverfahrens [1]

Das Triangulationsverfahren beruht auf der Abstandsmessung durch Winkelberechnung. Es wird dabei von einem Laser ein Punkt auf das Messobjekt projiziert, wobei das dort reflektierte Licht in Abhängigkeit von der Entfernung unter einem bestimmten Winkel auf den Sensor der Kamera trifft. Somit kann aus der Position des Lichtpunktes auf dem Kamerachip und der Distanz vom Sender zum Kamerachip der Abstand zum Messobjekt errechnet werden. Beim Lichtschnittverfahren wird anstatt eines Punktes eine Laserlinie genutzt, wodurch das Lichtschnittverfahren eine Erweiterung des Triangulationsverfahrens ist. Das Schnittelement der Lichtebe mit dem Messobjekt wird von der Kamera als Linie wahrgenommen. Dabei kann für jeden Punkt der Linie eine Triangulation durchgeführt und somit die genaue räumliche Position eines jeden Punktes berechnet werden. [6] [7]

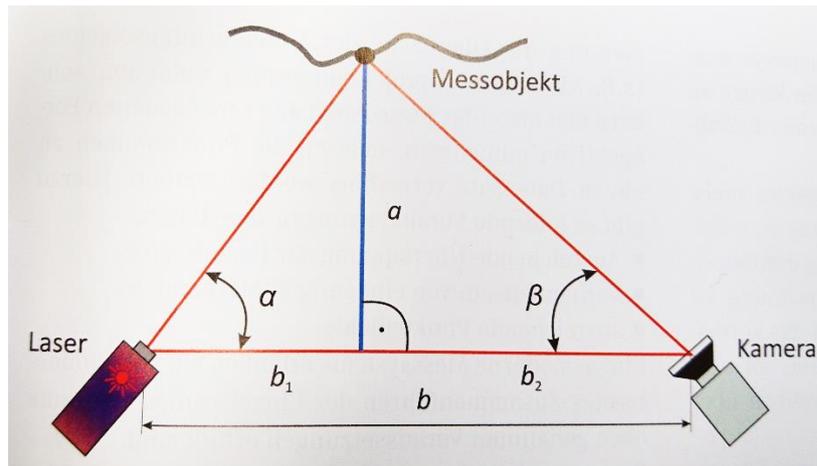


Abbildung 6: Prinzip der Lasertriangulation [1]

Aus Abbildung 6 ist ersichtlich, dass ein Punkt, der unter dem Winkel α auf das Messobjekt projiziert wird, nach Reflexion auf dem Sensor unter dem Winkel β erfasst wird. Daraus lässt sich der Abstand des Messgeräts vom Messobjekt bestimmen.

Für eine flächenhafte Oberflächenmessung wird der Laserstrahl über das zu messende Objekt geführt, wobei die Kamera möglichst viele Bilder aufnimmt, um eine hohe Genauigkeit zu erzielen. Das Ergebnis einer solchen Messung ist eine sogenannte Punktwolke, also eine Menge an Raumpunkten, zu denen jeweils x-, y-, und z-Koordinaten bekannt sind. [1]

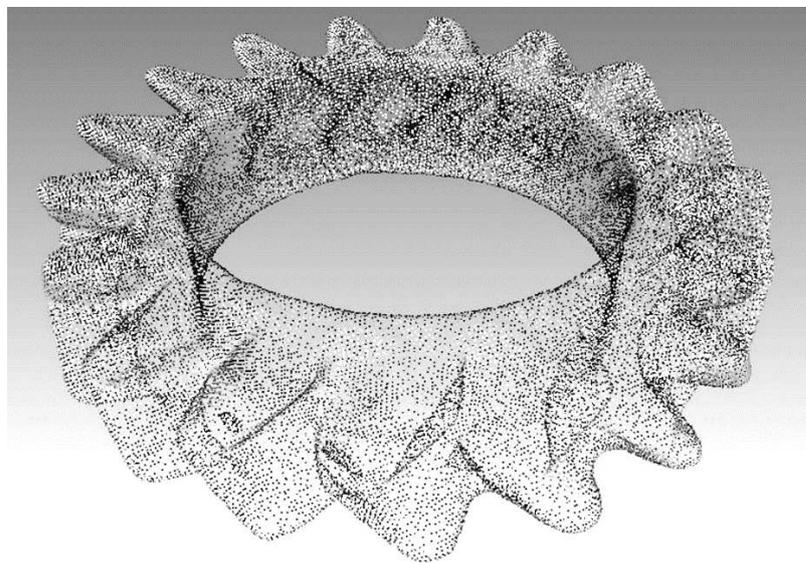


Abbildung 7: Beispiel einer Punktwolke [8]

Es ist meist nicht möglich, die komplette Oberfläche des zu vermessenden Bauteils durch eine einzige Scanbewegung zu erfassen. Aus diesem Grund müssen die einzelnen Aufnahmen verknüpft werden, wozu es verschiedene mathematische Verfahren gibt, die meist entweder auf Korrelation oder auf merkmalsbasierten Methoden basieren. Um eine Verknüpfung zu realisieren ist es notwendig, dass die zu verbindenden Punktwolken

überlappende Areale haben. Bei den merkmalsbasierten Methoden werden die geometrischen Eigenschaften des Messobjekts ausgenutzt, z.B. Fläche, Form, Durchmesser der zu vermessenden Geometrie. Nachdem die gesamte zusammenhängende Punktwolke berechnet wurde folgt in einem nächsten Schritt die Vernetzung der aufgenommenen Messpunkte zu einem Polygonnetz. In Abbildung 8 ist ein Beispiel einer solchen vernetzten Punktwolke zu sehen. [1]

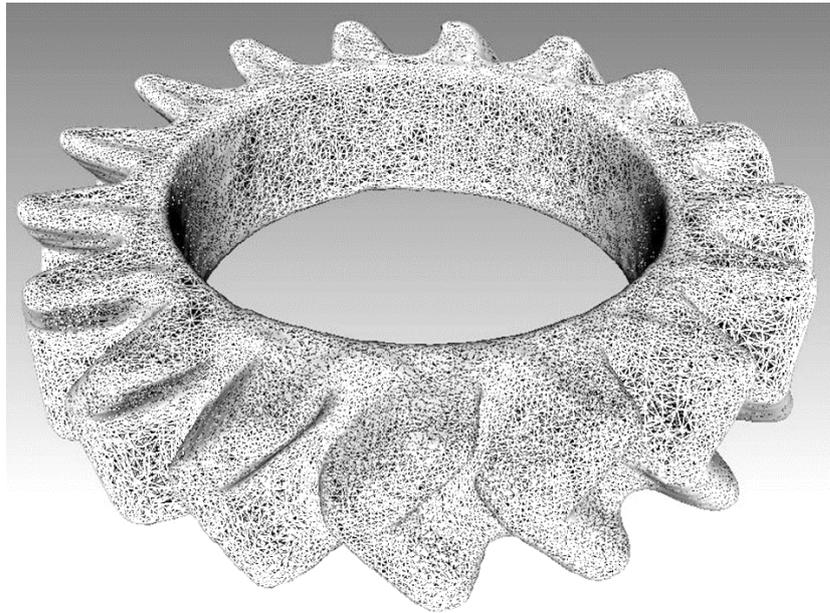


Abbildung 8: Beispiel einer vernetzten Punktwolke [9]

2.2.1.3 Messeinflüsse beim Lichtschnittverfahren

Die Oberflächenbeschaffenheit des Messobjektes hat sehr großen Einfluss sowohl auf die Durchführbarkeit der Oberflächenvermessung als auch der erreichbaren Genauigkeit. Wenn die Beschaffenheit der Oberfläche auch ohne zusätzliche Behandlung genaue Messergebnisse ermöglicht, spricht man in diesem Zusammenhang von kooperativen Oberflächen. Gut geeignet für das Lichtschnittverfahren sind matte Oberflächen, wogegen spiegelnde (z.B. blankes Metall) oder teiltransparente Flächen (z.B. Glas) nur schwer zu erfassen sind. Durch glänzende Oberflächen entstehen am Detektor inhomogene Intensitätsverteilungen, was moderne Messsysteme aber teilweise kompensieren können, sodass Messobjekte mit spiegelnder Oberfläche dennoch erfasst werden können, wenn auch mit reduzierter Genauigkeit. Transparente Bereiche führen dazu, dass ein großer Teil des Lichts für die eigentliche Messung nicht zur Verfügung steht, weil es in die Oberfläche des Bauteils eindringt. Auch sehr dunkle oder schwarze Flächen können das Messergebnis negativ beeinflussen, da nur sehr wenig Licht reflektiert wird. Die besten Ergebnisse liefern

matte Oberflächen, diese streuen das einfallende Licht gleichmäßig in alle Raumrichtungen.
[1]

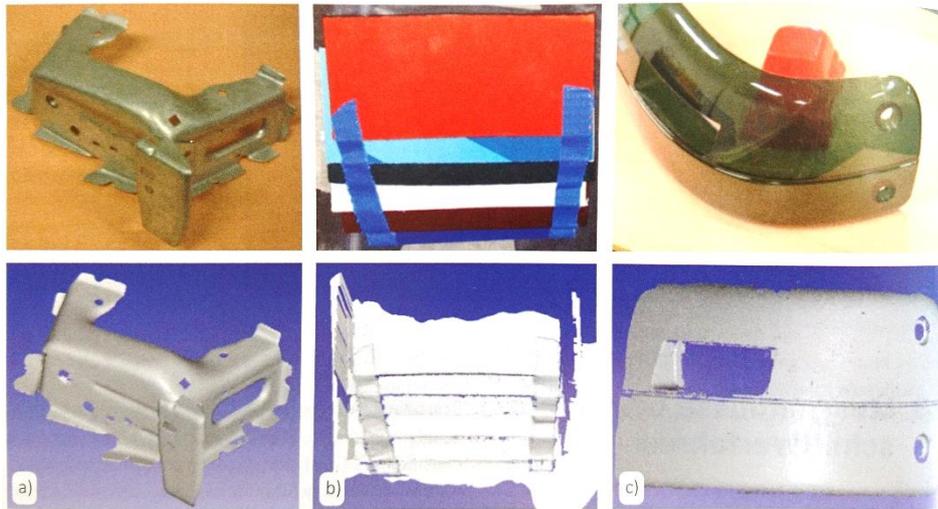


Abbildung 9: Vermessung unterschiedlicher Oberflächen: a) dunkle Metalloberfläche, b) verschiedene Farben, c) halbdurchsichtige Oberfläche [1]

2.2.1.4 Nachbearbeitung der Messdaten

Die aufgenommenen Messdaten in Form einer Punktwolke müssen nach der Messung meist nachbearbeitet und Änderungen am Polygonnetz vorgenommen werden. Grundsätzlich werden vier Arten der Nachbearbeitung unterschieden: [1]

- **Schließen von Lücken im Netz**

Abschattungen oder störende Reflexionen verursachen oft Bereiche, die von der Kamera nicht erfasst werden können. Diese Lücken in der Oberflächenstruktur können von modernen Messprogrammen mithilfe von Splinefunktionen unter Berücksichtigung der Krümmung der umliegenden Geometrie gefüllt werden, sofern die Lücken klein genug sind und sich in homogener Geometrieumgebung befinden.

- **Glätten der Punktwolke**

Zur Beseitigung von Ausreißern kann eine Glättung des Polygonnetzes vorgenommen werden, wobei eine zu starke Glättung wiederum zu einer Geometriefälschung führen kann. Moderne Programme ermöglichen eine lokale Glättung des Polygonnetzes, wodurch eine negative Beeinflussung der gesamten Geometrie vermieden wird.

- **Entfernen störender Fragmente**

Fehler bei der Vermessung oder auch im Berechnen der Punktwolke können zu Fehlstellen im Polygonnetz führen, z.B. doppelte Netze oder falsch angeordnete Dreiecke. Solche Fehlstellen können durch die Messprogramme detektiert und beseitigt werden.

- **Verringerung der Dichte der Punktemenge**

Die Punktwolke, die nach der Vermessung einer komplexen Geometrie als Messergebnis zur Verfügung steht, besteht oft aus vielen Millionen einzelnen Punkten. Nach der Vernetzung zu einem Polygonnetz ergeben sich daraus sehr große Datenmengen, die wiederum schlecht für die nachträgliche Bearbeitung geeignet sind. Großflächige, ebene Bereiche können allerdings durch eine wesentlich geringere Punktemenge beschrieben werden, ohne an Genauigkeit zu verlieren, wie in Abbildung 10 zu erkennen ist.

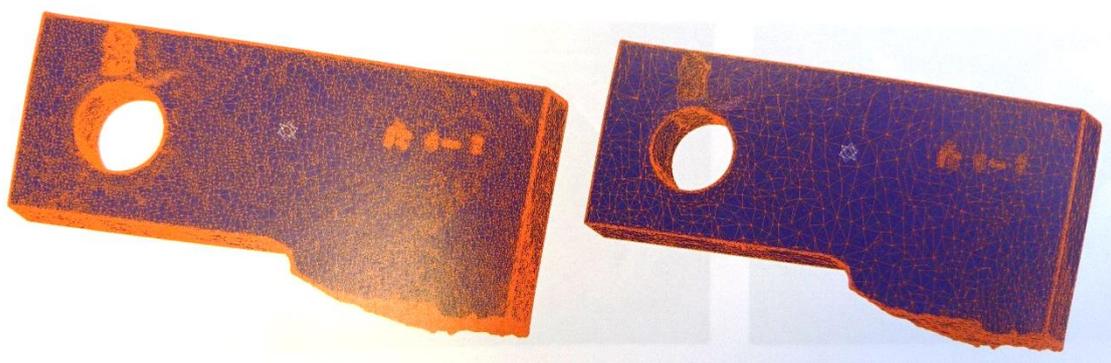


Abbildung 10: Polygonnetz vor (links) und nach (rechts) einer Reduzierung der Punktemenge [1]

2.2.2 Streifenprojektion

2.2.2.1 Grundlagen

Das Verfahren der Streifenprojektion wird bereits seit Anfang der 1990er Jahre für industrielle Anwendungen eingesetzt, wobei je nach Messaufgabe unterschiedlichste Ausführungen von Messsystemen erhältlich sind.

Im Allgemeinen wird unter dem Prinzip der Streifenprojektion eine Projektion von codierten Streifenmustern auf das Messobjekt bei gleichzeitiger Beobachtung und Aufzeichnung des von der Oberfläche verzehrten Streifenmusters mit einem Detektor verstanden. Es werden also durch projizierte Streifen mehrere Lichtschnitte über das zu vermessende Objekt gelegt, die mittels einer Kamera aus einem anderen Blickwinkel aufgenommen werden (siehe Abbildung 11). Das Funktionsprinzip ähnelt sehr stark dem Lichtschnittverfahren, wobei zur schnelleren und genaueren Vermessung der Oberfläche gleichzeitig mehrere Streifenmuster

auf die Oberfläche projiziert werden, die zur eindeutigen Unterscheidung der Streifen außerdem codiert sind. [1], [7]

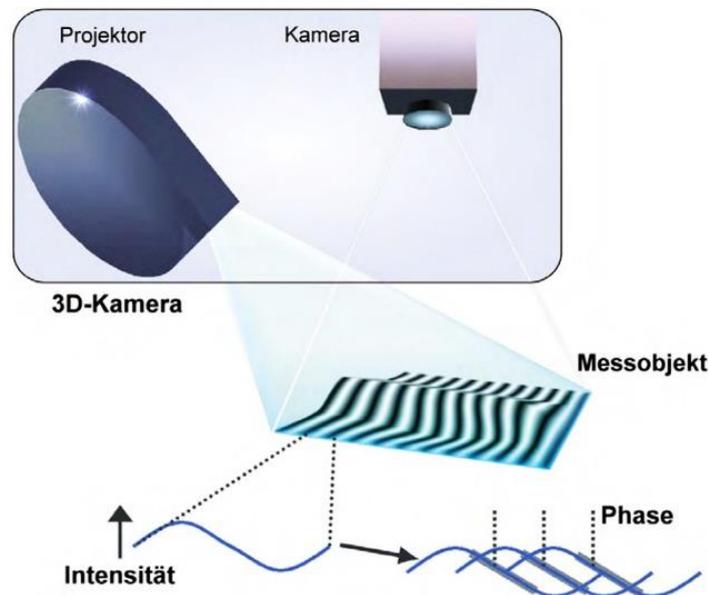


Abbildung 11: Prinzip der Phasenmessenden Streifenprojektion [10]

Durch Verwendung verschiedener Objektive kann das Messvolumen auf die jeweilige Messaufgabe angepasst werden, wobei Messvolumen bis etwa 4 m³ möglich sind. Maximal erreichbare Messgenauigkeiten beim Streifenprojektionsverfahren liegen bei etwa 0,003 mm. Bei sehr großen Prüfkörpern besteht, wie auch beim Lichtschnittverfahren, das Problem, dass aufgrund der hohen Anzahl an Messpunkten große Datenmengen entstehen, was wiederum steigende Anforderungen an den Messrechner sowie das Messprogramm zur Folge hat. [1]

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Streifenprojektion [1]

Vorteile	Nachteile
Absolute Geometrievermessung	Bedingt für bewegliche Teile
Für große Messobjekte geeignet	Nicht für alle Oberflächen geeignet
Vermessung automatisierbar	Abschattungen vorhanden
Einfacher Messaufbau	
Kompakt (leicht transportabel)	
Hohe Genauigkeit	
Texturerfassung möglich	

2.2.2.2 Beschreibung des Streifenprojektionsverfahrens

Die dreidimensionale Oberflächenerfassung beim Streifenprojektionsverfahren beruht auf dem Triangulationsprinzip, welches bereits im Kapitel 2.2.1 beschrieben wurde. Wird das Triangulationsprinzip jedoch flächenhaft auf komplexe Oberflächen angewandt, besteht das Problem einer mehrdeutigen Zuordnung zwischen den Punkten des Beleuchtungsmusters und den beobachteten Bildpunkten. Um einen Punkt eindeutig identifizieren zu können, werden codierte Beleuchtungssequenzen verwendet, bei denen jedem Beleuchtungsstrahl ein eindeutiges Codewort zugewiesen wird. [3]

Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten der Codierung von Beleuchtungsstrahlen kurz beschrieben: [1], [3], [11]

- **Zeitlich codierte Verfahren**

Ein sehr gängiges Codierungsprinzip bei der 3D-Vermessung mittels Streifenprojektion ist der Gray-Code, der so definiert ist, dass sich benachbarte Codewörter in genau einem Bit unterscheiden. Die Tatsache, dass die Bit-Änderung zwischen benachbarten Codewörtern minimal ist, hat den Vorteil, dass ein eventueller Fehler geringer ausfällt als bei anderen Binärcodierungen. Abbildung 13 veranschaulicht die Codierung und anschließende Decodierung einer Pixelkoordinate aus aufeinanderfolgenden Gray-Code-Bildern.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Bit 1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Bit 2	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
Bit 3	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
Bit 4	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1

Abbildung 12: Gray-Code der Zahlen 0 bis 15 [11]

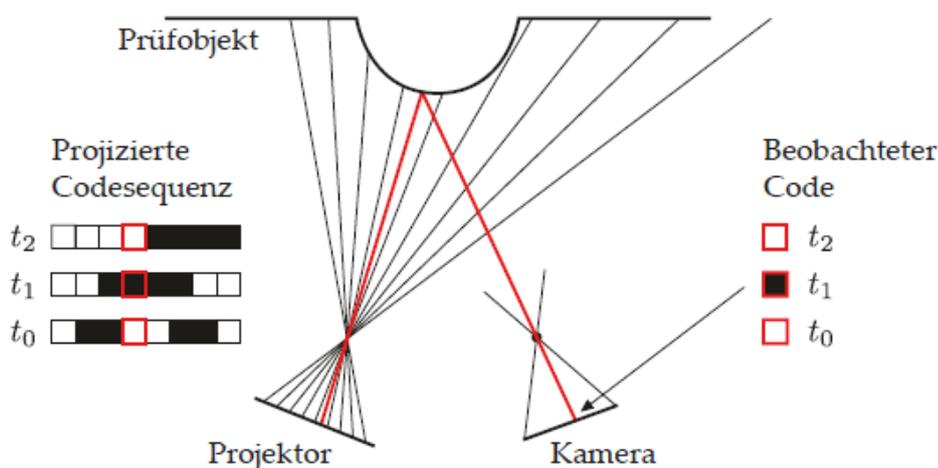


Abbildung 13: Decodierung einer Pixelkoordinate aus aufeinanderfolgenden Gray-Code-Bildern [3]

- **Phasen-codierte Verfahren**

Ebenfalls eine effiziente Möglichkeit zur Codierung von projizierten Beleuchtungsmustern stellen phasencodierte Verfahren dar. Die Informationen über die Oberflächenform des Messobjektes werden bei phasenmessenden Verfahren direkt aus den abgebildeten Intensitätswerten gewonnen. Das sinusförmige Streifenmuster wird dabei als sinusförmiger Graustufenverlauf in die Messszene projiziert. Im Vergleich zu zeitlich codierten Verfahren (z.B. Gray-Code) liefern Phasencodierte Verfahren höhere Genauigkeiten und Auflösungen. In Abbildung 11 ist das Prinzip der phasenmessenden Streifenprojektion zu sehen.

- **Frequenzcodierte Verfahren**

Eine weitere Möglichkeit zur Codierung von Beleuchtungsmustern ist die Frequenzcodierung. Dabei erfolgt die Codierung der Lichtstrahlen durch die Farbe der einzelnen Streifen, wobei jedem Streifen eine eigene Farbe zugewiesen wird. Die Anwendung dieses Verfahrens bringt jedoch einige Einschränkungen mit sich. So dürfen sich beispielsweise die Lichtverhältnisse während der Messung nicht ändern, weshalb die Muster von einer Blitzlichtquelle projiziert werden, um Umgebungseinflüsse zu minimieren und den Kontrast zu erhöhen. Ist eine hohe Genauigkeit gefordert, sind dichte Streifenmuster notwendig, was aber wiederum die Unterscheidbarkeit der einzelnen Streifen beeinträchtigt. Wesentlicher Vorteil von frequenzcodierten Verfahren ist die Möglichkeit der Verwendung eines einzelnen Musters, was eine sehr kurze benötigte Zeitdauer für die Projektion und Aufnahme mit sich bringt.

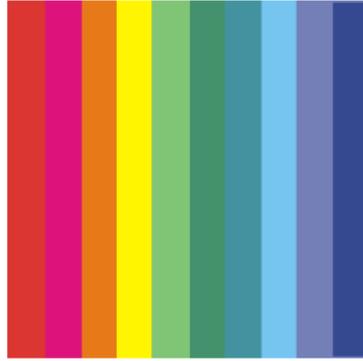


Abbildung 14: Frequenzcodiertes Streifenmuster [11]

- **Örtlich codierte Verfahren**

Bei der örtlichen Codierung kann aufgrund der codierten Umgebung eindeutig die Herkunft eines Bildpunkts beschrieben werden. Hierbei gibt es viele Verschiedene Arten von Codes. Möglich ist beispielsweise, Streifen farblich zu codieren, wobei die Position eines Streifens eindeutig anhand der Codierung der umgebenden Streifen erfasst werden kann. Die codierten Streifen werden dabei außerdem in gleich große Kästchen mit schwarzen Abstandhaltern unterteilt, siehe Abbildung 15. Dadurch ist die Herkunft der weißen Streifen aufgrund der zwei aufeinanderfolgenden benachbarten Kästchen bestimmbar. Wenn zur Codierung Basisfarben verwendet werden (rot, grün, blau sowie schwarz als Abstandhalter) existieren somit sechs Farbcodes (rr, gg, bb, gr, gb, rb). Es können also 36 ($= 6^2$) Streifen decodiert werden. Es besteht allerdings, wie auch schon beim frequenzcodierten Verfahren der Nachteil der schlechten Vermessbarkeit farblicher Oberflächen. Zudem führen Unstetigkeiten, wie z.B. Bohrungen dazu, dass benachbarte Kästchen eventuell nicht erkannt werden können und somit Probleme bei der Zuordnung bestehen.

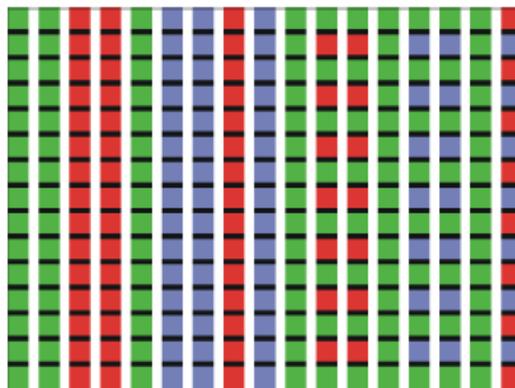


Abbildung 15: Örtlich codierte Streifen [11]

2.2.2.3 Vergleich der beschriebenen Codierungsverfahren

In Tabelle 3 werden die oben vorgestellten Verfahren zur Codierung von Streifenmustern direkt miteinander verglichen.

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Codierungsverfahren [1]

Verfahren	Robustheit in Bezug auf die Oberflächenbeschaffenheit	Genauigkeit und Auflösung	Robustheit bei bewegten Objekten	Aufwand für Decodierung	Aufwand für Messsystemaufbau
Zeitlich codierte Verfahren	hoch	hoch	gering	gering	mittel
Phasencodierte Verfahren	hoch	sehr hoch	gering	mittel	hoch
Frequenz-codierte Verfahren	sehr gering	hoch	hoch	gering	mittel
Örtlich codierte Verfahren	gering	mittel	hoch	mittel	mittel

Die beschriebenen Kriterien des Vergleichs sind wie folgt zu verstehen:

- Robustheit in Bezug auf die Oberflächenbeschaffenheit
Wenn die Beschaffenheit der Oberfläche großen Einfluss auf das Messergebnis hat, wird das Verfahren mit „sehr gering“ bewertet.
- Genauigkeit und Auflösung
Dabei wird bewertet wie hoch die prinzipiell erreichbare Genauigkeit ist.
- Robustheit bei bewegten Objekten
Wenn mit einem Codierverfahren die Vermessung bewegter Objekte nicht möglich ist, wird es als „sehr gering“ eingestuft.
- Aufwand für Decodierung
Hier wird der Zeit- und Rechenaufwand betrachtet, der zur Decodierung aufgenommener Informationen und Umrechnung in 3D-Koordinaten notwendig ist.
- Aufwand für den Messsystemaufbau
Dabei wird verglichen, wie komplex der Geräteaufbau in Abhängigkeit des verwendeten Verfahrens ist.

2.2.3 Photogrammetrie

2.2.3.1 Grundlagen

Die Ursprünge der Photogrammetrie liegen über 100 Jahre zurück auf dem Gebiet der Geodäsie. Die Grundidee der Photogrammetrie ist es, anhand von Bildern die Form und Lage von Messobjekten zu rekonstruieren. Durch die Entwicklung digitaler Fotografie wurde

das Verfahren zu einer universal einsetzbaren Messmethode, die besonders für großflächige Werkstücke geeignet ist und daher sehr verbreitet in der industriellen Messtechnik zum Einsatz kommt. [1], [7]

Tabelle 4: Vor- und Nachteile der Photogrammetrie [1]

Vorteile	Nachteile
Für sehr große Messobjekte geeignet	Begrenzte Genauigkeit
Fast beliebige Oberflächenbeschaffenheit	Kaum automatisierbar
Handelsübliche Kameras einsetzbar	Vorbereitungen erforderlich
Kompakt und daher leicht transportabel	Nicht für bewegte Objekte geeignet
Texturerfassung möglich	Ungeeignet für kleine Messobjekte
Keine gefährliche Strahlung	

Abbildung 16 veranschaulicht schematisch die Vermessung eines Fahrzeuges mittels Photogrammetrie. Dabei sind die an der Karosserie angebrachten Referenzmarken, deren Funktion im Folgenden noch beschrieben wird, sowie die verschiedenen Kamerapositionen aus denen das Fahrzeug vermessen wird, erkennbar.

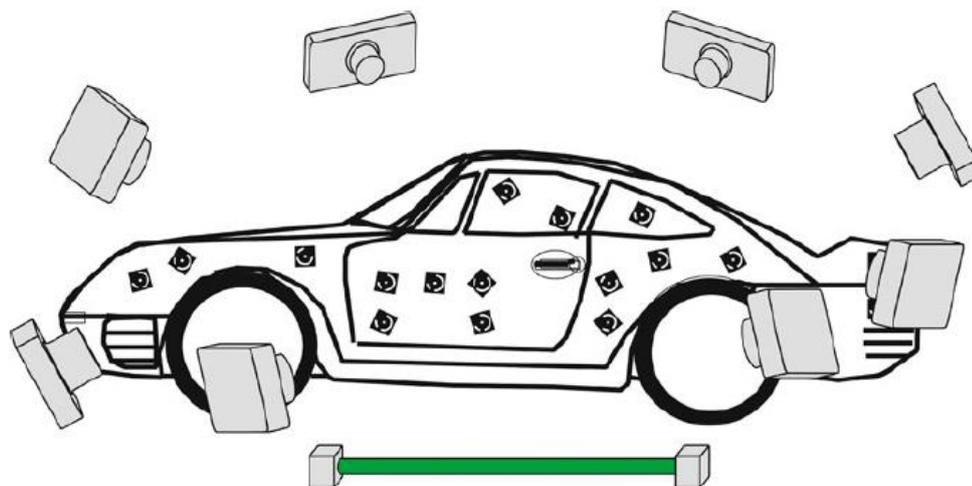


Abbildung 16: Einsatzbeispiel der Photogrammetrie [7]

2.2.3.2 Beschreibung des Photogrammetrieverfahrens

Das Prinzip der Photogrammetrie beruht auf der Fähigkeit, aus zwei aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommenen Bildern, dreidimensionale Koordinaten oder die Form eines zu vermessenden Bauteils durch Stereomessung abzuleiten. Zur Vermessung größerer Bauteile in der Fertigungsmesstechnik werden meist codierte Referenzmarken verwendet, die an unterschiedlichen Stellen auf dem zu vermessenden Objekt angebracht werden, siehe Abbildung 17. Anschließend werden mit einer Digitalkamera – bei modernen

Photogrammetriesystemen sind hochauflösende digitale Spiegelreflexkameras im Einsatz – aus verschiedenen Richtungen mehrere Bilder aufgenommen. Es existieren allerdings auch Anwendungen, bei denen das Messobjekt in einem Messraum praktisch gleichzeitig von mehreren Kameras aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden kann. [7]

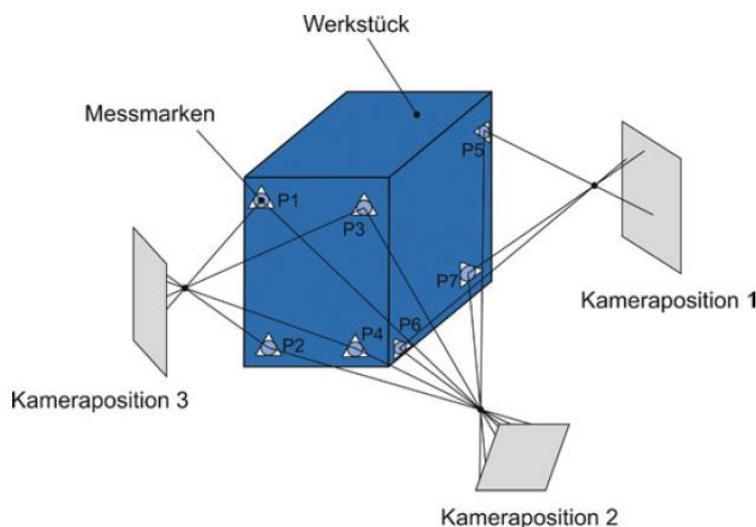


Abbildung 17: Aufbau und Messprinzip der Photogrammetrie [7]

Um die 3D-Koordinaten aus zweidimensionalen Bildaufnahmen rekonstruieren zu können, ist es notwendig, das Messobjekt aus zumindest zwei verschiedenen Perspektiven zu erfassen. Dabei ist es wichtig, dass möglichst viele Referenzmarken in mehreren Bildern, also aus mehreren Kamerapositionen sichtbar sind, was die Messunsicherheit verringert und die Redundanz erhöht. So ist z.B. in Abbildung 17 gut erkennbar, dass die Marker P1 bis P4 sowohl aus Kameraposition 2 als auch von Kameraposition 3 sichtbar sind. Um aus den ebenen Abbildungen, die von der Kamera aufgenommen werden, dreidimensionale Koordinaten bestimmen zu können, wird ein mathematisches Modell benötigt. Es ist daher notwendig, die geometrischen Abbildungsgesetze der verwendeten Technologie zu kennen. Das meistverwendete Modell hierbei ist die Zentralprojektion, welche man sich geometrisch als eine Abbildung der dreidimensionalen Punkte auf eine zweidimensionale Ebene, den Kamerasensor, mittels Geraden vorstellen kann. Um die Strahlenbündel im Raum rekonstruieren zu können, müssen sowohl die Daten der inneren als auch die Daten der äußeren Orientierung bekannt sein. Als Orientierung bezeichnet man hierbei die geometrischen Zusammenhänge sowohl im als auch um das Messbild, siehe Abbildung 18. [1], [7]

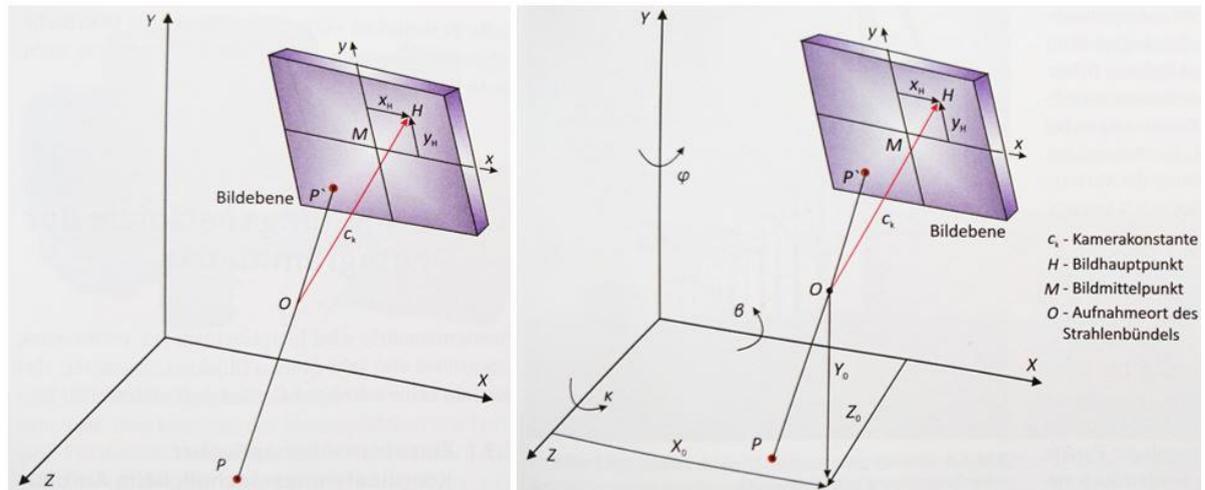


Abbildung 18: Parameter der inneren (links) und äußeren (rechts) Orientierung [1]

Durch die innere Orientierung werden die geometrischen Verhältnisse in der Aufnahmekamera beschrieben und durch die äußere Orientierung die Lage des Projektionszentrums im Raum. Kolinearitätsgleichungen beschreiben den Zusammenhang zwischen dem Bild- und dem Objektsystem: [1]

$$x = x_H - c_k \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + dx$$

$$y = y_H - \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + dy$$

Hierbei sind die Parameter r_{ik} Elemente der Drehmatrix R , welche die Position des Bildes in Bezug auf das Objektkoordinatensystem XYZ angibt. Die Parameter r_{ik} können mithilfe der Drehwinkel φ , κ , β (ersichtlich in Abbildung 18 rechts) beschrieben werden. Wenn die Aufnahmen sich überlappen, entsteht ein überbestimmtes Gleichungssystem, welches von der Auswertesoftware gelöst werden muss. Das führt dazu, dass photogrammetrische Auswertungen sehr rechenintensiv sein können. Wenn die inneren und äußeren Orientierungen bekannt sind, können daraus die Objektkoordinaten bestimmt werden, wobei die Parameter der beiden Orientierungen mittels Kalibrierung ermittelt werden. Um die Auswertung der Aufnahmen zu automatisieren, werden bei den meisten photogrammetrischen Verfahren codierte Marken auf das zu vermessende Objekt aufgeklebt. Das System kann diese Messmarken automatisch erkennen, wodurch Einzelaufnahmen automatisch anhand homologer Punkte und Überlappungen ausgewertet werden können. Es existieren auch schon Systeme, die virtuelle Messmarken verwenden. Diese werden auf die zu messende Oberfläche projiziert, wodurch die Geometrie nicht verdeckt wird. [1], [7]

2.2.3.3 Anwendungen der Photogrammetrie

Das Verfahren der Photogrammetrie wird meist zur Vermessung sehr großer Objekte eingesetzt, bei denen keine Genauigkeit im μm -Bereich erforderlich ist. Das ist etwa bei vielen Messaufgaben im Schiffbau sowie auch in der Schienenfahrzeugindustrie der Fall. So werden beispielsweise Form- und Lagetoleranzen der Seitenwände von Schienenfahrzeugen oft mittels Photogrammetrie überprüft. Nachdem die Bilder von der Software ausgewertet wurden, können die gemessenen 3D-Koordinatenpunkte in einem CAD-Programm mit der Sollgeometrie des betreffenden Bauteils verglichen und so überprüft werden, ob Toleranzgrenzen eingehalten werden. [1], [7]

2.2.4 Lasertracker

2.2.4.1 Grundlagen

Lasertracker dienen vorwiegend zur hochgenauen Längen- und Entfernungsmessung und basieren auf dem Prinzip der Interferometrie von Lichtwellen, welches nachfolgend noch beschrieben wird. Grundlegend für Lasertracker ist die Eigenschaft, dass sie der Bewegung eines Reflektors, der an bestimmten Punkten des Messobjekts angebracht wird, durch automatische und reaktionsschnelle Lasernachführung folgen können, was hochgenaue Messungen in nahezu jede Raumrichtung ermöglicht. [1]



Abbildung 19: Beispiel eines Lasertrackers (Leica AT960) [12]

Das Funktionsprinzip des Lasertrackers beruht darauf, dass das Licht einer Laserlichtquelle in zwei Teilstrahlen aufgeteilt wird, von denen ein Teilstrahl – der Objektstrahl – zum Messobjekt und anschließend zurück zum Messgerät gelangt. Dort werden die beiden Teilstrahlen überlagert, wodurch Interferenzen entstehen. Die Änderung der Intensität des

Objektstrahls wird an einem Detektor beobachtet, wodurch Rückschlüsse auf den zurückgelegten Weg des Laserstrahls gezogen werden können. [1]

Tabelle 5: Vor- und Nachteile von Lasertrackern [1]

Vorteile	Nachteile
Sehr große Abstände zum Messobjekt möglich	Keine absolute Messung
Extrem hohe Genauigkeit	Maßnahmen zur Lasersicherheit erforderlich
Messung automatisierbar	Hoher Vorbereitungsaufwand
Großflächige Vermessungen möglich	Relativ komplexer Aufbau
Hochgenaue Verfolgung von Messobjektbewegungen	

2.2.4.2 Beschreibung des Messverfahrens

Die Funktionsweisen von Lasertrackern verschiedener Hersteller ähneln sich sehr stark, unterschiedlich sind meist nur die Strahlenverläufe sowie die Messraten. Hauptbestandteil eines Lasertrackers ist ein Laserinterferometer, das entweder im Stativ oder bei neueren Modellen auch oft extern untergebracht ist. Durch zwei elektrisch angetriebene Drehachsen sowie hochgenauen Winkelmesssystemen lässt sich der Laserstrahl des Interferometers frei im Raum führen. Ein Reflektor (siehe Abbildung 20) wird am Messobjekt an der Stelle positioniert, an der ein Messwert bestimmt werden soll. Anschließend wird derselbe Reflektor an der nächsten gewünschten Stelle positioniert und die vollzogene Positionsänderung wird von einem Sensor erkannt und die beiden Drehachsen automatisch nachgeführt. Der Messkopf folgt also kontinuierlich dem sich bewegenden Reflektor, was auch als Positionstracking bezeichnet wird. Die aktuellen dreidimensionalen Koordinaten des Reflektors im Raum können über die beiden Winkelinformationen der Drehachsen sowie über die Abstandsinformation des Laserinterferometers berechnet werden. [7], [13], [14]



Abbildung 20: Beispiel eines Reflektors für Lasertracker (Quelle: Siemens Mobility)

Die Funktionsweise des Lasertrackers und vor allem des Laserinterferometers soll anhand von Abbildung 21 veranschaulicht werden. Vom Laserinterferometer wird eine kontinuierliche Lichtwelle ausgesandt, die einen Strahlteiler durchläuft und danach auf einen drehbar gelagerten Kippspiegel trifft. Dort wird der Strahl zum oben beschriebenen Reflektor abgelenkt und von dessen reflektierender Oberfläche zurückgeworfen. Ein Teil des reflektierten Lichtstrahls wird am Strahlteiler abgespaltet und zu einem Positionssensor geleitet. Der verbleibende Anteil des Lichtstrahls gelangt zurück zum Laserinterferometer zur Bestimmung der Relativentfernung. Dort werden die Amplituden der Welle als Hell- Dunkel-Unterschiede gezählt und das empfangene Lichtsignal dadurch ausgewertet. Der Positionssensor ermittelt den Versatz zum Zentrum des Reflektors und ein Rechner korrigiert die ermittelte Positionsabweichung indem die Motoren des Kippspiegels so angesteuert werden, dass die Positionsabweichung ausgeglichen werden und der ausgesendete Lichtstrahl genau ins Zentrum des Reflektors trifft. Diese Winkelkorrektur ist Teil eines Regelkreises und wird mit einer Frequenz von 3000 Hz, also 3000 Mal pro Sekunde durchgeführt. Dadurch wird eine schnelle Zielverfolgung ermöglicht, wenn der Reflektor bewegt wird. [15]

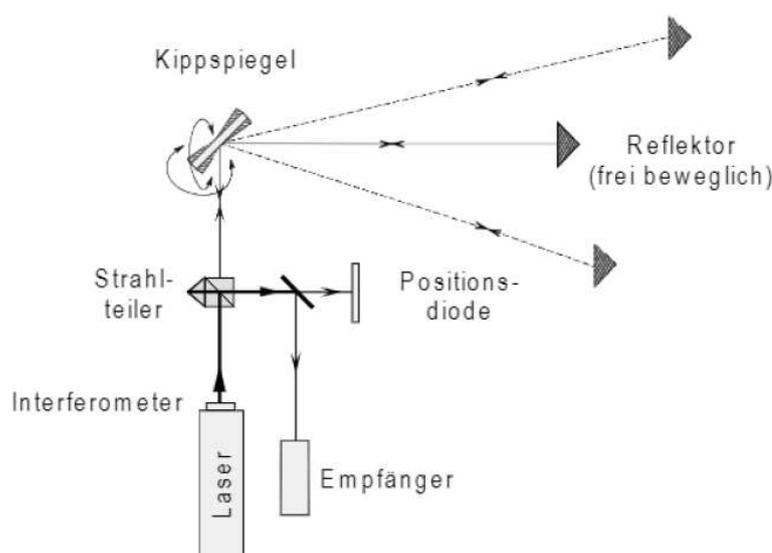


Abbildung 21: Messprinzip eines Lasertrackers [16]

2.2.4.3 Zusatzkomponenten für Lasertracker

Für viele Messaufgaben ist die Vermessung lediglich einzelner Punkte mittels eines Reflektors wenig sinnvoll. Sind beispielsweise versteckte Antastpunkte zu messen, die nicht direkt im Erfassungsbereich des Lasertrackers liegen, bietet sich die Verwendung eines berührenden mobilen Messkopfsystems an. Ist die 3D-Vermessung und Digitalisierung

großer Oberflächen notwendig, bietet sich die Kombination aus Lasertracker und berührungslosem mobilem Messkopfsystem an.

- **Lasertracker mit berührendem Messkopfsystem**

Voraussetzung für die Anwendung dieses Messprinzips ist, dass der Lasertracker zusätzlich mit einer Kamera ausgestattet ist. Die ist bei vielen neueren und vor allem hochpreisigen Geräten serienmäßig verbaut, wie beispielsweise beim AT960 von Leica, der in Abbildung 19 zu sehen ist. Viele andere, vor allem ältere Geräte, lassen sich oft mit einem Kameraaufsatz erweitern, der auf den Lasertracker aufgesetzt wird.

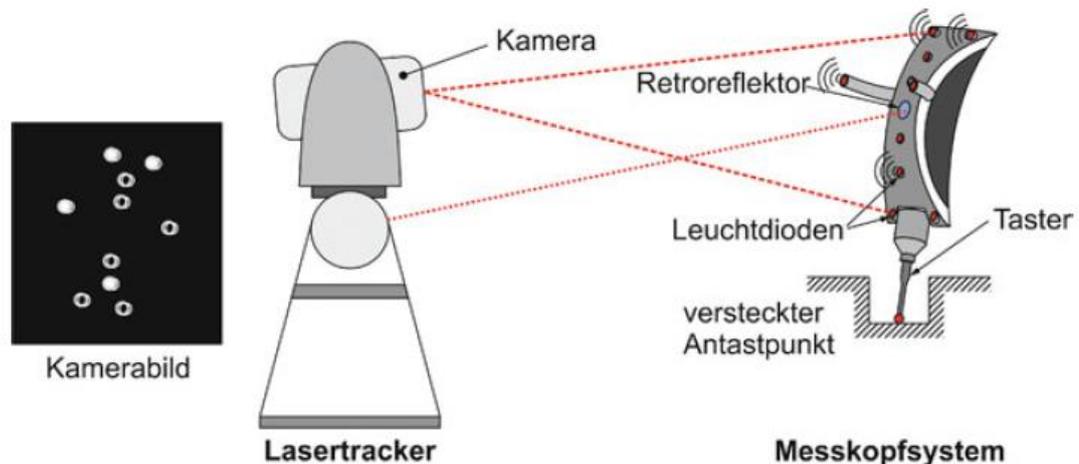


Abbildung 22: Lasertracker mit berührendem Messkopfsystem [7]

Das berührende mobile Messkopfsystem verfügt über einen Reflektor und Leuchtdioden sowie ein Tasterelement mit Tastkugel an der Spitze, welches zur berührenden Antastung auf der zu messenden Oberfläche dient. Der Lasertracker erfasst die dreidimensionalen Koordinaten des Reflektors auf dem Messkopfsystem. Mit dem aufgesetzten oder integrierten Kamerasystem ist es möglich, mithilfe der am Messkopf angebrachten LEDs die genaue räumliche Lage des Messkopfes photogrammetrisch zu bestimmen. Dadurch sind alle sechs Freiheitsgrade bestimmt und das System kann die 3D-Koordinaten der Antastkugel des Messkopfsystems bestimmen. [7], [13]

Die Kombination aus Lasertracker und mobilem berührendem Messkopfsystem eignet sich besonders zur Vermessung großer Werkstücke mit versteckten Antastpunkten, die der Lasertracker beispielsweise mittels einfacher Reflektormessung nicht direkt erfassen könnte. Erreichbare Genauigkeiten liegen bei modernen Geräten im Bereich von etwa 35 μm bei einem 360° Messbereich von bis zu 60 m. [7], [17]

- **Lasertracker mit berührungslosem Messkopfsystem**

Für die Anwendung dieses Messprinzips ist es ebenfalls notwendig, dass der Lasertracker mit einer Kamera ausgestattet ist. Beim Messkopf, der hier zur Anwendung kommt handelt es sich um einen berührungslosen, handgeführten Laserscanner, der nach dem Triangulationsprinzip arbeitet. Dabei wird mittels eines rotierenden Polygonspiegels eine Laserlinie auf die Oberfläche des Messobjekts projiziert und deren Verformung mit einem lichtempfindlichen CCD-Sensor (hier in Abbildung 23 als 2D-Sensor bezeichnet) erfasst.

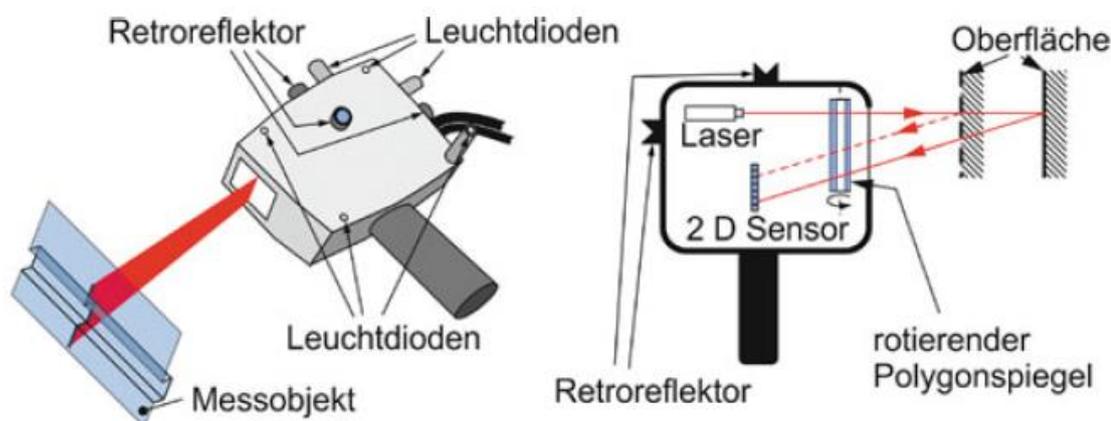


Abbildung 23: Lasertracker mit berührungslosem Messkopfsystem [7]

Die Position des von der Oberfläche reflektierten Lichtstrahls auf dem CCD-Sensor ist dabei abhängig von der Distanz zwischen dem Scanner und der Oberfläche. Daraus ist es möglich, die dreidimensionalen Koordinaten jedes gescannten Punktes auf der Werkstückoberfläche relativ zum Messkopfsystem zu berechnen. Es wird also vom gescannten Bereich eine Punktwolke erzeugt. Die Erfassung der genauen Lage des handgeführten Scanners im Raum erfolgt auf die gleiche Art und Weise wie oben beim berührenden Messkopfsystem beschrieben. Es ist also auf jeder Seite des Scanners ein Reflektor sowie mehrere Leuchtdioden angebracht. Die Position des Reflektors wird vom Lasertracker erfasst und die Koordinaten der Leuchtdioden mittels Kamerasystem photogrammetrisch erfasst, womit alle sechs Freiheitsgrade bestimmt sind. [7], [13]

In Abbildung 24 ist ein Beispiel einer Oberflächenmessung mit dem berührungslosen mobilen Messkopfsystem Leica T-Scan zu sehen.



Abbildung 24: Beispiel einer Oberflächenvermessung mit dem berührungslosen mobilen Messkopfsystem Leica T-Scan [18]

Anwendung finden Lasertracker in Kombination mit handgeführten Laserscannern beispielsweise bei der Messung und Digitalisierung großer Freiformflächen, wie z.B. im Schienenfahrzeug- oder Flugzeugbau. Der Lasertracker bildet hierbei das globale Bezugssystem und mit dem handgeführten Scanner wird eine Punktwolke der Oberfläche erzeugt, die wiederum die Geometrie der gescannten Oberfläche repräsentiert. Manche mobile berührungslose Messkopfsysteme bieten auch die Möglichkeit der Befestigung an einem Roboterarm und somit die Möglichkeit zur Durchführung automatisierter Oberflächenmessungen, beispielsweise in der Serienfertigung. [18], [7]

2.2.5 Terrestrisches Laserscanning

2.2.5.1 Grundlagen

Terrestrische Laserscanner (TLS) gibt es seit etwa 20 Jahren und sie wurden zu Beginn hauptsächlich im Gebiet der Fernerkundung und der Gebäudevermessung eingesetzt. Für Messaufgaben im Bereich der industriellen Fertigung waren die erreichbaren Genauigkeiten der TLS anfangs noch nicht ausreichend. Die rasante Weiterentwicklung der zugrundeliegenden Technologie und dadurch immer höhere Genauigkeiten ermöglichen jedoch seit einigen Jahren auch einen Einsatz der terrestrischen Laserscanner zur 3D-Oberflächenerfassung im Bereich der Fertigungsmesstechnik. [1]



Abbildung 25: Beispiel eines terrestrischen Laserscanners (Surphaser 100 HSX) [19]

3D-Oberflächenmessungen mittels terrestrischem Laserscanner geschehen berührungslos und automatisiert. Der Laserscanner wird an mehreren Standpunkten so aufgestellt, dass das gesamte zu messende Objekt erfasst werden kann. Die Punktwolken, die so bei jedem Scanvorgang entstehen, müssen sich jeweils in geringem Maße überlappen, um anschließend von der Auswertesoftware zu einer gesamten Punktwolke zusammengefügt zu werden, die schlussendlich die Oberfläche des Messobjektes widerspiegelt. Je nach eingesetztem Modell dauert ein Scanvorgang pro Standpunkt nur wenige Minuten. Mittels TLS ist es möglich, komplexe Objekte mit großen Abmessungen in relativ kurzer Zeit zu erfassen. Zu bedenken ist bei terrestrischen Laserscan-Messungen allerdings, dass die entstehenden Datenmengen enorm sein können. Dies ist speziell bei modernen Geräten der Fall, welche oft über 1 Mio Punkte in der Sekunde erfassen können, was in weiterer Folge entsprechend hohe Hardwareanforderungen und eventuelle Probleme bei der Datenauswertung nach sich ziehen kann. Die erreichbare Genauigkeit bei terrestrischen Laserscannern hängt von vielen Faktoren, wie etwa der Farbe und Reflexivität der Oberfläche, der Distanz zwischen Scanner und Messobjekt und dem Auftreffwinkel des Laserstrahls ab. Unter idealen Bedingungen lassen sich mit modernen, hochgenauen terrestrischen Laserscannern Genauigkeiten von etwa 0,1 mm erzielen. [1], [2]

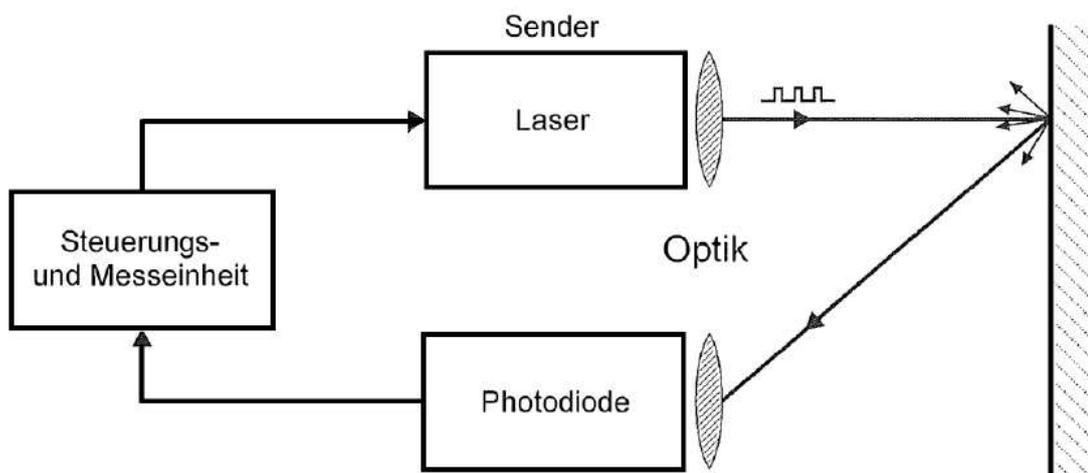
Tabelle 6: Vor- und Nachteile von terrestrischen Laserscannern [1]

Vorteile	Nachteile
Sehr große Abstände zum Messobjekt möglich	Keine absolute Messung
Messung automatisierbar	Geringere Messgenauigkeiten als etwa bei Lasertrackern
Manuelles Zusammenfügen der einzelnen Aufnahmen meist nicht erforderlich	Relativ komplexer Aufbau
Großflächige Vermessungen möglich	
Schnelle Vermessung großer Bauteile möglich	

2.2.5.2 Beschreibung des Messverfahrens

Prinzipiell unterscheidet man beim terrestrischen Laserscanning drei verschiedene Verfahren, wobei es bei allen drei Verfahren darum geht, die Distanz zwischen Scanner und Oberfläche des Messobjektes zu bestimmen. Für den praktischen Einsatz vor allem im industriellen Umfeld spielt allerdings ein Verfahren, nämlich das Triangulationsverfahren, wegen des nur sehr geringen möglichen Arbeitsabstandes keine Rolle. Aus diesem Grund werden im Folgenden nur die beiden gängigen Verfahren, das Impulslaufzeitverfahren und das Phasenvergleichsverfahren beschrieben. [1]

Beiden Messverfahren liegt das Prinzip zugrunde, dass ein stark gebündelter Laserstrahl ausgesandt wird, der von der Oberfläche des zu messenden Objektes gestreut und zum Teil wieder zurück in Richtung Laserscanner reflektiert wird. Der reflektierte Anteil des Strahls wird von einer Photodiode registriert, wie in der schematischen Darstellung des Prinzips in Abbildung 26 zu sehen ist. [20]

**Abbildung 26:** Schematische Darstellung eines Laserscanners [21]

Die Aufgabe von terrestrischen Laserscannern ist es, die Oberfläche von Objekten dreidimensional zu vermessen, also an vielen Punkten abzutasten. Dazu ist es erforderlich, dass der Laserstrahl gezielt abgelenkt wird, um so möglichst viele Punkte zu erfassen. Die Ablenkung des Laserstrahls erfolgt dabei einerseits durch Rotation des Messgeräts um die vertikale Achse mithilfe von Servomotoren, wobei die jeweils aktuelle Position mit höchster Genauigkeit bestimmt werden kann und in die Berechnung mit einfließt. Zudem wird der Strahl auch noch durch um die horizontale Achse rotierende Spiegel abgelenkt, wobei es verschiedene Arten von Rotationsspiegeln gibt. Laserscanner zur Erzeugung von 360°-Panoramascans verwenden rotierende Schrägspiegel. Der schematische Aufbau des terrestrischen Laserscanners ist in Abbildung 27 dargestellt, wo auch die beiden Rotationsachsen gut zu erkennen sind. [1]

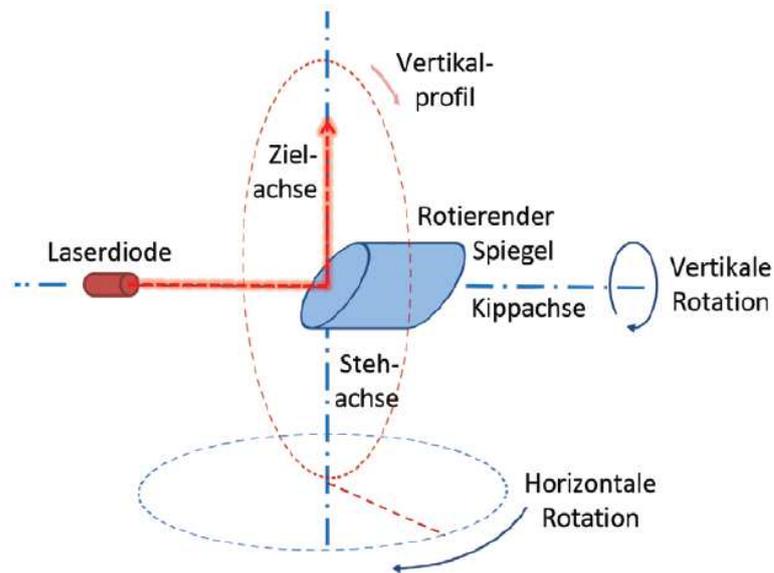


Abbildung 27: Aufbau eines terrestrischen Laserscanners [22]

Dieser Aufbau ermöglicht es, dass die Oberfläche des Messobjektes schrittweise automatisch abgetastet wird. Es wird dabei meist in vertikalen Scan-Zeilen gemessen und der Rotationswinkel des Spiegels so lange variiert, bis der gesamte Öffnungswinkel durchlaufen wurde. Nach jeder vollständig durchlaufenen vertikalen Scan-Zeile folgt eine horizontale Drehung um einen bestimmten Winkelbetrag und die nächste Scan-Zeile wird gemessen. Dieser Ablauf wiederholt sich so lange, bis das gesamte vorgegebene Messvolumen (maximal 360°) abgetastet wurde und es entsteht eine regelmäßige Punktwolke (Abbildung 28), wobei von jedem einzelnen Punkt die sphärischen Koordinaten, also der Vertikal- und Horizontalwinkel sowie die Distanz zum Messgerät bekannt sind. [23]

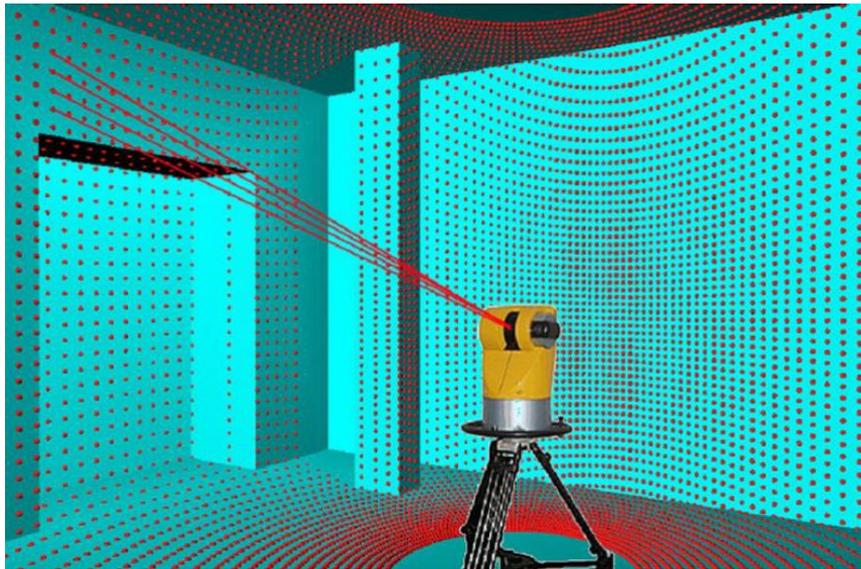


Abbildung 28: Punktwolke eines Terrestrischen Laserscans [24]

Eine weitere Information, die jedem aufgenommenen Punkt zusätzlich zu den drei Koordinaten hinterlegt wird, ist ein Intensitätswert. Dieser ist als Signalstärke des von der Oberfläche reflektierten Laserstrahls zu verstehen, der von der Photodiode des Laserscanners detektiert wird und ist stark von der Entfernung des zu messenden Objektes und der Beschaffenheit seiner Oberfläche abhängig. Erforderlich sind solche Intensitätswerte zur Bestimmung von signalisierten Verknüpfungspunkten, die dem Zusammenfügen mehrerer Scans aus verschiedenen Aufnahmepositionen in ein gemeinsames Koordinatensystem dienen. [23]

Im Folgenden werden die zwei für praktische Anwendungen von terrestrischen Laserscannern gebräuchlichsten Verfahren der Distanzmessung erklärt, das Impulslaufzeitverfahren und das Phasenvergleichsverfahren. Wie eingangs erwähnt, existiert noch ein weiteres Verfahren der Distanzmessung, das Triangulationsverfahren, welches aber für praktische Anwendungen vor allem in der industriellen Messtechnik aufgrund des eingeschränkten Arbeitsabstandes keine Relevanz hat.

- **Impulslaufzeitverfahren**

Beim Impulslaufzeitverfahren, auch als Time of Flight (ToF)- Verfahren bezeichnet, wird die Laufzeit gemessen, die ein ausgesandter Lichtimpuls benötigt, um die zu bestimmende Entfernung zwischen Scanner und Messobjekt zu durchlaufen. Nach der Reflexion des ausgesandten Lichtimpulses an der Oberfläche wird die Rückstreuung von einem Detektor registriert. Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist in Abbildung 29 zu sehen. [1], [23]

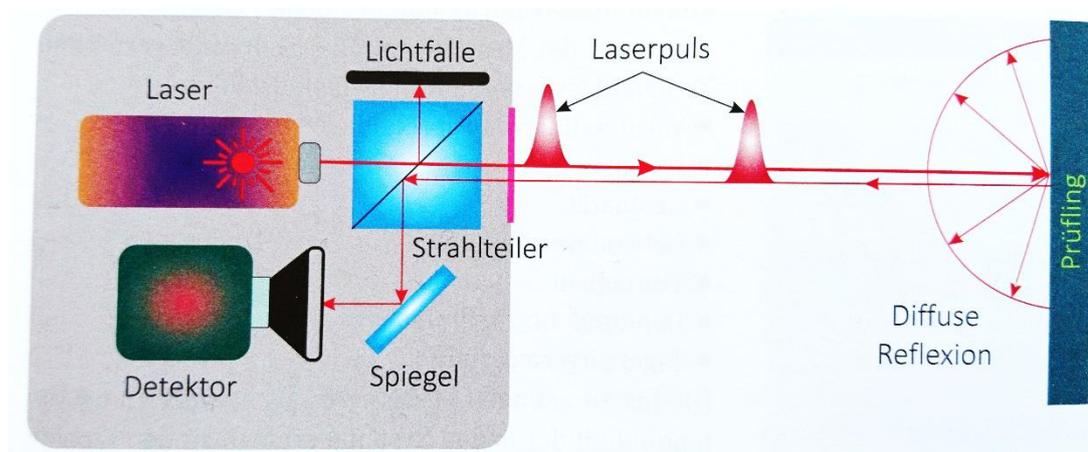


Abbildung 29: Prinzip des Impulslaufzeitverfahrens [1]

Ein wesentlicher Vorteil von Laserscannern, die nach dem Impulslaufzeitverfahren arbeiten, ist der große mögliche Arbeitsabstand für Messungen auf großen Distanzen. Nachteilig ist allerdings die eingeschränkte Genauigkeit im Vergleich zu Scannern, die nach dem Phasenvergleichsverfahren arbeiten. So sind Impulslaufzeit-Geräte für Anwendungen gedacht, bei denen Genauigkeiten im Millimeter- oder sogar Zentimeterbereich ausreichend sind. [1], [23]

Aus der gemessenen Laufzeit t , der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 und der Brechzahl der Atmosphäre n kann daraus die gesuchte Entfernung zum Messobjekt berechnet werden. [1]

$$s = \frac{1}{2n} c_0 * t$$

- **Phasenvergleichsverfahren**

Beim Phasenvergleichsverfahren werden anstatt von Laserimpulsen amplitudenmodulierte Lichtwellen kontinuierlich ausgesandt. Diese Wellen werden an der Oberfläche des zu messenden Objektes reflektiert und zeitversetzt vom Detektor wieder empfangen, wie in Abbildung 30 schematisch dargestellt. Da es sich bei den ausgesandten Wellen um harmonische Wellen handelt, ist ein Vergleich der Phasenverschiebung zwischen ausgesandter und empfangener Welle möglich. [23], [1]

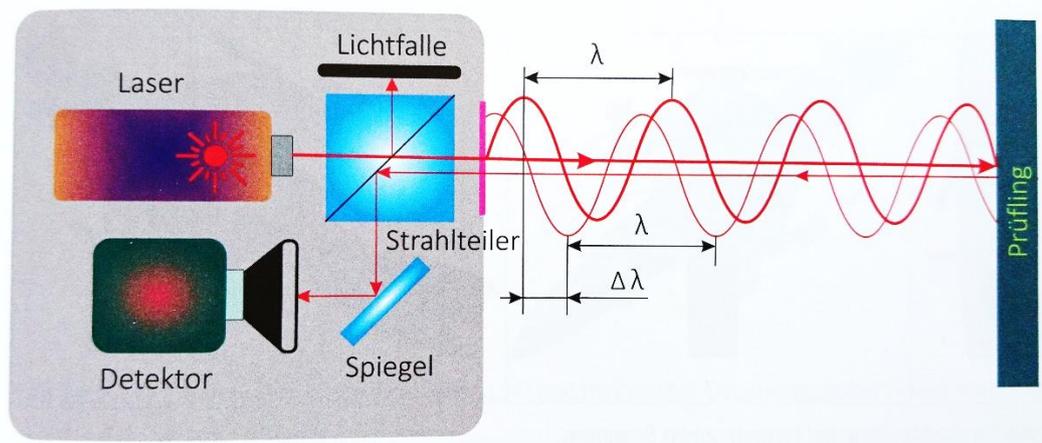


Abbildung 30: Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens [1]

Die Maßeinheit für die Abstandsmessung ist die Wellenlänge λ des verwendeten Lasers, wobei die Entfernung s nicht direkt aus der Phasenverschiebung bestimmt werden kann aufgrund unbekannter Ordnung N der Sinusschwingung.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

c ...Lichtgeschwindigkeit

f ...Frequenz der Welle

$$2s = N * \lambda + \Delta\lambda$$

$\Delta\lambda$...Wellenreststück (Phasenverschiebung)

Man nennt dieses Problem auch Mehrdeutigkeitsproblem. Um dieses zu lösen, wird die Trägerwelle mit mehreren sogenannten Modulationswellen überlagert, wodurch eine neue, wesentlich größere Wellenlänge erzeugt wird. Das Phasenvergleichsverfahren bietet gegenüber dem Impulslaufzeitverfahren eine wesentlich höhere Genauigkeit. Maximale Arbeitsabstände bei diesem Verfahren betragen meist etwa 100 Meter, was für industrielle Messaufgaben meist ausreichend ist. [1]

2.2.5.3 Einflussfaktoren auf die Messung

Ein sehr wichtiger Einflussfaktor bei Messungen mit terrestrischen Laserscannern ist die Reflexionseigenschaft der Oberfläche des Messobjekts, wobei bei diffus reflektierenden Oberflächen in der Regel die besten Ergebnisse erzielt werden können. Bei diesen wird der auftreffende Laserstrahl aufgrund von Mikrofacetten im Material in sehr viele Richtungen

gestreut. Bei einer Reflexion an spiegelnden Oberflächen tritt das Problem auf, dass im Normalfall keine Anteile des Laserstrahls in die gleiche Richtung des auftreffenden Strahls zurückreflektiert werden. Oberflächen, die den auftreffenden Laserstrahl stark absorbieren und spiegelnde Oberflächen sind daher für Laserscan-Messungen kaum geeignet. [1], [25]

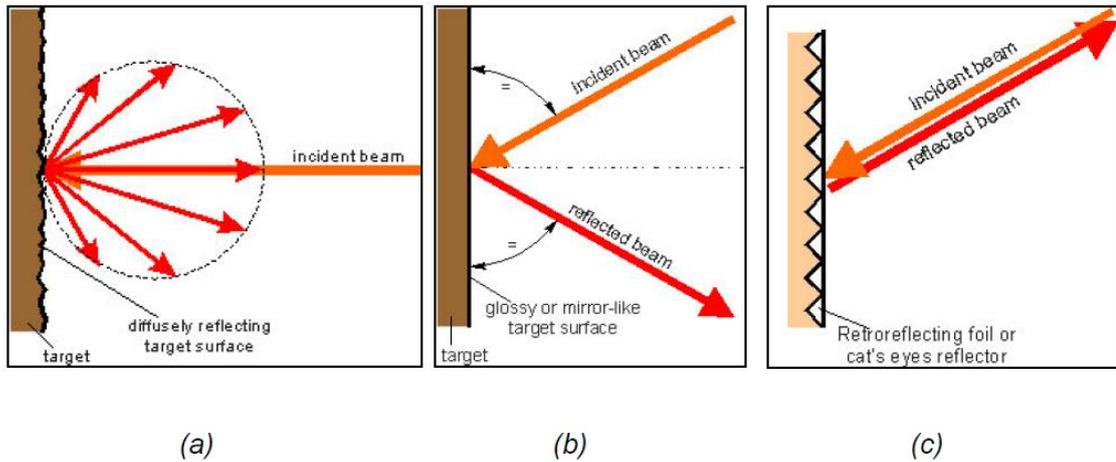


Abbildung 31: Reflexionseigenschaften von Oberflächen: (a) diffuse Reflexion, (b) spiegellähnliche Reflexion, (c) Retroreflexion [26]

Weitere Einflussfaktoren, die möglicherweise das Messergebnis verfälschen oder sogar unmöglich machen könnten, sind Partikel in der Luft, wie z.B. Staub oder starker Nebel.

Beim Vermessen von Kanten können oft Verfälschungen auftreten, da Laserpunkte nicht unendlich klein sein können. So wird in beispielsweise ein Teil des Laserpunktes auf einer Seite der Kante reflektiert, während der restliche Teil auf die Oberfläche trifft, die sich hinter der Kante befindet. Das Messergebnis entspricht in so einem Fall dann nicht der Realität, weil ein Mittelwert aus den beiden Reflexionen gebildet wird. [1]

3 Grundlagen Virtual- und Augmented Reality

3.1 Historische Entwicklung und Begriffsabgrenzung

Die Ursprünge von Virtual Reality gehen auf die 1960er Jahre zurück, wobei der US-Amerikaner Ivan Sutherland wesentlichen Anteil an den Forschungen auf diesem neuartigen Gebiet hatte. Er beschrieb 1965 in „The Ultimate Display“ seine Vorstellungen, einen Rechner mit der Konstruktion, Navigation und dem Erleben virtueller Welten zu verbinden. Beachtenswert ist hierbei, dass dies noch lange vor der Erfindung des PCs war. Sutherland war es auch, der 1968 ein erstes Head-mounted Display (HMD) entwickelte, welches aus einem Datenhelm in Kombination mit einem mechanischen und alternativ auch ultraschallbasierten Tracking-System bestand, siehe Abbildung 32. Anwender dieses Systems konnten eine einfache, simulierte dreidimensionale Umgebung perspektivisch korrekt betrachten. Diese Entwicklung kann gleichzeitig auch als weltweit erste Augmented Reality (AR)- Anwendung angesehen werden, weil es als See-Through-System ausgelegt war. [27]

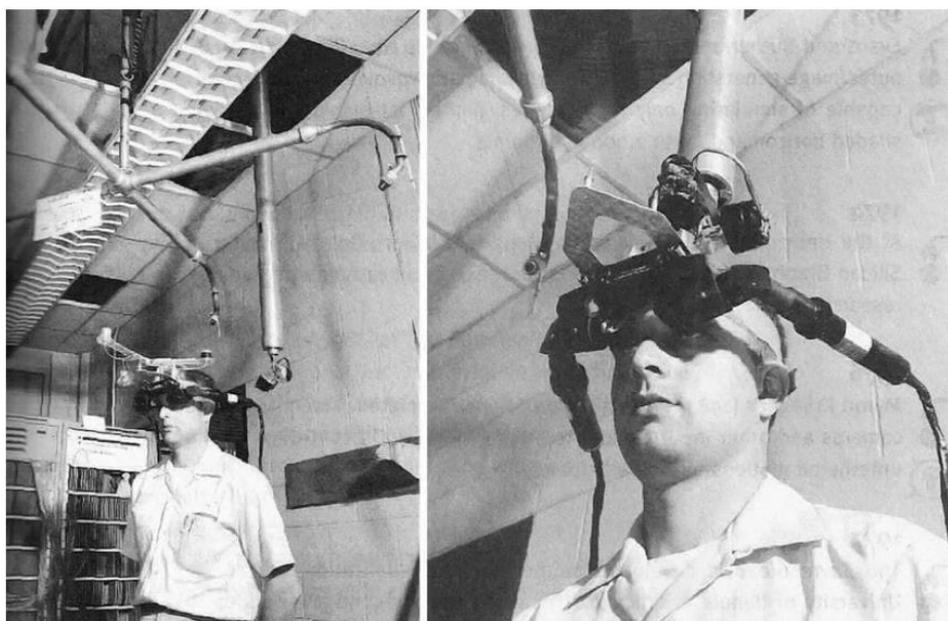


Abbildung 32: head-mounted Display (HMD) von Ivan Sutherland 1968 [28]

Mitte der 1980er Jahre wurde vom NASA Research Center das sogenannte VIEW-Projekt (Virtual Environment Interface Workstations) gestartet, welches das Ziel hatte, eine multisensorische Workstation zu entwickeln, mit der virtuelle Weltraumstationen simuliert werden können.

Anfang der 1990er Jahre wurde erstmals der Begriff Augmented Reality verwendet. Der amerikanische Flugzeughersteller Boeing startete ein Pilotprojekt, welches es seinen Mitarbeitern durch in das Gesichtsfeld eingeblendete Informationen erleichterte, die Verkabelung im Flugzeug zu verlegen.

In den folgenden Jahren gab es eine Reihe weiterer bahnbrechender Entwicklungen auf dem Gebiet der Virtuellen und Erweiterten Realität, die aber allesamt aufgrund des extrem hohen Preisniveaus für die erforderliche Hardware hauptsächlich Forschungsinstituten und großen Industriebetrieben vorbehalten waren.

Einen regelrechten Boom erleben VR und AR-Anwendungen erst seit ein paar Jahren, nachdem 2013 die relativ preisgünstige Datenbrille Oculus Rift vorgestellt wurde und in den folgenden Jahren immer mehr Hersteller, wie etwa Google, HTC, Microsoft und viele weitere nachzogen und erschwingliche VR- und AR- Lösungen auf den Markt brachten. [27]

Bei Betrachtung der beiden Technologien Virtual Reality und Augmented Reality fällt auf, dass beide auf dem Begriff der Realität aufbauen. Dabei ist unter physischer Realität der Geltungsbereich physikalischer Gesetze zu verstehen, der nicht auf künstlicher Nachbildung basiert. Computergenerierte Realität, wie sie etwa bei VR und AR der Fall ist, hat das Ziel, Objekte der physischen Realität möglichst real abzubilden und gegebenenfalls auch eine Manipulation dieser Objekte zu ermöglichen. Unter dem Begriff der Virtualität hingegen ist zu verstehen, dass ein Konstrukt zumindest in seiner Wirkung oder Funktion individuell sinnlich wahrgenommen werden kann. [29]

Ein weiterer Anhaltspunkt zur Unterscheidung der Begriffe ist das Reality-Virtuality-Kontinuum nach Milgram, das in Abbildung 33 zu sehen ist. Die beiden Pole links und rechts außen stellen jeweils die vollständig reale beziehungsweise virtuelle Umgebung dar. Dazwischen sind die entsprechenden Erweiterungsbereiche angesiedelt, die unter dem Überbegriff Mixed Reality (MR) zusammengefasst sind. Mixed Reality ist demnach zutreffend, wenn die Wahrnehmung der physischen Realität durch digitale Inhalte nicht vollständig ersetzt, sondern lediglich ergänzt wird. Wenn digitale Elemente die Wahrnehmung der physischen Realität vollständig ersetzen, spricht man von Virtual Reality (VR). Das bedeutet, dass Virtual- bzw. Augmented- Reality Technologien stufenlos in dieses Kontinuum eingeordnet werden können, je nachdem, wie sie umgesetzt sind. [29]

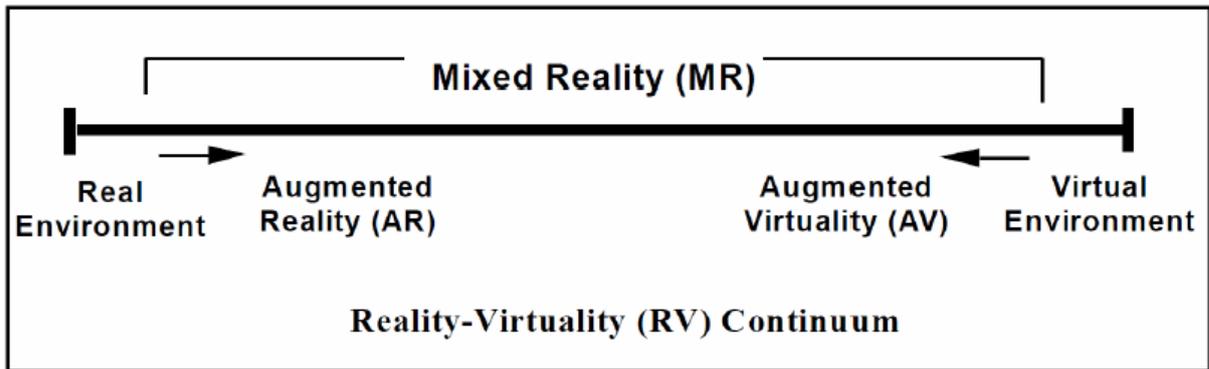


Abbildung 33: Reality-Virtuality-Kontinuum [30]

3.2 Virtual Reality

Virtual Reality (Abkürzung VR) ist noch ein relativ junges aber sehr schnell wachsendes Gebiet in der Wissenschaft. Die Forschung und Weiterentwicklung von Virtual Reality Technologien wird sehr stark von rasanten Fortschritten in der Hardware vorangetrieben, die der Technologie zugrunde liegt. Aufgrund dieser Tatsache gibt es auch bisher noch keine einheitliche Definition von Virtueller Realität. Im Folgenden wird versucht, Virtual Reality aus einem technologieorientierten Blickwinkel zu charakterisieren. [27]

3.2.1 Technologieorientierte Betrachtung

Ein charakteristisches Merkmal vieler Darstellungen von Virtual Reality Systemen sind spezielle Geräte zur Ein- und Ausgabe von Informationen, wie beispielsweise Head-Mounted Displays (HMD), also in Form von Helmen am Kopf des Nutzers angebrachte Displays. Zudem existieren auch spezielle Stereobrillen sowie Datenhandschuhe. Allerdings muss man aufgrund der sehr rasch voranschreitenden technologischen Entwicklung vorsichtig sein, die Definition von Virtual Reality ausschließlich an speziellen Ein- und Ausgabegeräten festzumachen, da diese Hardware sehr schnell überholt sein kann.

VR baut im Allgemeinen auf dreidimensionalen Inhalten der Computergrafik auf mit einem Fokus auf Echtzeit-Anwendungen, die oft über 3D-Displays dargestellt werden. Ein Beispiel solcher 3D-Displays ist in Abbildung 34 dargestellt. [27]



Abbildung 34: Beispiel einer VR-Brille (Samsung Gear VR) [31]

Oft erfolgt die Präsentation der dreidimensionalen Inhalte auch multisensorisch, das heißt, dass nicht nur der Sehsinn, sondern auch der Hör- oder der Tastsinn angesprochen werden. Hierfür werden neben der visuellen Ausgabe über das Display auch noch Lautsprecher oder spezielle Datenhandschuhe verwendet. Bei vielen Anwendungen von Virtual Reality kommen auch 3D-Interaktionsgeräte zum Einsatz, deren exakte Position im Raum verfolgt wird, was auch als Tracking bezeichnet wird. So ist es mittels 3D-Tracking von Körperbewegungen beispielsweise möglich, natürliches Zeigen zu realisieren und das Greifen virtueller Gegenstände zu ermöglichen. Das Tracking von Position und Orientierung des Anwenders ist auch Basis der blickpunktabhängigen Bildgenerierung, die ein weiteres Merkmal vieler VR-Systeme darstellt. Hierbei passt sich die dargestellte 3D-Umgebung stets an die aktuelle Perspektive an, wenn sich der VR-Nutzer bewegt. [27]

Ein weiterer wichtiger Begriff im Zusammenhang mit Virtueller Realität ist der Begriff der Immersion, der ein zentrales Merkmal in der Unterscheidung zwischen herkömmlichen Mensch-Maschine-Schnittstellen und VR-Anwendungen darstellt. Immersion im technischen Sinne bedeutet, dass die Sinneseindrücke eines VR-Nutzers durch ein oder mehrere Ausgabegeräte möglichst umfassend angesprochen werden. Slater und Wilbur definieren Immersion nach vier technischen Eigenschaften: [27]

- 1) Nutzer sollen möglichst von der realen Umgebung isoliert werden, was bedeutet, dass die Sinneseindrücke nach Möglichkeit ausschließlich computergeneriert sein sollen.
- 2) Es sollen möglichst viele Sinne angesprochen werden.

- 3) Ausgabegeräte sollten nicht nur ein eingeschränktes Sichtfeld bieten, sondern den Anwender vollständig umgeben.
- 4) Zudem sollten Ausgabegeräte eine hohe Auflösung und eine qualitativ hochwertige Farbdarstellung, also eine möglichst „lebendige“ Darstellung bieten.

Tabelle 7 stellt einen Vergleich zwischen VR und konventioneller Computergrafik an.

Tabelle 7: Vergleich von konventioneller Computergrafik zu Virtual Reality [27]

3D-Computergrafik	Virtual Reality
Rein visuelle Präsentation	Multimodale Präsentation (d.h. es werden gleichzeitig mehrere Sinnesmodalitäten angesprochen, z.B. gleichzeitig visuell, akustisch und haptisch)
Präsentation nicht notwendigerweise zeitkritisch	Echtzeitdarstellung
Betrachterunabhängige Präsentation (exozentrische Perspektive)	Betrachterabhängige Präsentation (egozentrische Perspektive)
Statische Szene oder vorberechnete Animation	Echtzeitinteraktion und -simulation
2D-Interaktion (Maus, Tastatur)	3D-Interaktion (Körperbewegung, Hand-, Kopf- u. Körpergestik) + Spracheingabe
Nicht-immersive Präsentation	Immersive Präsentation

Head Mounted Displays (HMD), wie in Abbildung 34 zu sehen bieten demnach eine immersive Darstellung, da die Eindrücke, die ein Benutzer wahrnimmt, praktisch ausschließlich vom Computer generiert werden. Als immersive VR-Systeme werden also meist Systeme auf Basis von HMDs verstanden, während bei Desktop-gebundenen Varianten auch oft von nicht-immersiver VR gesprochen wird. [27]

In Abbildung 35 ist ein beispielhafter Vergleich von immersiven und nicht-immersiven VR-Systemen zu sehen.

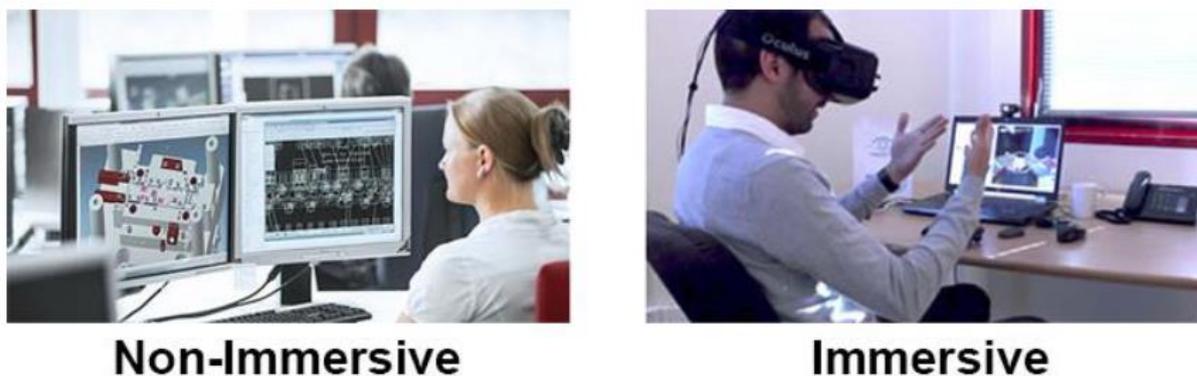


Abbildung 35: Vergleich von immersiver und nicht-immersiver VR [32]

3.3 Augmented Reality

Augmented Reality (abgekürzt AR) bedeutet ins Deutsche übersetzt so viel wie Erweiterte Realität. Es existieren unterschiedlichste, teils widersprüchliche Definitionen von Augmented Reality in der Literatur. Eine in der Wissenschaft etablierte und allgemein anerkannte Definition von AR ist jene von Azuma aus 1997, wonach ein AR-System über drei charakteristische Merkmale verfügt: [27]

- 1) Realität und Virtualität werden kombiniert.
- 2) Es ist interaktiv in Echtzeit.
- 3) Die virtuellen Inhalte sind in 3D registriert.

Das zweite Merkmal dieser Definition trifft auch auf Virtual Reality zu, während die anderen beiden Merkmale eine deutliche Unterscheidung zu VR darstellen. Die Kombination von Realität und Virtualität erfolgt üblicherweise insofern, als dass die Realität um virtuelle, also künstlich erzeugte Inhalte ergänzt wird. So ist es möglich, dass der Anwender des AR-Systems seine reale Umgebung und die ergänzten virtuellen Inhalte stets als ein Ganzes wahrnehmen kann. Das dritte Merkmal dieser Definition ist so zu verstehen, dass die virtuellen Inhalte geometrisch registriert sind, also dass ein virtuelles Objekt einen scheinbar festen Platz in der realen Umgebung hat und diesen auch beibehält, solange es nicht durch eine Interaktion des Benutzers die Position verändert. Die Überlagerung und Registrierung in Echtzeit bedeutet auch, dass ein virtuelles Objekt seine Position auch dann beibehält, wenn der AR-Anwender sich beispielsweise dreht und somit einen anderen Bereich seiner realen Umgebung wahrnimmt. [27]

Augmented Reality lässt sich nach [27] demzufolge etwas vereinfacht folgendermaßen definieren:

AR ist eine um virtuelle Inhalte angereicherte Wahrnehmung der realen Umgebung in Echtzeit, die sich in ihrer Ausprägung und Anmutung soweit wie möglich an der Realität orientiert, sodass im Extremfall (wenn das gewünscht ist) eine Unterscheidung zwischen realen und virtuellen (Sinnes-) Eindrücken nicht mehr möglich ist.

In Abbildung 36 ist ein typisches Beispiel für eine Augmented Reality Anwendung zu sehen. Dabei wird auf einem Ausgabegerät (hier ein Tablet-Computer) die Kameraaufnahme um virtuelle Inhalte, beispielsweise für Reparatur- oder Wartungszwecke ergänzt.

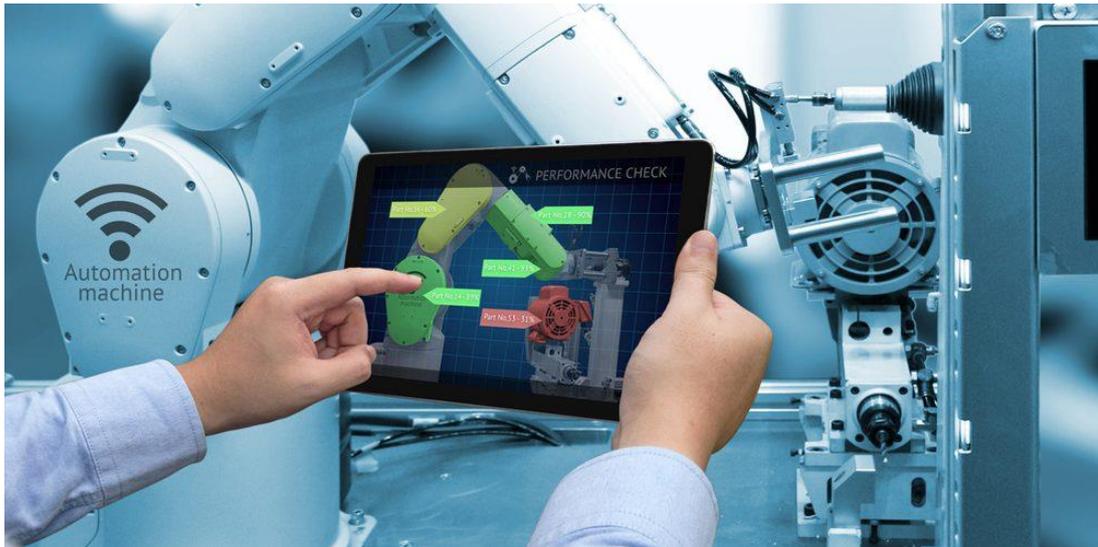


Abbildung 36: Beispiel einer typischen AR-Anwendung [33]

Augmented Reality beschränkt sich in den meisten praktischen Anwendungsfällen auf eine Erweiterung der visuellen Wahrnehmung, kann jedoch, wie auch VR, um weitere sensorische Wahrnehmungen ergänzt werden, beispielsweise auditiver oder haptischer Natur. [27]

Abbildung 37 veranschaulicht die Unterschiede von VR und AR. Dabei ist ersichtlich, dass der Anwender von AR-Systemen sowohl mit der realen Umgebung als auch mit virtuellen Inhalten interagiert. Dabei müssen die reale Umgebung und virtuelle Inhalte nicht strikt voneinander getrennt sein, sondern diese können sich überlagern.

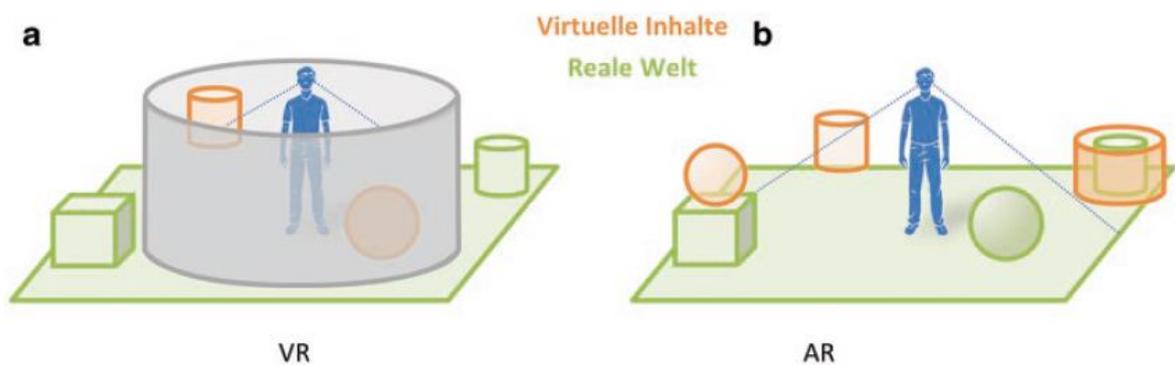


Abbildung 37: Vergleich von Virtual Reality (a) zu Augmented Reality (b) [27]

Beim Vergleich der beiden Konzepte (siehe Tabelle 8) fällt auf, dass einige grundlegende Merkmale die gleichen sind. So werden beispielsweise sowohl bei AR als auch bei VR 3D-

Objekte visualisiert und es finden bei beiden Interaktionen in Echtzeit statt. Auch die Art der Darstellung erfolgt sowohl bei Virtual- als auch bei Augmented Reality in der sogenannten egozentrischen Perspektive, das bedeutet, dass die Darstellung aus der jeweiligen Perspektive des Betrachters erfolgt. Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal ist jedoch, wie oben bereits erwähnt, dass bei VR die Darstellung aller Inhalte rein virtuell erfolgt, während AR die reale Umgebung um virtuell eingebettete Inhalte ergänzt. Demzufolge ist bei Augmented Reality Anwendungen auch keine vollständige Immersion realisierbar. [27]

Table 8: Gegenüberstellung der Merkmale von VR und AR [27]

Virtual Reality	Augmented Reality
Multimodale Präsentation	Multimodale Präsentation
Interaktion und Simulation in Echtzeit	Interaktion und Simulation in Echtzeit
Darstellung in Echtzeit	Darstellung in Echtzeit
Virtuelle 3D-Objekte	Virtuelle 3D-Objekte
Alle Inhalte rein virtuell dargestellt	Kombination von Realität und virtuellen Inhalten
Immersion	Geometrische (3D-) Registrierung
Betrachterabhängige Präsentation (egozentrische Perspektive)	Betrachterabhängige Präsentation (egozentrische Perspektive)
Ortsgebunden	Ortsgebunden oder mobil
Innen	Innen und außen
Virtuelle Beleuchtung	Reale und virtuelle Beleuchtung beeinflussen sich gegenseitig
Nutzerperspektive beliebig skalierbar	Nutzer immer unskaliert (virtuelle Modelle eingeschränkt skalierbar)

4 Wagenkastenvermessung

Nach der Fertigstellung des Rohbaus von Wagenkästen, gleich welcher Art, sind eine Reihe von Messwerten und geometrischen Kennwerten zu erfassen und die Einhaltung der vom Engineering geforderten Toleranzgrenzen zu überprüfen. Hierzu sind im Werk Wien Simmering der Siemens Mobility GmbH aktuell zwei unterschiedliche Messmethoden im Einsatz, einerseits die Vermessung mittels Lasertracker und andererseits die Vermessung mittels Photogrammetrie.

4.1 Aktuell angewandte Messmethoden

4.1.1 Lasertracker

Eine bewährte Methode zur präzisen Bestimmung der Maßgenauigkeit großer Bauteile ist die Vermessung per Lasertracker. Dabei werden die Koordinaten einzelner Messpunkte durch interferometrische Abstandsmessung zwischen Lasertracker und Reflektor bestimmt, siehe auch Beschreibung unter 2.2.4.

4.1.1.1 Verwendetes Messgerät

Der Lasertracker, der derzeit im Werk Wien zur Vermessung der Wagenkästen in Verwendung ist, ist ein Absolute Tracker AT 403 der Firma Leica. Dieser Lasertracker ist durch seine kompakten Abmessungen und seine Portabilität sehr gut für einen Einsatz in der industriellen Messtechnik geeignet. In Abbildung 38 ist gut erkennbar, dass dieses Modell ein externes Interferometer besitzt, welches am Stativ angebracht ist.



Abbildung 38: Leica Absolute Tracker AT 403 (Quelle: Siemens Mobility)

Der Leica Absolute Tracker AT 403 ist ein portables akkubetriebenes Universalmesssystem, bei dem während des laufenden Betriebs die Batterie gewechselt werden kann, was einen ganztägigen kabellosen Betrieb ermöglicht. Bei großvolumigen Messobjekten tritt oft das Problem auf, dass der Laserstrahl während des Messvorgangs unterbrochen wird, was meist einen Eingriff des Benutzers erfordert und so den Messvorgang erheblich verzögern kann. Dies ist der Fall, wenn der Lasertracker sozusagen den „Sichtkontakt“ zum Reflektor verliert. Die integrierte Power Lock Funktion dieses Laser Trackers wirkt dem entgegen, indem der Laserstrahl bei einer Unterbrechung, die sich bei komplexen Messobjekten oft nicht vermeiden lässt, automatisch wiederhergestellt wird, ohne dass der Anwender eingreifen muss. Der Laser Tracker „sucht“ also den Reflektor wieder. [37]



Abbildung 39: Reflektoren für Laser Tracker [37]

Das Gehäuse ist nach der Schutzklasse IP54 zertifiziert, was einen Einsatz auch in schwierigen Umgebungsbedingungen ermöglicht und vor Staubpartikeln und Feuchtigkeit schützt. Der Einsatz des AT 403 ist bei Betriebstemperaturen zwischen -15°C und 45°C möglich. Für sehr große Messobjekte, wie sie etwa Schienenfahrzeuge darstellen, ist dieser Lasertracker aufgrund seines sehr großen Messbereiches gut geeignet. Bei Reflektormessung (Funktionsweise siehe Beschreibung unter 2.2.4.2) beträgt der maximal mögliche Messbereich im Durchmesser 320 m, wobei der Mindestabstand zwischen Lasertracker und Reflektor etwa 0,8 m betragen muss. In der nachfolgenden Abbildung 40 sind die wichtigsten Technischen Daten des Leica AT 403 zusammengefasst. [37]

TECHNISCHE DATEN

Genauigkeit

Reflektor* $U_{(k,y,z)} = \pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$
($\pm 0.0006'' + 0.000072''/\text{ft}$)

Leica B-Probe* $U_{(k,y,z)} = \pm 0.2\text{mm} (\pm 0.008'')$

* Alle Angaben zur Genauigkeit beziehen sich auf eine maximal zulässige Abweichung (MPE) und wurden gemäß ASME B88.4.1 8-2008 und ISO 10360-10:2016 unter Verwendung von Leica 1,5" Rotatingreflektoren berechnet, sofern nicht anders angegeben.

Absolute Distanzgenauigkeit $\pm 10 \mu\text{m} (\pm 0.00039'')$

Absolute Winkelgenauigkeit
(einschließlich Nivellierfunktion) $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$
($\pm 0.0006'' + 0.000072''/\text{ft}$)

Umgebungsbedingungen

Staub/Wasser IP54 (IEC 60529)

Betriebstemperatur $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+45 \text{ }^\circ\text{C}$

Relative Luftfeuchtigkeit max 95%
(nicht kondensierend)

Umgebungsüberwachung Temperatur, Luftdruck und
-feuchtigkeit

Lasersicherheit

Produkt der Laserklasse 2
gemäß IEC 60825-1, zweite
Auflage (2014-05)

Messbereich

Typisches Messvolumen mit Reflektor (\varnothing) 320 m

Mindestabstand bei Messung mit Reflektor $< 0.8 \text{ m}$

Schnittstellen

Kabel TCP/IP (Cat5)

Kabellos WLAN (IEEE 802.11n)

Energieversorgung

Intern Lithium-Ionen-Akku mit 8
Stunden Laufzeit (typisch)

Extern AC-Netzteil

Optional Stromversorgung über
Ethernet (PoE+)

Allgemeines

Übersichtskamera IR-optimiertes Bild 4:3
 \approx Sichtfeld 10°

Fernbedienung Infrarot, 4 Tasten
Leica B-Probe

Leica B-Probe

Messvolumen (\varnothing) 20 m

Versetzungsvolumen(\varnothing) bis zu 320 m

Mindestabstand bei der Messung 2.5 m

Staub/Wasser IP50

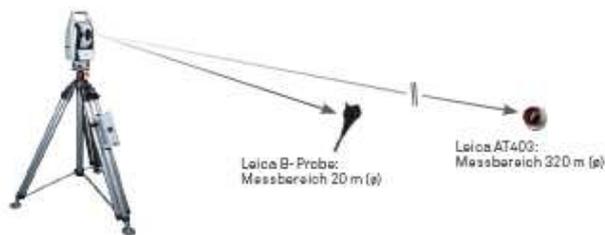


Abbildung 40: Technische Daten des Leica Laser Trackers AT 403 [37]

4.1.1.2 Messaufbau und Messablauf

Vor Beginn der Messung muss der Laser Tracker mit 4 definierten Referenzpunkten, die auf dem Boden fixiert sind, kalibriert werden. Die Referenzpunkte sind am Messplatz rund um den zu vermessenden Wagenkasten fest im Boden fixiert und dienen zur Aufnahme der Reflektorkugel, mit deren Hilfe der Laser Tracker kalibriert wird, siehe folgende Abbildung.



Abbildung 41: Referenzpunkt zur Kalibrierung [38]

Nach der Kalibrierung des Laser Trackers werden etwa 200 definierte Punkte am Wagenkasten gemessen, um die Einhaltung diverser Toleranzgrenzen zu überprüfen. Hierbei wird nach einem vorgegebenen Messplan vorgegangen und der Reflektor an den jeweiligen Messpunkt gehalten, während der Laser Tracker die Koordinaten des Punktes ermittelt. Die genaue Anzahl an Messpunkten und die zu messenden Merkmale hängen stark von der Art des zu messenden Wagenkastens ab. Wie in Kapitel 4 erwähnt fertigt Siemens Mobility im Werk Wien vier verschiedene Fahrzeugtypen, nämlich U-Bahnen, Straßenbahnen, Automated People Mover (fahrerlose Transportsysteme) und Reisezugwagen, sogenannte Passenger Coaches. In Abbildung 42 ist links der Messaufbau eines Metro-Wagenkastens am Messplatz für die Vermessung per Laser Tracker zu sehen und rechts die Reflektorkugel zur Vermessung eines definierten Punktes.



Abbildung 42: Messaufbau (links) und Reflektor (rechts) zur Wagenkastenvermessung mittels Laser Tracker (Quelle: Siemens Mobility)

Durch das Positionstracking des Laser Trackers, das in 2.2.4.2 beschrieben ist, verfolgt der Messkopf stets den Reflektor, wenn dieser von einem Messpunkt zum nächsten bewegt wird und bestimmt die exakten Koordinaten eines Punktes automatisch, sobald der Laserstrahl exakt ins Zentrum des Reflektors ausgerichtet ist. Die aufgenommenen Messwerte können anschließend im Auswertungsprogramm PolyWorks verarbeitet und ausgewertet werden. Es ist beispielsweise möglich, die aufgenommenen Messpunkte über das 3D CAD Modell zu legen und so zu überprüfen, ob die jeweiligen Messwerte im Toleranzbereich liegen oder nicht. Abbildung 43 zeigt einen solchen Toleranzabgleich durch Überlagerung der Messpunkte und dem CAD Modell an einer Baugruppe eines Wagenkastens.

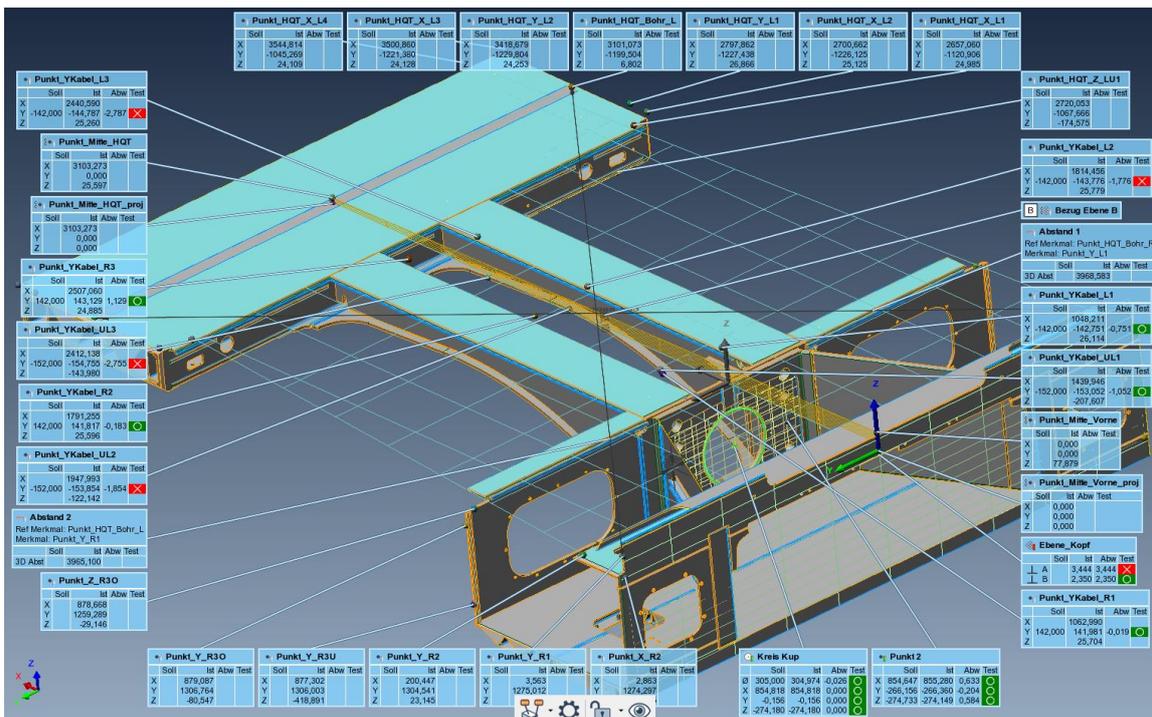


Abbildung 43: Toleranzabgleich in PolyWorks (Quelle: Siemens Mobility)

4.1.1.3 Eignung der Messdaten zur Erstellung von Schulungsunterlagen

Der Laser Tracker AT 403 von Leica Hexagon liefert hochgenaue Messergebnisse von einzelnen definierten Messpunkten und ist daher zur Vermessung des Rohbau Wagenkastens bestens geeignet. Es werden von diesem Messsystem allerdings bei der Messung keine fotografischen Aufnahmen gemacht, sodass die Verwendung des AT 403 zur Erstellung Fertigungs- oder Montagebegleitender Aufnahmen im Rahmen eines Virtual Maintenance Trainings nicht möglich ist.

4.1.2 Photogrammetrie

Eine weitere Methode zur Überprüfung der Toleranzgrenzen von Rohbau Wagenkästen im Siemens Mobility Werk Wien ist die Vermessung des Wagens mittels Photogrammetrie. Die Technologie, die diesem Messverfahren zugrunde liegt, ist unter Punkt 2.2.3 ausführlich beschrieben.

4.1.2.1 Verwendetes Messgerät

Im Siemens Mobility Werk Wien ist die photogrammetrische Messkamera INCA 3 von Geodetic Systems (siehe Abbildung 44) zur Vermessung von Rohbau-Wagenkästen im Einsatz.



Abbildung 44: Messkamera INCA 3 von Geodetic Systems [39]

Die INCA 3 von Geodetic Systems ist mit einem hochauflösenden CCD Sensor sowie einem leistungsstarken integrierten Computer ausgestattet und ermöglicht hochgenaue photogrammetrische Messungen selbst unter rauen Umgebungsbedingungen. Die Kamera ist aufgrund ihrer leichten und sehr robusten Bauweise besonders zur Vermessung sehr großer Bauteile im industriellen Umfeld geeignet. Sie wird neben der Schienenfahrzeugbranche auch gerne von Flugzeugherstellern sowie im Schiffbau angewandt. [40]

4.1.2.2 Messaufbau und Messablauf

Der zu vermessende Wagenkasten steht aufgebockt auf einem speziell für photogrammetrische Messungen vorbereiteten Messplatz. Wie bei der Vermessung mittels Laser Tracker liegt auch der photogrammetrischen Vermessung ein Messplan des jeweiligen Wagenkastens zugrunde, in dem beschrieben ist, welche Merkmale bei der Messung zu überprüfen sind. Anhand dieses Messplans werden vom Messtechniker die Referenzmarken, die zur Messung mittels Photogrammetrie (siehe Beschreibung unter Punkt 2.2.3) notwendig sind, an genau definierten Punkten am Wagenkasten aufgebracht. Je nach Art des Fahrzeugs werden etwa 250 bis 300 Markierungen aufgebracht. In Abbildung 45 sind einige solcher Messmarken zu sehen, die zu Vermessung eines U-Bahn Wagenkastens aufgebracht wurden.



Abbildung 45: Referenzmarken zur photogrammetrischen Vermessung (Quelle: Siemens Mobility)

Nachdem die Markierungen aufgebracht wurden, wird der Wagenkasten mithilfe der Messkamera aus verschiedenen Perspektiven erfasst. Wichtig dabei ist, wie unter 2.2.3 beschrieben, dass möglichst viele Referenzmarken in mehreren Aufnahmen, also aus

mehreren Kamerapositionen sichtbar sind. Insgesamt werden so je nach Größe des Messobjekts Aufnahmen aus etwa 400 verschiedenen Positionen gemacht.

Anschließend werden die Aufnahmen mit dem Programm V-Stars von Geodetic Systems ausgewertet und die Messwerte an den Referenzpunkten mit den Sollwerten aus dem Messplan abgeglichen und so die Einhaltung der geforderten Toleranzgrenzen überprüft. In der folgenden Abbildung aus dem Auswertungsprogramm V-Stars ist zu sehen, aus welcher Kameraposition (blau dargestellt) welche Markierungen erfasst wurden.

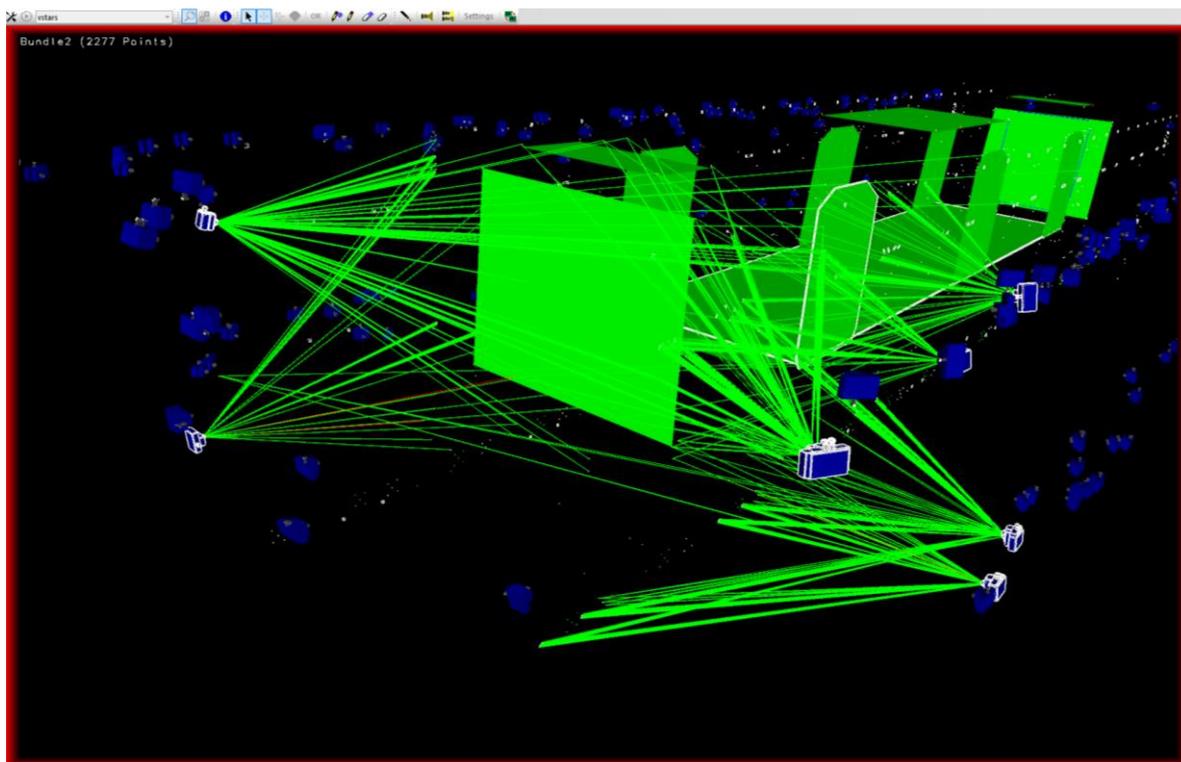


Abbildung 46: *Verschiedene Kamerapositionen bei der photogrammetrischen Vermessung eines Wagenkastens (Quelle: Siemens Mobility)*

4.1.2.3 Eignung der Messdaten zur Erstellung von Schulungsunterlagen

Die photogrammetrische Messkamera INCA 3 von Geodetic Systems in Verbindung mit dem Auswertungsprogramm V-Stars stellt neben der Vermessung mittels Laser Tracker eine weitere Möglichkeit zur hochgenauen Erfassung von Messwerten und Geometriedaten dar. Die von der Messkamera erzeugten Aufnahmen sind allerdings, wie in Abbildung 47 zu erkennen, nicht zur Verwendung als Bildmaterial zur Erstellung eines *Virtual Maintenance Trainings* geeignet. Hierfür wäre eine höhere Auflösung sowie Farbaufnahmen erforderlich.

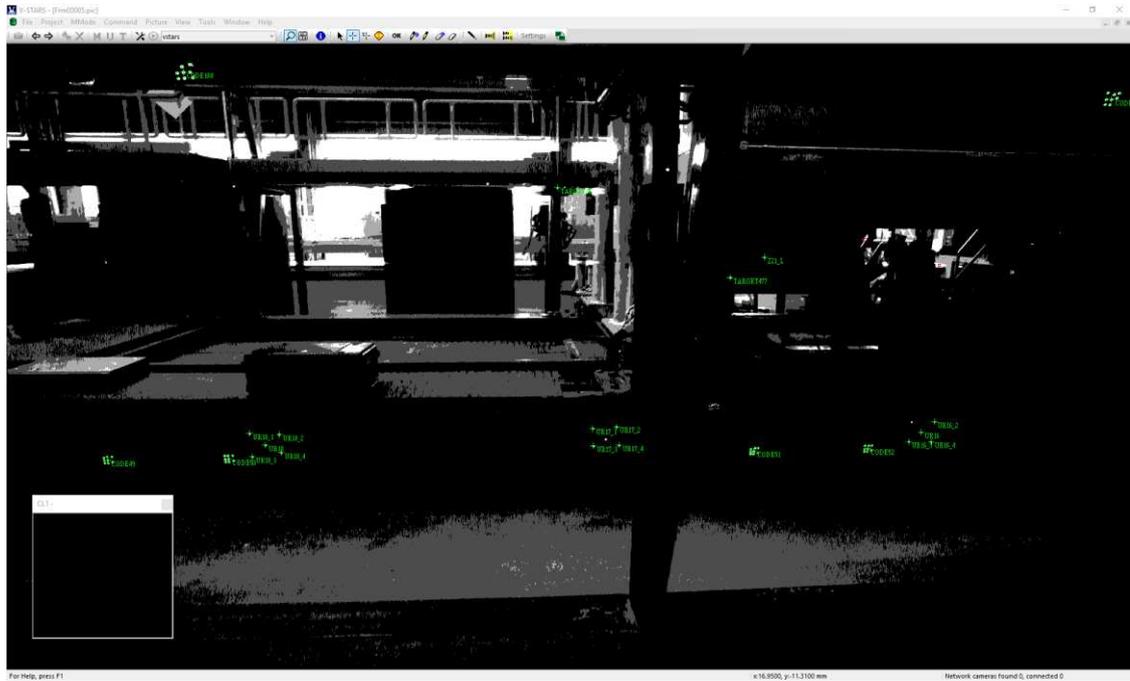


Abbildung 47: Einzelne Kameraaufnahme mittels INCA 3 von Geodetic Systems (Quelle: Siemens Mobility)

5 Virtual Maintenance Training

5.1 Problemstellung und Ausgangssituation

Wie eingangs erwähnt, besteht der Wunsch eines Kunden der Siemens Mobility GmbH nach einer Konzeptausarbeitung für ein *Virtual Maintenance Training*, also einer virtuellen Schulungsunterlage als Hilfestellung zur Schulung der Wartungsmitarbeiter. Eine solche virtuelle Schulungsunterlage soll möglichst immersiv sein, das heißt, der Anwender soll sich virtuell durch das Fahrzeug bewegen und zu jedem gewünschten Detail navigieren können. Hintergrund für den Wunsch nach einem solchen *Virtual Maintenance Training* ist, dass die einzelnen Abschnitte der Montage, also vom Rohbau des Wagenkastens bis zum fertigen Innenausbau, dokumentiert und digital bereitgestellt werden können. Dadurch soll es ermöglicht werden, dass ein Wartungsmitarbeiter in der virtuellen Schulungsunterlage nachsehen kann, was sich wo im Zug befindet. Ein Beispiel hierfür wäre etwa, dass man in der virtuellen Umgebung bei einem Schaltschrank im Zug nachsehen kann, was sich hinter der Abdeckung verbirgt und im Idealfall auch gleich die zugehörigen Wartungspläne oder Anleitungen hinterlegen kann. Das Programm für das *Virtual Maintenance Training* soll auf verschiedenen Ausgabegeräten gestartet werden können. In einem ersten Schritt mit Desktop sowie Tablet und zukünftig im Idealfall mit Ausgabegeräten, die einen höheren Immersionsgrad bieten, wie z.B. eine VR-Brille.

Im Hinblick auf verwendete Technologien zur Umsetzung wurden seitens des Kunden keine konkreten Anforderungen, Einschränkungen oder sonstige Vorgaben gestellt. Die Herangehensweise seitens Siemens Mobility ist, dass das Konzept und die zugrundeliegende Technologie jedoch nicht nur auf einen einzelnen Kunden zugeschnitten sein soll, sondern sich auch auf alle anderen aktuellen und zukünftigen Schienenfahrzeugprojekte anwenden lässt. Das hierfür eingesetzte Aufnahmesystem, beispielsweise ein 3D-Laserscanner soll wiederum im Idealfall, aber nicht notwendigerweise, auch in anderen Bereichen der Fertigung, wie etwa der Wagenkastenvermessung eingesetzt werden können.

5.2 Auswahl geeigneter Technologien

Die im Werk Wien der Siemens Mobility GmbH bereits eingesetzten Systeme zur berührungslosen Vermessung der Wagenkästen bieten, wie in Kapitel 5 bereits festgestellt, nicht die notwendigen Technologien, um als Basis zur Erstellung virtueller Schulungsunterlagen zu dienen. Grundvoraussetzung hierfür ist die Möglichkeit, hochauflösende 360°-Aufnahmen aus dem Wageninneren machen zu können sowie die Erstellung einer Punktwolke. Eine Punktwolke im Hintergrund ermöglicht das Setzen von Markierungen an bestimmten Punkten, sogenannten Geo Tags, um dort beispielsweise Anleitungen, Detailaufnahmen, Wartungspläne oder ähnliches hinterlegen zu können.

Nach eingehender Recherche der verfügbaren Technologien zur dreidimensionalen Oberflächenerfassung (siehe auch Kapitel 2.2) sowie Gesprächen mit Experten im Bereich der industriellen Messtechnik stellte sich die Verwendung eines Terrestrischen 3D-Laserscanners als einzig praxistaugliche Methode dar. Die technologischen Grundlagen Terrestrischer Laserscanner sind unter Punkt 2.2.5 ausführlich erklärt. Diese Messsysteme erstellen einerseits die zum Setzen von Geo Tags wichtige Punktwolke des gescannten Objekts. Andererseits sind einige aktuelle hochwertige 3D-Laserscanner zusätzlich mit hochauflösenden Kameras ausgestattet, die während des Scanvorgangs Bildaufnahmen erstellen und diese zu einem 360°-Bild zusammenfügen. Somit sind die beiden Grundvoraussetzungen erfüllt, um einen virtuellen Rundgang durch das Fahrzeug zu ermöglichen.

5.2.1 3D-Laserscanner

Im Folgenden werden drei verschiedene Terrestrische 3D-Laserscanner unterschiedlicher Preiskategorien der Firma Leica Geosystems verglichen. Alle Systeme eint die Tatsache, dass sie sowohl Punktwolken als auch 360°-Aufnahmen des gescannten Wagenkastens erstellen können. Auch bieten alle drei Laserscanner die Möglichkeit, die aufgenommenen Scan-Daten und Panoramabilder anschließend im Leica-eigenen Programm *Cyclone REGISTER 360* zu bearbeiten und so für Schulungszwecke aufzubereiten.

5.2.1.1 Leica RTC360

Der akkubetriebene *RTC360* von Leica Geosystems ist ein Hochgeschwindigkeits-3D-Laserscanner der neuesten Generation, der nach dem Impulslaufzeitverfahren (ToF – Time

of Flight) arbeitet, welches unter 2.2.5.2 ausführlich beschrieben ist. Drei integrierte Kameras ermöglichen die Erstellung von sphärischen 360°-Aufnahmen mit einer Auflösung von 432 Megapixeln.



Abbildung 48: Leica RTC360 [41]

Die gewünschte Auflösung der Scans ist vom Benutzer wählbar und beträgt 3, 6 oder 12 mm auf eine Entfernung von 10 m. Bei einer eingestellten Auflösung von 6 mm dauert ein kompletter Scan inklusive 360°-Bild weniger als drei Minuten. Pro Sekunde werden mit diesem Scanner bis zu 2 Mio Punkte erfasst, wobei die Reichweite bis zu 130 m beträgt. Der Abstand zum Objekt, welches erfasst werden soll, sollte allerdings 0,5 m nicht unterschreiten. Die Steuerung des Laserscanners erfolgt wahlweise über einen integrierten Touchscreen seitlich am Scanner oder alternativ per Tablet über die zugehörige *Leica Cyclone FIELD360 App*. [42]

5.2.1.2 Leica BLK360

Auch der *BLK360* ist ein akkubetriebener Hochgeschwindigkeits-Laserscanner mit integriertem hochauflösendem Kamerasystem, welches die Erstellung von sphärischen 360°-Aufnahmen mit einer Auflösung von 150 Megapixeln ermöglicht. Im Gegensatz zum *RTC360*, der ungefähr 5 kg wiegt, ist dieser 3D-Laserscanner mit einem Gewicht von etwa 1 kg allerdings wesentlich leichter, was einen Einsatz in häufig wechselnden Scan-Positionen erleichtert. Der Mindestabstand zum Messobjekt beträgt 0,6 m und die maximale Reichweite 60 m. Der Scanvorgang erfolgt mit 360000 Punkten in der Sekunde und dauert für einen Rundum-Scan inklusive 360°-Panoramabild unter drei Minuten. Die Erreichbare Genauigkeit

liegt bei 4 mm auf 10 m Entfernung sowie 7 mm auf 20 m Entfernung. Die Steuerung des Laserscanners erfolgt per Tablet über die *Leica Cyclone FIELD360 App*. [43], [44]



Abbildung 49: Leica BLK360 [43]

5.2.1.3 Leica BLK2GO

Der *BLK2GO* von Leica ist ebenfalls ein 3D-Laserscanner, allerdings mit dem wesentlichen Unterschied zu den beiden anderen vorgestellten Modellen, dass er handgeführt ist und während des Scanvorgangs nicht örtlich gebunden auf einem Stativ steht. Der Anwender geht also mit diesem Scanner in der Hand durch den Wagen, während die Punktwolke sowie die Panoramabilder erzeugt werden. Der Abstand zwischen Scanner und zu erfassendem Objekt sollte nicht weniger als 0,5 m und maximal 20 m betragen. Die Messrate beträgt bei diesem Modell 420000 Punkte in der Sekunde bei einer erreichbaren Genauigkeit je nach Abstand zwischen 6 und 15 mm. [45]



Abbildung 50: Leica BLK2GO [45]

Sphärische Panoramabilder werden von einer 4,8 Megapixel Kamera erzeugt, wobei bei Bedarf auch Detailaufnahmen mit einer ebenfalls integrierten Kamera mit 12 Megapixeln erzeugt werden können. Der Scannvorgang wird über die Taste am Scanner gestartet und kann währenddessen auch in der zugehörigen *BLK2GO Live App* am Smartphone mitverfolgt werden. Wird an einer bestimmten Position eine Detailaufnahme gewünscht, kann diese mit der integrierten 12 Megapixel-Kamera erzeugt werden und kann anschließend im Programm *Cyclone REGISTER 360* an der entsprechenden Stelle mittels Geo Tag angefügt werden. [45], [46]

Der große Nachteil des *BLK2GO* gegenüber den beiden anderen vorgestellten 3D-Laserscannern *BLK360* und *RTC360* ist, dass die Auflösung der Panoramabilder für eine praxiserrechte Verwendung in virtuellen Schulungsunterlagen zu gering ist. Details sind nicht besonders gut erkennbar, wie in der folgenden Aufnahme ersichtlich ist, die in einem U-Bahn Innenraum erzeugt wurde. Somit kommt der *BLK2GO* als Laserscanner zur Erstellung des *Virtual Maintenance Trainings* nicht infrage.

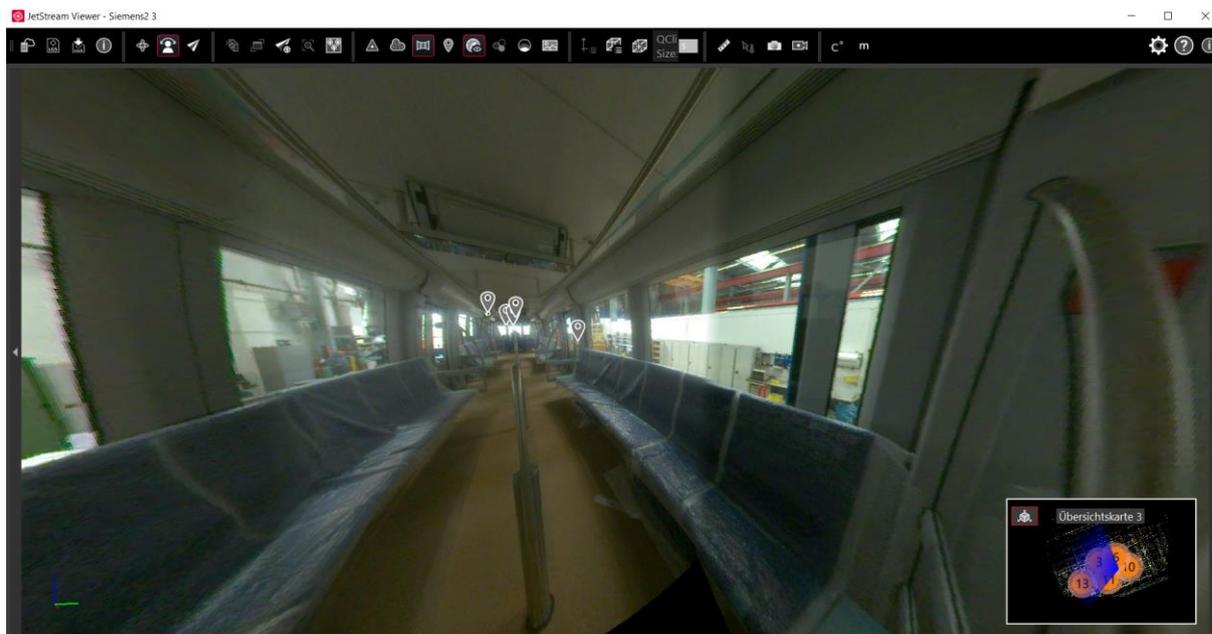


Abbildung 51: Aufnahme aus einem Metro-Innenraum mittels Leica BLK2GO (Quelle: Siemens Mobility)

5.2.2 Testaufnahmen und visuelle Umsetzung

Aus dem Vergleich der unterschiedlichen 3D-Laserscanner in 6.2.1 ergibt sich, dass sowohl der *RTC360* als auch der *BLK360* eine praxistaugliche Technologie zur Erstellung von Aufnahmen als Basis für virtuelle Schulungsunterlagen bieten, während der handgeführte Scanner *BLK2GO* aufgrund zu geringer Auflösung der 360°-Aufnahmen hierfür nicht geeignet ist.

Je nach gewünschtem Detaillierungsgrad sollte alle 2 – 3 Meter im Wagenkasten ein Standpunkt definiert werden, von dem aus ein Scanvorgang gestartet sowie jeweils ein 360°-Panoramabild erzeugt wird. Die erzeugten Punktwolken der Einzelscans können direkt anschließend über die zugehörige *Leica Cyclone FIELD360 App* per Tablet zusammengefügt werden, um so eine zusammenhängende Punktwolke mit überlagerten Panoramabildern zu erzeugen.

Um die generierten 3D-Daten und Bildaufnahmen für die Verwendung in einem *Virtual Maintenance Training* aufzubereiten, bedarf es einer Anwendung, die es ermöglicht, virtuell durch das gescannte Fahrzeug zu gehen. Außerdem soll es möglich sein, wie unter 6.1 und 6.2 beschrieben, dass an beliebigen Punkten Geo Tags gesetzt und somit wichtige Informationen wie Wartungsanleitungen, Detailaufnahmen oder ähnliches hinterlegt werden können. Leica bietet eine solche Technologie in Form des Programms *JetStream Viewer*.

Folgende Abbildungen aus dem Innenraum von U-Bahn Wagenkästen wurden mit dem oben beschriebenen 3D-Laserscanner *Leica RTC360* in der Montagehalle des Siemens Mobility Werks Wien erzeugt und mittels *Leica JetStream Viewer* visualisiert.

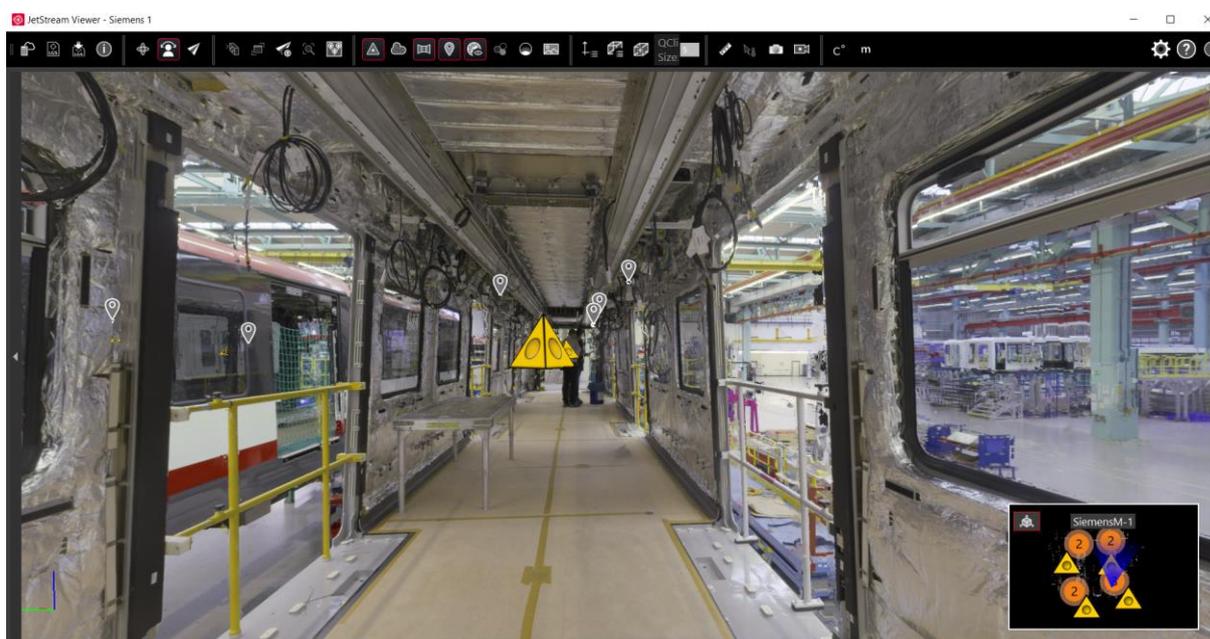


Abbildung 52: Sphärisches Panoramabild aus einem Fahrzeuginnenraum (Quelle: Siemens Mobility)

Die gelben pyramidenförmigen Symbole stellen jeweils einen Standpunkt des Laserscanners dar, von welchem aus ein Scan durchgeführt sowie eine 360°-Aufnahme erzeugt wurde. Durch Klicken auf das Symbol kann der Anwender jeweils zum nächsten Standpunkt weitergehen. Rechts unten in Abbildung 52 ist eine Navigationsansicht zu sehen, wo ersichtlich ist, an welcher Position im Wagen man sich gerade befindet. Das Programm bietet auch die Möglichkeit einer Draufsicht auf den gesamten zusammenhängenden gescannten Bereich, wie in Abbildung 53 dargestellt. Die gelben Symbole stellen wiederum die einzelnen Standpunkte des Laserscanners dar.

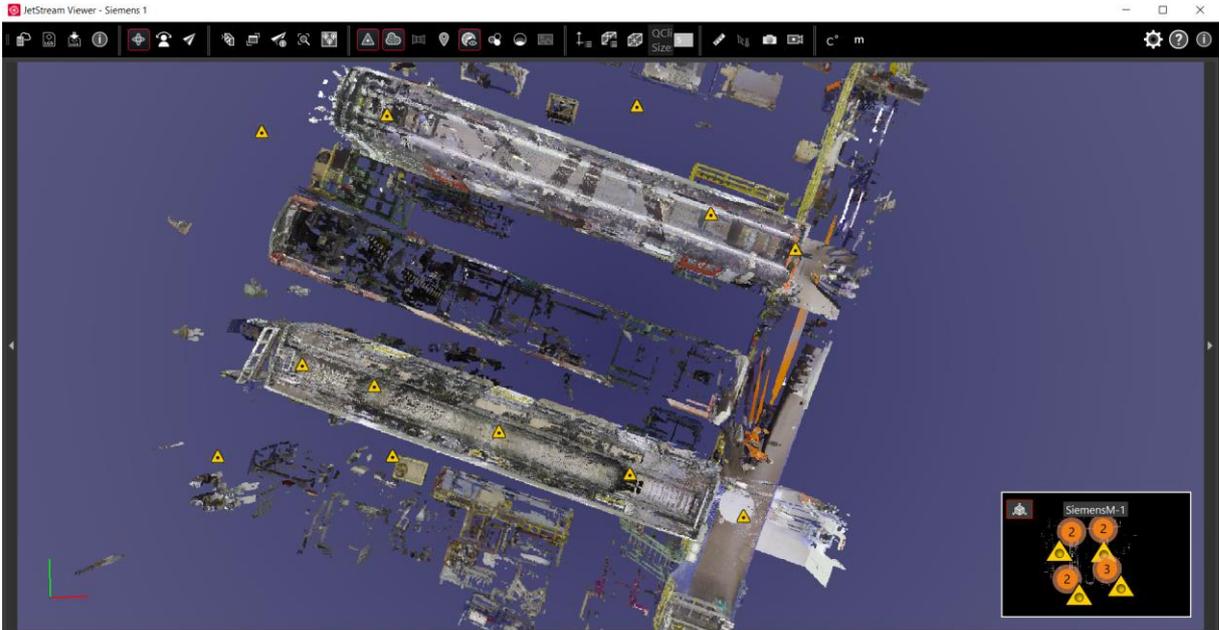


Abbildung 53: gesamter zusammenhängender Scanbereich in der Draufsicht (Quelle: Siemens Mobility)

In folgender Abbildung ist am Beispiel eines Schaltschranks zu erkennen, dass an beliebigen Stellen Geo Tags an die Punktwolke gehängt werden können (graue Symbole) um beispielsweise für Wartungsmitarbeiter wichtige Informationen wie Schaltpläne, Detailaufnahmen oder auch Anleitungsvideos zu hinterlegen.

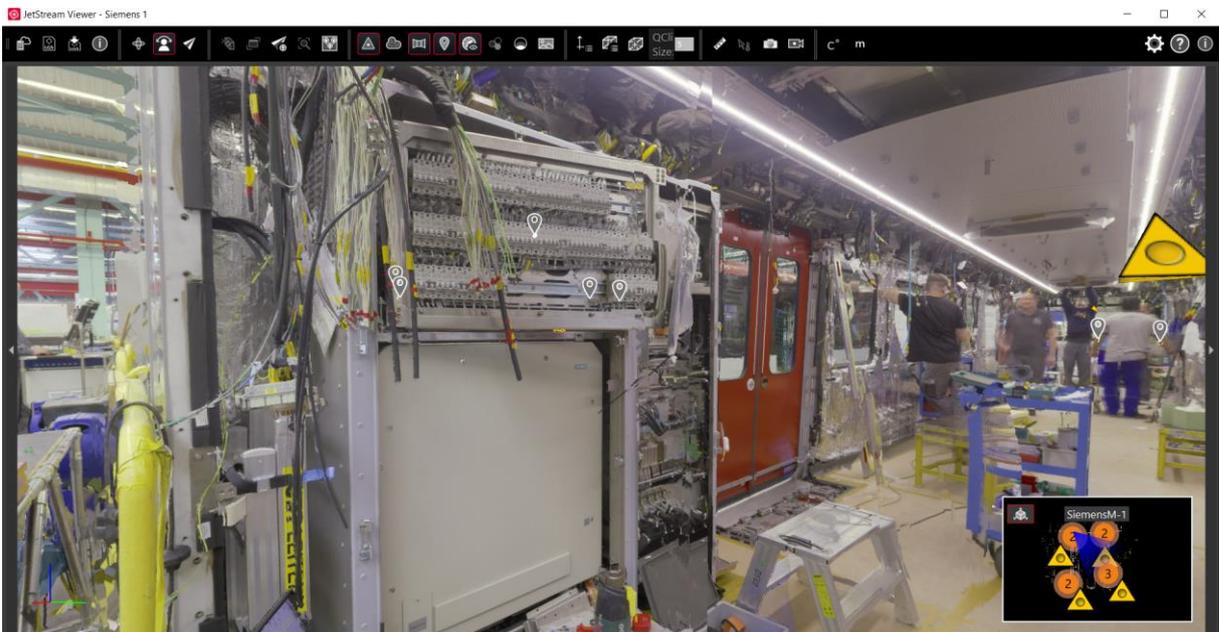


Abbildung 54: Geo Tags zur Hinterlegung wichtiger Informationen (Quelle: Siemens Mobility)

Durch Anklicken des Tags öffnet sich ein Informationsfenster (siehe Abbildung 55), über das man zur hinterlegten Datei, zum Beispiel einer Wartungsanleitung, gelangt.

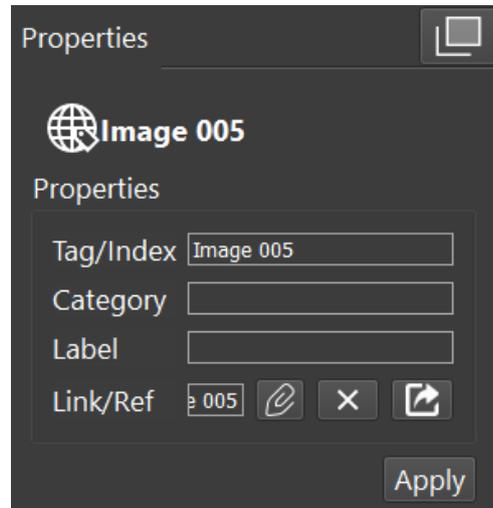


Abbildung 55: Informationsfenster zu einem Geo Tag (Quelle: Siemens Mobility)

Wie in den Abbildungen zu erkennen, ist die Auflösung und der Detaillierungsgrad der Aufnahmen sehr hoch, was für die Verwendung als virtuelle Schulungsunterlage vorteilhaft ist. Dadurch und aufgrund der Tatsache, dass Anwender sich mithilfe des hier vorgestellten Grobkonzepts virtuell durch das Fahrzeug bewegen und hinterlegte Informationen in Form der beschriebenen Geo Tags abrufen können, sind die wesentlichen Anforderungen, die der Kunde an ein solches *Virtual Maintenance Training* stellt, erfüllt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Nach einer umfangreichen Recherche zu den verschiedenen Möglichkeiten der berührungslosen dreidimensionalen Oberflächenerfassung wurde versucht, einen kurzen Überblick über die Grundlagen der Virtuellen und Erweiterten Realität zu geben.

Die Technologien der Wagenkastenvermessung, die im Werk Wien der Siemens Mobility GmbH verwendet werden, wurden eingehend untersucht und im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt. Dabei wurde überprüft, ob die von den vorgestellten Messgeräten, einerseits ein Lasertracker, andererseits eine photogrammetrische Messkamera, eingesetzte Technologie auch die Möglichkeit bietet, montagebegleitende Aufnahmen zu erzeugen, die für virtuelle Schulungsunterlagen verwendet werden können. Keines der beiden Messsysteme bietet jedoch die Möglichkeit zur Erzeugung einer Punktwolke sowie zur Aufnahme von hochauflösenden 360°-Panoramabildern, die für einen virtuellen Rundgang durch das Fahrzeug Voraussetzung wären.

Das im Anschluss vorgestellte Konzept ist nur ein erster Schritt zur Implementierung eines *Virtual Maintenance Trainings*, welches der Kunde eines U-Bahn Projekts zur Schulung seiner Wartungsmitarbeiter wünscht. Dabei wurden geeignete 3D-Laserscanner-Systeme vorgestellt, die sowohl die Erstellung von Punktwolken als auch die Aufnahme hochauflösender sphärischer Bilder ermöglichen. Auf Basis der Testaufnahmen, die während der Montage des Innenausbaus eines Wagenkastens erzeugt wurden, wurde ein Programm vorgestellt, das die Möglichkeit bietet, virtuell durch das Fahrzeug zu gehen sowie an gewünschten Positionen Detailinformationen zu hinterlegen.

Somit wurde eine gute Basis geschaffen für künftige Weiterentwicklungen, insbesondere, was die Einbindung der Aufnahmen in immersive Ausgabegeräte wie VR-Brillen betrifft. Auch das Finden einer Möglichkeit, die verschiedenen Montageabschnitte des Innenausbaus in einem Programm übereinanderzulegen und so dem Anwender die Möglichkeit zu bieten, Schicht für Schicht „aufzuklappen“, um jeweils darunterliegende Elemente zu erkennen, wird Aufgabe zukünftiger Recherchen und Entwicklungen sein.

7 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: U-Bahn Wien "X-Wagen" [36].....</i>	11
<i>Abbildung 2: Gegenüberstellung weißes (oben) / gefiltertes (mitte) Glühlampenlicht und Laserlicht (unten) [2].....</i>	13
<i>Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Lasers [3]</i>	14
<i>Abbildung 4: 3D-Oberflächenmessung mittels Lichtschnittverfahren [5]</i>	16
<i>Abbildung 5: Prinzip des Lichtschnittverfahrens [1].....</i>	17
<i>Abbildung 6: Prinzip der Lasertriangulation [1].....</i>	18
<i>Abbildung 7: Beispiel einer Punktwolke [8].....</i>	18
<i>Abbildung 8: Beispiel einer vernetzten Punktwolke [9].....</i>	19
<i>Abbildung 9: Vermessung unterschiedlicher Oberflächen: a) dunkle Metalloberfläche, b) verschiedene Farben, c) halbdurchsichtige Oberfläche [1]</i>	20
<i>Abbildung 10: Polygonnetz vor (links) und nach (rechts) einer Reduzierung der Punktemenge [1].....</i>	21
<i>Abbildung 11: Prinzip der Phasenmessenden Streifenprojektion [10].....</i>	22
<i>Abbildung 12: Gray-Code der Zahlen 0 bis 15 [11]</i>	23
<i>Abbildung 13: Decodierung einer Pixelkoordinate aus aufeinanderfolgenden Gray-Code-Bildern [3]</i>	24
<i>Abbildung 14: Frequenzcodiertes Streifenmuster [11].....</i>	25
<i>Abbildung 15: Örtlich codierte Streifen [11].....</i>	25
<i>Abbildung 16: Einsatzbeispiel der Photogrammetrie [7].....</i>	27
<i>Abbildung 17: Aufbau und Messprinzip der Photogrammetrie [7].....</i>	28
<i>Abbildung 18: Parameter der inneren (links) und äußeren (rechts) Orientierung [1].</i>	29
<i>Abbildung 19: Beispiel eines Lasertrackers (Leica AT960) [12]</i>	30
<i>Abbildung 20: Beispiel eines Reflektors für Lasertracker (Quelle: Siemens Mobility)</i>	31

<i>Abbildung 21: Messprinzip eines Lasertrackers [16]</i>	32
<i>Abbildung 22: Lasertracker mit berührendem Messkopfsystem [7]</i>	33
<i>Abbildung 23: Lasertracker mit berührungslosem Messkopfsystem [7]</i>	34
<i>Abbildung 24: Beispiel einer Oberflächenvermessung mit dem berührungslosen mobilen Messkopfsystem Leica T-Scan [18]</i>	35
<i>Abbildung 25: Beispiel eines terrestrischen Laserscanners (Surphaser 100 HSX) [19]</i>	36
<i>Abbildung 26: Schematische Darstellung eines Laserscanners [21]</i>	37
<i>Abbildung 27: Aufbau eines terrestrischen Laserscanners [22]</i>	38
<i>Abbildung 28: Punktwolke eines Terrestrischen Laserscans [24]</i>	39
<i>Abbildung 29: Prinzip des Impulslaufzeitverfahrens [1]</i>	40
<i>Abbildung 30: Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens [1]</i>	41
<i>Abbildung 31: Reflexionseigenschaften von Oberflächen: (a) diffuse Reflexion, (b) spiegelähnliche Reflexion, (c) Retroreflexion [26]</i>	42
<i>Abbildung 32: head-mounted Display (HMD) von Ivan Sutherland 1968 [28]</i>	43
<i>Abbildung 33: Reality-Virtuality-Kontinuum [30]</i>	45
<i>Abbildung 34: Beispiel einer VR-Brille (Samsung Gear VR) [31]</i>	46
<i>Abbildung 35: Vergleich von immersiver und nicht-immersiver VR [32]</i>	47
<i>Abbildung 36: Beispiel einer typischen AR-Anwendung [33]</i>	49
<i>Abbildung 37: Vergleich von Virtual Reality (a) zu Augmented Reality (b) [27]</i>	49
<i>Abbildung 38: Leica Absolute Tracker AT 403 (Quelle: Siemens Mobility)</i>	52
<i>Abbildung 39: Reflektoren für Laser Tracker [37]</i>	53
<i>Abbildung 40: Technische Daten des Leica Laser Trackers AT 403 [37]</i>	54
<i>Abbildung 41: Referenzpunkt zur Kalibrierung [38]</i>	55
<i>Abbildung 42: Messaufbau (links) und Reflektor (rechts) zur Wagenkastenvermessung mittels Laser Tracker (Quelle: Siemens Mobility)</i>	56

<i>Abbildung 43: Toleranzabgleich in PolyWorks (Quelle: Siemens Mobility)</i>	56
<i>Abbildung 44: Messkamera INCA 3 von Geodetic Systems [39]</i>	57
<i>Abbildung 45: Referenzmarken zur photogrammetrischen Vermessung (Quelle: Siemens Mobility)</i>	58
<i>Abbildung 46: Verschiedene Kamerapositionen bei der photogrammetrischen Vermessung eines Wagenkastens (Quelle: Siemens Mobility)</i>	59
<i>Abbildung 47: Einzelne Kameraaufnahme mittels INCA 3 von Geodetic Systems (Quelle: Siemens Mobility)</i>	60
<i>Abbildung 48: Leica RTC360 [41]</i>	63
<i>Abbildung 49: Leica BLK360 [43]</i>	64
<i>Abbildung 50: Leica BLK2GO [45]</i>	65
<i>Abbildung 51: Aufnahme aus einem Metro-Innenraum mittels Leica BLK2GO (Quelle: Siemens Mobility)</i>	66
<i>Abbildung 52: Sphärisches Panoramabild aus einem Fahrzeuginnenraum (Quelle: Siemens Mobility)</i>	67
<i>Abbildung 53: gesamter zusammenhängender Scanbereich in der Draufsicht (Quelle: Siemens Mobility)</i>	68
<i>Abbildung 54: Geo Tags zur Hinterlegung wichtiger Informationen (Quelle: Siemens Mobility)</i>	68
<i>Abbildung 55: Informationsfenster zu einem Geo Tag (Quelle: Siemens Mobility)</i>	69

8 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Vor- und Nachteile des Lichtschnittverfahrens [1].....</i>	16
<i>Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Streifenprojektion [1].....</i>	22
<i>Tabelle 3: Vergleich verschiedener Codierungsverfahren [1].....</i>	26
<i>Tabelle 4: Vor- und Nachteile der Photogrammetrie [1]</i>	27
<i>Tabelle 5: Vor- und Nachteile von Lasertrackern [1]</i>	31
<i>Tabelle 6: Vor- und Nachteile von terrestrischen Laserscannern [1].....</i>	37
<i>Tabelle 7: Vergleich von konventioneller Computergrafik zu Virtual Reality [27].....</i>	47
<i>Tabelle 8: Gegenüberstellung der Merkmale von VR und AR [27].....</i>	50

9 Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
µm	Mikrometer (0,001 Millimeter)
mm	Millimeter
m	Meter
z.B.	Zum Beispiel
CAD	Computer Aided Design
m ³	Kubikmeter
Hz	Hertz
LED	Leuchtdiode
TLS	Terrestrischer Laserscanner
Mio	Million
HMD	Head mounted Display
VR	Virtual Reality
AR	Augmented Reality
kg	Kilogramm

10 Literaturverzeichnis

- [1] M. Schuth, *Handbuch optische Messtechnik*, München: Hanser, 2017.
- [2] B. Tremel, "Workflows im terrestrischen Laserscanning und in der UAV-Photogrammetrie," Universität Wien, 2017.
- [3] J. Beyerer, *Automatische Sichtprüfung*, 2. Aufl. 2016 ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Vieweg, 2016.
- [4] "Lichtschnittsystem zur 3D-Oberflächeninspektion," https://www.zbs-ilmenau.de/pdf/Flyer_14_Lichtschnitt.pdf.
- [5] Creaform. "HandySCAN 3D," https://www.creaform3d.com/blog/pun5th75ef_wp/wp-content/uploads/handyscan3d-3dscanning-product-development-v2.jpg.
- [6] E. Guttenger, "Automatische Oberflächenprüfung mit Ermittlung von Fehlertiefen und Fehlerhöhen mittels Laser-Lichtschnittverfahren: 3-D Oberflächenprüfung im harten Industrieinsatz der Daimler-Giesserei," in DGZfP-Jahrestagung 2009, 2009.
- [7] C. P. Keferstein, *Fertigungsmesstechnik*, 9., überarbeitete und erweiterte Auflage ed., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [8] "Punktwolke," https://www.rapidobject.com/de/Leistungen/3D-Datenerstellung/3D-Scannen/3D-Scan-Ausgabeformate_1262.html.
- [9] "Vernetzung einer Punktwolke," https://www.rapidobject.com/de/Leistungen/3D-Datenerstellung/3D-Scannen/3D-Scan-Ausgabeformate_1262.html.
- [10] "Dreidimensionale Formerfassung per Streifenprojektion," <https://www.stemmer-imaging.com/de-at/grundlagen/kameras-dreidimensionale-formerfassung-per-streifenprojektion/>.
- [11] P. Azad, "Entwicklung eines Projektor-basierten 3D-Scanners für dynamische Szenen," 2003.
- [12] L. Hexagon. "Leica Absolute Tracker AT960," <https://www.hexagonmi.com/de-DE/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at960>.
- [13] M. Möser, "Industriemesstechnik."
- [14] M. Juretzko, "Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit eines geregelten Winkelmeßsystems am Beispiel eines Lasertrackers LTD 500."

- [15] B. Sackel, "Aufbau eines Referenzpunktnetzes in der Diagnostikhalle und Erfassen des stationären Halleninventars mit Hilfe eines Laserscanners," 2014.
- [16] M. Möser, "20 Jahre Industrievermessung."
- [17] L. Hexagon, "Leica Absolute Tracker AT960 Produktbroschüre."
- [18] L. Hexagon, "Mobiles Laserscanning mit dem Leica Absolute Tracker AT960."
- [19] "Surphaser 100 HSX," <https://www.limes.com/de/produkte/surphaser>.
- [20] T. Achs, "Untersuchung zur Genauigkeit des terrestrischen Laserscanners Surphaser 100HSX," TU Wien, 2017.
- [21] W. Wagner, A. Ullrich, and C. Briese, "Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche," 2003.
- [22] C. Holst, "Terrestrisches Laserscanning 2019: Von großen Chancen, großen Herausforderungen und großen Radioteleskopen," 2019.
- [23] T. Achs, *Untersuchung zur Genauigkeit des terrestrischen Laserscanners Surphaser 100HSX*, Wien: Wien, 2017.
- [24] W. Niemeier, S. Thomsen, and S. M., "3D-Geometrieerfassung mit Terrestrischen Laserscannern", 2002.
- [25] T. Redl, "Einsatz von Photogrammetrie und Laserscanning zur Dokumentation von Bauwerken," Wien, Techn. Univ., Dipl.-Arb., 2005, 2005.
- [26] A. Haring, "Modellierung terrestrischer Laserscanner-Daten," Wien, Techn. Univ., Dipl.-Arb., 2003, 2003.
- [27] R. Dörner, *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)*, 2nd ed. 2019 ed., Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Vieweg, 2019.
- [28] ResearchGate. "Ivan Sutherland's head-mounted 3D display," https://www.researchgate.net/figure/Ivan-Sutherlands-head-mounted-3D-display-c-1968-The-display-had-a-suspending_fig1_337438550.
- [29] H. Orsolits, and M. Lackner, *Virtual Reality und Augmented Reality in der Digitalen Produktion*: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [30] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi *et al.*, "Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum," *Telem manipulator and Telepresence Technologies*, vol. 2351, 01/01, 1994.
- [31] Samsung. "Samsung Gear VR (SM-R323)," <https://www.samsung.com/at/wearables/gear-vr-r323/>.
- [32] T. Bánsági, "Virtuelle Inbetriebnahme einer flexiblen Fertigungszelle : Modellierung aller Komponenten einer flexiblen Fertigungszelle mit Robotersimulation und Darstellung in Virtual Reality," TU Wien, Wien, 2017.

- [33] CSG. "Augmented Reality Anwendung," <https://www.cad-schroer.de/loesungen/industrie-40/augmented-reality/>.
- [34] "Siemens Mobility Homepage," <https://new.siemens.com/global/de/unternehmen/ueberuns/unternehmensstruktur/mobility.html>.
- [35] Siemens. "Geschäftsbericht 2019," <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:bb722ca2-ba5e-4886-a59c-a31f5cb10508/siemens-gb2019.pdf>.
- [36] "U-Bahn Wien," <https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/referenzen/u-bahn-wien.html>.
- [37] L. Hexagon, "Leica Absolute Tracker AT403 Produktbroschüre."
- [38] L. Hexagon. "Leica Absolute Tracker AT 403," <https://www.hexagonmi.com/de-at/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at403>.
- [39] Inspect-Online. "State-of-the-Art Camera for Industrial 3D Measurement Applications (Geodetic Systems INCA 3)," <https://www.inspect-online.com/en/topstories/control/state-art-camera-industrial-3d-measurement-applications>.
- [40] Inspect-Online, "State-of-the-Art Camera for Industrial 3D Measurement Applications," 2011.
- [41] Leica. "Leica RTC360," <https://leica-geosystems.com/de-at/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>.
- [42] Leica, "Leica RTC360 LT – 3D-Reality-Capture-Lösung," 2019.
- [43] Leica. "Leica BLK360," <https://leica-geosystems.com/de-at/products/laser-scanners/scanners/blk360>.
- [44] Leica, "Leica BLK360 Datenblatt," 2020.
- [45] Leica, "Leica BLK2GO Datenblatt," 2020.
- [46] Leica. "BLK2GO vs BLK360," <https://shop.leica-geosystems.com/de-DE/blog/five-things-know-when-choosing-mobile-or-terrestrial-laser-scanner>.